

Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften
Institut für Geographische Wissenschaften

**Untersuchungen zur Wirkung von Biokohlekomposten in
Topf- und Feldversuchen mit ausgewählten Pflanzen aus
unterschiedlichen Klimazonen**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Dr. rer. nat.

vorgelegt von
Dipl.-Geogr. Kathrin Ullum

Oktober 2016

1. Gutachter: Professor Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze

Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften

2. Gutachter: Professor Dr. Michael Schneider

Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften

3. Gutachter: Professor Dr. Albert-Dieter Stevens

Freie Universität Berlin
Botanischer Garten und Botanisches Museum Berlin-Dahlem

Datum der Disputation: 12.05.2017

Eidesstaatliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ich erkläre weiterhin, dass die Dissertation bisher nicht in dieser oder anderer Form in einem anderen Prüfungsverfahren vorgelegen hat.

Berlin, den

.....

Dipl.-Geogr. Kathrin Ullum

Für Jermain

Diese Arbeit widme ich meinem lieben Sohn Jermain als Beweis dafür, dass man mit Durchhaltevermögen, Selbstvertrauen und Ehrgeiz seine Ziele erreichen kann, auch wenn sie anfänglich in weiter Ferne liegen.

Danksagung

Meinem Doktorvater Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze danke ich für die Unterstützung und Förderung des Dissertationsvorhabens sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Prof. Dr. Albert-Dieter Stevens und Prof. Dr. Michael Schneider danke ich vielmals für die Begutachtung der Dissertation.

Weiterhin möchte ich ein großes Dankeschön meinen lieben Kollegen der Arbeitsgruppe Geoökologie, besonders Dr. Robert Wagner, Dipl.-Geogr. René Schatten und Dr. Ines Vogel aussprechen, mit denen ich sehr gute fachliche Diskussionen führen konnte.

Bedanken möchte ich mich recht herzlich bei Felix Jenny vom ehemaligen Entwicklungshilfeverein Abokobi Society Switzerland, jetzt umbenannt in Agric Society Switzerland Ghana, für die Möglichkeit der Durchführung der Feldversuche in der nördlichen Region von Ghana. Franz Zemp von der ökologischen Farm in Ghana danke ich für seine Gastfreundschaft und für die inspirierenden Gespräche. Peter Billa danke ich für sein Engagement, mich zu den entsprechenden Feldern der Kleinbauern zur Datenaufnahme zu fahren. Dr. Fosu vom SARI (Savannah Agriculture Research Institute) danke ich für den fachlichen Input vor Ort. Ibrahim und Walisu danke ich für ihre Hilfe bei der Datenaufnahme.

Mein großer Dank gilt außerdem den Mitarbeitern des Julius-Kühn-Instituts Berlin, Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz insbesondere Herrn Dr. Felgentreu, Herrn Dr. Strumpf, Roland Buchhorn, Manfred Berg, Ursula Stendel, Catrin Vetter, Roshi und Bärbel Flessner. Danke auch an Silvio Arganese, der es immer irgendwie möglich machte, besondere Literaturwünsche zu besorgen.

Meinen Dank richte ich ebenso an Frau Wernstedt, die mich mit kompetenten Ratschlägen bei anbahnenden Schreibblockaden sehr unterstützt hat.

Mein inniger Dank gilt besonders meinem lieben Ehemann Henrik, mit dem ich sehr anregende Diskussionen über die statistische Auswertung der Daten führen konnte. Danke für Dein Vertrauen in mich und Deine Liebe sowie für die ausgleichenden Momente, die mir wieder neue Kraft und Energie gegeben haben.

Meinem Sohn Jermain danke ich für die aufmunternden Worte und seine Späße zwischendurch.

Nachdrücklich noch ein großes Dankeschön an meine liebe Familie und all meine lieben Freunde.

Kurzzusammenfassung

Die hochwertige Verwertung anfallender organischer Reststoffe trägt zum Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz bei. Durch lokal und regional angepasste intelligente Stoffkreislaufkonzepte können aus vorhandenen Ressourcen qualitativ hochwertige Substrate nachhaltig erzeugt werden, die ein attraktives Anwendungspotenzial in der Landwirtschaft sowie im Garten- und Zierpflanzenbau aufweisen.

Die Herstellung von Biokohlekompost (BKK) auf der Basis einer neuen kreislauforientierten und ressourcenschonenden Produktionstechnik unter Zugabe von Biokohle kann als effektive Behandlungsmethode organischer Abfälle angesehen werden, um den Nährstoffkreislauf zu stabilisieren.

Um das Nutzpotenzial von BKK abzuleiten, wurden unter der Zielsetzung der Bewertung pflanzenbaulicher Wirkung von BKK zahlreiche Pflanzenwachstumstests unter Gewächshaus- und Freilandbedingungen sowie unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen durchgeführt.

Die Anwendung von BKK als Substratkomponente und Torfersatzstoff im Zierpflanzenbau sowie als Bodenverbesserungsmittel mit ertragssteigernder Wirkung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in semiariden Gebieten bildeten den Schwerpunkt dieser Untersuchung.

Zum einen wurde die Eignung von BKK als Substratkomponente und Torfersatzstoff im Botanischen Garten Berlin (BG) mittels Pflanzenwachstumstests von 11 verschiedenen Pflanzenspezies aus drei unterschiedlichen Klimazonen (tropisch, subtropisch und gemäßigt) überprüft. Es wurde das Pflanzenwachstum in den untersuchten Testsubstraten mit dem im BG herkömmlich verwendeten pflanzenspezifischen Substrat verglichen.

Zum anderen wurde die Wirkung von BKK als nachhaltiges Bodenverbesserungsmittel zur Steigerung der Ertragsleistung auf einem lehmigen Sandboden mit pH-Werten zwischen 4,6 und 5,9 sowie Gehalten an organischer Substanz zwischen 0,7 und 2,8 in der nördlichen Region der Republik Ghana untersucht. Es wurden die Maiserträge sowie das Pflanzenwachstum der BKK-Flächen mit den Kontrollflächen verglichen.

Die erzielten Untersuchungsergebnisse verdeutlichen die Eignung von BKK als Substratkomponente und Torfersatzstoff sowie als nachhaltiges Bodenverbesserungsmittel zur Steigerung der Ertragsleistung und Verbesserung des Pflanzenwachstums sowie der Bodenqualität. Im Botanischen Garten Berlin zeigten die untersuchten Pflanzen in den Testsubstraten mit BKK ein gleichwertiges oder verbessertes Pflanzenwachstum gegenüber den bisher verwendeten Standardsubstraten. Es wurden keine signifikanten Wachstumsbeeinträchtigungen bei den torfreduzierten Testsubstraten gegenüber den torfhaltigen Kontrollsubstraten festgestellt.

Durch die Anwendung von BKK als Torfersatz wurde ein Torfeinsparpotenzial von 22 bis 33 % nachgewiesen. Darüber hinaus wurde durch die Anwendung von BKK als neue Substratkomponente ein 30 % iges Düngereinsparpotenzial ermittelt.

Die Untersuchungen der Wirkung von BKK auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in Nordghana zeigten signifikante Steigerungen der Ertragsleistung und ein verbessertes Pflanzenwachstum auf den BKK-Flächen gegenüber den Kontrollflächen. Die Applikation von BKK mit einer Auftragungsmenge von 12,5 t ha⁻¹ führte zu einer durchschnittlichen Steigerung der Maiserträge um das 1,3 bis 4,9-Fache. Darüber hinaus zeigte BKK ein bodenverbesserndes Potenzial im Hinblick auf boden-physikalisch-chemische Eigenschaften. Es wurde eine pH-Wert-Erhöpfung von durchschnittlich 0,3 pH-Einheiten festgestellt. Weiterhin konnte durch BKK die Kationenaustauschkapazität sowie die organische Bodensubstanz durchschnittlich um das 1,3-Fache erhöht werden.

Schlagwörter: Biokohlekompost, Torfersatz, Düngereinsparpotenzial, Substratkomponente, Bodenverbesserer, Ertragssteigerung, Biokohle Ghana

Abstract

The high-quality utilization of organic residues contributes to climate, environmental and resource protection. Through locally and regionally adapted intelligent material cycle concepts, high-quality substrates with an attractive application potential in agriculture as well as in horticulture and cultivation of ornamental plants can be produced from existing resources.

The production of biochar-compost (BKK) on the basis of a new recycling-oriented and resource-conserving production technology with the addition of biochar can be regarded as an effective treatment method of organic waste in order to stabilize the nutrient cycle.

In order to tap the potential of the use of BKK, numerous plant growth tests were carried out under greenhouse and field conditions as well as under different climatic conditions to assess the effects on plant growth of BKK.

The focus of this study was the use of BKK as a substrate component and peat substitute in ornamental plant cultivation as well as a soil amendment with a yield-increasing effect on agricultural areas in semi-arid areas.

In one substudy, the suitability of BKK as a substrate component and peat substitute was tested by means of plant growth tests of 11 different plant species from three different climate zones (tropical, subtropical and temperate) in the Botanical Garden of Berlin (BG). Effects on plant growth in the test substrates were compared with the plant specific standard substrates traditionally used in the BG.

In the second substudy, the impact of BKK as a sustainable soil improver was investigated to increase the harvest yield of a loamy sand soil with pH values between 4.6 and 5.9 and contents of organic matter between 0.7 and 2.8 in the northern region of the Republic of Ghana. Maize yield and plant growth of the BKK-fields were compared with the control fields.

The results obtained confirm the suitability of BKK as a substrate component and peat substitute as well as a sustainable soil improver to increase plant growth and yield. In the Botanical Garden of Berlin the plants tested in the test substrates containing BKK showed similar or enhanced plant growth when compared with the standard substrate traditionally used in the BG. Plants in the peat-reduced test substrates did not show any significant negative effect on plant growth in comparison to the peat containing control substrates. The use of BKK as a peat substitute showed a peat saving potential of 22-33%. In addition, the use of BKK as a new substrate component resulted in a 30% fertilizer savings potential.

Investigations of the effect of BKK on agricultural land in northern Ghana showed significant increases in yield and improved plant growth on the BKK-fields compared to the control-fields. The application of BKK with a volume of 12.5 t ha⁻¹ led to a 1.3 to 4.9-fold increase in

maize yields on average. In addition, BKK showed a soil-improving potential with regard to soil physico-chemical properties. An average increase of the pH-value of 0.3 pH units was achieved. Furthermore, BKK was able to increase the cation exchange capacity as well as the soil organic matter by an average of a factor of 1.3.

Key words: biochar compost, peat substitute, fertilizer saving potential, substrate component, soil amendment, yield increase, biochar Ghana

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	I
Abstract III	
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XV
Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNGEN.....	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG AUF DEM GEBIET DER ANWENDUNG VON BIOKOHLE	5
2.1 Biokohleforschung	5
2.2 Definition, Eigenschaften und Wirkungen der Biokohle.....	7
2.3 Herstellungsverfahren.....	10
2.3.1 Pyrolyse.....	10
2.3.2 Hydrothermale und Vapothermale Carbonisierung	12
2.4 Anwendungsbereiche von Biokohle	12
2.4.1 Anwendung von Biokohle im Zierpflanzenbau	13
2.4.2 Anwendung von Biokohle in der Landwirtschaft.....	16
3 MATERIAL UND METHODEN	19
3.1 Topfversuche zur pflanzenbaulichen Wirkung von Biokohlekompost und dessen Potenzial als Torfersatz im Zierpflanzenbau	19
3.1.1 Kompostierung und Fermentation mit und ohne Biokohlezugabe	20
3.1.2 Probennahme und Probenvorbereitung	21
3.1.2.1 Proben des kompostierten und fermentierten Materials mit und ohne Biokohle.....	21
3.1.2.2 Biokohleproben.....	21
3.1.2.3 Angemischte Pflanzsubstratproben	22
3.1.2.4 Pflanzenproben	22
3.1.3 Charakterisierung der kompostierten und fermentierten pflanzlichen Materialien mit und ohne Biokohle.....	22

3.1.4	Charakterisierung der verwendeten Biokohle.....	23
3.1.5	Versuchsdesign der Topfversuche im Botanischen Garten Berlin.....	24
3.1.6	Zusammensetzungen der pflanzenspezifischen Substrate	25
3.1.7	Charakterisierung der Pflanzsubstrate	28
3.1.8	Saatgut, Anzucht und Kultivierung	30
3.1.9	Pflanzenparameter zur Bestimmung der Wuchsleistung.....	32
3.2	Feldversuche zur ertragssteigernden Wirkung von Biokohlekompost auf landwirtschaftlich genutzten Böden in der Republik Ghana.....	33
3.2.1	Charakterisierung des Untersuchungsgebietes.....	33
3.2.2	Vorversuche zur Bestimmung der Zusammensetzung der Biokohle- kompostmischung.....	37
3.2.3	Herstellung der Biokohle/Holzkohle	39
3.2.4	Herstellung des Biokohlekompostes	40
3.2.5	Feldversuche zur ertragssteigernden Wirkung von Biokohlekompost	42
3.2.6	Freilandbeprobung der Untersuchungsflächen	42
3.2.7	Datenerhebung ausgewählter Pflanzenparameter der Feldversuche.....	43
3.2.8	Charakterisierung der Böden, des eingesetzten Biokohlekompostes und der Biokohle.....	43
3.3	Qualitätssicherung	44
3.4	Analytische Untersuchungsmethoden.....	45
3.4.1	Substratuntersuchungen.....	45
3.4.1.1	Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter.....	45
3.4.1.2	Biologische Tests.....	49
3.4.2	Felduntersuchungen	50
3.4.3	Bestimmungen ausgewählter Parameter in der pflanzlichen Biomasse der Topfversuche.....	54
3.5	Statistische Auswertung der gewonnenen Daten	54
3.5.1	Untersuchungsergebnisse der Topfversuche im Botanischen Garten Berlin	54
3.5.2	Untersuchungsergebnisse der Felduntersuchungen	56

4	DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE	57
4.1	Topfversuche im Botanischen Garten Berlin	57
4.1.1	Vergleich der Substrateigenschaften der untersuchten Testsubstrate.....	57
4.1.1.1	Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter.....	57
4.1.1.2	Gesamtgehalte ausgewählter Mikro- und Makronährstoffe	58
4.1.1.3	Pflanzenverfügbare Gehalte ausgewählter Mikro- und Makronährstoffe ...	58
4.1.2	Vergleich der Wachstumsparameter der Testsubstrate mit den Kontrollsubstraten.....	59
4.1.3	Vergleich der Wachstumsparameter der torfreduzierten Testsubstrate mit den Kontrollsubstraten.....	60
4.1.4	Vergleich der Frisch- und Trockenmasse sowie Nährstoffgehalte ausgewählter Blattproben der Pflanzen in den torfreduzierten Test- substraten.....	71
4.1.5	Vergleich der Wachstumsparameter der Testsubstrate mit und ohne Biokohlezugabe	73
4.1.5.1	Pflanzen der tropischen Klimazone.....	73
4.1.5.2	Pflanzen der subtropischen Klimazone	77
4.1.5.3	Pflanzen der gemäßigten Klimazone	80
4.1.6	Vergleich der Wachstumsparameter der Testsubstrate mit kompostiertem und fermentiertem Material	83
4.1.6.1	Pflanzen der tropischen Klimazone.....	83
4.1.6.2	Pflanzen der subtropischen Klimazone	85
4.1.6.3	Pflanzen der gemäßigten Klimazone	89
4.1.7	Zusammenfassung der untersuchten Pflanzenparameter aller Topfversuche ..	91
4.1.8	Torf- und Düngereinsparpotenzial der hergestellten Testsubstrate	94
4.2	Feldversuche in Ghana.....	96
4.2.1	Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Eigen- schaften der Versuchsflächen	96
4.2.2	Vergleich der Maiskolbenentwicklung des Feldversuchs im Jahr 2012	99
4.2.3	Vergleich der Maiskolbenentwicklung des Feldversuchs im Jahr 2013	101
4.2.4	Vergleich der Maiserträge im Jahr 2012	104

4.2.5	Vergleich der Maiserträge im Jahr 2013	106
4.2.6	Vergleich der Maiserträge zwei aufeinanderfolgender Vegetations-perioden.....	109
5	DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	111
5.1	Biokohlekompostanwendung im Botanischen Garten Berlin	111
5.1.1	Einfluss auf die Substrateigenschaften	111
5.1.2	Nährstoffversorgung/-verfügbarkeit der Substrate.....	115
5.1.3	Einfluss der neu hergestellten Pflanzsubstrate auf das Pflanzen-wachstum ..	115
5.1.4	Einfluss der Biokohle auf das Pflanzenwachstum	116
5.1.5	Einfluss des Herstellungsprozesses (Kompostierung / Fermentation) auf das Pflanzenwachstum.....	118
5.1.6	Biokohlekompost als Substratmischungskomponente mit Torf- und Düngereinsparpotenzial.....	119
5.2	Biokohlekompostanwendung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen semiarider Gebiete.....	121
5.2.1	Einfluss auf physikalische, physikalisch-chemische und chemische Bodenparameter.....	121
5.2.2	Einfluss auf die Nährstoffverfügbarkeit.....	124
5.2.3	Einfluss auf Ertragsleistung und Pflanzenwachstum	125
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN	129
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	132
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	137
	ANHANG	149
Anhang A:	Substratansprüche der untersuchten Pflanzen	150
Anhang B:	Mehrfachvergleiche (SPSS Tabellenauszüge).....	152
Anhang C:	Tabellen zum Kapitel 4.1	156
Anhang D:	Tabellen zum Kapitel 4.2	170
	CURRICULUM VITAE.....	171

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Markierte Standorte von Biokohleforschungsprojekten und Feldexperimenten mit Biokohle in Europa (Quelle: http://cost.european-biochar.org/en/ct/49-Map-of-Biochar-Field-Trials-and-Research-Projects [10.08.2016]).....	7
Abb. 2.2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von einer aus holzigem Material hergestellten Biokohle; linkes und rechtes Foto: Darstellung der porösen Oberfläche; Mitte: durchwurzelte Biokohle (Foto von K. Rößler angefertigt im Julius-Kühn-Institut-Braunschweig, Institut für Epidemiologie und Pathogen-diagnostik).....	8
Abb. 3.1: Gesamtüberblick der durchgeführten Untersuchungen zur pflanzenbaulichen Wirkung von Biokohlekompost	19
Abb. 3.2: Linkes Foto: Verdichten der Fermentationsmiete mit dem Radlader; rechtes Foto: weiß abgedeckt und mit Paletten beschwert: Fermentationsmieten mit und ohne Biokohle; grün abgedeckt: Kompostmieten mit und ohne Biokohle; (Foto: N. König).....	21
Abb. 3.3: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns für die Topfversuche mit kompostiertem und fermentiertem Material mit und ohne Biokohle des Großansatzes GA2	25
Abb. 3.4: Thematische Karte mit markiertem Untersuchungsgebiet und Aufteilung einzelner Regionen (Quelle: https://www.cia.gov/library/publications/cia-mapspublications/Ghana.html)	33
Abb. 3.5: Agrarökologische Zonen von Ghana (Quelle: (Barry et al. 2005)).....	34
Abb. 3.6: Räumliche durchschnittliche Niederschlagsverteilung [mm] im Volta Becken und im markierten Untersuchungsgebiet (Quelle: verändert nach (Barry et al. 2005))	35
Abb. 3.7: Räumliche durchschnittliche Verteilung der Evapotranspiration [mm] im Volta Becken und im markiertem Untersuchungsgebiet (Quelle: verändert nach (Barry et al. 2005)).....	36
Abb. 3.8: Räumliche durchschnittliche Temperaturverteilung [°C] im Volta Becken und markiertem Untersuchungs-gebiet (Quelle: verändert nach (Barry et al. 2005))	36
Abb. 3.9: Übersicht der Parzellen (A1-A8 und B1-B8) mit applizierten Mengen der Bodenverbesserungsmittel auf den Versuchsflächen und den entsprechenden Anbaukulturen (BK-Biokohle, Ko-Kompost, Hm-Hühnermist)	37
Abb. 3.10: Ranglistenpunkteverteilung für die einzelnen Bodenverbesserungsmittel bezogen auf den Ernteertrag (P1-P7 Untersuchungsparzellen mit unterschiedlichen Einzel-oder Mischappli-kationen)	38
Abb. 3.11: Traditionelle Holzkohleherstellung im Erdmeiler (Foto: S.Schori).....	40
Abb. 3.12: Abfallprodukt aus der Holzkohleherstellung im Erdmeiler (Foto: S.Schori).....	40
Abb. 3.13: mit Strohmatte abgedeckte Kompostmieten (Foto P. Billa).....	41
Abb. 3.14: Abfüllen des fertigen Biokohlekompostes in Säcke (Foto P. Billa)	41
Abb. 3.15: Einarbeitung der Biokohlekompostmischung in den Boden nach zwei unterschiedlichen Methoden (Fotos P. Billa).....	42
Abb. 3.16: Feldbehebungsmuster für die Bodenprobenahme der 16 Einzelproben (nach VDLUFA - Methodenbuch Bd I, A 1.2.1)	43
Abb. 4.1: Vergleich der mittleren Biomasse der torfreduzierten Substrate mit den Kontrollsubstraten (* bedeutet statistische Signifikanz gegenüber den Kontrollen mit	

	p<0,05; einfaktorielle ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzinhomogenität Tamhane-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	61
Abb. 4.2:	Vergleich der mittleren Pflanzenhöhe (oben) und Blattanzahl (unten) der torfreduzierten Substrate mit den Kontrollsubstraten (* bedeutet statistische Signifikanz mit p<0,05; einfaktorielle ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzinhomogenität Tamhane-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	62
Abb. 4.3:	Pflanzenentwicklung von <i>Aglaonema commutatum</i> am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)	65
Abb. 4.4:	Pflanzenentwicklung von <i>Carica papaya</i> am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)	66
Abb. 4.5:	Direkter Vergleich der Pflanzenentwicklung von <i>Carica papaya</i> in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K).....	67
Abb. 4.6:	Pflanzenentwicklung von <i>Coffea arabica</i> am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsub-straten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)	67
Abb. 4.7:	Pflanzenentwicklung von <i>Digitalis trojana</i> vor dem ersten Umtopfen, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen.....	68
Abb. 4.8:	Pflanzenentwicklung von <i>Geranium maderense</i> am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen.....	69
Abb. 4.9:	Pflanzenentwicklung von <i>Nerium oleander</i> am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)	69
Abb. 4.10:	Mittlere Blattanzahl und Biomasse von <i>Carica papaya</i> und <i>Digitalis trojana</i> im Topfversuch (unterschiedliche Buchstaben bedeuten statistische Signifikanz mit p<0,05 (einfaktorielle ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzinhomogenität Tamhane-Test); Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	70
Abb. 4.11:	Mittlere Frischmasse (FM) / Trockenmasse (TM) der Blattproben von <i>Aglaonema commutatum</i> , <i>Coffea arabica</i> und <i>Geranium maderense</i> im Topfversuch (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	71
Abb. 4.12:	Mittlere Blattanzahl (A), Biomasse (B) und Pflanzenhöhe (C) der Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle (gepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit p<0,05; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	74
Abb. 4.13:	Mittlere Pflanzenhöhe der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit p<0,05; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	75
Abb. 4.14:	Mittlere Blattanzahl der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der	

Pflanzen der tropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	76
Abb. 4.15: Mittlere Biomasse der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	76
Abb. 4.16: Mittlere Blattanzahl (A), Biomasse (B) und Pflanzenhöhe (C) der Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle (gepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	77
Abb. 4.17: Mittlere Pflanzenhöhe der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	78
Abb. 4.18: Mittlere Blattanzahl der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	79
Abb. 4.19: Mittlere Biomasse der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	79
Abb. 4.20: Mittlere/s Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattanzahl und Holzgewicht der Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle (gepoolte Daten) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	80
Abb. 4.21: Mittlere Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (oben) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (unten) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	81
Abb. 4.22: Mittleres Holzgewicht und mittlere Pflanzenhöhe der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (oben) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (unten) (ungepoolte Daten) der Gehölze der gemäßigten Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	82
Abb. 4.23: Mittlere Pflanzenhöhe, Blattanzahl und Biomasse der Fermentationsvarianten gegenüber den Kompostvarianten (gepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	84
Abb. 4.24: Vergleich der mittleren Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe der Fermentationsvarianten ohne Biokohle mit den Kompostvarianten ohne Biokohle (oben) sowie der Fermentationsvarianten mit Biokohle mit den Kompostvarianten mit Biokohle (unten) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)	85

Abb. 4.25: Mittlere Pflanzenhöhe, Blattanzahl und Biomasse der Fermentationsvarianten gegenüber den Kompostvarianten (gepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	86
Abb. 4.26: Vergleich der mittleren Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe der Fermentationsvarianten ohne Biokohle mit den Kompostvarianten ohne Biokohle (oben) sowie der Fermentationsvarianten mit Biokohle mit den Kompostvarianten mit Biokohle (unten) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	88
Abb. 4.27: Mittlere Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattanzahl und Holzgewicht der Fermentationsvarianten gegenüber den Kompostvarianten (gepoolte Daten) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	89
Abb. 4.28: Mittlere/s Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattanzahl und Holzgewicht der Fermentationsvarianten ohne Biokohle (F0) gegenüber den Kompostvarianten ohne Biokohle (IR0) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	90
Abb. 4.29: Mittlere/s Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattanzahl und Holzgewicht der Fermentationsvarianten mit Biokohle (F15) gegenüber den Kompostvarianten mit Biokohle (IR15) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall).....	91
Abb. 4.30: Mittlere Pflanzenhöhe, Biomasse und Blattanzahl der einzelnen Testsubstrate (F0, F15, IR0, IR15) im Verhältnis zur Kontrolle zusammengefasst von allen untersuchten Pflanzen (log10 Skalierung; Daten gepoolt; grüne Linie ist der Bezug zur Kontrolle).....	92
Abb. 4.31: Mittlere Pflanzenhöhe, Biomasse und Blattanzahl der Varianten mit und ohne Biokohle (linke Spalte) sowie der Fermentations- und Kompostvarianten (rechte Spalte) im Verhältnis zur Kontrolle zusammengefasst von allen untersuchten Pflanzen (log10 Skalierung; Daten gepoolt; grüne Linie ist der Bezug zur Kontrolle).....	93
Abb. 4.32: Anzahl der Düngergaben mit den entsprechend verwendeten Düngemitteln für die Kontroll- und Testsubstrate.....	95
Abb. 4.33: Prozentualer Torfanteil der Kontrollsubstrate und der entsprechenden torfreduzierten Pflanz-substrate (PS1-Pflanzsubstrat für <i>Carica papaya</i> und <i>Coffea arabica</i> ; PS2-Pflanzsubstrat für <i>Aglaonema commutatum</i> ; PS3- Pflanzsubstrat für <i>Digitalis trojana</i> , <i>Geranium maderense</i> und <i>Nerium oleander</i> ; PS4- Pflanzsubstrat für <i>Silphium perfoliatum</i>).....	95
Abb. 4.34: Mittlere verfügbare Gehalte der Nährstoffe Kalium, Magnesium und Phosphor auf den Kontroll- (K) und Biokohlekompostflächen (BKK); (n=5; * bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test bei unabhängigen Stichproben; Fehlerbalken präsentieren das 95%ige Konfidenzintervall); Daten der fünf untersuchten Standorte wurden jeweils für BKK und K zusammengefasst.....	97

- Abb. 4.35:** Vergleich der verfügbaren Aluminiumgehalte auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte Gbilugu (GB), Kukuo Yepalsi (KY), N'Bannayili (NB), Mogtandi (MT) und Tamale (TA); (K-Kontrollfläche, BKK-Biokohlekompostfläche)98
- Abb. 4.36:** Mittlere verfügbare Aluminiumgehalte auf den Kontrollflächen und Biokohlekompostflächen; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test bei unabhängigen Stichproben; Fehlerbalken präsentieren das 95 % ige Konfidenzintervall); Daten aller untersuchten Standorte wurden jeweils für BKK und K zusammengefasst98
- Abb. 4.37:** Verteilung der Maiskolbengewichte (A) und Maiskolbenlänge (B) auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2012 (KY- Kukuo Yepalsi, MT – Mogtandi, NB- N'Bannayil; $n=20$; * bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$)99
- Abb. 4.38:** Visueller Vergleich der Maiskolbenentwicklung ausgewählter Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte (obere Fotos GB-Standort Gbilugu, untere Fotos MT-Standort Mogtandi).....100
- Abb. 4.39:** Korrelation zwischen dem Maiskolbengewicht und der Maiskolbenlänge der Kontrollflächen und der Biokohlekompostflächen ($n=160$; r_s = Spearman's Rangkorrelationskoeffizient)101
- Abb. 4.40:** Verteilung der Maiskolbengewichte (A) und Maiskolbenlänge (B) auf den Kontrollflächen und mit Biokohlekompost applizierten Testflächen der untersuchten Standorte in 2013 (GB- Gbilugu, KY- Kukuo Yepalsi, NB- N'Bannayili, TA- Tamale; $n=20$; * bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$)102
- Abb. 4.41:** Visueller Vergleich der Maiskolbenentwicklung ausgewählter Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte (obere Fotos TA-Standort Tamale, untere Fotos GB-Standort Gbilugu)103
- Abb. 4.42:** Korrelation zwischen dem Maiskolbengewicht und der Maiskolbenlänge der Kontrollflächen und der Biokohlekompostflächen ($n=100$; r_s = Spearman's Rangkorrelationskoeffizient)104
- Abb. 4.43:** Vergleich des Kornertrages der Maiskultur der einzelnen Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2012 (GB – Gbilugu, KY - Kukuo Yepalsi, MT - Mogtandi, NB - N'Bannayili)105
- Abb. 4.44:** Berechnete Ertragssteigerungen für Mais auf den Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2012 (GB – Gbilugu, KY - Kukuo Yepalsi, MT - Mogtandi, NB - N'Bannayili); Biokohlekompostfläche wurde in Bezug zur Kontrollfläche gesetzt.....105
- Abb. 4.45:** Mittlerer Kornertrag für Mais auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen in 2012; Daten der jeweils 8 Versuchsfelder wurden gepoolt (* bedeutet statistische Signifikanz, t-Test bei unabhängigen Stichproben bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$)106
- Abb. 4.46:** Vergleich des Kornertrages der Maiskultur der einzelnen Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2013 (GB - Gbilugu, KY- Kukuo Yepalsi, NB - N'Bannayili, TA - Tamale)107

Abb. 4.47: Mittlerer Kornertrag der Maiskultur auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen in 2013; (* bedeutet statistische Signifikanz, t-Test bei unabhängigen Stichproben mit einem Signifikanzniveau von $p=0,05$)	108
Abb. 4.48: Berechnete Ertragssteigerungen für Mais auf den Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2013 (GB–Gbilugu, KY-Kukuo Yepalsi, NB-N´Bannayili, TA-Tamale); Biokohlekompostfläche wurde in Bezug zur Kontrollfläche gesetzt	108
Abb. 4.49: Vergleich der Kornerträge zwei aufeinanderfolgender Vegetationsperioden nach einmaliger Anwendung von Biokohlekompost im Jahr 2012 auf den Testflächen der untersuchten Standorte (GB – Gbilugu und KY- Kukuo Yepalsi)	109
Abb. 4.50: Vergleich der Kornerträge für Mais auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Felder GB 2.Feld und KY 3.Feld; Daten aus den Jahren 2012 und 2013 wurden gepoolt (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben)	110

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Ausgewählte Biomassen zur Herstellung von Biokohlen gemäß EBC (2012).....	11
Tab. 3.1: Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien für die Kompostierung und Fermentation mit und ohne Biokohlezugabe (verändert nach Wagner et al, 2014).....	20
Tab. 3.2: Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter des kompostierten (IR0 und IR15) und fermentierten (F0 und F15) Materials mit und ohne Biokohle im Vergleich zu dem bisher im BG verwendeten Kompost.....	23
Tab. 3.3: Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter der Biokohle.....	24
Tab. 3.4: Zusammensetzung der sechs pflanzenspezifischen Substratmischungen für die Topfversuche mit kompostiertem und fermentiertem Material des Großansatzes GA2 und den entsprechenden Anteilen an Additiven.....	26
Tab. 3.5: Prozentualer Torf- und Biokohleanteil in den untersuchten Testvarianten der sechs pflanzen-spezifischen Substratmischungen für die Topfversuche.....	27
Tab. 3.6: Physikalische, physikalisch-chemische, chemische Parameter der angemischten Pflanzsubstrate mit und ohne Biokohle vor Versuchsbeginn	28
Tab. 3.7: Gesamtgehalte der Hauptnähr- und Mikronährelemente vor Versuchsbeginn	29
Tab. 3.8: Pflanzenverfügbare Gehalte der Hauptnähr- und Mikronährelemente vor Versuchsbeginn	30
Tab. 3.9: Testpflanzen und Versuchszeiträume für die Topfversuche mit kompostiertem und fermentiertem Material mit und ohne Biokohlezugabe.....	31
Tab. 3.10: Düngergaben der einzelnen Testpflanzen im Topfversuch für die Kontroll- und Testsubstrate	32
Tab. 3.11: Rangfolge der Ernteerträge der Testparzellen (P 1 - P 8) beider Versuchsflächen Gbilugu (GB) und Kukuo Yepalsi (KY); farbige Darstellung der ersten drei Ränge.....	39
Tab. 3.12: Punkteverteilung für die einzelnen Ränge der Testparzellen (P 1 - P 8) beider Versuchsflächen Gbilugu (GB) und Kukuo Yepalsi (KY); farbige Darstellung der Ranghöchsten.....	39
Tab. 3.13: Bodenart der untersuchten Standorte.....	43
Tab. 3.14: Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter der Biokohle, des Biokohlekompostes und der untersuchten Böden (FM-Frischmasse, TM-Trockenmasse) ..	44
Tab. 3.15: Überblick der erhobenen physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Parameter der Substratuntersuchungen und den entsprechenden Bestimmungsmethoden.....	46
Tab. 3.16: Mittlere Frischmasseerträge (FM) des Kresse- und Chinakohltests und deren Relation zum Kontrollsubstrat EE0.....	50
Tab. 3.17: Überblick der physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Parameter der Bodenuntersuchungen und den entsprechenden Bestimmungsmethoden	51
Tab. 3.18: Vergleich der Datensätze der Topfversuche	55
Tab. 4.1: Vergleich der Testsubstrate (IR0, IR15, F0, F15) mit den Kontrollen bezüglich der in den Topfversuchen erhobenen Pflanzenparameter	59
Tab. 4.2: Vergleich der Mittelwerte (MW) und Signifikanzwerte (p-Wert) der erhobenen Pflanzenparameter, Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe der Testsubstrate (IR0, IR15, F0, F15) mit den Kontrollsubstraten (K); (fett geschriebene p-Werte stellen die statistische	

Signifikanz gegenüber den Kontrollen dar mit $p < 0,05$ (einfaktorielle ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzhomogenität Tamhane-Test)	64
Tab. 4.3: Vergleich der mittleren Gesamtnährstoffgehalte der Blattproben der Testsubstrate (IR0, IR15, F0, F15) mit den Kontrollsubstraten von <i>Aglaonema commutatum</i> , <i>Coffea arabica</i> und <i>Geranium maderense</i>	72
Tab. 4.4: Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter sowie Gesamtgehalte und verfügbare Gehalte an Nährstoffen und Aluminium und Eisen der Versuchsflächen der Standorte Gbilugu (GB), Kukuwo Yepalsi (KY), N'Bannayili (NB), Mogtandi (MT) und Tamale (TA); (K-Kontrollfläche, BKK-Biokohlekompostfläche)	96

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ANOVA	Varianzanalyse, engl. Variance of analysis
BA	Blattanzahl
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BG	Botanischer Garten Berlin-Dahlem
BGK e.V.	Bundesgütegemeinschaft Kompost
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BKK	Biokohlekompost
CAT	Mischung aus Calciumchlorid und Diethylentriaminpentaessigsäure im Verhältnis 1:8
COST	European Cooperation in Science and Technology
DeCo!	Decentralized Composting
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN EN	Standard nach europäischer Norm
DIN EN ISO	Standard nach europäischer und internationaler Norm
DTPA	Diethylentriaminpentaessigsäure
DüMV	Düngemittelverordnung
DüV	Düngeverordnung
EBC	European Biochar Certificate
eBRN	European Biochar Research Network
EFRE	Europäischen Fonds für regionale Entwicklung
EMa	Effektive Mikroorganismen-aktiviert
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency
F	Fermentation
F0	Fermentiertes Material ohne Biokohlezugabe
F0	fermentiertes Material ohne Biokohle
F15	Fermentiertes Material mit Biokohlezugabe
F15	fermentiertes Material mit Biokohle
FM	Frischmasse
GA2	Großansatz 2 der Kompostierung und Fermentation
GB	Gbilugu (Untersuchungsstandort in Ghana)
H	Pflanzenhöhe
HG	Holzgewicht
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
IBI	International Biochar Initiative
ICP-OES	Optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas
IR	Intensivrotte
IR0	Kompostiertes Material ohne Biokohlezugabe

IR0	kompostiertes Material ohne Biokohle
IR15	Kompostiertes Material mit Biokohlezugabe
IR15	kompostiertes Material mit Biokohle
ISO	International Organization for Standardization
KAK	Kationenaustauschkapazität
KY	Kukuo Yepalsi (Untersuchungsstandort in Ghana)
MT	Mogtandi (Untersuchungsstandort in Ghana)
NB	N'Banaayili (Untersuchungsstandort in Ghana)
NGO	Nichtregierungsorganisation
oBM	oberirdische Biomasse
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
TA	Tamale (Untersuchungsstandort in Ghana))
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.
WHK	Wasserhaltekapazität

Chemische Elemente und Ionen nach Nomenklatur (IUPAC-System)

Längen-, Flächen-, Raummaße und Gewicht nach dem metrischen System

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNGEN

Die effektive Verwertung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie die Schließung von Stoffkreisläufen rückt im Hinblick des Nachhaltigkeitsgedankens immer mehr in den Mittelpunkt. Die Herstellung und Anwendung von Biokohlekompost bietet die Möglichkeit, organische Ressourcen durch lokal oder regional angepasste Konzepte nachhaltig zu nutzen und leistet einen wichtigen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird das Potenzial von Biokohlekompost als möglichen Torfersatz und Bodenverbesserungsmittel untersucht. Der Abbau der Torfböden zur Herstellung von Bodensubstraten erfordert die Überprüfung von Alternativen zum Torfersatz. Die Begrenzung des Torfanteils und dessen Substitution durch Biokohlekompost stellt einen wichtigen Aspekt hinsichtlich der Erhaltung der Moore dar. Die Reduzierung des Torfabbaus sowie der Schutz der Moore leisten einen bedeutenden Beitrag zum integrierten Klima- und Umweltschutz, da Moore zum einen eine hohe Ökosystemleistung aufweisen und zum anderen der Atmosphäre Kohlenstoffdioxid entziehen und als Kohlenstoffs Senke wirken. Moore nehmen zwar nur 3% der weltweiten Landoberfläche ein, speichern aber doppelt so viel Kohlenstoff wie die Biomasse aller Wälder der Erde und tragen ganz erheblich zur dauerhaften CO₂-Reduzierung in der Atmosphäre bei (JOOSTEN UND COUWENBERG 2008). In Europa werden jährlich ca. 67 Millionen m³ Torf abgebaut, davon werden ca. 37 Millionen m³ für Pflanz- und Kultursubstrate verwendet, ca. 50 % wird energetisch genutzt (ALTMANN 2008). Zwei Drittel des in der Bundesrepublik Deutschland abgebauten Torfes wird derzeit für Substrate im Erwerbsgartenbau verwendet.

Um die Ressource Boden nachhaltig zu bewirtschaften und die Ernährungsgrundlage zu sichern, ist es dringend notwendig, die Bodenfruchtbarkeit zu steigern und die Bodenqualität zu verbessern. Die Anwendung von organischen Bodenverbesserungsmitteln wie z.B. Biokohlekompost als auch nachhaltige Anbaumethoden sowie vielfältige Fruchtfolgen sind Bestandteil eines nachhaltigen Bodenmanagements und können der zunehmenden Bodendegradation entgegenwirken. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden zum einen Untersuchungen hinsichtlich pflanzenbaulicher und ertragssteigernder Wirkungen von Biokohlekompost im westafrikanischen Savannengebiet der Republik Ghana durchgeführt. Diese Gegend ist von nährstoffarmen Böden mit einer geringen Bodenfruchtbarkeit geprägt. Die wirtschaftliche Aktivität konzentriert sich vorwiegend auf die landwirtschaftliche Produktion. Die vorherrschenden klimatischen Bedingungen, die durch wechselnde Regen- und Trockenzeiten gekennzeichnet sind, erschweren jedoch die Bewirtschaftung dieser Böden. Um weitere Nährstoffverluste der Böden entgegenzuwirken, die Bodenfruchtbarkeit zu steigern und die Ertragsleistung der Böden zu gewährleisten, wurden im Rahmen einer

zweijährigen Feldstudie den afrikanischen Kleinbauern die Potenziale der Anwendung von Biokohlekompost demonstriert und die Anwendungsmöglichkeiten erörtert.

Zum anderen befasst sich die vorliegende Dissertation mit der Verwendung von Biokohlekompost als Torfersatzstoff und neue Substratkomponente im Zierpflanzenbau.

Anhand zahlreicher Topf- und Feldversuche mit verschiedenen Pflanzen aus unterschiedlichen Klimazonen wurde die pflanzenbauliche Wirkung von Biokohlekompost im Botanischen Garten Berlin (BG) unter kontrollierten Gewächshausbedingungen untersucht.

Das Hauptziel war die Untersuchung der pflanzenbaulichen Wirkung hinsichtlich Biomasse, Höhenwachstum, Blattanzahl und Pflanzengesundheit von den im BG neu hergestellten Pflanzsubstraten mit und ohne Biokohle im Vergleich zu den bisherigen im BG verwendeten Pflanzsubstraten.

Es sollte nachgewiesen werden, ob die neu hergestellten Pflanzsubstrate mit und ohne Biokohlezugabe gleichwertige oder bessere Ergebnisse erzielen hinsichtlich des Pflanzenwachstums als die herkömmlich im BG verwendeten Pflanzsubstrate. Weiterhin sollte der Nachweis erbracht werden, dass sich ein reduzierter Torfanteil in Pflanzsubstraten nicht negativ auf die Wuchleistung auswirkt und Biokohlekompost zur Torfsubstitution in Pflanzsubstraten geeignet wäre. Zusätzlich wurde das Düngereinsparpotenzial der neu hergestellten Pflanzsubstrate mit und ohne Biokohle im Vergleich zu den bisher verwendeten Pflanzsubstraten ermittelt. Des Weiteren wurde untersucht, ob ein unterschiedliches Pflanzenwachstum feststellbar ist bei der Verwendung von kompostiertem oder fermentiertem Material in den zu testenden Pflanzsubstraten.

Folgende Fragen sollten im Rahmen der durchgeführten Topfversuche beantwortet werden:

1. Sind die neu hergestellten Pflanzsubstrate mit und ohne Biokohle gleichwertig oder besser als die herkömmlich verwendeten Pflanzsubstrate hinsichtlich des Pflanzenwachstums?
2. Hat der Verwertungsprozess von organischem Material (Fermentation/Kompostierung) einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum?
3. Hat die Biokohle einen Effekt auf das Pflanzenwachstum?
4. Ist Biokohlekompost als Mischungskomponente in Pflanzsubstraten geeignet, um den Torfanteil zu reduzieren?
5. Kann über die Zugabe von Biokohlekompost in Pflanzsubstraten der Düngemittelsatz reduziert werden?

Im Rahmen von Felduntersuchungen wurden die Effekte einer praxisorientierten Anwendung von Biokohlekompost auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im Norden Ghanas bezüglich einer nachhaltigen Steigerung der Ertragskapazität sowie eines verbesserten Pflanzenwachstums untersucht.

Mittels mehrerer Feldversuche wurden die Erträge der mit Biokohlekompost applizierten Flächen mit den Erträgen der Flächen ohne Biokohlekompostzugabe verglichen. Darüber hinaus wurden Pflanzenwachstumsparameter erhoben, die den Vergleich der Pflanzenentwicklung auf den Test- und Kontrollflächen unterstützten. Den Kleinbauern vor Ort sollte über die Anwendung von Biokohlekompost als Bodenverbesserungsmittel eine nachhaltige Alternative zu mineralischer Düngung aufgezeigt werden, mit der sich Erträge steigern lassen.

Folgende Fragestellungen sollten im Rahmen der Felduntersuchungen beantwortet werden:

1. Lassen sich durch die Anwendung von Biokohlekompost auf landwirtschaftlich genutzten Flächen Ernteerträge steigern?
2. Welche Wirkung hat Biokohlekompost auf das Pflanzenwachstum bzw. Pflanzenentwicklung?
3. Hat Biokohlekompost eine bodenverbessernde Wirkung?
4. Sind positive Effekte auf Erträge und Pflanzenwachstum auch in der zweiten Vegetationsperiode nach einer Einzelapplikation von Biokohlekompost nachweisbar?

Die durchgeführten Topf- und Feldversuche erfolgten im Zuge des Forschungsprojektes „TerraBoGa“ sowie des Entwicklungshilfeprojektes „Biochar in Ghana“.

Das Forschungsprojekt „TerraBoGa - Schließung von Kreisläufen durch Energie- und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie¹ im Botanischen Garten im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Klimaschutz – Modellprojekt Urban farming“ wurde durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt des Landes Berlin und der Europäischen Union aus Mitteln des Umweltentlastungsprogramms II (UEP II) und des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen 11260 UEP II/2 innerhalb der Förderperiode von 2010 bis 2015 gefördert (TERYTZE ET AL. 2015).

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Implementierung, Untersuchung und Bewertung eines integrierten Stoffstrommanagements im BG verbunden mit der Anwendung der Terra-Preta-Technologie, die die Herstellung und den Einsatz von Biokohle zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Biokohlekomposte/-substrate umfasst.

¹ Der Einsatz der „TerraPreta-Technologie“ im BG ist definiert als die Herstellung und der Einsatz von Biokohle zur Erzeugung hochwertiger Biokohlekomposte zur Schließung bzw. Optimierung von Stoffkreisläufen verbunden mit positiven Umwelteffekten. Daneben können Effektive Mikroorganismen z.B. zur Konservierung von pflanzlichen Reststoffen zum Einsatz kommen.

Das Entwicklungshilfeprojekt „Biochar in Ghana - Einsatz von Biokohlekompost auf kargen Böden in der nördlichen Region der Republik Ghana zur Verbesserung der Ernährungsgrundlage von armen Kleinbauern“ wurde in Kooperation mit der Arbeitsgruppe Geoökologie des Fachbereiches Geowissenschaften der Freien Universität Berlin, dem gemeinnützigen Entwicklungshilfeverein Abokobi Society Switzerland und der ghanaischen NGO DeCo! durchgeführt (<http://abokobi.ch/47/projekte/biochar>; <http://www.deco-farming.com/index.php?seite=5>).

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG AUF DEM GEBIET DER ANWENDUNG VON BIOKOHLE

2.1 Biokohleforschung

Das stark zunehmende wissenschaftliche Interesse, das der Biokohle entgegengebracht wird sowie die mediale Aufmerksamkeit, die sie derzeit erfährt, geht hauptsächlich auf die Wiederentdeckung der Terra Preta do Indio, eines sehr fruchtbaren und anthropogen entstandenen schwarzen Bodens in Zentral-Amazonien (Brasilien) zurück. Zwei große Hoffnungsaspekte, die mit der Terra Preta verbunden werden, ist zum einen die Fruchtbarkeit in Böden durch den Einsatz von Biokohle zu erhöhen und zum anderen durch die stabilen Kohlenstoffbindungen der Biokohle, Kohlenstoff zu sequestrieren und somit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Terra Preta kommt aus dem portugiesischen Sprachgebrauch und bedeutet „schwarze Erde“. Sie kommt inselförmig im Amazonasbecken (Brasilien) vor und bedeckt eine Fläche von 6.000 bis 18.000 km² (WOODS ET AL. 2009). Häufig ist sie in ehemaligen Siedlungsgebieten anzufinden. Ihr Alter wird auf 500 bis 2000 Jahre geschätzt (GLASER UND BIRK 2012; WOODS ET AL. 2009). Trotz Jahrhundert langer landwirtschaftlicher Nutzung und der großen Auswaschungsgefahr an Nährstoffen weist sie eine hohe organische Bodensubstanz, ein hohes Nährstoffpotenzial und hohe Kohlenstoffgehalte auf. Im Vergleich zu den Terra Preta-Flächen sind die umliegenden tropischen Böden größtenteils Lateritböden, die meist tiefgründig verwittert, wenig fruchtbar, humus- und nährstoffarm sind und hauptsächlich aus Aluminium- und Eisenoxiden bestehen und eine rötliche Farbe aufweisen. Durch die hohen Niederschläge werden Nährstoffe ausgewaschen und aufgrund der hohen Temperaturen wird organisches Material sehr schnell abgebaut und mineralisiert. Umso überraschender war das Vorkommen der Terra Preta in dieser Klimazone. Die Terra Preta weckte aufgrund ihres hohen Humusgehaltes und der gesteigerten Bodenfruchtbarkeit im Vergleich zu den umliegenden unfruchtbaren tropischen Böden globales Interesse (ZECH ET AL. 1990). Detaillierte Untersuchungen von (GLASER ET AL. 2001a) identifizierten verkohltes organisches Material als wesentlichen Bestandteil der Terra Preta, das die einzigartigen Eigenschaften erklären könnte. Es wurde nachgewiesen, dass durch anthropogenen Einfluss, dem Boden organische Abfälle wie z.B. Pflanzen- und Tierreste, Exkremete, Knochen und Fischgräten, vermischt mit Holzkohle, zugeführt wurden (GLASER UND BIRK 2012). Dies verweist auf ein zur damaligen Zeit bereits erfolgreiches und nachhaltiges Abfallwirtschaftssystem zur Verwertung organischer Reststoffe unter Zugabe von Holzkohle als wesentlichen Bestandteil. Aus der Kohlenstoff-Forschung ist bekannt, dass verkohltes organisches Material aufgrund der hohen Anzahl aromatischer

Kohlenstoffstrukturen sehr abbaubeständig ist, d.h. eine stabilisierende Wirkung aufweist (GOLDBERG 1985). Diese aromatischen Kohlenstoffstrukturen werden im Laufe der Zeit teilweise oxidiert und bieten dadurch eine hohe Nährstoffbindungskapazität (GLASER ET AL. 2002; GLASER ET AL. 2001b). Nährstoffe aus den organischen Restmaterialien können in pflanzenverfügbare Form an dem verkohlten Material gebunden werden und so fruchtbare Böden mit Horizontmächtigkeiten von bis zu 2 m entstehen lassen.

In zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen wurden die vielen positiven Eigenschaften sowie der hohe Anteil stabiler Kohlenstoffverbindungen der Terra Preta do Indio belegt (vgl. (GLASER UND WOODS 2004; GLASER 2007; LEHMANN UND JOSEPH 2009) und im Zuge dessen stieg das wissenschaftliche Interesse an der Verwendung von Holzkohle vs. Biokohle als Bodenverbesserungsmittel für pflanzenbaulich genutzte Böden (JEFFERY ET AL. 2011).

Das enorme Interesse an der Biokohleforschung führte zur Gründung zweier großer Organisationen auf internationaler und europäischer Ebene. Die International Biochar Initiative (IBI) wurde im Juli 2006 in den USA gegründet und zählt bereits über 400 Mitglieder aus 34 Ländern (<http://www.biochar-international.org>; [10.08.2016]). Die IBI unterstützt die Informationsbündelung, -überprüfung sowie -verteilung zu allen relevanten Aspekten bezüglich der Biokohle. Um die internationale und interdisziplinäre Zusammenarbeit zu fördern, bietet sie eine globale Informations- und Kommunikationsplattform. Weiterhin werden Standards und Richtlinien entwickelt, um die Produktion und Vermarktung der Biokohle nach hohen ethischen Standards einzuhalten und ihren unbedenklichen Einsatz zu gewährleisten.

Das europäische Pendant, COST&eBRN (European Cooperation in Science and Technology (COST) und European Biochar Research Network (eBRN)), dem mehr als 270 Mitglieder aus 31 Ländern angehören, hat sich zur Aufgabe gemacht, die europäische Biokohleforschung zu koordinieren, Wissenschaftler, Interessensgruppen und potenzielle Anwender von Biokohle aus der EU zusammenzubringen sowie den Wissensaustausch und Interdisziplinarität als auch die Kooperation von Wissenschaft und Technologie zu fördern (<http://cost.european-biochar.org>; [10.08.2016]). Innerhalb des Netzwerks haben sich vier Arbeitsgruppen gebildet, die sich mit unterschiedlichen biokohlerelevanten Themen wie Herstellung und Charakterisierung, Landnutzungsmanagement, Ökonomische Aspekte und Life Cycle Assessment sowie Einfluss auf die Umwelt befassen.

Wie stark das europäische Interesse an der Biokohleforschung ist, vermittelt die folgende Abbildung 2.1, in der die Standorte von Biokohleforschungsprojekten und Feldexperimenten mit Biokohle in Europa dargestellt sind. Die Anzahl biokohlerelevanter Projekte wächst kontinuierlich.



Abb. 2.1: Markierte Standorte von Biokohleforschungsprojekten und Feldexperimenten mit Biokohle in Europa (Quelle: <http://cost.european-biochar.org/en/ct/49-Map-of-Biochar-Field-Trials-and-Research-Projects> [10.08.2016])

2.2 Definition, Eigenschaften und Wirkungen der Biokohle

Derzeit gibt es keine einheitliche Definition von Biokohle. LEHMANN UND JOSEPH (2009) definieren Biokohle als kohlenstoffreiches Produkt, das durch die thermische Zersetzung von Biomasse wie z.B. Holz unter reduziertem Sauerstoffgehalt und relativ niedrigen Temperaturen ($< 700\text{ °C}$) entsteht. In den Richtlinien für die Produktion von Pflanzenkohle², dem sogenannten Europäischen Pflanzenkohle Zertifikat (engl. European Biochar Certificate) wird die Biokohle / Pflanzenkohle als pyrolytisch hergestellte Kohle bezeichnet, die ökologisch nachhaltig in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann. Die Biokohleherstellung erfolgt durch Biomasse-Pyrolyse, einer thermochemischen Zersetzung organischer Ausgangsstoffe bei stark reduziertem Sauerstoffgehalt von unter 2 % und bei Temperaturen zwischen 350 °C und 1000 °C (EBC 2012). Darüber hinaus sind in dem Europäischen Pflanzenkohle Zertifikat Qualitätskriterien für Biokohlen vorgeschlagen, die für

² Pflanzenkohle ist ein Synonym für Biokohle, im Englischen spricht man von Biochar

die Herstellung und den Einsatz der Biokohle eingehalten werden sollten. Die durch Pyrolyse hergestellten Biokohlen zeichnen sich durch hohe Kohlenstoffgehalte von mehr als 50 % aus (GLASER UND BIRK 2012)

Der Kohlenstoff in Biokohlen liegt in einer sehr stabilen Form vor, der im Boden nicht sofort von Bodenmikroorganismen umgesetzt wird (LEHMANN ET AL. 2011) und aus dem ein Kohlenstoffanreicherungspotenzial in Böden resultiert. Somit kann die Anwendung von Biokohle in Böden zur dauerhaften Kohlenstoff-Sequestrierung führen (GLASER UND BIRK 2012; KUZYAKOV ET AL. 2009; LEHMANN 2007; SCHMIDT UND NOACK 2000). VERHEIJEN ET AL. (2010) nehmen an, dass die Biokohle mehrere Hundert Jahre stabil im Boden verbleibt.

Der pH-Wert von Biokohlen ist in der Regel basisch und kann daher den pH-Wert des Bodens erhöhen (VERHEIJEN ET AL. 2010). In Abhängigkeit von den Ausgangsmaterialien zur Herstellung der Biokohle sowie der Pyrolysetemperatur kann der pH-Wert von Biokohlen zwischen vier und zwölf schwanken (LEHMANN ET AL. 2011).

Die Wasserhaltkapazität von Böden kann durch den Eintrag von Biokohlen verbessert werden (BASSO ET AL. 2013; LIU ET AL. 2012). GLASER ET AL. (2002) stellten in Böden, die mit Biokohle appliziert wurden, eine um 18 % höhere Wasserhaltekapazität fest als in Böden ohne Biokohle.

Als Schlüsselmerkmal der Biokohlen kann ihre poröse Struktur und die daraus hervorgehende große spezifische Oberfläche von bis zu 300 m²/g angesehen werden (vgl. Abb. 2.2). Daraus ergibt sich eine hohe Adsorptions- und Speicherkapazität für Nährstoffe und Wasser (LEHMANN UND JOSEPH 2009; KAMMANN ET AL. 2015), wodurch die Auswaschung von Nährstoffen verringert werden kann.

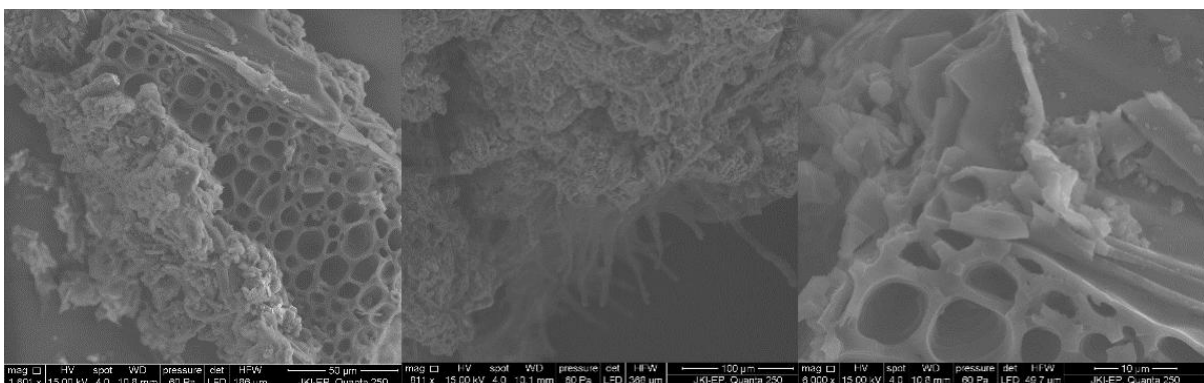


Abb. 2.2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von einer aus holzigem Material hergestellten Biokohle; linkes und rechtes Foto: Darstellung der porösen Oberfläche; Mitte: durchwuzelte Biokohle (Foto von K. Rößler angefertigt im Julius-Kühn-Institut-Braunschweig, Institut für Epidemiologie und Pathogendiagnostik)

BEESLEY ET AL. (2011) gibt zu bedenken, dass gerade frische Biokohlen Nährstoffe so binden können, dass sie den Pflanzen nicht zur Verfügung stehen und empfiehlt aus diesem Grund

Biokohlen vor der Anwendung, mit Nährstoffen aufzuladen. Als besonders günstig hat sich eine Mischung von Biokohle mit Kompost herausgestellt, bei der die Biokohle mit Nährstoffen aus dem Kompost beladen wird und gleichzeitig eine Aktivierung mit Mikroorganismen erfolgt (SCHMIDT 2011b).

Infolge der hohen Porosität weisen Biokohlen eine hohe Kationenaustauschkapazität (KAK) auf (BEESLEY ET AL. 2011; YAO ET AL. 2012), wodurch an der Oberfläche der Biokohlen positiv geladene Ionen (Kationen) gebunden werden können, die unter bestimmten Voraussetzungen für Pflanzen und Mikroorganismen zur Verfügung stehen. Wie der pH-Wert ist die KAK von Biokohlen abhängig vom Ausgangsmaterial sowie der Pyrolysetemperatur. LEHMANN ET AL. (2011) hebt hervor, dass die KAK mit steigender Pyrolysetemperatur sinkt.

Im Zusammenhang mit der hohen Porosität bieten Biokohlen einen idealen Lebensraum für Bodenmikroorganismen (WARNOCK ET AL. 2007). LEHMANN ET AL. (2011) betonen, dass die Anwendung von Biokohle in Böden nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der mikrobiellen Biomasse führt, sondern infolge veränderter Bodenbedingungen (z.B. pH, Wassergehalt, Kohlenstoffgehalt, Nährstoffverfügbarkeit) sich die Dominanz einzelner Arten verändern kann.

Weitere nachgewiesene Effekte von Biokohlen in Böden sind die Reduktion von Treibhausgasemissionen, sowie die Beschleunigung des Schadstoffabbaus und Verringerung der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen (CLOUGH ET AL. 2013; IPPOLITO ET AL. 2012; KAMMANN ET AL. 2012).

TAGHIZADEH-TOOSI ET AL. (2011) stellten nach Applikation von Biokohle auf Weiden eine Reduzierung der Stickstoff-Dioxid-Emissionen fest. Versuche von ZHANG ET AL. (2012) bestätigten diese Ergebnisse und gehen von einer gesteigerten Stickstoffeffizienz aus infolge einer reduzierten Auswaschung.

Im Abbauersuch mit ¹⁴C-markiertem Pyren stellten WORZYK ET AL. (2016) ein gesteigertes Abbaupotenzial von Pyren sowie eine Steigerung der mikrobiellen Bodenaktivität durch Einsatz von Biokohle und Biokohlekompost fest. Untersuchungen von HAUBOLD-ROSAR ET AL. (2016) zum Abbau von Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) in kontaminierten Böden zeigten eine Intensivierung des MKW-Abbaus durch Einmischung von 25 Vol.-% Biokohlekompost in den Boden.

Für die Biokohleanwendung in Böden hat sich eine Mischung aus Biokohle und Kompost bewährt, bei der die Biokohle co-kompostiert wurde, d.h. sie wurde zu Beginn des Kompostierprozesses hinzugegeben und so mit Nährstoffen aufgeladen (WIEDNER ET AL. 2015). Durch Bio-Oxidation wird im Verlauf der Mineralisierung und Humifizierung die Änderung der Oberflächeneigenschaften von Biokohlen herbeigeführt (BERNAL ET AL. 2009). Den Angaben folgend wird durch Oxidation der Biokohlenoberflächen der Stickstoffrückhalt

sowie die Stickstoffverfügbarkeit für Pflanzen entscheidend beeinflusst (KAMMANN ET AL. 2012). Bei der Anwendung von frischer Biokohle kann es aufgrund der hohen Sorptionseigenschaft zur kurzfristigen Immobilisierung von Bodennährstoffen kommen, die Wachstumsdepressionen bei Pflanzen hervorrufen können (KAMMANN 2011).

Die Zugabe von Biokohle zum Kompostierprozess ist geeignet, um Stickstoff-, Calcium-, Magnesium- und Phosphorverluste zu reduzieren (SCHATTEN ET AL. 2015; MAJOR ET AL. 2009). Auch GLASER UND KAMMANN (2013) empfehlen die Zugabe von Biokohle zum Kompostierprozess anstatt Biokohle zum fertigen Kompost hinzu zu mischen. Während der Co-Kompostierung wird die Biokohle mit Nährstoffen aufgeladen und kann somit zur Steigerung der Düngeneffizienz und der Reduzierung des Einsatzes von Düngemitteln beitragen (PROST ET AL. 2013; BLACKWELL ET AL. 2009). Durch Zugabe von Biokohle zum Kompostierprozess wurden in unterschiedlichen Untersuchungen eine Reduzierung der NH_3 - und N_2O -Emissionen festgestellt (WANG ET AL. 2013; HUA ET AL. 2012; STEINER ET AL. 2010). Weiterhin wurde eine Verringerung der Kohlenstoff-Verluste und bessere Bildung von stabilen Humaten/Huminsäuren nachgewiesen (FISCHER UND GLASER 2012).

Darüber hinaus ist Biokohle ein ausgezeichnetes Füll- und Adsorptionsmittel bei der Verwendung feuchter und stickstoffreicher Materialien (WANG ET AL. 2013; STEINER ET AL. 2011; DIAS ET AL. 2010).

2.3 Herstellungsverfahren

2.3.1 Pyrolyse

Durch Biomasse-Pyrolyse, einem technischen Verfahren bei dem organisches Material unter bestimmten Prozessbedingungen thermochemisch zersetzt wird, werden Biokohlen hergestellt. Laut dem Europäischen Pflanzenkohle-Zertifikat EBC (2012) dürfen zur Herstellung von Biokohlen/Pflanzenkohlen ausschließlich organische Reststoffe verwendet werden, die in einer speziellen Liste aufgeführt sind, der sogenannten Positivliste, die als Anhang des Europäischen Pflanzenkohle-Zertifikats zu finden ist. Um die Vielfältigkeit der einzusetzenden Biomassen zu verdeutlichen, werden in der folgenden Tabelle 2.1 beispielhaft einige Biomassen mit ihrer entsprechenden Herkunft aufgelistet. Weiterhin muss gewährleistet sein, dass die zu verwendenden Biomassen nicht durch andere nichtorganische Stoffe oder Abfälle verunreinigt sind.

Tab. 2.1: Ausgewählte Biomassen zur Herstellung von Biokohlen gemäß EBC (2012)

Ausgangsmaterial	Herkunft
Grüngut	aus getrennter Sammlung kommunaler Sammeldienste
Ernterückstände, Stroh, Baum- und Strauchschnitt, Häckselgut, Holzreste, Sägemehl, Sägespäne u.a.	Landwirtschafts- und Forstbereich
Laub, Baum- und Strauchschnitt, Schnittgut aus Naturschutzpflege u.a.	Gartenbau und Landschaftspflege
Trester, Schalen und Pressrückstände u.a.	Pflanzliche Nahrungsmittelproduktion
Borsten, Federn, Knochen u.a.	Tierische Nebenprodukte
Papierfaserschlamm	Papierherstellung
Gärreste	Biogasanlagen

Mittels moderner Pyrolyseanlagen und –methoden ist es möglich Biokohlen aus dieser großen Vielfalt an Biomassen, mit einem maximalen Feuchtigkeitsgehalt von bis zu 50 %, energieeffizient und umweltschonend herzustellen. Während der Pyrolyse entstehen neben der Biokohle Synthesegase, die abgefangen werden müssen und nicht in die Atmosphäre entweichen dürfen als auch Wärme, die weitergenutzt werden muss. Die Eigenschaften der Biokohle sind stark abhängig vom Herstellungsprozess sowie von den verwendeten Ausgangsmaterialien (YAO ET AL. 2012). Beim Pyrolyseprozess können gesundheitsschädliche polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen, die in der Biokohle wiederzufinden sind. Im EBC werden Grenzwerte zu dieser Schadstoffgruppe formuliert, die für Biokohlen einzuhalten sind, damit es zu keiner Verschleppung von Schadstoffen durch die Anwendung von Biokohle kommt. Um eine gute Qualität der erzeugten Biokohlen zu gewährleisten sowie eine hohe Anwendungssicherheit zu ermöglichen, sind kontinuierliche Qualitätsprüfungen unumgänglich.

Derzeit sind deutsche Unternehmen wie z.B. BioMaCon, Carbon Terra und Pyreg mit ihren industriellen Pyrolyseanlagen auf dem Markt. Neben diesen Großanlagen werden auch Klein- und Kleinstanlagen entwickelt.

Die Pyrolyse von Biomassen bei gleichzeitiger Wärmenutzung stellt eine vielversprechende Technologie dar, die einen Beitrag zur Sequestrierung von Kohlenstoff leistet, wie die Ergebnisse des Pilotprojektes Terra BoGa im Botanischen Garten Berlin bereits erfolgreich gezeigt haben (SCHATTEN ET AL. 2015).

2.3.2 Hydrothermale und Vapothermale Carbonisierung

Hydrothermale und Vapothermale Carbonisierung sind weitere Verkohlungsprozesse, die im Vergleich zur Pyrolyse ein biokohleähnliches, chemisch und physikalisch aber unterschiedliches Produkt hervorbringen. Beide Prozesse laufen bei niedrigeren Temperaturen als die Pyrolyse.

Die hydrothermale Carbonisierung (HTC) ist ein Verfahren, das geeignet ist, aus Biomasse mit hohem Feuchtegehalt ohne vorherige Trocknung ein torfähnliches Material, die sogenannte HTC-Kohle, herzustellen (HITZL ET AL. 2015). Hierbei wird die Biomasse unter Zugabe von Wasser unter hohem Druck und bei Temperaturen von ca. 180 - 250 °C über mehrere Stunden carbonisiert (FUNKE UND ZIEGLER 2011).

Die vapothermale Carbonisierung (VTC) ist ein Verfahren, bei der im Vergleich zur hydrothermalen Carbonisierung Biomasse in einer Dampfatmosphäre effizienter thermochemisch umgewandelt wird (FUNKE ET AL. 2013).

Die Endprodukte beider Verfahren zeigten in ökotoxikologischen Untersuchungen wie z.B. dem Regenwurmfluchttest eine negative Wirkung (BUSCH ET AL. 2012) und unterliegen im Boden schnelleren Zersetzungsprozessen, so dass sie zur Kohlenstoffsequestrierung ungeeignet sind.

2.4 Anwendungsbereiche von Biokohle

Längst sind die Einsatzmöglichkeiten von Biokohle nicht nur als Bodenverbesserer oder Bodenhilfsmittel beschränkt, sondern es haben sich innerhalb der letzten Jahre eine Vielzahl weiterer Nutzungsmöglichkeiten herausgestellt. SCHMIDT (2012) beschreibt 55 Anwendungsbereiche für Biokohle/Pflanzenkohle. So findet Biokohle selbst in der Viehhaltung ihren Einsatz z.B. als Futterzusatz oder Einstreu wodurch die Gesundheit der Tiere und das Stallklima sich deutlich verbessern (GERLACH 2012; GERLACH UND SCHMIDT 2012). In der Güllebehandlung kann Biokohle eingesetzt werden, um die Geruchsbelastungen merklich zu minimieren (SCHMIDT 2011a).

Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften der Biokohle wie z.B. eine extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit, eignet sie sich zur Isolation und Regulierung der Luftfeuchtigkeit in Gebäuden (SCHMIDT 2013).

Darüber hinaus kann sie aufgrund ihrer hohen Adsorptionsfähigkeit als Dekontaminationsmittel eingesetzt werden. SCHATTEN UND TERYTZE (2016) stellten in ihren Elutionsversuchen mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) belasteten Böden, die mit Biokohle und

Biokohlesubstraten behandelt wurden, eine deutliche Reduzierung der Freisetzung dieser Schadstoffe fest und empfehlen die Anwendung von Biokohle für die Sanierung von Bodenverunreinigungen.

In der Textilindustrie findet Biokohle z.B. als Gewebezusatz Verwendung. LIN UND CHANG (2008) beschreiben den Einsatz von Bambusbiokohle in Textilien, um bessere Wärmeeigenschaften, höhere Atmungsaktivität und geringere Geruchsentwicklungen zu erzielen.

Die für diese Arbeit relevanten Anwendungsbereiche der Biokohle beschränken sich auf den Einsatz als Mischungskomponente in Kultursubstraten sowie als Bodenverbesserungsmittel für landwirtschaftlich genutzte Böden und werden im Folgenden näher betrachtet.

2.4.1 Anwendung von Biokohle im Zierpflanzenbau

Das Einmischen von Biokohle in Kultursubstrate gewinnt im Zierpflanzenbau zunehmend an Bedeutung, da es eine mögliche Alternative zu Torf darstellen könnte. Die Kultivierung von Topf- und Zierpflanzen erfolgt in der Regel auf erdlosen Substraten, die als Hauptbestandteil Torf enthalten. Torf wird aufgrund seiner günstigen physikalischen Eigenschaften wie z.B. der hohen Wasserspeicherfähigkeit bei gleichzeitig ausreichendem Luftporenvolumen hauptsächlich in Kultursubstraten eingesetzt. Weitere Additive können organische und anorganische Komponenten wie z.B. Kompost, Rinden, Sand, Lavagrus, Bims, Perlite oder Xylite sein. Aufgrund der einhergehenden Umweltproblematik, die der Abbau der endlichen Torfreserven nach sich zieht, wird zunehmend nach alternativen Substratkomponenten, die den Torf ersetzen können, gesucht (VAUGHN ET AL. 2013). Neben Reishüllen (EVANS UND GACHUKIA 2007), Kokosfasern (VAUGHN ET AL. 2013; NOGUERA ET AL. 2003; EVANS ET AL. 1996) und verschiedene Komposte (ZHANG ET AL. 2013; FARRELL UND JONES 2010; JAYASINGHE ET AL. 2010) haben Tests mit Biokohle gezeigt, dass sie ein geeigneter Torfersatz für erdlose Substrate wäre (KAUDAL ET AL. 2016; NIETO ET AL. 2016; PETERSON UND JACKSON 2014; VAUGHN ET AL. 2013; TIAN ET AL. 2012).

In der Studie von TIAN ET AL. (2012) wurde das Wachstum der Zierpflanze *Calathea rotundifolia* cv. *Fasciata* auf einem pflanzenspezifischen Torfsubstrat (100 %) mit dem auf einem reinen Biokohlesubstrat (Ausgangsmaterial Grünschnitt, Pyrolysetemperatur 160 °C bis 220 °C) und auf einem 1:1 Torf-Biokohle-Mischsubstrat verglichen. Das beste Pflanzenwachstum wurde beim Torf-Biokohle-Mischsubstrat festgestellt, das eine 22 %ige Erhöhung der Biomasse im Vergleich zum reinen Torfsubstrat zeigte. Des Weiteren wurde eine Reduzierung des Substratabbaus durch den Einsatz von Biokohle nachgewiesen. Nach einer sechsmonatigen Testdauer war die Fraktion > 1 mm beim Torfsubstrat um 39 %, beim

Biokohlesubstrat um 9 % und beim Torf-Biokohle-Mischsubstrat um 21 % reduziert. Die Ergebnisse resultierten in die Empfehlung der Verwendung von einem Torf-Biokohle-Mischsubstrat für die Kultivierung von *Calathea rotundifolia* cv. *Fasciata*, um Torf teilweise zu ersetzen, ohne das Pflanzenwachstum negativ zu beeinträchtigen. Die Anwendung von Biokohle als Mischungskomponente in Pflanzsubstraten hat einen positiven Einfluss auf deren Langlebigkeit.

In den Versuchen von FASCELLA ET AL. (2013) wurde das Pflanzenwachstum von *Euphorbia x lomi* *Rauh* cv. ‚*Chiara*‘ in vier verschiedenen Torf-Biokohle-Mischsubstraten mit unterschiedlichen Biokohlezugaben mit dem eines reinen Torfsubstrates verglichen. Die eingesetzte Biokohle wurde aus dem Holz von Koniferen hergestellt. Die Torf-Biokohle-Mischsubstrate setzten sich wie folgt zusammen: 85 % Torf (T) und 15 % Biokohle (BK); 70 % T und 30 % BK; 55 % T und 45 % BK; 40 % T und 60 % BK. Signifikante Unterschiede hinsichtlich der Blütenanzahl und der Wurzellänge konnten bei den Varianten mit einer Biokohlezugabe von 45 % und 60 % gegenüber der reinen Torfvariante festgestellt werden. Nach einer dreimonatigen Kultivierung blühten bereits 70 % der Pflanzen in dem Torf-Biokohle-Mischsubstrat mit einem Biokohleanteil von 60 %, im reinen Torfsubstrat dagegen 38 %.

Eine frühere Blütenbildung wurde bei den Pflanzen *Zinnia linearis*, *Melampodium paludosum* und *Salvia splendens* beobachtet, die in einem Kultursubstrat (aus Torf, Sand, Vermiculit und Perlit) mit einem 10 % igem Holzkohleanteil kultiviert wurden (KADOTA UND NIIMI 2004).

Eine weitere Untersuchung ging der Frage nach, ob Kompostsubstrate im Zierpflanzenbau geeignet wären, wenn sie durch Beimengung weiterer organischer Komponenten optimiert und in ihren Eigenschaften dem Torf angeglichen werden könnten (ZHANG ET AL. 2014). Hierzu wurden die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Substrate untersucht sowie ein Wachstumsversuch mit *Calathea insignis* durchgeführt, bei dem die zu testenden Substrate mit einem reinen Kompostsubstrat verglichen wurden. Es wurden drei Ausgangssubstrate aus zweifach fermentiertem Kompost aus Grünschnitt (Geäste und Blätter) und einem Biokohleanteil von 0 %, 20 % und 35 % hergestellt. Ausgangsmaterial der Biokohle waren Kokosfasern, die bei 450 °C pyrolysiert wurden. Den Ausgangssubstraten wurden zusätzlich jeweils 0 %, 0,5 % oder 0,7 % Huminsäure hinzugegeben. Durch die Zugabe von Biokohle konnte die Wasserhaltekapazität und die Porosität des Kompostes verbessert werden. Es wurde eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit und des pH-Wertes durch die Beimengung von Biokohle festgestellt. Hinsichtlich der Gesamtgehalte an Stickstoff, Phosphor, Calcium und Mangan kam es durch die Biokohle zu einer Reduzierung. Wachstumssteigerungen von *Calathea insignis* konnten durch die Zugabe von Biokohle und

Huminsäuren nachgewiesen werden, wobei die besten Ergebnisse bei einer Zugabe von 20 % Biokohle und 0,7 % Huminsäure erzielt wurden (ZHANG ET AL. 2014).

Der Einsatz von Biokohlekompost im Pflanzenbau zeigte in ersten Untersuchungen positive Wirkungen (GLASER UND KAMMANN 2013).

Da Biokohle im trockenen Zustand sehr staubig ist, hat man versucht, Biokohle zu pelletieren, um eine verbesserte Handhabung zu erzielen. Um die Eigenschaften sowie die Eignung als Torfersatz dieser Biokohle zu untersuchen, wurden Versuche mit pelletierter Biokohle aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien durchgeführt. In den Untersuchungen von (VAUGHN ET AL. 2013) wurden Biokohlepellets aus Hartholz und aus Weizenstroh eingesetzt. Es wurden sechs Testsubstrate mit einem Kontrollsubstrat, bestehend aus 50 % Vermiculit und 50 % Torf miteinander verglichen. Die Testsubstrate waren wie folgt zusammengesetzt: 50 % Vermiculit (V) und 45 % Torf (T) und 5 % pelletierte Biokohle aus Hartholz oder Weizenstroh (BK); 50 % V und 40 % T und 10 % BK; 50 % V und 35 % T und 15 % BK. Die pelletierte Biokohle aus Weizenstroh hatte eine höhere Leitfähigkeit und einen höheren pH-Wert als die Biokohle aus Hartholz. Dies wurde auf den höheren Kaliumgehalt in der Weizenstroh-Biokohle zurückgeführt. Mit zunehmenden Anteil der Einmischung beider Biokohlen wurden die Rohdichte, der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit von den entsprechenden Substraten erhöht. Die Wachstumsversuche mit Tomaten (*S. lycopersicum* L.) und Ringelblumen (*T. erecta* L.) zeigten ein signifikant gesteigertes Pflanzenhöhenwachstum in allen Biokohleapplikationen. Hinsichtlich der Trockenmasse wurden bei den Tomatenpflanzen keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu dem Kontrollsubstrat festgestellt. Bei den Ringelblumen wurde nur für die Variante mit 5 % iger Biokohleemischung aus Hartholz eine signifikant verringerte Trockenmasse im Vergleich zur Kontrolle nachgewiesen. Als Ergebnis dieser Studie konnte herausgestellt werden, dass die beiden aus Stroh und Holz pelletierten Biokohlen geeignet sind, um Torf in erdlosen Substraten zu den hier angegebenen Anteilen zu ersetzen.

Eine weitere erwähnenswerte Eigenschaft der Biokohle ist deren phytosanitäre Wirkung. In den Pflanzversuchen von (HAREL ET AL. 2012; ZWART UND KIM 2012; ELMER UND PIGNATELLO 2011) wurden die phytosanitären Effekte durch die Anwendung von Biokohle nachgewiesen. Sowohl Kompost als auch Biokohle zeigen positive Effekte hinsichtlich Resistenzen gegenüber Pflanzenkrankheiten, Pathogenen und Schädlingen (TERYTZE ET AL. 2015; KRAUSE ET AL. 2003; MATSUBARA ET AL. 2002; ELAD ET AL. 2010; HOITINK ET AL. 1996), so dass aus der Mischung von den beiden Materialien ein Synergieeffekt resultieren kann.

2.4.2 Anwendung von Biokohle in der Landwirtschaft

Die Anwendung von Biokohle als Bodenverbesserer ist keine neue Erfindung, sondern basiert auf altem vorhandenem Wissen. Bereits seit über 2500 Jahren wurde Biokohle in zahlreichen Regionen der Welt zur Verbesserung der Bodenqualität eingesetzt (VERHEIJEN ET AL. 2010). Das bekannteste Beispiel für die Verwendung von Biokohle in Kombination mit anderen organischen Reststoffen zur nachhaltigen Verbesserung ausgelaugter Böden ist Terra Preta. Leider ging im Zuge der Anwendung mineralischer Düngemittel dieses Wissen verloren. Erst als Biokohle als mögliches Tool gegen den Klimawandel in den Fokus rückte, wurden ihre Funktionen als Bodenverbesserer und Nährstoffträger wiederentdeckt.

Durch die Anwendung von Biokohle in Böden lassen sich äußerst positive Effekte auf die Bodenqualität, Bodenaktivität, Bodengesundheit und Ertragsleistungen in Abhängigkeit von den Standortbedingungen (z.B. Bodentyp, klimatische Verhältnisse), Qualität der Biokohle und den angebauten Kulturpflanzen feststellen (LEHMANN ET AL. 2011; DOWNIE ET AL. 2009). In wissenschaftlichen Untersuchungen konnten folgende Effekte nachgewiesen werden:

- Verbesserung der Wasserspeicherkapazität der Böden (LIU ET AL. 2012; LEHMANN ET AL. 2011; MAJOR ET AL. 2010)
- Erhöhung des Boden-pH-Werts (VERHEIJEN ET AL. 2010)
- Verbesserung des Gas- und Wasseraustauschs (CHAN ET AL. 2008)
- Reduzierung klimaschädlicher Methan- und Lachgasemissionen (KAMMANN 2010; VAN ZWIETEN ET AL. 2009)
- Steigerung der mikrobiellen Aktivität und des Bodenlebens (KUZYAKOV ET AL. 2009; STEINBEISS ET AL. 2009; THIES UND RILLIG 2009)
- Zunahme von Mykorrhizen (HAMMER ET AL. 2014; WARNOCK ET AL. 2007)
- Verbesserte Nährstoffdynamik und verminderte Nährstoffauswaschung (YAO ET AL. 2012; CHAN UND XU 2009)
- Verbesserung der Pflanzengesundheit (ELAD ET AL. 2010)

Weitere positive Effekte der Anwendung von Biokohle auf Böden können ein verbessertes Pflanzenwachstum sowie eine Steigerung von Ernteerträgen sein (RÖßLER ET AL. 2015; JEFFERY ET AL. 2011;). In einigen Studien werden beispielsweise Ertragssteigerungen von über 300 % durch die Anwendung von Biokohle angegeben (CORNELISSEN ET AL. 2013). Diese hohen Ertragssteigerungen sind eher eine Ausnahme statt die Regel, darüber hinaus sind die Ertragsspannweiten sehr unterschiedlich und es wurden sogar in einigen Fällen von Ertragsdepressionen berichtet (JEFFERY ET AL. 2011).

Biokohle zeigt in Abhängigkeit von der Bodenart und den klimatischen Bedingungen ganz unterschiedliche Wirkungen. In einem längerfristigen Feldversuch wurden die Effekte von

Biokohle in drei unterschiedlichen Auftragungsmengen (30, 60 und 90 t ha⁻¹) hinsichtlich Ernteertrag und Bodeneigenschaften in einem kalkhaltigen Boden untersucht (LIANG ET AL. 2014). Angebaut wurden Winterweizen und Sommermais, wobei der jährliche Ertrag mit steigender Auftragungsmenge nicht signifikant gesteigert werden konnte, aber der kumulative Ertrag war signifikant unterschiedlich über die ersten vier Vegetationsperioden. Nach zweijähriger Biokohleanwendung wurde eine pH-Werterhöhung von 0,35 Einheiten festgestellt. Die Zugabe von 90 t ha⁻¹ Biokohle führte nach drei Jahren zu einer signifikanten Verringerung der Bodendichte, wobei die Wasserhaltekapazität gesteigert wurde. Die Ergebnisse von LIANG ET AL. (2014) zeigten, dass Biokohle in kalkhaltigen Böden angewendet werden kann ohne signifikanten Einfluss hinsichtlich Nährstoffverfügbarkeit sowie Ertragseinbußen.

Auf einer Bananen- und Papayapflanzung im tropischen Australien wurden die Effekte von Biokohle, Kompost und co-kompostierter Biokohle hinsichtlich Bodeneigenschaften, Ernteerträge sowie Treibhausgasemissionen in einer Vegetationsperiode untersucht (BASS ET AL. 2016). Die drei untersuchten Bodenverbesserungsmittel steigerten signifikant die Kationenaustauschkapazität, den Bodenwassergehalt sowie die Gehalte an Bodenkohlenstoff und -nährstoffen. Die Erhöhung des Bodennährstoffgehaltes sowie die Verbesserung der bodenphysikalischen Eigenschaften führten aber nicht zu einer gesteigerten Fruchternte. Entgegen den Erwartungen wurde der Bananenertrag um 18%, 12% und 24% reduziert in der Anwendung Biokohle, Kompost und co-kompostierter Biokohle. Es wurden keine signifikanten Unterschiede für den Papayaertrag nachgewiesen. Für die Behandlungen, die Biokohle enthielten, konnte eine Reduzierung der N₂O-Emissionen festgestellt werden.

Ein weiterer Feldversuch untersuchte auf einem tropischen Ferralsol den Einfluss von Biokohle, Kompost und Biokohlekompost in Bezug auf Bodenfruchtbarkeit, Maisertrag und Treibhausgasemissionen (AGEGNEHU ET AL. 2016). Es wurden Ertragssteigerungen zwischen 10 und 29% festgestellt durch die Anwendung der drei untersuchten Bodenverbesserungsmittel. Physikalisch-chemische Eigenschaften sowie Nährstoffgehalte des untersuchten Bodens wurden signifikant durch die Anwendung der organischen Bodenverbesserer gesteigert. Durch den Einsatz von Biokohle und Biokohlekompost konnte der organische Kohlenstoffgehalt im Boden, der Bodenwassergehalt sowie die Nährstoffverfügbarkeit verbessert und Treibhausgasemissionen minimiert werden.

Durch Anwendung von Biokohlekompost auf Böden wird die organische Bodensubstanz nachhaltig und langfristig durch die Abbaustabilität der Biokohle erhöht (FISCHER UND GLASER 2012). Dadurch kann nachhaltiger Humusaufbau betrieben werden, der zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit führt (FREE ET AL. 2010). Insbesondere in humusarmen

Sandböden mit einem geringen Anteil an Fein- und Mittelporen ist dieses Potenzial des Biokohlekompostes stark ausgeprägt (FISCHER UND GLASER 2012).

3 MATERIAL UND METHODEN

Im folgenden Kapitel werden die Topfversuche im Botanischen Garten Berlin und die Feldversuche in der Republik Ghana sowie die angewendeten Methoden zur Untersuchung der pflanzenbaulichen Wirkungen von Biokohlekompost im Zierpflanzenbau als auch auf Böden semiarider Gebiete detailliert beschrieben. Die folgende Abbildung 3.1 zeigt im Überblick die durchgeführten Untersuchungen.

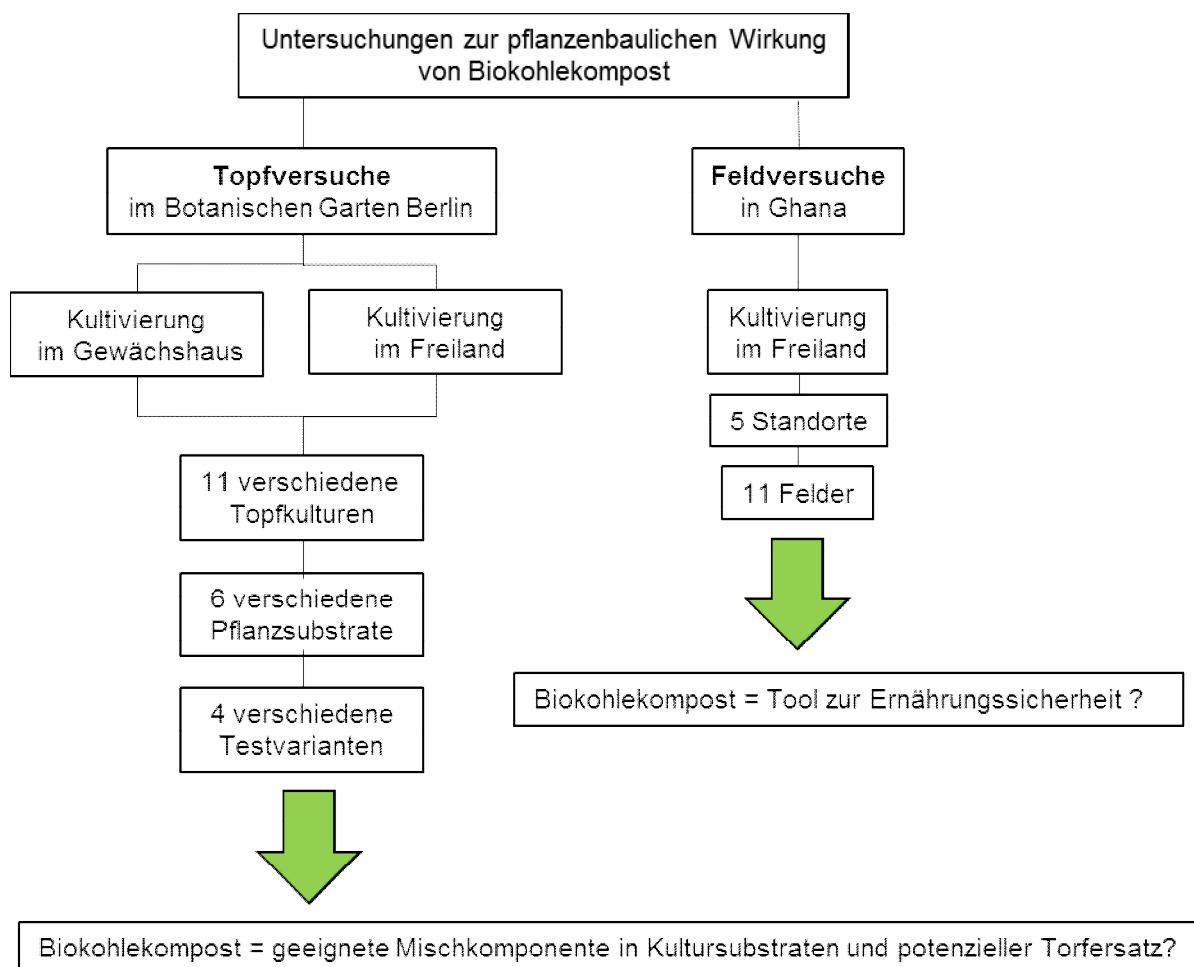


Abb. 3.1: Gesamtüberblick der durchgeführten Untersuchungen zur pflanzenbaulichen Wirkung von Biokohlekompost

3.1 Topfversuche zur pflanzenbaulichen Wirkung von Biokohlekompost und dessen Potenzial als Torfersatz im Zierpflanzenbau

Im Botanischen Garten Berlin (BG) wurden die anfallenden organischen Reststoffe durch ein optimiertes Stoffstrommanagement mittels Kompostierung und Fermentation mit und ohne Biokohlezugabe verwertet. Das kompostierte und fermentierte Material mit und ohne

Biokohlezugabe wurde als Additiv zur Herstellung von Pflanzsubstraten mit einem reduzierten Torfanteil verwendet. Anhand zahlreicher Topfversuche wurde die Qualität der neu hergestellten Pflanzsubstrate hinsichtlich des Pflanzenwachstums bewertet und mit den bisher im BG verwendeten pflanzenspezifischen Pflanzsubstraten, welche als Kontrollsubstrat dienten, verglichen. Anhand der durchgeführten Wachstumsversuche sollte die Frage geklärt werden, ob Biokohlekompost ein geeigneter Torfersatz wäre. Darüber hinaus war zu klären, ob die optimierte Kompostierung sowie die Fermentation geeignet sind, um die im BG anfallenden organischen Reststoffe so zu verwerten, dass ein qualitativ hochwertiges Produkt entsteht, das den bisherigen zugekauften Kompost ersetzen könnte.

3.1.1 Kompostierung und Fermentation mit und ohne Biokohlezugabe

Für die Kompostierung und Fermentation des Großansatzes GA2 wurden die gleichen Ausgangsmaterialien verwendet wie z.B. strukturreiche Grünschnittmaterialien, Grasschnitt sowie Pflanzenreste, die mit einem Schredder zerkleinert und im Anschluss vermischt wurden. Diese Mischung wurde in zwei gleich große Teile geteilt. Ein Teil wurde zum Aufsetzen der zwei Kompostmieten mit einer Breite von 2,50 m und einer Höhe von 1,30 m verwendet, der andere Teil für die zwei Fermentationsmieten. Zu den Fermentationsmieten wurden zusätzlich 10 l/m³ EMA/Melasse-Lösung³ gegeben. Zu jeweils einer von den beiden Fermentations- und Kompostmieten wurden 15 Vol. % Biokohle zugemischt. Die Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien für die zwei Kompostmieten und zwei Fermentationsmieten jeweils mit und ohne Biokohlezugabe ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tab. 3.1: Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien für die Kompostierung und Fermentation mit und ohne Biokohlezugabe (verändert nach (WAGNER ET AL. 2014))

	Label	Organische Reststoffe [Vol. %]	Biokohle [Vol. %]	EMA/Melasse-Lösung [l/m ³]
Kompostmiete ohne Biokohle	GA2-IR0	100	0	0
Kompostmiete mit Biokohle	GA2-IR15	85	15	0
Fermentationsmiete ohne Biokohle	GA2-F0	100	0	10
Fermentationsmiete mit Biokohle	GA2-F15	85	15	10

Um einen aeroben Abbau zu verhindern, wurden die Fermentationsmieten mit Hilfe eines Radladers verdichtet und anschließend mit einer luftdichten Silagefolie abgedeckt und für vier Wochen fermentiert (Abb. 3.2). Nach dem Fermentationsprozess wurden die beiden Mieten jeweils zu zwei separaten Haufen aufgeschüttet und bis zur Verwendung so gelagert. Die beiden Kompostmieten wurden mit einem atmungsaktiven Vlies abgedeckt und für acht

³ EM-effektive Mikroorganismen, die die Fermentation von organischen Abfällen begünstigen

Wochen kompostiert (Abb. 3.2). Um einen optimalen Kompostierprozess zu gewährleisten, wurden in der ersten Woche täglich die Temperatur, der CO₂-Gehalt und die Feuchte der beiden Kompostmieten mit und ohne Biokohle kontrolliert. Bei Bedarf wurden die Mieten bewässert und mehrmals pro Woche umgesetzt, um eine optimale Sauerstoffversorgung sicherzustellen. Nach einer achtwöchigen Kompostierdauer wurden beide Mieten jeweils zu einem großen Haufen zusammengefasst und unterlagen danach einem dreimonatigen Reifeprozess. Anschließend wurde der fertige Kompost auf 10 mm gesiebt und in überdachten Boxen bis zur Verwendung gelagert.



Abb. 3.2: Linkes Foto: Verdichten der Fermentationsmiete mit dem Radlader; rechtes Foto: weiß abgedeckt und mit Paletten beschwert: Fermentationsmieten mit und ohne Biokohle; grün abgedeckt: Kompostmieten mit und ohne Biokohle; (Foto: N. König)

3.1.2 Probennahme und Probenvorbereitung

3.1.2.1 Proben des kompostierten und fermentierten Materials mit und ohne Biokohle

Zur Bestimmung physikalischer, physikalisch-chemischer und chemischer Parameter wurden von den Kompost- und Fermentationsmieten mit und ohne Biokohle Proben genommen. Bei den beiden Kompostmieten mit und ohne Biokohle wurden jeweils zehn Einzelproben zu einer Mischprobe vereint. Die Mischprobe wurde anschließend geteilt und in zwei Polyethylen-tüten abgefüllt. Eine der beiden Tüten wurde bei -18°C eingefroren die andere Tüte wurde im Kühlschrank bis zur Analyse gelagert. Ein Teil der Mischprobe wurde luftgetrocknet und bis zur Analyse in Polyethylenflaschen aufbewahrt. Mit den beiden Fermentationsmieten mit und ohne Biokohle wurde analog verfahren.

3.1.2.2 Biokohleproben

Aus der in Bigbags gelagerten Biokohlemenge wurden fünf Einzelproben zu einer Mischprobe vereint und in Polyethylen-tüten bis zur Analyse im Kühlschrank gelagert. Ein

weiterer Teil der Mischprobe wurde luftgetrocknet und bis zur Analyse in Polyethylenflaschen aufbewahrt.

3.1.2.3 Angemischte Pflanzsubstratproben

Vor Versuchsbeginn wurden von den sechs angemischten Pflanzsubstraten jeweils immer fünf Einzelproben zu einer Mischprobe vereint. Die Mischprobe wurde anschließend geteilt und in zwei Polyethylen-Tüten abgefüllt. Eine der beiden Tüten wurde bei -18°C eingefroren die andere Tüte wurde im Kühlschrank bis zur Analyse gelagert. Ein Teil der Mischprobe wurde luftgetrocknet und bis zur Analyse in Polyethylenflaschen aufbewahrt.

Nach Versuchsende wurden die Töpfe aller Pflanzen pro Kontroll- und Testsubstrat jeweils zu einer Mischprobe vereint. Die Lagerung und weitere Probenvorbereitung erfolgte analog zu den Pflanzsubstratproben vor Versuchsbeginn.

3.1.2.4 Pflanzenproben

Nach Versuchsende wurden von den Topfpflanzen *Aglaonema commutatum*, *Coffea arabica* und *Geranium maderense* pro Topf und Pflanzsubstrat Blattproben zur Bestimmung der Trockensubstanz und der Gesamtnährstoffgehalte genommen. Alle Blattproben wurden im Trockenschrank bei 60°C für fünf Tage bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend in einer Schlagkreuzmühle feingemahlen und bis zur Analyse in Polyethylenflaschen gelagert.

3.1.3 Charakterisierung der kompostierten und fermentierten pflanzlichen Materialien mit und ohne Biokohle

Verschiedene physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter wurden vom kompostierten und fermentierten Material mit und ohne Biokohle untersucht, bevor diese als Substratkomponente für die zu testenden Pflanzsubstrate verwendet wurden. Die untersuchten Parameter sind der Tabelle 3.2 zu entnehmen. Die von der Bundesgemeinschaft Kompost (BGK) festgelegten Qualitätsparameter für Komposte wurden für alle untersuchten Materialien eingehalten.

Tab. 3.2: Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter des kompostierten (IR0 und IR15) und fermentierten (F0 und F15) Materials mit und ohne Biokohle im Vergleich zu dem bisher im BG verwendeten Kompost

Parameter	Einheit	IR0	IR15	F0	F15	BG Kompost	Spannweiten*
Trockenmasse	% FM	67	61	62	58	63	---
Wassergehalt	% FM	33	39	38	42	37	---
Rohdichte	g/l FM	881	846	925	798	733	500 - 820
WHK	Vol. %	71	72	67	71	73	---
Salzgehalt	g/l FM	1,5	1,3	1,8	1,3	1,2	1,9 - 8,0
pH (CaCl ₂)	-	7,3	7,5	7,4	7,8	7,5	6,9 - 8,3
Organische Substanz	% TM	18	29	18	32	28	24 - 51
C	% TM	9,5	20,7	9,5	22,9	15,0	16 - 37
N	% TM	0,6	0,6	0,6	0,5	0,8	0,5 – 1,5
C/N-Verhältnis	-	16	35	16	46	19	---
N _{min}	mg/l FM	54	31	113	21	129	0 - 740
P _{total}	g/kg TM	1,3	1,3	1,3	1,2	1,5	---
K _{total}	g/kg TM	6,8	6,9	7,0	7,2	5,3	---
Mg _{total}	g/kg TM	2,9	2,7	3,1	2,9	2,5	---
P _{verfügbar}	g/l FM	0,5	0,5	0,6	0,4	0,07	0,2 – 0,7
K _{verfügbar}	g/l FM	3,0	2,9	3,3	3,1	1,6	1,2 - 4,6
Mg _{verfügbar}	g/l FM	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1 – 0,4

* entsprechend den Anforderungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK 2006)

IR0-kompostiertes Material ohne Biokohle; IR15-kompostiertes Material mit Biokohle; F0-fermentiertes Material ohne Biokohle; F15-fermentiertes Material mit Biokohle; WHK-Wasserhaltekapazität; FM-Frischmasse; TM-Trockenmasse; total-Gesamtgehalt; verfügbar-(pflanzen)verfügbarer Gehalt

3.1.4 Charakterisierung der verwendeten Biokohle

Die verwendete Biokohle wurde aus unbehandeltem holzigem Material bei 550°C hergestellt und von dem kommerziellen Biokohlehersteller Carbon Terra GmbH bezogen. Für den Kompostierungs- und Fermentationsprozess mit Biokohlezugabe wurde die Biokohle zuvor mit Wasser befeuchtet und anschließend mit den verwendeten organischen Reststoffen vermischt. Verschiedene physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter der Biokohle wurden untersucht, die in der Tabelle 3.3 aufgelistet sind.

Tab. 3.3: Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter der Biokohle

Parameter	Einheit	Richtwerte EBC*	Biokohle
Trockenmasse	% FM	-	90,4
Wassergehalt	% FM	-	9,6
Rohdichte	g/l FM	-	342
Salzgehalt	g/l FM	-	0,6
pH (CaCl ₂)	-	-	8,5
C	% TM	>50	71,9
N	% TM	nur Angabe	0,8
C/N-Verhältnis	-	-	87
P	mg/kg TM	nur Angabe	1909
K	mg/kg TM	nur Angabe	8731
Mg	mg/kg TM	nur Angabe	2589
Pb	mg/kg TM	basic: 150; premium: 120	<1,0
Cd	mg/kg TM	basic: 1,5; premium: 1,0	<0,1
Cr	mg/kg TM	basic: 90; premium: 80	9,3
Cu	mg/kg TM	Grenzwert: 100	17,7
Ni	mg/kg TM	basic: 50; premium: 30	12,2
Zn	mg/kg TM	basic: 400; premium: 300	52,3
Hg	mg/kg TM	Grenzwert: 1,0	<0,1
16 EPA-PAK (B[a]P)	mg/kg TM	basic: 12; premium: 4	5,0 (<0,2)

*European Biochar Certificate (Europäisches Pflanzenkohlezertifikat) 2012; Version 5; 01.12.2014

Alle Werte entsprachen den Anforderungen des Europäischen Pflanzenkohle Zertifikats (EBC) und die untersuchten Schwermetallgehalte lagen unterhalb der in der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) festgelegten Grenzwerte.

3.1.5 Versuchsdesign der Topfversuche im Botanischen Garten Berlin

Aus dem kompostierten und fermentierten Material mit und ohne Biokohlezugabe des Großansatzes GA2 wurden sechs pflanzenspezifische Substrate unter Zugabe von weiteren Additiven angemischt (vgl. Tab. 3.4). In diesen Substraten wurden insgesamt elf unterschiedliche Testpflanzen kultiviert und ihre Wuchsleistung untersucht.

Die randomisierten Topfversuche wurden in drei- bis sechsfacher Wiederholung durchgeführt. Ausgewählte Pflanzenparameter wurden zur Bestimmung des vegetativen und generativen Wachstums erhoben.

Das entsprechende Versuchsdesign der Topfversuche ist schematisch in Abbildung 3.3 dargestellt.

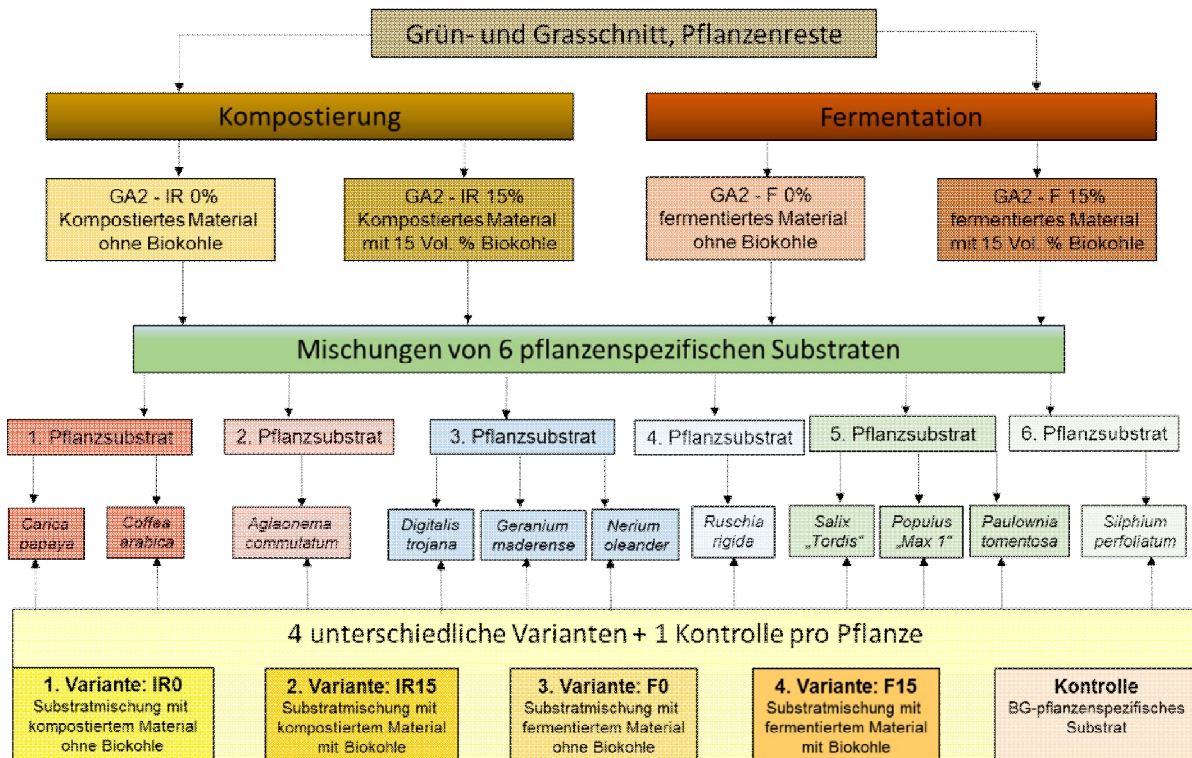


Abb. 3.3: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns für die Topfversuche mit kompostiertem und fermentiertem Material mit und ohne Biokohle des Großansatzes GA2

3.1.6 Zusammensetzungen der pflanzenspezifischen Substrate

Für die elf durchgeführten Topfversuche wurden insgesamt sechs unterschiedliche pflanzenspezifische Substrate mit weiteren Additiven angemischt, deren Zusammensetzung der Test- und Kontrollsubstrate Tabelle 3.4 zu entnehmen ist.

Tab. 3.4: Zusammensetzung der sechs pflanzenspezifischen Substratmischungen für die Topfversuche mit kompostiertem und fermentiertem Material des Großansatzes GA2 und den entsprechenden Anteilen an Additiven

	zK	GA2	T	Sa	Pe	TM	CP	LG	Bi	Le	PR	GG	La	X
1. Substrat für <i>Digitalis trojana</i>, <i>Geranium maderense</i> und <i>Nerium oleander</i>														
Testsubstrate	-	8	4	2	-	-	-	2	1	-	-	-	-	-
Kontrolle	6	-	6	2	-	-	-	2	1	-	-	-	-	-
2. Substrat für <i>Carica papaya</i> und <i>Coffea arabica</i>														
Testsubstrate	-	3	2	-	-	-	-	-	2	-	1,5	-	-	-
Kontrolle	-	-	3	-	-	1,5	-	-	2	-	1,5	-	-	2
3. Substrat für <i>Paulownia tomentosa</i>, <i>Populus "Max 1"</i> und <i>Salix "Tordis"</i>														
Testsubstrate	-	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kontrolle	2	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Substrat für <i>Silphium perfoliatum</i>														
Testsubstrate	-	4	2	2	-	-	-	1	2	1	-	-	-	-
Kontrolle	3	-	3	2	-	-	-	1	2	1	-	-	-	-
5. Substrat für <i>Aglaonema commutatum</i>														
Testsubstrate	-	7 ^{1/3}	2/3	2	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Kontrolle	7	-	1	2	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-
6. Substrat für <i>Ruschia rigida</i>														
Testsubstrate	-	2 ^{1/4}	-	1,5	-	-	-	-	-	1	-	1,5	3/4	-
Kontrolle	1,5	-	-	1,5	-	-	-	-	-	1	-	1,5	1,5	-

zK=zugekaufter Kompost, GA2=fermentiertes oder kompostiertes Material mit und ohne Biokohle; T=Torf; Sa=Sand; Pe=Perlite; TM=Tonmehl; CP=cocopur; LG=Lavagrus; Bi=Bims; Le=Lehm; PR=Pinienrinde; GG=Granitgrus; La=Lauberde; X=Xylit

Pro Pflanze wurden vier unterschiedliche Varianten untersucht, die sich in der Biokohlezugabe und der Art des GA2-Materials (Kompost/Fermentation) unterschieden. Die untersuchten Testvarianten werden in der vorliegenden Arbeit wie folgt abgekürzt: IR0, IR15, F0 und F15.

- IR0 – kompostiertes Material ohne Biokohle
- IR15 – kompostiertes Material mit 15 Vol% Biokohle (co-kompostierte Biokohle)
- F0 – fermentiertes Material ohne Biokohle
- F15 – fermentiertes Material mit 15 Vol% Biokohle (co-fermentierte Biokohle)

Die Testvarianten wurden jeweils mit dem entsprechenden Kontrollsubstrat als auch untereinander verglichen.

Der Anteil des zugekauften Kompostes, der für die Kontrollsubstrate verwendet wurde, wurde in allen Testvarianten vollständig durch das kompostierte/fermentierte Material des Großansatzes GA2 ausgetauscht. Darüber hinaus wurde der Torfanteil bei sieben Pflanzen

in den Testvarianten reduziert. Bei den Pflanzen *Aglaonema commutatum*, *Carica papaya*, *Coffea arabica*, *Digitalis trojana*, *Geranium maderense*, *Nerium oleander* und *Silphium perfoliatum* wurde der Torfanteil jeweils zu einem Drittel durch das kompostierte und fermentierte Material des GA2 ersetzt.

Ausgehend von einem 15 % igem Biokohleanteil in den Fermentations- und Kompostmieten wurde der Anteil an Biokohle in den sechs untersuchten Pflanzsubstraten berechnet. Der Torfanteil wurde ebenfalls unter Berücksichtigung aller anderen Zuschlagstoffen in den einzelnen Pflanzsubstraten berechnet.

In der Tabelle 3.5 sind die prozentualen Torf- und Biokohleanteile der untersuchten Testvarianten aller sechs pflanzenspezifischen Substratmischungen, die für die Topfversuche verwendet wurden, aufgeführt.

Tab. 3.5: Prozentualer Torf- und Biokohleanteil in den untersuchten Testvarianten der sechs pflanzenspezifischen Substratmischungen für die Topfversuche

Pflanzsubstrat	Testvariante	Anteil Torf [%] im Substrat	Anteil Biokohle [%] im Substrat
1. Pflanzsubstrat für <i>Digitalis trojana</i> <i>Geranium maderense</i> <i>Nerium oleander</i>	Kontrolle	35,3	0
	F0	23,5	0
	F15	23,5	8,9
	IR0	23,5	0
	IR15	23,5	8,9
2. Pflanzsubstrat für <i>Carica papaya</i> <i>Coffea arabica</i>	Kontrolle	30	0
	F0	23,5	0
	F15	23,5	6,7
	IR0	23,5	0
	IR15	23,5	6,7
3. Pflanzsubstrat für <i>Salix "Tordis"</i> <i>Populus "Max 1"</i> <i>Paulownia tomentosa</i>	Kontrolle	60	0
	F0	60	0
	F15	60	7,6
	IR0	60	0
	IR15	60	7,6
4. Pflanzsubstrat für <i>Silphium perfoliatum</i>	Kontrolle	25	0
	F0	16,7	0
	F15	16,7	6,3
	IR0	16,7	0
	IR15	16,7	6,3
5. Pflanzsubstrat für <i>Aglaonema commutatum</i>	Kontrolle	7,7	0
	F0	5,1	0
	F15	5,1	10,7
	IR0	5,1	0
	IR15	5,1	10,7
6. Pflanzsubstrat für <i>Ruschia rigida</i>	Kontrolle	0	0
	F0	0	0
	F15	0	6,1
	IR0	0	0
	IR15	0	6,1

3.1.7 Charakterisierung der Pflanzsubstrate

Vor Versuchsbeginn wurden alle sechs angemischten Pflanzsubstrate auf ihre Nährstoffgehalte (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Gehalte) sowie physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter untersucht. Für die Substratuntersuchung am Versuchsende wurde für jede Pflanze pro Kontroll- und Testsubstrat eine Mischprobe genommen, die auf die gleichen Parameter wie zu Versuchsbeginn analysiert wurde. Die entsprechenden Analysenwerte vor Versuchsbeginn sind den Tabellen 3.6, 3.7 und 3.8 zu entnehmen.

Tab. 3.6: Physikalische, physikalisch-chemische, chemische Parameter der angemischten Pflanzsubstrate mit und ohne Biokohle vor Versuchsbeginn

Pflanzsubstrat	Testvariante	TS %	WG %	pH	SG mg/100g FS	SG g/l	WHK _{max} Vol%	pf _{frisch} g/l	pf _{trocken} g/l	org.Sub. %TS	C _{org} %TS	C %	N %	C/N
1. Pflanzsubstrat für <i>Digitalis trojana</i>	Kontrolle	83,6	16,4	6,0	81	0,7	59,5	896	749	13,5	7,8	6,9	0,3	20
	F0	84,4	15,6	6,6	140	1,6	63,0	1127	951	10,3	6,0	5,5	0,3	16
	F15	82,1	17,9	6,8	81	0,8	66,1	1040	854	14,9	8,7	10,2	0,2	43
	IR0	85,9	14,1	6,7	120	1,3	61,6	1098	929	9,3	5,4	4,7	0,3	18
	IR15	82,7	17,3	6,9	87	1,0	62,5	1082	908	11,6	6,7	7,2	0,2	37
2. Pflanzsubstrat für <i>Carica papaya</i>	Kontrolle	64,0	36,0	6,2	46	0,3	68,4	560	358	41,3	23,9	26,3	0,4	61
	F0	75,1	24,9	6,2	164	1,2	73,9	719	540	18,8	10,9	9,8	0,6	16
	F15	66,0	34,0	6,5	81	0,5	58,6	641	423	27,2	15,8	18,8	0,5	37
	IR0	81,3	18,7	6,3	124	0,8	51,5	671	546	17,6	10,2	9,1	0,6	15
	IR15	69,7	30,3	6,5	90	0,6	54,3	610	425	27,8	16,1	18,6	0,6	32
3. Pflanzsubstrat für <i>Salix "Tordis"</i>	Kontrolle	57,3	42,7	5,6	140	0,7	76,0	491	281	26,8	46,1	22,7	1,2	19
	F0	64,2	35,8	5,2	224	1,2	68,9	531	341	34,9	20,2	20,5	1,0	21
	F15	66,1	33,9	5,4	81	0,4	68,9	460	304	42,2	24,5	29,6	0,9	33
	IR0	63,9	36,1	5,1	167	0,9	76,5	541	345	34,9	20,3	20,6	0,9	23
	IR15	50,9	49,1	5,2	93	0,5	78,7	505	257	45	26,1	31,3	0,9	35
4. Pflanzsubstrat für <i>Silphium perfoliatum</i>	Kontrolle	91,6	8,4	6,2	69	0,8	52,5	1120	1026	9,2	5,3	4,3	0,4	12
	F0	94,5	5,5	6,6	88	1,0	13,9	1136	1073	5,6	3,3	2,1	0,1	14
	F15	91,9	8,1	6,9	50	0,6	51,5	1119	1028	8,6	5,0	5,5	0,1	47
	IR0	89,2	10,8	6,5	74	0,8	51,6	1093	985	6,6	3,8	2,6	0,1	22
	IR15	90,1	9,9	6,8	60	0,6	48,7	1057	943	8,6	5,0	4,9	0,2	24
5. Pflanzsubstrat für <i>Aglaonema commutatum</i>	Kontrolle	15,8	84,2	6,4	410	3,1	55,8	752	633	15,7	9,1	8,0	0,6	13
	F0	11,6	88,4	6,5	371	3,1	45,2	856	751	13,3	7,7	7,1	0,6	13
	F15	22,6	77,4	6,6	753	6,4	63,1	850	662	16,7	9,7	11,3	0,5	23
	IR0	17,9	82,2	6,2	794	7,1	61,7	900	739	10,8	6,3	6,0	0,6	11
	IR15	19,7	80,3	6,8	735	6,0	77,4	819	657	17,3	10,0	11,3	0,5	22
6. Pflanzsubstrat für <i>Ruschia rigida</i>	Kontrolle	5,8	94,2	6,1	375	5,3	49,5	1410	1328	6,1	3,5	3,2	0,3	12
	F0	7,6	92,4	6,0	450	6,3	50,8	1396	1289	5,4	3,1	2,5	0,3	10
	F15	9,6	90,4	6,3	398	5,6	51,5	1392	1258	7,9	4,6	5,3	0,3	20
	IR0	6,1	93,9	6,1	497	7,0	47,2	1409	1323	5,8	3,3	2,7	0,3	10
	IR15	5,3	94,8	6,6	357	4,8	46,4	1329	1260	7,0	4,0	4,1	0,2	18

TS-Trockensubstanz; WG-Wassergehalt; SG-Salzgehalt; FS-Frischsubstanz; WHK_{max}- maximale Wasserhaltekapazität; pf-Rohdichte; org. Sub.-organische Substanz; C_{org}-organischer Kohlenstoff; C/N-Kohlenstoff-Stickstoffverhältnis

Tab. 3.7: Gesamtgehalte der Hauptnähr- und Mikronährelemente vor Versuchsbeginn

Pflanzsubstrat	Testvariante	Cu mg/kg	Fe g/kg	K g/kg	Mg g/kg	Mn g/kg	Na g/kg	Ni mg/kg	P g/kg	S g/kg	Zn mg/kg
1. Pflanzsubstrat für <i>Digitalis trojana</i> <i>Geranium maderense</i> <i>Nerum oleander</i>	Kontrolle	25	20,7	9,7	7,8	0,5	6,7	31	1,2	0,5	99
	F0	20	18,5	8,4	6,7	0,4	5,3	24	1,1	0,6	76
	F15	20	20,7	9,8	8,1	0,5	6,1	25	1,0	0,4	77
	IR0	25	20,9	9,9	8,2	0,5	6,6	26	1,1	0,5	78
	IR15	23	24,5	10,2	10,6	0,5	6,1	31	1,2	0,4	70
2. Pflanzsubstrat für <i>Carica papaya</i> <i>Coffea arabica</i>	Kontrolle	8	19,1	11,7	4,3	0,6	9,8	28	0,3	1,9	78
	F0	16	18,5	12,8	4,4	0,7	9,1	20	0,9	0,8	101
	F15	10	13,6	15,0	2,5	0,9	15,6	12	0,7	0,7	125
	IR0	15	18,9	11,9	4,4	0,8	10,3	17	0,9	0,7	104
	IR15	18	15,9	13,3	3,3	0,8	12,2	15	0,8	0,7	114
3. Pflanzsubstrat für <i>Salix "Tordis"</i> <i>Populus "Max 1"</i> <i>Paulownia tomentosa</i>	Kontrolle	38	8,1	5,0	2,1	0,2	0,6	14	1,4	1,2	199
	F0	18	9,3	5,9	3,1	0,3	1,2	17	1,2	1,1	99
	F15	16	9,1	4,9	2,6	0,3	0,8	20	0,9	0,9	117
	IR0	17	9,0	5,1	2,5	0,2	0,8	17	1,1	1,0	100
	IR15	16	8,1	4,7	2,3	0,3	0,9	17	1,0	0,9	104
4. Pflanzsubstrat für <i>Silphium perfoliatum</i>	Kontrolle	20	15,3	9,9	5,1	0,6	8,7	18	0,7	0,5	87
	F0	16	16,9	8,4	6,0	0,5	6,9	23	0,8	0,4	54
	F15	16	16,4	8,1	5,6	0,5	6,9	21	0,7	0,3	54
	IR0	16	16,1	8,3	6,0	0,4	6,2	27	0,8	0,4	57
	IR15	12	17,1	9,4	5,9	0,5	7,3	19	0,6	0,3	59
5. Pflanzsubstrat für <i>Aglaonema commutatum</i>	Kontrolle	26	4,8	3,8	1,8	0,2	0,6	13	1,1	1,6	124
	F0	20	5,3	4,0	2,0	0,2	0,8	12	0,9	1,2	88
	F15	17	5,1	3,5	1,5	0,2	0,8	20	0,6	1,1	84
	IR0	19	6,5	3,6	2,3	0,2	1,2	13	0,8	1,1	86
	IR15	17	6,0	3,5	2,3	0,3	1,4	13	0,7	1,1	83
6. Pflanzsubstrat für <i>Ruschia rigida</i>	Kontrolle	14	4,1	2,4	1,2	0,1	0,5	20	0,5	0,6	69
	F0	14	5,4	2,8	1,7	0,1	0,9	17	0,5	0,6	64
	F15	13	5,2	2,4	1,5	0,1	0,9	11	0,4	0,6	82
	IR0	18	5,2	2,7	1,7	0,2	1,1	18	0,5	0,7	117
	IR15	16	5,4	2,5	1,5	0,1	1,0	39	0,4	0,5	84

Tab. 3.8: Pflanzenverfügbare Gehalte der Hauptnähr- und Mikronährelemente vor Versuchsbeginn

Pflanzsubstrat	Testvariante	Cu mg/kg	Fe g/kg	K g/kg	Mg g/kg	Mn g/kg	Na g/kg	Ni mg/kg	P g/kg	S mg/kg	Zn mg/kg
1. Pflanzsubstrat für <i>Digitalis trojana</i> <i>Geranium maderense</i> <i>Nerum oleander</i>	Kontrolle	2,63	0,10	0,67	0,19	0,03	0,08	0,13	0,12	0,03	32,63
	F0	1,99	0,11	1,09	0,22	0,02	0,06	0,17	0,12	0,04	18,22
	F15	1,54	0,08	0,85	0,17	0,02	0,05	0,14	0,06	0,02	14,88
	IR0	1,99	0,09	1,17	0,22	0,03	0,06	0,17	0,12	0,04	19,94
	IR15	1,52	0,08	0,90	0,18	0,02	0,06	0,14	0,09	0,03	15,74
2. Pflanzsubstrat für <i>Carica papaya</i> <i>Coffea arabica</i>	Kontrolle	1,57	0,17	0,21	0,27	0,04	0,08	0,96	0,00	0,08	8,91
	F0	2,29	0,12	1,25	0,27	0,04	0,08	0,19	0,13	0,05	23,29
	F15	2,15	0,10	1,07	0,24	0,03	0,08	0,19	0,07	0,03	23,28
	IR0	2,10	0,10	1,08	0,24	0,04	0,07	0,17	0,13	0,04	21,20
	IR15	1,73	0,09	1,06	0,23	0,04	0,08	0,17	0,09	0,03	21,28
3. Pflanzsubstrat für "Tordis" "Max 1" <i>Salix</i> <i>Populus</i> <i>Paulownia tomentosa</i>	Kontrolle	3,80	0,13	1,73	0,25	0,03	0,08	0,16	0,18	0,07	53,48
	F0	2,73	0,19	1,25	0,26	0,03	0,06	0,22	0,19	0,06	23,54
	F15	2,33	0,18	1,21	0,23	0,04	0,06	0,25	0,14	0,04	25,13
	IR0	2,65	0,17	1,33	0,26	0,04	0,05	0,24	0,21	0,05	25,39
	IR15	2,11	0,16	1,04	0,22	0,04	0,05	0,21	0,15	0,03	21,05
4. Pflanzsubstrat für <i>Silphium perfoliatum</i>	Kontrolle	2,07	0,08	0,53	0,12	0,02	0,06	0,15	0,09	0,03	19,73
	F0	1,69	0,10	0,77	0,16	0,02	0,06	0,17	0,09	0,03	14,14
	F15	1,16	0,08	0,49	0,11	0,02	0,05	0,15	0,05	0,01	9,77
	IR0	1,26	0,07	0,58	0,13	0,02	0,05	0,16	0,07	0,02	11,80
	IR15	1,64	0,08	0,60	0,14	0,02	0,05	0,17	0,09	0,02	13,38
5. Pflanzsubstrat für <i>Aglaonema commutatum</i>	Kontrolle	3,04	0,09	1,73	0,23	0,02	0,07	0,19	0,15	0,06	38,66
	F0	2,72	0,11	1,76	0,27	0,04	0,07	0,24	0,15	0,08	25,24
	F15	1,77	0,10	1,00	0,18	0,02	0,05	0,19	0,08	0,05	16,63
	IR0	2,58	0,10	1,41	0,24	0,03	0,07	0,21	0,17	0,07	22,56
	IR15	1,87	0,09	1,10	0,20	0,03	0,07	0,19	0,11	0,05	19,08
6. Pflanzsubstrat für <i>Ruschia rigida</i>	Kontrolle	1,73	0,08	0,87	0,19	0,02	0,04	0,16	0,08	0,04	20,32
	F0	1,85	0,08	0,83	0,18	0,03	0,03	0,18	0,10	0,04	15,16
	F15	1,42	0,05	0,66	0,15	0,02	0,03	0,14	0,05	0,03	13,28
	IR0	1,81	0,07	0,73	0,17	0,02	0,03	0,18	0,09	0,04	15,31
	IR15	1,39	0,06	0,73	0,17	0,02	0,04	0,16	0,07	0,04	13,37

3.1.8 Saatgut, Anzucht und Kultivierung

Alle verwendeten Testpflanzen wurden aus Samen oder Stecklingen, die aus dem BG stammten, in einem Anzuchtsubstrat bestehend aus einer 1:1 Mischung aus Torf und Sand angezogen. Um eine möglichst große Spannweite unterschiedlichster Pflanzen abzudecken, wurden elf Testpflanzen aus drei unterschiedlichen Klimazonen (Tropen, Subtropen und gemäßigte Klimazone) ausgewählt (s. Tabelle 3.9).

Tab. 3.9: Testpflanzen und Versuchszeiträume für die Topfversuche mit kompostiertem und fermentiertem Material mit und ohne Biokohlezugabe

Testpflanze	Pflanzenfamilie	Klimazone	Versuchszeitraum
<i>Carica papaya</i> (Papaya)	Caricaceae	Tropen	06.06.2012 – 07.05.2013
<i>Coffea arabica</i> (Kaffeestrauch)	Rubiaceae	Tropen	02.10.2012 – 13.11.2014
<i>Aglaonema commutatum</i> (Kolbenfaden)	Araceae	Tropen	04.01.2013 – 17.11.2014
<i>Digitalis trojana</i> (Fingerhut)	Scrophulariaceae	Subtropen	13.06.2012 – 14.11.2013
<i>Geranium maderense</i> (Storchschnabel)	Geraniaceae	Subtropen	08.06.2012 – 25.11.2014
<i>Nerium oleander</i> (Oleander)	Apocynaceae	Subtropen	08.01.2013 – 24.04.2014
<i>Ruschia rigida</i> (Mittagsblume)	Aizoaceae	Subtropen	28.12.2012 – 03.02.2014
<i>Silphium perfoliatum</i> (Durchwachsende Silphie)	Asteraceae	Gemäßigt	20.06.2012 – 02.10.2014
<i>Salix</i> "Tordis" (Weidenhybride)	Salicaceae	Gemäßigt	10.07.2012 – 11.09.2013
<i>Populus</i> "Max 1" (Pappelhybride)	Salicaceae	Gemäßigt	29.05.2012 – 15.12.2014
<i>Paulownia tomentosa</i> (Blauglockenbaum)	Paulowniaceae	Gemäßigt	31.05.2012 – 11.09.2014

Es wurden Pflanzgefäße aus Plastik, die individuell an die jeweilige Größe der Versuchspflanzen angepasst waren, verwendet. Dies entspricht der gängigen Pflegepraxis der Gärtner des Botanischen Gartens und ermöglicht den Pflanzen eine optimale Entwicklung ohne eine erhöhte Gefahr von Staunässe oder Überdüngung. Die Düngemaßnahmen wurden nach gärtnerischer Praxis den jeweiligen Pflanzen, Pflanzenentwicklung und Substratmischungen angepasst. Alle Pflanzen wurden beim Umtopfen mit einer organischen Grunddüngung mit Hornspäne (10 g pro Liter Substrat) ergänzt. Alle zu untersuchenden Testsubstrate erhielten eine zusätzlich angepasste Düngung mit Harnstoff (0,55 g / 1 l Wasser). Im Gegensatz dazu wurden die Kontrollvarianten mit einem Volldünger (Wuxal 3 ml / 1 l Wasser oder Flory 3 1,6 g / 1 l Wasser) gedüngt. Die entsprechenden Düngergaben der einzelnen Pflanzen sind in der Tabelle 3.10 aufgelistet.

Die Pflanzen der tropischen und subtropischen Klimazone wurden unter kontrollierten Gewächshausbedingungen kultiviert, Pflanzen der gemäßigten Klimazone standen im Freiland und waren den jeweiligen Witterungsbedingungen ausgesetzt. Die Wasserversorgung wurde dem jeweiligen Pflanzenbedarf angepasst und erfolgte nach gärtnerischer Praxis.

Tab. 3.10: Düngergaben der einzelnen Testpflanzen im Topfversuch für die Kontroll- und Testsubstrate

	Anzahl der Düngergaben			
	Wuxal	Flory3	Harnstoff	Hornspäne
<i>Carica papaya</i>				
Kontrolle	6	2	4	2
Testsubstrate	0	0	4	2
<i>Coffea arabica</i>				
Kontrolle	3	3	6	3
Testsubstrate	0	0	6	3
<i>Aglaonema commutatum</i>				
Kontrolle	3	0	3	1
Testsubstrate	0	0	3	1
<i>Geranium maderense</i>				
Kontrolle	4	0	3	3
Testsubstrate	0	0	7	3
<i>Nerium oleander</i>				
Kontrolle	3	0	0	1
Testsubstrate	0	0	3	1
<i>Digitalis trojana</i>				
Kontrolle	0	0	2	1
Testsubstrate	0	0	2	1
<i>Ruschia rigida</i>				
Kontrolle	0	0	0	2
Testsubstrate	0	0	0	2
<i>Silphium perfoliatum</i>				
Kontrolle	2	0	2	1
Testsubstrate	0	0	4	1
<i>Salix "Tordis"/</i>				
Kontrolle	0	0	1	2
Testsubstrate	0	0	1	2
<i>Populus "Max 1"</i>				
Kontrolle	0	0	1	2
Testsubstrate	0	0	1	2
<i>Paulownia tomentosa</i>				
Kontrolle	0	0	1	2
Testsubstrate	0	0	1	2

Wuxal und Flory 3 sind Volldünger

3.1.9 Pflanzenparameter zur Bestimmung der Wachstumsleistung

Von allen Pflanzen wurden in drei- bis vierwöchigem Abstand die Pflanzenhöhe bzw. -breite und die Blattanzahl bestimmt. Des Weiteren wurden bei einigen Pflanzen Knospen- und Blütenanzahl sowie bei den Gehölzen das Holzgewicht erhoben. Die Bestimmung der oberirdischen Biomasse erfolgte für alle krautigen Pflanzen am Versuchsende. Die untersuchten Pflanzenparameter werden in der vorliegenden Arbeit wie folgt abgekürzt: H – Pflanzenhöhe, BA – Blattanzahl, oBM – oberirdische Biomasse und HG – Holzgewicht.

3.2 Feldversuche zur ertragssteigernden Wirkung von Biokohlekompost auf landwirtschaftlich genutzten Böden in der Republik Ghana

3.2.1 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Allgemeine Landesdaten

Die Republik Ghana liegt im tropischen Westafrika dessen geographische Lage mit 4° 45' bis 11° 10' nördlicher Breite sowie mit 3° 15' West bis 1° 12' Ost angegeben wird. Im Osten grenzt Ghana an Togo, im Westen an die Elfenbeinküste, im Norden an Burkina Faso und im Süden am Golf von Guinea⁴. Ghana wird vegetationsgemäß der Zone der Savannen und klimatisch der Zone des Tropischen Wechselklimas zugeordnet. Das Tropische Wechselklima ist gekennzeichnet durch eine Regenzeit im Sommer und einer Trockenzeit im Winter. Landschaftlich besteht Ghana größtenteils aus recht ebenem Tiefland.

Ghana ist ein ausgeprägtes Agrarland in dem ein Großteil der Bevölkerung in der Landwirtschaft im Rahmen von Subsistenzwirtschaft, d.h. als Selbstversorger tätig ist.

Agrargeographische Aspekte

Die forschungsrelevanten Feldversuche wurden in der nördlichen Region (Northern), der größten Region Ghanas durchgeführt (vgl. Abb. 3.4).



Abb. 3.4: Thematische Karte mit markiertem Untersuchungsgebiet und Aufteilung einzelner Regionen (Quelle: <https://www.cia.gov/library/publications/cia-mapspublications/Ghana.html>)

⁴ Ist ein Teil des Atlantischen Ozeans, der von den Küsten Westafrikas im Norden und Osten begrenzt wird

Diese Region umfasst eine Fläche von 70383 km², die fast ein Drittel der gesamten Landesfläche entspricht und liegt in der agrarökologischen Zone⁵ Guinea Savanne (vgl. Abb. 3.5).

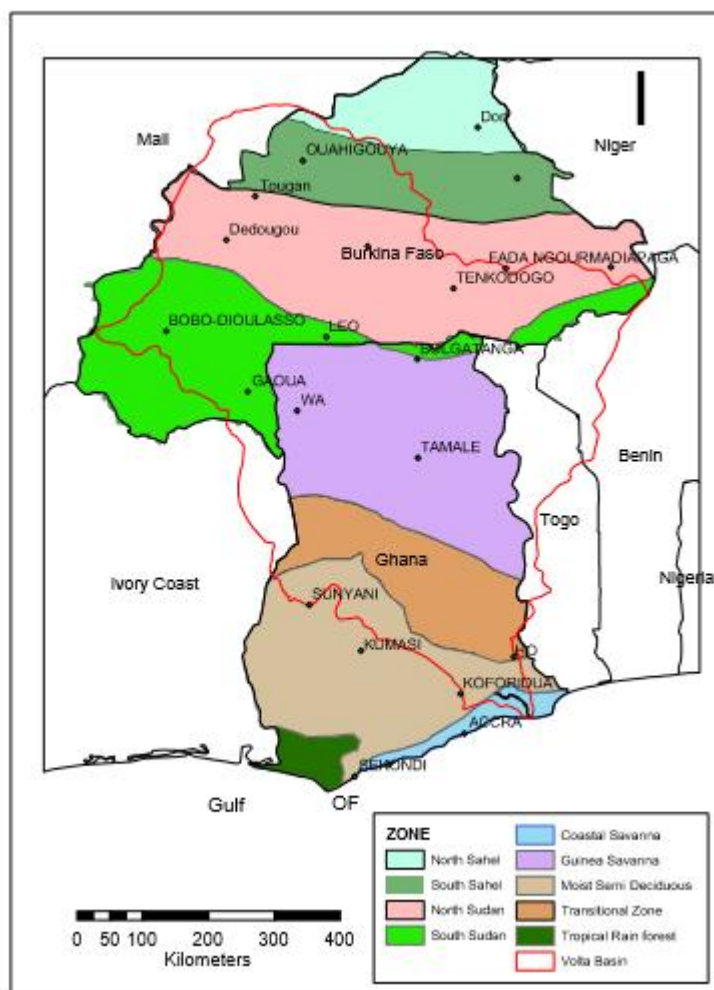


Abb. 3.5: Agrarökologische Zonen von Ghana (Quelle: (BARRY ET AL. 2005))

Nord- und Mittelghana wird von dem riesigen Stromgebiet des Volta durchzogen und ist infolge von Auswaschungen und Erosion nicht sehr fruchtbar. Die Vegetation besteht überwiegend aus Grassland, das von Savanne mit lockerem Bestand an trockenresistenten Bäumen wie z.B. dem Baobab *Adansonia digitata* oder Karitébaum (Sheabutterbaum) *Vitellaria paradoxa* gelegentlich unterbrochen wird.

Im Vergleich zu den südlich anschließenden Regionen ist die nördliche Region, in der das Untersuchungsgebiet lag, deutlich trockener. Dieses Gebiet steht unter tropisch kontinentalem Klimaeinfluss mit nur einer Regenzeit und ist von einer sehr ungleichmäßigen Niederschlagsverteilung gekennzeichnet. Zwischen Mai und September liegt die Regenzeit

⁵ Geographisch begrenztes Gebiet mit ähnlichen klimatischen und ökologischen Eigenschaften, das dadurch für bestimmte Landnutzungen geeignet ist. (Quelle: <http://www.weltagrarbericht.de/glossar/glossar.html>)

mit durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmengen von 900 bis 1100 mm (BARRY ET AL. 2005), (vgl. Abb. 3.6).

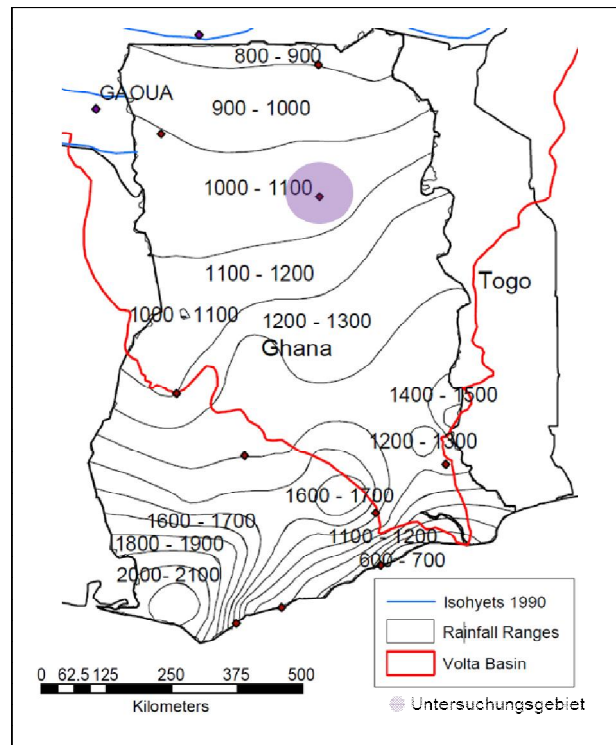


Abb. 3.6: Räumliche durchschnittliche Niederschlagsverteilung [mm] im Volta Becken und im markierten Untersuchungsgebiet (Quelle: verändert nach (BARRY ET AL. 2005))

Im Oktober/November folgt die Trockenzeit, die bis in den März/April reicht. Die durchschnittliche Evapotranspirationsrate liegt mit 1800 mm deutlich höher als die Niederschläge (BARRY ET AL. 2005), (vgl. Abb.3.7). Die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt für das Untersuchungsgebiet 28°C (vgl. Abb.3.8).

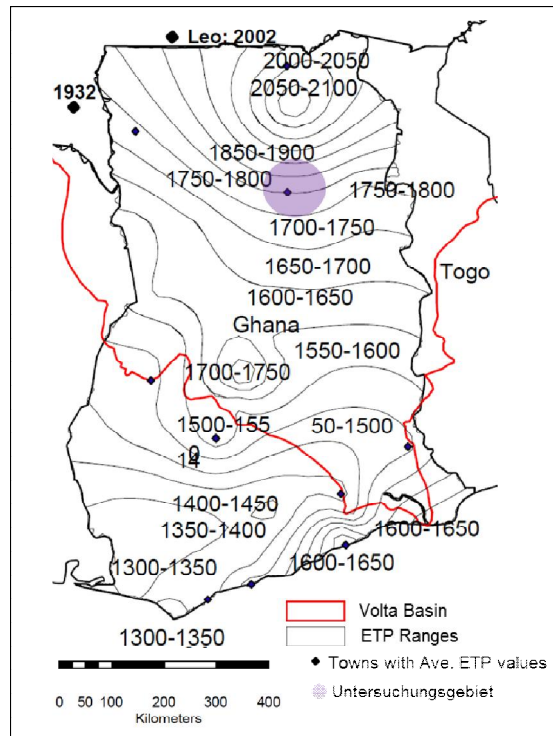


Abb. 3.7: Räumliche durchschnittliche Verteilung der Evapotranspiration [mm] im Volta Becken und im markiertem Untersuchungsgebiet (Quelle: verändert nach (BARRY ET AL. 2005))

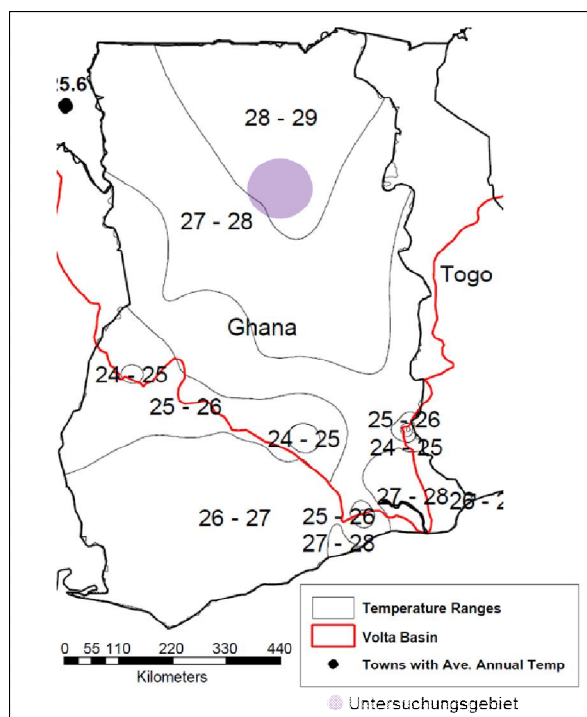


Abb. 3.8: Räumliche durchschnittliche Temperaturverteilung [°C] im Volta Becken und markiertem Untersuchungs-gebiet (Quelle: verändert nach (BARRY ET AL. 2005))

Bodenbeschaffenheit und landwirtschaftliches Potenzial

Die Böden in der nördlichen Region sind nährstoffarm, weisen einen sehr geringen Gehalt an organischer Substanz auf und sind starken Erosionsprozessen ausgesetzt. Starke Regenfälle und lange Trockenheit wirken sich problematisch auf die Bodenfruchtbarkeit aus. Durch die intensive Austrocknung kann es teilweise zur Ausbildung von harten Schichten nahe der Oberfläche kommen, die die Kultivierung der Böden erschweren.

3.2.2 Vorversuche zur Bestimmung der Zusammensetzung der Biokohlekompostmischung

Zur Bestimmung der Zusammensetzung der in den nachfolgenden Feldversuchen angewendeten Biokohlekompostmischung wurden im Jahr 2011 Vorversuche auf zwei Versuchsfeldern in der nördlichen Region Ghanas in den Orten Gbilugu und Kukuo Yepalsi durchgeführt. Die Versuchsfelder mit jeweils einer Größe von 787 m² wurden in 16 gleich große Parzellen eingeteilt, wobei zwei Parzellen als Kontrollfläche dienten. Auf den Testparzellen wurden verschiedene organische Bodenverbesserungsmittel, wie z.B. Kompost, Hühnermist und Biokohle in Einzel- und Kombinationsanwendung mit unterschiedlichen Aufbringungsmengen sowie unterschiedlichen Mischungsanteilen getestet (vgl. Abb. 3.9). Als Versuchspflanzen kamen Erdnuss (engl. Groundnut) (*Arachis hypogaea*) und Rispenhirse (engl. Guinea corn (sorghum)) (*Sorghum bicolor*) zum Einsatz, die in der letzten Juniwoche 2011 ausgesät wurden. Die Ernte der Erdnüsse erfolgte im Oktober 2011, die der Rispenhirse im November 2011.

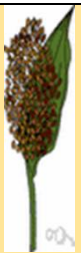

A1: BK 1 kg/m ²	A2: Ko 1 kg/m ²	A3: Ko 0,5 kg/m ² BK 1 kg/m ²	A4: Ko 0,3 kg/m ² BK 0,3 kg/m ² Hm 0,3 kg/m ²	 Rispenhirse
A5: Ko 0,5 kg/m ² Hm 0,5 kg/m ²	A6: Hm 1 kg/m ²	A7: BK 1 kg/m ² Ko 0,25 kg/m ² Hm 0,25 kg/m ²	A8: Kontrolle	
B1: BK 1 kg/m ²	B2: Ko 1 kg/m ²	B3: Ko 0,5 kg/m ² BK 1 kg/m ²	B4: Ko 0,3 kg/m ² BK 0,3 kg/m ² Hm 0,3 kg/m ²	 Erdnüsse
B5: Ko 0,5 kg/m ² Hm 0,5 kg/m ²	B6: Hm 1 kg/m ²	B7: BK 1 kg/m ² Ko 0,25 kg/m ² Hm 0,25 kg/m ²	B8: Kontrolle	

Abb. 3.9: Übersicht der Parzellen (A1-A8 und B1-B8) mit applizierten Mengen der Bodenverbesserungsmittel auf den Versuchsfeldern und den entsprechenden Anbaukulturen (BK-Biokohle, Ko-Kompost, Hm-Hühnermist)

Am Standort Gbilugu (GB) war der Boden ein stark lehmiger Sandboden mit einem pH von 5,8 und einem mittleren Humusgehalt von 2,3 %. In Kukuo Yepalsi (KY) war der Boden ein mittel lehmiger Sandboden mit einem pH von 4,6 und einem mittleren Humusgehalt von 1,3 %.

Um Aussagen über die pflanzenbaulichen Wirkungen der einzelnen Bodenverbesserungsmittel zu treffen, wurden von allen Parzellen aus einem definierten Bereich, der sogenannten Kernzone (3 m x 3 m), die Erträge ermittelt und miteinander verglichen sowie ausgewählte Pflanzenparameter erhoben. Den Erträgen wurden Rangpunkte vergeben, um die Bodenverbesserungsmittel zu identifizieren, die den höchsten Ernteertrag erwarten lassen (Abb. 3.10). Die Bewertung erfolgte aufgrund von vier zusammengezählten Ranglistenpunkten für die zwei Anbaukulturen und den zwei Versuchsflächen. Den Tabellen 3.11 und 3.12 können die einzelnen Rangpunkte der beiden Versuchsflächen entnommen werden.

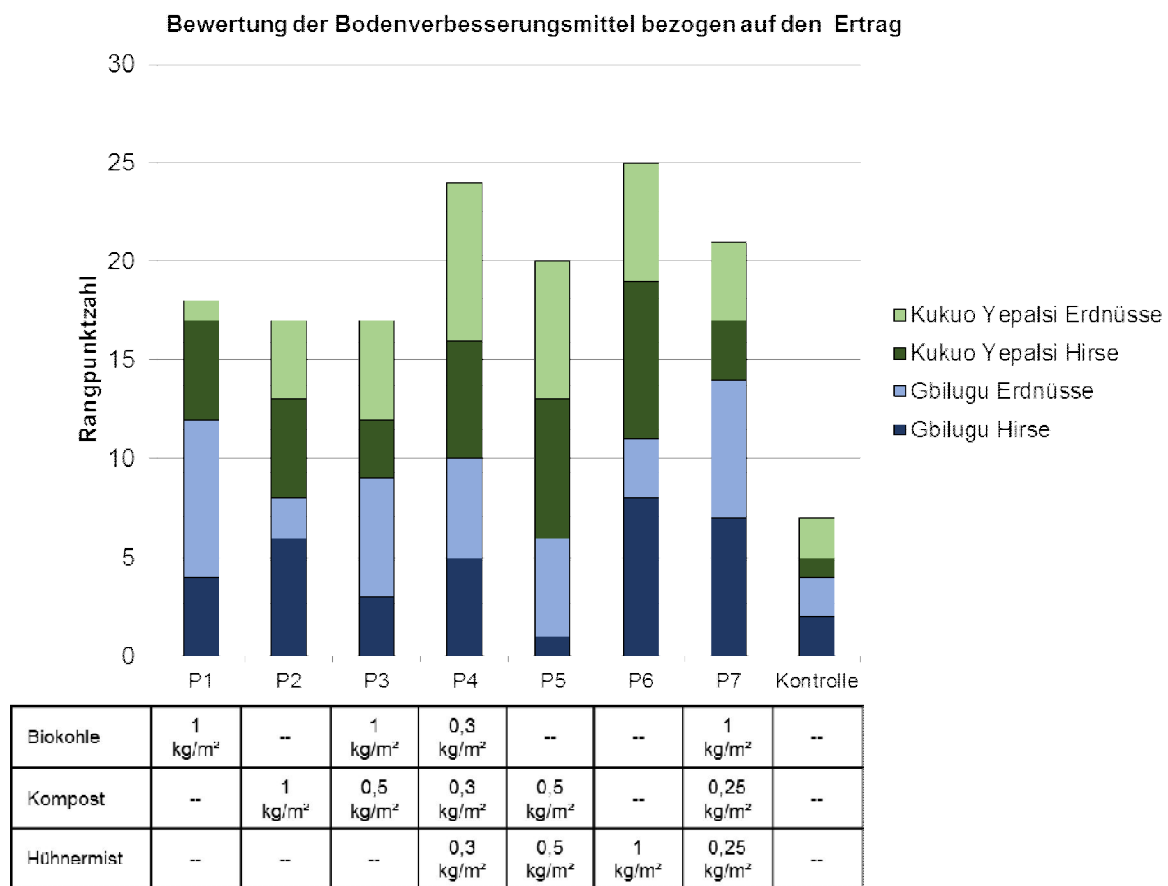


Abb. 3.10: Ranglistenpunkteverteilung für die einzelnen Bodenverbesserungsmittel bezogen auf den Ernteertrag (P1-P7 Untersuchungspartellen mit unterschiedlichen Einzel-oder Mischapplikationen)

Tab. 3.11: Rangfolge der Ernteerträge der Testparzellen (P 1 - P 8) beider Versuchsflächen Gbilugu (GB) und Kukuio Yepalsi (KY); farbige Darstellung der ersten drei Ränge

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8 Kontrolle
GB Hirse	5	3	6	4	8	1	2	7
GB Erdnüsse	1	7	3	4	4	6	2	7
KY Hirse	4	4	6	3	2	1	6	8
KY Erdnüsse	8	5	4	1	2	3	5	7

Tab. 3.12: Punkteverteilung für die einzelnen Ränge der Testparzellen (P 1 - P 8) beider Versuchsflächen Gbilugu (GB) und Kukuio Yepalsi (KY); farbige Darstellung der Ranghöchsten

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8 Kontrolle
GB Hirse	4	6	3	5	1	8	7	2
GB Erdnüsse	8	2	6	5	5	3	7	2
KY Hirse	5	5	3	6	7	8	3	1
KY Erdnüsse	1	4	5	8	7	6	4	2
Summe	18	17	17	24	20	25	21	7
Rang	5	6	6	2	4	1	3	8

- beste Ernteerträge / bestes Bodenverbesserungsmittel
- zweitbeste Ernteerträge / zweitbestes Bodenverbesserungsmittel
- drittbeste Ernteerträge / drittbestes Bodenverbesserungsmittel

Aus den Ergebnissen dieses Vorversuches wurde für die nachfolgenden Feldversuche in 2012 und 2013 eine Biokohlekompostmischung bestimmt, die sich aus 25 Vol. % Kompost, 25 Vol. % Hühnermist und 50 Vol. % Biokohle zusammensetzt.

3.2.3 Herstellung der Biokohle/Holz Kohle

Die in Ghana weit verbreitete Holzkohleherstellung erfolgt in traditionellen Erdmeilern nach der sogenannten „earth mound method“ (Erdhaufenmethode) (vgl. Abb. 3.11). Es werden verschieden große Holzstücke zu einem Haufen geschichtet, der von unten her angezündet und anschließend mit Erde bedeckt wird. Der Verkohlungsprozess dauert mehrere Tage und wird von den Köhlern oder Köhlerfrauen kontrolliert. Beim Herstellungsprozess fallen bis zu 20-30 % Kohlestaub und kleinere Holzkohlebruchstücke an, die größtenteils keine weitere Verwendung mehr finden und somit ein Abfallprodukt sind (vgl. Abb. 3.12). Dieser Reststoff wurde für die Vorversuche und für die Herstellung des Biokohlekompostes verwendet.



Abb. 3.11: Traditionelle Holzkohleherstellung im Erdmeiler (Foto: S.Schori)



Abb. 3.12: Abfallprodukt aus der Holzkohleherstellung im Erdmeiler (Foto: S.Schori)

3.2.4 Herstellung des Biokohlekompostes

Die Herstellung des Biokohlekompostes, der sich aus 25 Vol % kompostierten organischen Material, 25 Vol % Hühnermist und 50 Vol % Biokohle zusammensetzt, erfolgte mittels offener Mietenkompostierung im Frühjahr 2012. Es wurden ausschließlich regional anfallende organische Reststoffe, wie z.B. Markt- und Küchenabfälle, Abfallprodukte der Sheabutterproduktion, Abfallprodukte der Holzkohleherstellung, Niembaumblätter und Hühnermist aus den umliegenden Hühnerfarmen verwendet. Alle Materialien wurden zuvor zerkleinert, gut miteinander vermischt, zu Kompostmieten aufgeschichtet und mit Strohmatte gegen Austrocknung abgedeckt (Abb. 3.13). Die verwendete Biokohle wurde vor der Zugabe zum Kompostgemisch mit Wasser befeuchtet. Um eine gute aerobe

Kompostierung zu gewährleisten, wurden die Mieten mehrmals händisch gewendet und bei Bedarf befeuchtet. Nach einem achtwöchigen Kompostierprozess wurde der fertige Biokohlekompost in Säcke abgefüllt und bis zur Verwendung im Schatten gelagert (Abb. 3.14).



Abb. 3.13: mit Strohmatte abgedeckte Kompostmieten (Foto P. Billa)



Abb. 3.14: Abfüllen des fertigen Biokohlekompostes in Säcke (Foto P. Billa)

3.2.5 Feldversuche zur ertragssteigernden Wirkung von Biokohlekompost

Die ersten groß angelegten Feldversuche wurden im Jahr 2012 mit der im Vorversuch ermittelten Biokohlekompostmischung an vier unterschiedlichen Standorten (Gbilugu, Kukuo Yepalsi, Mogtandi, N'Banaayili) durchgeführt.

In Kooperation mit 20 lokalen Kleinbauern wurden die Versuchsflächen (jeweils 5000 m²) vorbereitet und mit dem Biokohlekompost in einer Aufbringungsmenge von 12,5 t ha⁻¹ appliziert und in den Boden eingehackt oder in Einzelfällen mit einem traditionellen Ochsenpflug eingearbeitet (vgl. Abb. 3.15). Die entsprechenden Kontrollflächen wurden nach gängiger landwirtschaftlicher Praxis bearbeitet, aber nicht gedüngt.



Abb. 3.15: Einarbeitung der Biokohlekompostmischung in den Boden nach zwei unterschiedlichen Methoden (Fotos P. Billa)

Eine Woche nach Applikation der Biokohlekompostmischung wurden auf den Ackerflächen hauptsächlich Mais, aber auch Sojabohnen, Bohnen und teilweise Rispenhirse angebaut. Ende Oktober / Anfang November erfolgte die Ernte mit entsprechender Datenaufnahme, um Aussagen bezüglich der Ertragsleistung zu machen.

3.2.6 Freilandbeprobung der Untersuchungsflächen

Zur Charakterisierung der untersuchten Böden nach physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Parametern sowie Bestimmung der Bodenart wurden alle vier Standorte mit einem Handbohrstock in einer Tiefe von 20 cm beprobt. Die Probenahme erfolgte nach Probenahmeverfahren gemäß VDLUFA Methodenbuch I, A 1.2.1. Pro Untersuchungsfläche wurden 16 Einzelproben, die sich an ein bestimmtes Feldbegehungsmuster orientierten (vgl. Abb. 3.16), zu einer Mischprobe vereint, homogenisiert und in verschließbaren Polyethylen-tüten bis zur Analyse gelagert.

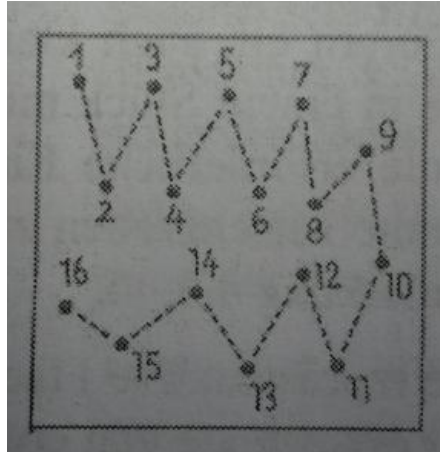


Abb. 3.16: Feldbegehungsmuster für die Bodenprobenahme der 16 Einzelproben (nach VDLUFA - Methodenbuch Bd I, A 1.2.1)

3.2.7 Datenerhebung ausgewählter Pflanzenparameter der Feldversuche

Ende Oktober / Anfang November in den Jahren 2012 und 2013 wurden die angebauten Nutzpflanzen geerntet. Für die Datenerhebung wurde pro Ackerfläche stichprobenartig eine Teilfläche, die sogenannte Kernzone, in der Größe von 2,5 m x 2,5 m abgesteckt. Innerhalb dieser Kernzone wurden folgende Parameter erfasst:

- Ø Bestimmen der Erträge der entsprechenden Anbaukulturen
- Ø Bestimmen spezifischer Pflanzenparameter wie z.B. Kolbengewicht (FM), Kolbenlänge und Korngewicht (TM) der Maispflanzen

3.2.8 Charakterisierung der Böden, des eingesetzten Biokohlekompostes und der Biokohle

Die Böden der Versuchsflächen wurden nach Bodenart charakterisiert. Die zugeordnete Bodenart der einzelnen Untersuchungsstandorte sowie die entsprechenden Sand-, Schluff- und Tonanteile sind der Tabelle 3.13 zu entnehmen.

Tab. 3.13: Bodenart der untersuchten Standorte

	Gbilugu	Kukuo Yepalsi	Mogtandi	N'Banaayili	Tamale
Sand %	55,2	63,9	56,1	68,8	59,9
Schluff %	30,8	28,2	33,5	23,6	30,7
Ton %	14,1	7,9	10,5	7,6	9,4
Bodenart	stark lehmiger Sand	mittel lehmiger Sand	mittel lehmiger Sand	schwach lehmiger Sand	mittel lehmiger Sand

Ausgewählte physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter wurden von der eingesetzten Biokohle, dem Biokohlekompost sowie den Böden erhoben und sind der Tabelle 3.14 zu entnehmen.

Tab. 3.14: Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter der Biokohle, des Biokohlekompostes und der untersuchten Böden (FM-Frischmasse, TM-Trockenmasse)

Parameter	Einheit	Biokohle	Biokohlekompost	Boden
pH-Wert (CaCl ₂)		7,1	6,9 – 7,04	4,6 – 5,9
Rohdichte	g/l FM		721 - 738	
Salzgehalt	g/l FM		4,7 – 5,9	
Organische Substanz	% TM		48 – 50	0,7 – 2,8
C _{total}	% TM	45,2	36 – 41	0,4 – 1,4
N _{total}	% TM	0,5	0,5 – 0,6	0,03 – 0,1
P _{total}	mg/kg TM	585	4386 - 9878	88 – 332
K _{total}	mg/kg TM	3675	3553 - 11009	1418 – 3541
P _{verfügbar}	mg/kg TM	163	247 - 1000	18 - 28
K _{verfügbar}	mg/kg TM	1050	4530 - 4850	25 – 62
KAK	cmol+/kg	41,8	37,5 - 38,5	1,85 – 6,34
Summe PAK	mg/kg TM	0,079 – 0,46		

KAK-Kationenaustauschkapazität; PAK-Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Die Bestimmung der PAK-Werte der eingesetzten Biokohle hat gezeigt, dass die ermittelten Werte den Anforderungen des Europäischen Pflanzenkohle Zertifikats (EBC) entsprachen und lagen unterhalb des festgelegten Grenzwertes für Premiumqualität.

3.3 Qualitätssicherung

Entsprechend dem Vorsorgeprinzip, dass einer Risiko- bzw. Gefahrenvorsorge dient, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit sichergestellt, dass alle verwendeten Materialien, die auf oder in Böden eingetragen wurden sowie ihre Anwendung in Kultursubstraten fanden, stets die definierten Qualitätsstandards in Form von Mindestanforderungen und Grenz- und Richtwerten nach Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV), Bioabfallverordnung (BioAbfV), Düngemittelverordnung (DüMV), Düngeverordnung (DüV) sowie Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK) und Europäischen Pflanzenkohlezertifikat (EBC) einhielten. Hierzu wurden die im Botanischen Garten Berlin anfallenden Ausgangsmaterialien für die Kompostierung und Fermentation sowie Biokohle, Biokohlekomposte als auch Biokohlesubstrate hinsichtlich festgelegter Kriterien vor der Anwendung überprüft. Die entsprechenden geltenden rechtlichen Bestimmungen gemäß DüMV (2012) und BioAbfV (2012) hinsichtlich etwaiger Schadstoffbelastungen und Ausbringungsmengen bzw. -beschränkungen sowie die Einhaltung der Anforderungen der BBodSchV (2012) wurden stets bei der Anwendung von Komposten und Kultursubstraten

beachtet. Alle verwendeten Materialien wurden im Hinblick auf die Gehalte an Schadstoffen als unbedenklich bewertet.

Um eine hohe Qualität der Analysenergebnisse sowie deren Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wurden sämtliche Untersuchungen nach standardisierten Methoden nationaler und internationaler Normen durchgeführt. Des Weiteren wurden Referenzmaterialien und Referenzproben für die Verfahrensanalytik verwendet.

3.4 Analytische Untersuchungsmethoden

Im folgenden Teil werden alle Untersuchungsmethoden, die in dieser Arbeit angewendet wurden, aufgelistet und kurz beschrieben.

3.4.1 Substratuntersuchungen

3.4.1.1 Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter

Das kompostierte und fermentierte pflanzliche Material mit und ohne Biokohle, die eingesetzte Biokohle sowie die gärtnerischen Kulturmedien wurden auf ihre physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Parameter untersucht. Die erhobenen Parameter mit den entsprechenden Bestimmungsmethoden sind in Tabelle 3.15 enthalten.

Tab. 3.15: Überblick der erhobenen physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Parameter der Substratuntersuchungen und den entsprechenden Bestimmungsmethoden

Untersuchungsparameter	Bestimmungsmethode	Kurzbeschreibung
Trockensubstanz [%]	VDLUFA Methodenbuch I, A 2.1.1	Berechnung durch die Bestimmung des Wassergehaltes/des Trockenrückstandes nach dem Trocknen bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz (mindestens 24 h)
Wassergehalt [%]	VDLUFA Methodenbuch I, A 2.1.1	Trocknen von 10 g Probenmaterial bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz (mindestens 24 h)
Rohdichte [g/l FM]	Methodenbuch BGK ⁶ , Kap. II A4	Messung des Gewichts und des Volumens einer Probe, nachdem sie in einem Meßzylinder 10 mal aus einer Höhe von 10 cm fallengelassen wurde
(WHK _{max}) ⁷ [Vol.-%]	Methodenbuch BGK, Kap. II A2	Gravimetrische Bestimmung der Wassermenge die bis zur vollen kapillaren Sättigung aufgenommen und gegen die Schwerkraft gehalten werden kann
pH (CaCl ₂) [-]	DIN EN 13037:2012-01 und Methodenbuch BGK, Kap. III. C1.1	Messung mittels pH-Elektrode (WTW SenTix [®] 51) im 0,01 molaren CaCl ₂ -Extrakt (Verhältnis Probe:CaCl ₂ = 1:10)
Salzgehalt [g/l FM]	VDLUFA ⁸ Methodenbuch I, A 13.4.1 und Methodenbuch BGK, Kap. III. C2.1	Messung mittels Leitfähigkeitsmesszelle (WTW TetraCon [®] 325) in einer Suspension aus Probe und vollentsalztem Wasser im Verhältnis 1:10
KAK _{eff} ⁹ [cmol/kg]	DIN EN ISO ¹⁰ 11260:2011-09	Bestimmung der Summe der austauschbaren Kationen, die an negativen Bindungsplätzen der Austauscher gebunden sind, durch Bariumchlorid-lösung

⁶ BGK - Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V

⁷ WHK_{max} – maximale Wasserhaltekapazität

⁸ VDLUFA - Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.

⁹ KAK_{eff} – effektive Kationenaustauschkapazität

¹⁰ DIN EN ISO – Standard nach europäischer und internationaler Norm

Organische Substanz (Glühverlust) [% TS]	Methodenbuch BGK, Kap. III B1.1	Bestimmung durch Glühverlust bei 550°C in einem Muffelofen (Heraeus Instruments, Thermo Scientific) bis zur Gewichtskonstanz
Gesamt-Kohlenstoff C _t [% TS]	DIN EN 15936:2012-11	Bestimmung in einem CN-Analysator (LECO TruspecCHN)
Gesamt-Stickstoff N _t [% TS]	VDLUFA Methodenbuch I, A 2.2.5	
C/N-Verhältnis [-]	Berechnung aus den Gesamtgehalten von Kohlenstoff und Stickstoff	
Gesamtgehalte Nährstoffe und Schwermetalle Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Zn [mg/kg TS]	DIN ISO 11466:1995-03 (Königswasser- oder Salpetersäureaufschluss)	Bestimmung im Königswasseraufschluss (Verhältnis HCl zu HNO ₃ 3:1) bzw. bei hohen Gehalten an Organik im Salpetersäureaufschluss (Verhältnis HCl zu HNO ₃ 1:3) mittels Mikrowellenaufschlussgerät und anschließende Messung mittels ICP-OES ¹¹ (Perkin Elmer Gerade OES Optima 2100 DV)
Lösliche (pflanzenverfügbare) Nährstoffe und Schwermetalle Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Zn [mg/l FM]	VDLUFA Methodenbuch I, A 13.1.1 (CAT-Extraktion)	Extraktion in einer CAT-Lösung ¹² (CaCl ₂ und DTPA ¹³) und anschließende Messung mittels ICP-OES
Löslicher (pflanzenverfüg.) Stickstoff N _{min} [mg/l]		(N _{min} ist die Summe aus NH ₄ -N und NO ₃ -N)
NO ₃ -N Gehalt (Nitrat-Stickstoff)	VDLUFA Methodenbuch I, A 6.1.4.1	Extraktion in einer 0,0125 molaren CaCl ₂ -Lösung und Messung mittels Perkin Elmer Lambda 1A UV-VIS Spektrometer bei 210 nm
NH ₄ -N Gehalt (Ammonium-Stickstoff)	Nach Kandeler und Gerber (1988) (SCHINNER ET AL. 1991)	Extraktion in einer 0,0125 molaren CaCl ₂ -Lösung; Zugabe von 2,5 ml Mischlösung bestehend aus 0,3 M Natronlauge, Nitroprussid-Salicylat-Lösung und dest. Wasser

¹¹ ICP-OES – (englisch: inductively coupled plasma optical emission spectrometry) Optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas

¹² CAT – Mischung aus Calciumchlorid und Diethylentriaminpentaessigsäure im Verhältnis 1:8

¹³ DTPA - Diethylentriaminpentaessigsäure

Material und Methoden

(zu gleichen Teilen) und anschließende Zugabe von 1 ml Dichlorisocyanursäure;
kolorimetrische Bestimmung bei 660 nm mittels Photometer

PAK16 ¹⁴ nach EPA ¹⁵ [mg/kg TS]**	DIN ISO 13877:2000-01 (Extraktionsmittel n-Hexan und Toluol; 4h bzw. 4h/36h Extraktion)	Extraktion am Rückfluss; Aliquot wird auf PAK mittels HPLC ¹⁶ analysiert (Ergebnisse wurden aus den Prüfberichten entnommen)
---	---	--

DIN = Deutsches Institut für Normung; ISO = International Organization for Standardization; EN = Europäische Norm; **Analytik im externen akkreditierten Labor

¹⁴ PAK16 - Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

¹⁵ EPA - Environmental Protection Agency (amerikanische Umweltschutzbehörde)

¹⁶ HPLC – Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (zur Identifizierung und Quantifizierung von Substanzen, geeignet auch für nicht flüchtige Substanzen)

3.4.1.2 Biologische Tests

Zur Überprüfung der Qualität und der Pflanzenverträglichkeit des kompostierten und fermentierten Materials mit und ohne Biokohle, um potenziell schädigende Wirkungen auf Pflanzen zu erkennen, wurden zwei Pflanzenverträglichkeitstests (Kressetest und Chinakohltest) durchgeführt. Darüber hinaus sollte die Aussage getroffen werden, ob das untersuchte Prüfsubstrat sowohl als Mischkomponente für Erden und Substrate als auch als Bodenverbesserungsmittel geeignet ist.

Kressetest mit *Lepidium sativum* (Methodenbuch BGK, Kapitel IV A4) zur Überprüfung von Komposten auf phytotoxisch wirkende gasförmige Substanzen

Das zu überprüfende Material wurde in verschließbare Weckgläser gefüllt und drei cm darüber wurde eine Hängevorrichtung angebracht auf der ein befeuchtetes Wattepad mit einer definierten Menge an Saatgut lag. Der Test wurde in der Klimakammer des Julius Kühn Instituts Berlin-Dahlem für 7 Tage bei 20 °C und einer Beleuchtungsdauer von 12 h mit einer Beleuchtungsstärke von 3000 Lux durchgeführt. Nach 7 Tagen wurde die gekeimte Kresse dicht über der Wurzel abgeschnitten und die Frischmasse bestimmt. Als Testkriterium galt, dass die Prüfsubstrate mindestens 80% der Frischmasse des Kontrollsubstrates EE0¹⁷ erzielen mussten.

Chinakohltest mit *Brassica rapa subsp. pekinensis* (Methodenbuch BGK, Kapitel IV A3) zur Bestimmung der Pflanzenverträglichkeit im Keimungstest

Das zu überprüfende Material wurde in 400 ml große Pflanztöpfe gefüllt und eine definierte Saatgutmenge wurde zur Keimung hinzugegeben. Analog zum Kressetest fand auch der Chinakohltest unter den gleichen kontrollierten Bedingungen statt. Nach 12 Tagen wurde dicht über der Oberfläche der Prüfsubstanz der Aufwuchs abgeschnitten und dessen Frischmasse bestimmt, wobei als Testkriterium galt, dass mindestens 90 % der Frischmasse der Kontrolle erreicht werden musste. Die Berechnung erfolgt anhand des Mittelwertes der oberirdischen Frischmasseerträge. Die Frischmasse der Prüfsubstanzen werden prozentual in Relation zur mittleren Frischmasse des Kontrollsubstrates (EE0) ausgedrückt.

$$FM(r)_{25/50\%} = [FM_{25/50\%} / FM_{EE0}] \times 100 [\%]$$

$FM(r)_{25/50\%}$ - relativer Ertrag der Varianten bezüglich des Kontrollsubstrates EE0 in [%]

$FM_{25/50\%}$ - mittlere Frischmasseerträge der Varianten in [g]

FM_{EE0} - mittlerer Frischmasseertrag des Kontrollsubstrates in [g]

¹⁷ EE0 – ist eine ungedüngte Einheitserde Typ 0, die sich aus 70 % Hochmoortorf und 30 % Ton zusammensetzt, wird aufgekalkt, so dass der pH zwischen 5,5 und 6,5 liegt

Beide Tests wurden für die untersuchten Materialien bestanden. Die entsprechenden Werte sind der Tabelle 3.16 zu entnehmen. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Prüfsubstrat hinsichtlich des Kresstests keine oder nur in geringem Maße phytotoxisch wirkende gasförmige Verbindungen freisetzt und kann daher als Substratkomponente eingesetzt werden. Der Chinakohltest zeigte, dass das Prüfsubstrat als pflanzenverträglich angesehen werden kann und erfüllte die Anforderung zur Verwendung sowohl als Mischungskomponente für die Herstellung von Erden und Substraten als auch als Bodenverbesserungsmittel.

Tab. 3.16: Mittlere Frischmasseerträge (FM) des Kresse- und Chinakohltests und deren Relation zum Kontrollsubstrat EE0

Prüfsubstrat	Kresstest		Chinakohltest	
	FM [g]	Relation zu EE0 [%]	FM [g]	Relation zu EE0 [%]
Kontrollsubstrat EE0	3,9215		7,8632	
GA2 IR 0% (Kompost ohne Biokohle)	3,4582	88,2	7,7118	98,1
GA2 IR 15% (Kompost mit Biokohle)	3,3382	85,1	7,5825	96,4
GA2 F 0% (fermentiertes Material ohne Biokohle)	3,3062	84,3	7,7006	97,9
GA2 F 15% (fermentiertes Material mit Biokohle)	3,2836	83,7	7,6534	97,3
ASSM 2011 (Biokohlekompost Ghana)	3,1878	81,3	7,5936	96,6
ASSM 2012 (Biokohlekompost Ghana)	3,2132	81,9	7,6547	97,3
ASSM 2013 (Biokohlekompost Ghana)	3,1940	81,4	7,7351	98,4

3.4.2 Felduntersuchungen

Die Bodenproben der Versuchsflächen wurden auf ihre physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Parameter untersucht. Die erhobenen Parameter mit den entsprechenden Bestimmungsmethoden sind nachfolgend in der Tabelle 3.17 aufgelistet.

Tab. 3.17: Überblick der physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Parameter der Bodenuntersuchungen und den entsprechenden Bestimmungsmethoden

Untersuchungsparameter	Bestimmungsmethode	Kurzbeschreibung
pH-Wert (CaCl ₂) [-]	VDLUF A Methodenbuch I, A 5.1.1	luftgetrockneter und gesiebter (< 2 mm) Boden werden mit 0,01 molarer CaCl ₂ -Lösung versetzt und anschließend mit einem kalibrierten elektrometrischen pH-Messgerät gemessen
Wassergehalt [%]	VDLUF A Methodenbuch I, A 2.1.1	luftgetrockneter und gesiebter (< 2 mm) Boden wird bis zur Massenkonstanz über Nacht bei 105°C getrocknet und anschließend nach Abkühlung im Exsikkator zurückgewogen. Berechnung erfolgt nach folgender Formel: $w_W = \frac{G_{\text{feu}} - G_{\text{tr}}}{G_{\text{tr}} - T} * 100$ <p>G_{feu} = Gewicht der feuchten Probe + T in g ; G_{tr} = Gewicht der getrockneten Probe bei 105°C + T in g; T = Tarra in g</p>
Trockenmasse [%]	VDLUF A Methodenbuch I, A 2.1.1	Berechnet sich aus dem Wassergehalt nach folgender Formel: $w_{\text{TM}} = \frac{100}{(100 + w_W)} * 100 [\%]$
Korngrößenverteilung mittels Sieb-/Schlämmanalyse unter Verwendung der Pipett-Methode	VDLUF C Methodenbuch I, C 2.2.1	vorherige Zerstörung der organischen Substanz mit H ₂ O ₂ und anschließende Behandlung mit Natriumpyrophosphat
Salzgehalt [mg/100 g Boden]	VDLUF A Methodenbuch I, A 10.1.1	luftgetrockneter und gesiebter (< 2 mm) Boden wird mit destilliertem Wasser 1 h lang geschüttelt und danach filtriert. Im filtrierten Extrakt wird die Leitfähigkeit mit einem Leitfähigkeitsmessgerät gemessen. Der massenbezogene Salzgehalt errechnet sich wie folgt bei Verwendung einer Messzelle mit der Zellkonstante C=1: $w_{\text{Sa}} = k * F_t \text{ [mg/100 g Boden]}$ <p>k – abgelesener Messwert in 10⁻⁴ bei der Arbeitstemperatur t F_t – Umrechnungsfaktor für die bestimmte Arbeitstemperatur</p>
Effektive Kationenaustauschkapazität	DIN EN ISO 11260:2011-09	Um die Nährstoffbindungspotenziale der untersuchten Böden zu beschreiben, wurde die KAK _{eff} ermittelt durch Bestimmen der Summe der austauschbaren Kationen, die an

Material und Methoden

(KAK _{eff}) [cmol/kg]		negativen Bindungsplätzen der Austauscher gebunden sind, durch den Austausch mit Bariumchlorid. Die Messung erfolgte im Anschluss mit einem ICP-OES-Gerät.
Organische Substanz (Glühverlust) [% TS]	DIN EN 15169:2007-05	Der Anteil der organischen Substanz in Bodenproben ergibt sich aus der Bestimmung des Glühverlustes. Der Abbau bzw. die Veraschung der organischen Bodenbestandteile erfolgte bei Temperaturen bis 550°C im Muffelofen (Heraeus Instruments, Thermo Scientific). Nach folgender Formel wird der Glühverlust in Prozent zur Trockensubstanz [%TS] berechnet: $GV[\%TS] = \frac{M_{VdG} - M_{NdG}}{M_{NdG} - M_{Tara}} * 100 [\%]$ <p>M_{VdG} = Gewicht der Probe vor dem Glühen + T in g; M_{NdG} = Gewicht der Probe nach dem Glühen + T in g; M_{Tara} = Tara in g</p>
Gesamt-Kohlenstoff C _t und Gesamt-Stickstoff N _t [% TS]	DIN EN 15936:2012-11 VDLUFA Methodenbuch I, A 2.2.5	Die gemahlene Bodenprobe wird in Zinnschiffchen eingewogen und mittels CNS-Analysator auf ihre Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff analysiert.
Gesamtgehalte Nährstoffe [mg/kg] mittels Königswasseraufschluss ¹⁸	VDLUFA, Methodenbuch I A 2.4.3.1	Die gemahlene Bodenprobe wird mit Königswasser versetzt und im Mikrowellen-aufschlussgerät aufgeschlossen. Das Extrakt wird in einen 50 ml Messkolben überführt und bis zur Eichmarke mit destilliertem Wasser aufgefüllt und anschließend mittels ICP-OES gemessen
Lösliche (pflanzenverfügbare) Nährstoffe [mg/kg] mittels CAT-Methode	VDLUFA Methodenbuch I, A 13.1.1	5 g luftgetrockneter und gesiebter (< 2 mm) Boden werden mit 50 ml CAT-Lösung versetzt und 1 h geschüttelt und anschließend über einen Weißbandfilter filtriert und das Extrakt mittels ICP-OES gemessen.
Nitrat-Stickstoff (NO ₃ -N) durch UV-Absorption	VDLUFA Methodenbuch I, A 6.1.4.1	Die luftgetrocknete und gesiebte (< 2 mm) Bodenprobe wird mit einer 0,0125 molaren CaCl ₂ -Lösung für 1 h geschüttelt und anschließend filtriert. Aus dem erhaltenen Filtrat werden zwei aliquote Teile in zwei Reagenzgläser gefüllt und mit der benutzten Extraktionslösung auf 25 ml ergänzt, 1 ml Schwefelsäure hinzugegeben und gemischt. In eines der beiden Reagenzgläser werden verkupferte Zinkgranalien zur Reduktion des Nitrats gegeben und

¹⁸ Königswasser ist ein Gemisch aus konzentrierter Salzsäure (HCl) und konzentrierter Salpetersäure (HNO₃) im Verhältnis 3:1

über Nacht stehen gelassen. Die Extinktion des nicht reduzierten Aliquots (ohne Zinkgranalien) wird bei einer Wellenlänge von 210 nm mittels Spektralphotometer UV-VIS gemessen. Die Extinktion des reduzierten Aliquots misst man bei einer Wellenlänge von 275 nm. Der Wert der Differenz der gemessenen Extinktionen bei 210 nm und 275 nm wird zur Berechnung des Nitrat-Stickstoffgehaltes verwendet.

Die Berechnung des Nitrat-Stickstoffgehaltes von nahezu trockenen Böden erfolgt nach folgender Formel unter Verwendung eines für das verwendete Aliquot (10 ml) zugehörigen Faktor F (25 l/kg):

$$W_N \text{ (mf)} = \beta_N \text{ (ML)} * F \text{ [mg*kg}^{-1}\text{]}$$

β_N (ML) => NO₃-N Gehalt in dem nicht reduzierten Aliquot in mg/l

F => Faktor für das verwendete Aliquot in l/kg

Ammonium-Stickstoff (NH ₄ -N)	Nach Kandeler und Gerber (1988) (SCHINNER ET AL. 1991)	<p>Das gleiche CaCl₂-Extrakt von der Nitrat-Stickstoff-Bestimmung wird für die Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs verwendet. Zu 5 ml des filtrierten Extrakts werden 2,5 ml Mischlösung bestehend aus 0,3 M Natronlauge, Nitroprussid-Salicylat-Lösung und dest. Wasser (zu gleichen Teilen) hinzugegeben und anschließend mit 1 ml Dichlorisocyanursäure versetzt, geschüttelt und mindestens 30 min stehen gelassen. Die kolorimetrische Bestimmung erfolgt bei 660 nm mittels Photometer gegen den Blindwert der Eichung.</p> <p>Aus der Kalibrierungskurve werden die µg N in der Probenlösung ermittelt.</p> $\frac{VP * V * F * 100}{A * EW * \% TS} = \mu\text{g N} * \text{g}^{-1} \text{ TS}$ <p>VP (Vollprobe in µg N); V (Gesamtvolumen des Extraktes in ml); F (Verdünnungsfaktor); A (Filtrat Aliquot in ml); EW (Bodeneinwaage in g); 100 %⁻¹ TS (Trockensubstanzfaktor)</p>
--	---	---

3.4.3 Bestimmungen ausgewählter Parameter in der pflanzlichen Biomasse der Topfversuche

Zur Bestimmung der Gesamtgehalte an Nährstoffen der Topfkulturen *Aglaonema commutatum*, *Coffea arabica* und *Geranium maderense* wurde der Druckaufschluss 6AM (Aufschlussautoklaven für Mineralstoffanalytik) angewendet. Es handelt sich hierbei um eine von der Firma Lofffields patentierte „Überdruck-Entlastungseinrichtung“, bestehend aus einer Einpunkt-Arretierung, kombiniert mit einer freistehenden Dichtfuge aus Kunststoff. Es werden 300 bis 400 mg gemahlene Pflanzenprobenmaterial in ein Teflongefäß eingewogen und mit 5 ml 70 %iger Salpetersäure (HNO₃) versetzt. Nach Verschließen der Gefäße werden diese in eine Druckvorrichtung eingespannt und bei 180°C in einem handelsüblichen Heizschrank 10 Stunden lang aufgeschlossen. Nach dem Abkühlen werden die Probenlösungen quantitativ über einen Weißbandfilter in 25 ml Messkolben filtriert und bis zur Eichmarke mit bidestilliertem Wasser aufgefüllt. Diese Lösung wird anschließend mittels optische Emissionsspektrometrie mit gekoppeltem Plasma (ICP-OES) auf ihre Gesamtnährstoffe gemessen.

3.5 Statistische Auswertung der gewonnenen Daten

Alle erhobenen Daten der Topf- und Feldversuche wurden mit der Statistiksoftware IBM SPSS 22 und 23 statistisch ausgewertet. Zur Überprüfung der Voraussetzungen für die Anwendung der statistischen Methoden wurden alle Daten auf Normalverteilung und Varianzhomogenität mit Hilfe des Shapiro-Wilk- und Levené-Tests überprüft. Bei nicht normal verteilten Daten wurde versucht über eine angepasste Transformation, die Daten in eine Normalverteilung zu überführen. Wurden diese Voraussetzungen nicht erfüllt, wurden nicht-parametrische Testmethoden angewendet. Die Prüfung auf Ausreißer erfolgte visuell über die Boxplotdarstellung. Im Folgenden werden die angewendeten statistischen Tests für die Topf- und Feldversuche kurz beschrieben.

3.5.1 Untersuchungsergebnisse der Topfversuche im Botanischen Garten Berlin

Die Untersuchungsergebnisse der Topfversuche im Botanischen Garten Berlin wurden nach folgendem Vergleichskonzept ausgewertet (vgl. Tab. 3.18).

Tab. 3.18: Vergleich der Datensätze der Topfversuche

Vergleich von	Vergleichspaare	Untersuchungsfrage	Statistik
Kontrollsubstrat mit vier Testsubstraten und Mehrfachvergleiche der Testsubstrate untereinander	K – IR0 K – IR15 K – F0 K – F15	Zeigen die Testsubstrate ein gleichwertiges, besseres oder schlechteres Pflanzen-wachstum gegenüber der Kontrolle? Unterscheiden sich die Testsubstrate untereinander?	ANOVA
Fermentationsvarianten und Kompostvarianten	F0 – IR0 (ungepoolte Daten) F15 – IR15 (ungepoolte Daten) F0+F15 – IR0+IR15 (gepoolte Daten)	Hat der Herstellungsprozess einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum?	t-Test
Varianten mit Biokohle und Varianten ohne Biokohle	F0 – F15 (ungepoolte Daten) IR0 – IR15 (ungepoolte Daten) F0+IR0 – F15+IR15 (gepoolte Daten)	Hat die Biokohle einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum?	t-Test

K-Kontrolle; IR0-Kompost ohne Biokohle; IR15-Kompost mit Biokohle; F0-fermentiertes Material ohne Biokohle; F15-fermentiertes Material mit Biokohle

Für die Untersuchung des Pflanzenwachstums der Testsubstrate gegenüber der Kontrolle sowie der Testsubstrate untereinander wurde zur statistischen Auswertung die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) anhand von Mittelwertvergleichen bei einem Signifikanzniveau mit $p=0,05$ durchgeführt. Wurden mit der einfaktoriellen ANOVA Unterschiede zwischen den Mittelwerten identifiziert, erfolgte im Anschluss die Durchführung eines geeigneten Post-hoc-Spannweiten-Tests, bei dem durch paarweise multiple Vergleiche untersucht wurde, welche Mittelwerte sich voneinander unterscheiden. Bei normal verteilten und varianzhomogenen Daten und signifikanten Mittelwertsunterschieden wurde der Post-hoc-Test Tuckey HSD angewendet. Bei nicht varianzhomogenen, aber normal verteilten Daten erfolgte der Tamhane-Post-hoc-Test nach der ANOVA.

Für den Vergleich der Fermentationsvarianten mit den Kompostvarianten wurden zwei unterschiedliche Methoden verwendet:

1. Gepoolte Daten, d.h. die Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle wurden zusammengefasst und mit den zusammengefassten Kompostvarianten mit und ohne Biokohle miteinander verglichen (vgl. Tabelle 3.18)
2. Ungepoolte Daten, d.h. jeweils die Fermentationsvarianten mit Biokohle wurden mit den Kompostvarianten mit Biokohle verglichen und analog dazu wurde mit den Varianten ohne Biokohle vorgegangen

Für alle Mittelwertvergleiche wurde der t-Test für unabhängige Stichproben bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ durchgeführt.

Für den Vergleich der Testsubstrate mit und ohne Biokohle wurde analog wie zuvor beschrieben vorgegangen:

1. Gepoolte Daten, d.h. die Fermentations- und Kompostvarianten mit Biokohle wurden zusammengefasst und mit den zusammengefassten Fermentations- und Kompostvarianten ohne Biokohle miteinander verglichen (vgl. Tabelle 3.18)
2. Ungepoolte Daten, jeweils die Fermentationsvarianten mit Biokohle wurden mit den Fermentationsvarianten ohne Biokohle verglichen und analog dazu wurde mit den Kompostvarianten mit und ohne Biokohle vorgegangen

Die entsprechenden Mittelwertvergleiche wurden mit dem t-Test für unabhängige Stichproben bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ durchgeführt.

3.5.2 Untersuchungsergebnisse der Felduntersuchungen

Die erhobenen Maispflanzendaten wie Maiskolbenlänge und -gewicht der Biokohlekompost- und Kontrollflächen waren nicht normalverteilt und wurden mit dem nicht-parametrischen Testverfahren Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben statistisch ausgewertet bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$.

Um die Beziehung zwischen der Maiskolbenlänge und dem Maiskolbengewicht der untersuchten Kontroll- und Biokohlekompostflächen zu beschreiben, wurde die nicht-parametrische Spearman's Rangkorrelation durchgeführt.

Für die statistische Auswertung der Kornerträge aus den Jahren 2012 und 2013 wurden jeweils die Kornerträge der Biokohlekompostflächen sowie der Kontrollflächen pro Jahr zusammengefasst und mittels t-Test bei unabhängigen Stichproben die Mittelwertunterschiede bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ berechnet.

Für den Vergleich der Kornerträge zwei aufeinanderfolgender Vegetationsperioden wurde zur Berechnung signifikanter Unterschiede im Kornertrag das nicht-parametrische Testverfahren Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ verwendet, da die Daten nicht normal verteilt waren.

Um die Ertragssteigerung der Biokohlekompostflächen im Vergleich zu den Kontrollflächen zu bestimmen, wurde der Quotient aus dem Kornertrag der Biokohlekompostfläche und dem Kornertrag der Kontrollfläche gebildet.

4 DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Im folgenden Kapitel werden im ersten Teil die Ergebnisse der Topfversuche im Botanischen Garten detailliert dargestellt. Es werden die Wuchsleistungen der einzelnen Pflanzen in den Testsubstraten mit denen in den Kontrollsubstraten verglichen unter Berücksichtigung der Torfreduktion sowie der Verwendung von kompostiertem und fermentiertem Material mit und ohne Biokohle. Des Weiteren wird der Einfluss von Biokohlekompost auf die Substrateigenschaften sowie sein Torfersatz- und Düngereinsparpotenzial näher beleuchtet.

Im zweiten Teil werden die Ergebnisse aus den Feldversuchen in Ghana dargelegt. Es werden die Ertragsleistungen der mit Biokohlekompost applizierten Versuchsflächen mit denen der Kontrollflächen verglichen. Darüber hinaus wird auf den Einfluss von Biokohlekompost auf ausgewählte Bodeneigenschaften und das Pflanzenwachstum eingegangen.

4.1 Topfversuche im Botanischen Garten Berlin

4.1.1 Vergleich der Substrateigenschaften der untersuchten Testsubstrate

Wie im Kapitel 3.1.7 bereits beschrieben, wurden alle zu untersuchenden sechs angemischten Pflanzsubstrate einschließlich der jeweils vier Testvarianten und Kontrollen vor Versuchsbeginn auf physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter sowie Nährstoffgehalte untersucht. Im Folgenden wird auf die untersuchten Parameter näher eingegangen.

4.1.1.1 Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter

Anhand der Analysenwerte, die der Tabelle 3.6 des Kapitels 3.1.7 zu entnehmen sind, können folgende Feststellungen gemacht werden:

- Bei den sechs untersuchten Pflanzsubstraten zeigte sich bei allen Testvarianten mit Biokohle (IR15 und F15) gegenüber den Testvarianten ohne Biokohle (IR0 und F0) eine Erhöhung der organischen Substanz, des Kohlenstoffgehaltes, des Gehaltes an organischen Kohlenstoff sowie des Kohlenstoff-Stickstoffverhältnisses. Dies lässt sich durch die Zugabe von Biokohle, die einen hohen Anteil an Kohlenstoff mit sich bringt, erklären.
- Bei den Biokohlevarianten der sechs untersuchten Pflanzsubstrate reduzierte sich die Rohdichte im Vergleich zu den Testvarianten ohne Biokohle. Dies resultiert daraus, dass die Biokohle selbst eine geringe spezifische Dichte aufweist und

durch ihren Einsatz das Porenvolumen erhöht werden kann, was zwangsläufig die Rohdichte verringert.

- Mit Ausnahme des Pflanzsubstrates für *Aglaonema commutatum*, bei dem sich nur der Salzgehalt der Kompostvariante mit Biokohle (IR15) verringerte gegenüber der Kompostvariante ohne Biokohle (IR0), reduzierte sich der Salzgehalt aller anderen Biokohlevarianten (IR15 und F15) gegenüber den Testvarianten ohne Biokohle (IR0 und F0).
- Hinsichtlich des pH-Wertes konnten bei allen Biokohlevarianten eine leichte pH-Werterhöhung von 0,1 bis 0,6 pH-Einheiten gegenüber den Testvarianten ohne Biokohle nachgewiesen werden. Biokohle selbst ist basisch und kann somit pH-erhöhend wirken.
- Darüber hinaus konnte in Bezug auf die maximale Wasserhaltekapazität eine tendenzielle Erhöhung bei den Biokohlevarianten im Vergleich zu den Testvarianten ohne Biokohle festgestellt werden. Biokohlen verfügen über eine starke Porosität, was die Wasserkapazität erhöht und dadurch das Wasserspeichervermögen verbessert.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass durch die Anwendung von Biokohle wesentliche Anforderungen an Kultursubstrate wie z.B. geringer Salzgehalt, geringe Dichte und hohe Wasserspeicherfähigkeit erfüllt werden.

4.1.1.2 Gesamtgehalte ausgewählter Mikro- und Makronährstoffe

Um die Ausgangssituation hinsichtlich der Nährstoffgehalte zu untersuchen, wurden vor Versuchsbeginn Gesamtgehalte sowie pflanzenverfügbare Gehalte ausgewählter Mikro- und Makronährstoffe bestimmt. Die Gesamtgehalte der sechs untersuchten Pflanzsubstrate vor der Bepflanzung sind in der Tabelle 3.7 des Kapitels 3.1.7 aufgeführt. Es lässt sich feststellen, dass die Kontrollen und Testvarianten der untersuchten Pflanzsubstrate tendenziell vergleichbare Gesamtgehalte aufweisen und nur vereinzelt für einige Nährstoffe kleinere Schwankungen auftraten. Somit waren für die Kontrollen und Testvarianten hinsichtlich der Gesamtgehalte ähnliche Voraussetzungen gegeben.

4.1.1.3 Pflanzenverfügbare Gehalte ausgewählter Mikro- und Makronährstoffe

Da für die Aufnahme von Nährstoffen bei Pflanzen weniger die Gesamtgehalte, sondern eher die verfügbaren Gehalte des Kultursubstrates relevant sind, wurden diese vor Versuchsbeginn bestimmt und sind der Tabelle 3.8 des Kapitels 3.1.7 zu entnehmen. Ebenfalls bei der Betrachtung der verfügbaren Nährstoffe lässt sich ein vergleichbares Nährstoffniveau zwischen den Testvarianten und den Kontrollen feststellen.

4.1.2 Vergleich der Wachstumsparameter der Testsubstrate mit den Kontrollsubstraten

Aus der Tabelle 4.1 wird deutlich, dass die neu hergestellten Pflanzsubstrate aus dem fermentierten und kompostierten Material des Großansatzes GA2 mit und ohne Biokohlezugabe (IR0, IR15, F0, F15) in keinem der elf Topfversuche statistisch signifikant schlechtere Ergebnisse hinsichtlich der untersuchten Pflanzenparameter aufwiesen im Vergleich zu den bisher im BG verwendeten Pflanzsubstraten (Kontrolle). 55 % der elf untersuchten Testpflanzen zeigten in den Testsubstraten ein signifikant besseres Pflanzenwachstum im Hinblick auf die untersuchten Pflanzenparameter und 45 % ein gleichwertiges Pflanzenwachstum gegenüber den Kontrollen.

Tab. 4.1: Vergleich der Testsubstrate (IR0, IR15, F0, F15) mit den Kontrollen bezüglich der in den Topfversuchen erhobenen Pflanzenparameter

	Höhe (H)				Blattanzahl (BA)				Biomasse (oBM)				Knospenzahl (KA)				Blütenzahl (BZ)			
	IR0	IR15	F0	F15	IR0	IR15	F0	F15	IR0	IR15	F0	F15	IR0	IR15	F0	F15	IR0	IR15	F0	F15
<i>Aglaonema commutatum</i>																				
<i>Carica pepaya</i>																				
<i>Coffea arabica</i>																				
<i>Digitalis trojana</i>																				
<i>Geranium maderense</i>																				
<i>Nerium oleander</i>																				
<i>Ruschia rigida</i>																				
<i>Silphium perfoliatum</i>																				

	Höhe (H)				Blattanzahl (BA)				Biomasse (oBM)				Holzgewicht (HG)				Stammdurchmesser			
	IR0	IR15	F0	F15	IR0	IR15	F0	F15	IR0	IR15	F0	F15	IR0	IR15	F0	F15	IR0	IR15	F0	F15
<i>Populus "Max 1"</i>																				
<i>Salix "Tordis"</i>																				
<i>Paulownia tomentosa</i>																				

	statistische Signifikanz $p < 0,05$ (Testsubstrate besser als die Kontrollsubstrate)
	keine statistische Signifikanz (gleichwertiges Pflanzenwachstum wie die Kontrolle)
	nicht untersucht

Im Vergleich zur Kontrolle konnte ein signifikant verbessertes Pflanzenhöhenwachstum für die beiden Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (IR0 und IR15) in drei von neun Fällen festgestellt werden. Die beiden Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (F0 und F15) zeigten in einem Fall ein signifikant verbessertes Pflanzenhöhenwachstum gegenüber der Kontrolle. Für die Fermentationsvariante mit Biokohle (F15) wurde in drei von neun Fällen eine signifikant höhere Blattanzahl im Vergleich zur Kontrolle nachgewiesen. Die Testsubstrate IR0 und F0 zeigten in zwei von neun Fällen und IR15 in einem von neun Fällen eine signifikant erhöhte Blattanzahl. Eine signifikant höhere Biomasse gegenüber der Kontrolle wurde für die Kompostvariante mit und ohne Biokohle (IR15 und IR0) und für die Fermentationsvariante ohne Biokohle (F0) in drei von zehn Fällen ermittelt. In zwei von zehn Fällen zeigte das Testsubstrat F15 eine signifikant höhere Biomasse gegenüber der Kontrolle. Diese Ergebnisse zeigen kein einheitliches

Bild, verdeutlichen aber, dass die neu hergestellten Pflanzsubstrate im Vergleich zu den bisherigen verwendeten Pflanzsubstraten ein gleichwertiges oder besseres Pflanzenwachstum aufweisen.

Aus diesen Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass aus den im BG anfallenden organischen Reststoffen durch Kompostierung oder Fermentation ein Material hergestellt werden kann, das für die Zumischung in den Kultursubstraten geeignet ist, ohne das Pflanzenwachstum negativ zu beeinträchtigen.

4.1.3 Vergleich der Wachstumsparameter der torfreduzierten Testsubstrate mit den Kontrollsubstraten

Die Reduzierung des Torfanteils um ein Drittel in den Testsubstraten für *Aglaonema commutatum*, *Carica papaya*, *Coffea arabica*, *Digitalis trojana*, *Geranium maderense*, *Nerium oleander* und *Silphium perfoliatum* hat sich bei keiner dieser Pflanzen im Vergleich zur Kontrolle signifikant negativ auf das Pflanzenwachstum ausgewirkt. Die untersuchten Pflanzen zeigten ein gleichwertiges oder besseres Pflanzenwachstum als die Kontrollen. In den nachfolgenden Abbildungen 4.1 und 4.2 sind die untersuchten Pflanzenparameter der torfreduzierten Testsubstrate im Vergleich zum Kontrollsubstrat graphisch dargestellt. Es wurde ein signifikanter Biomassezuwachs bei *Carica papaya* und *Digitalis trojana* festgestellt. *Geranium maderense* und *Carica papaya* zeigten ein gesteigertes Pflanzenhöhenwachstum. Eine signifikante Erhöhung der Blattanzahl konnte bei *Nerium oleander*, *Geranium maderense*, *Digitalis trojana* und *Carica papaya* nachgewiesen werden. Die einzelnen Pflanzen werden im Anschluss detailliert betrachtet.

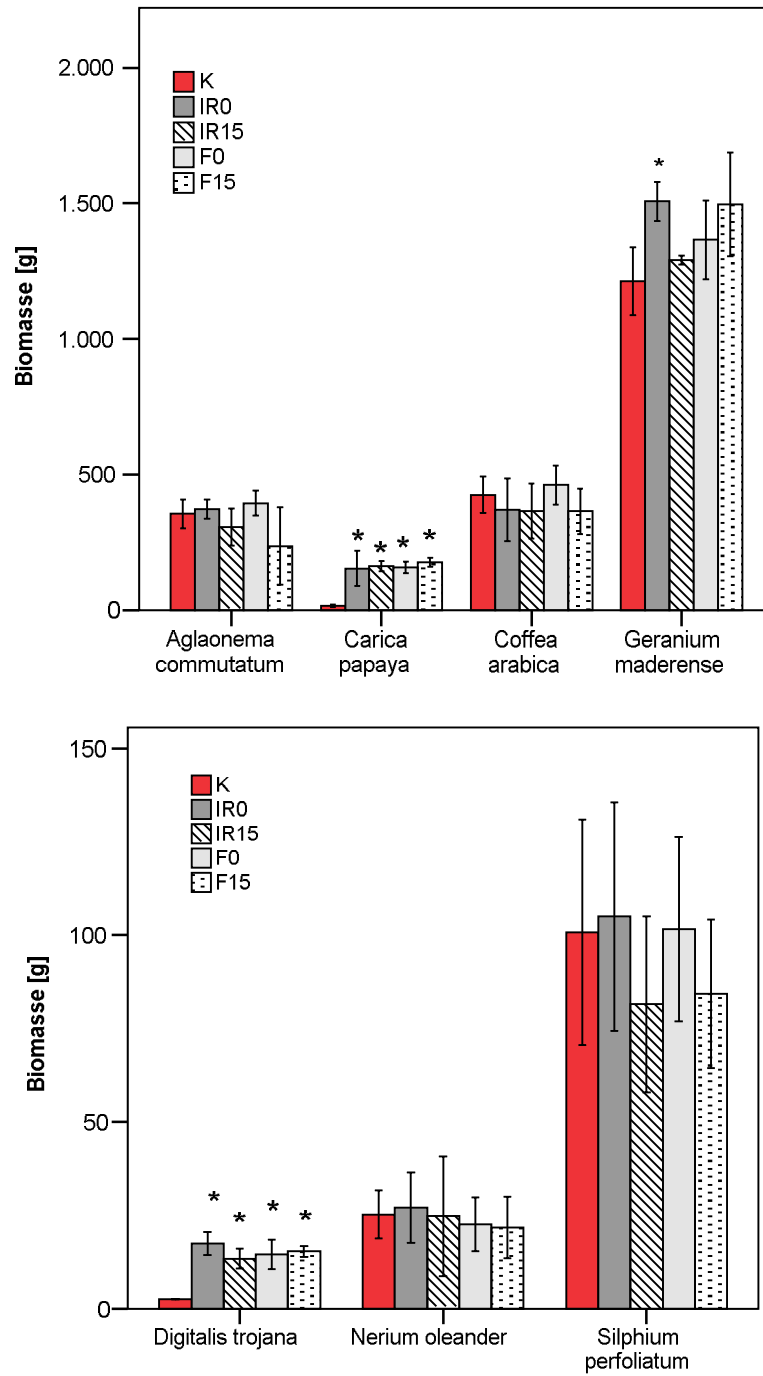


Abb. 4.1: Vergleich der mittleren Biomasse der torfreduzierten Substrate mit den Kontrollsubstraten (* bedeutet statistische Signifikanz gegenüber den Kontrollen mit $p < 0,05$; einfaktorielles ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzheterogenität Tamhane-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

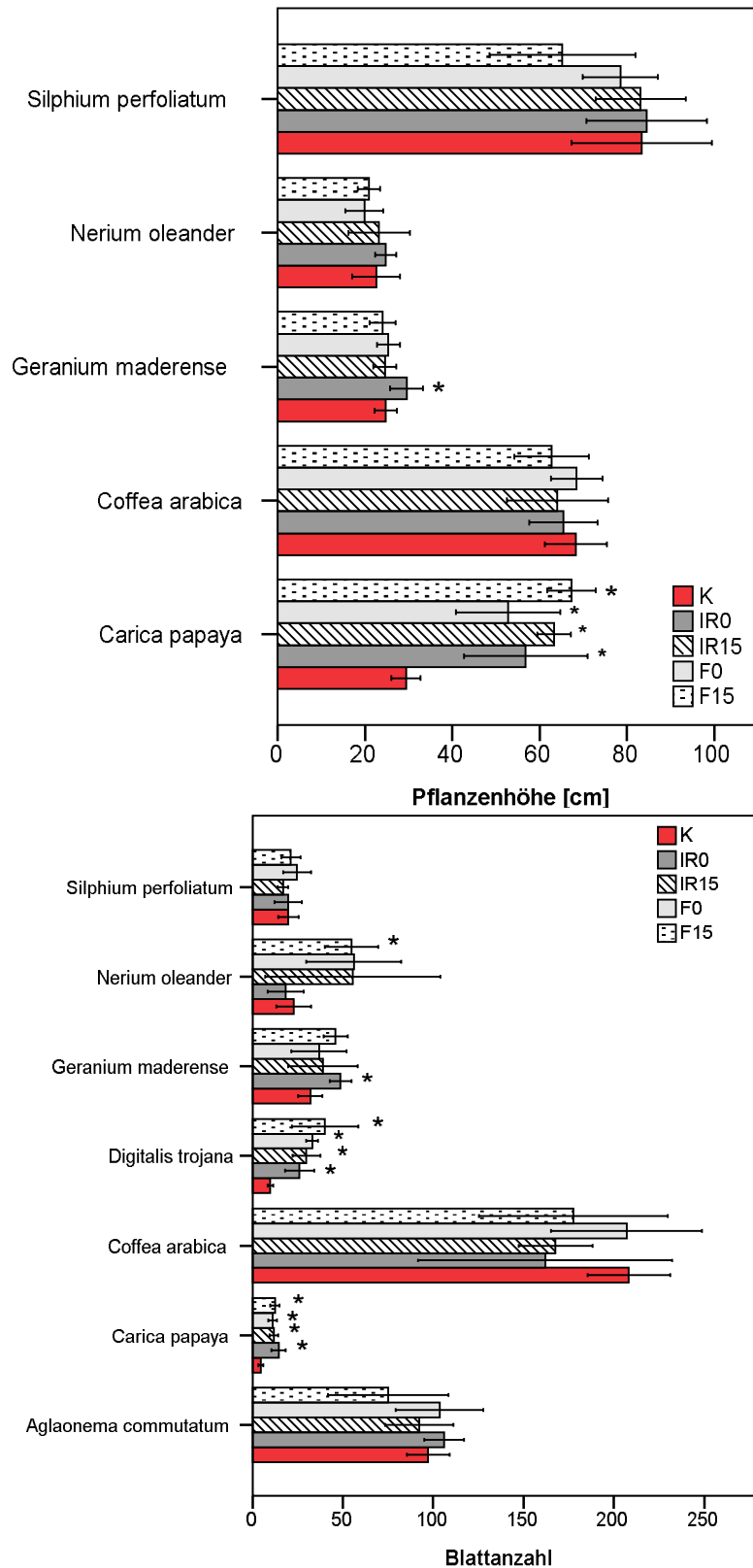


Abb. 4.2: Vergleich der mittleren Pflanzenhöhe (oben) und Blattanzahl (unten) der torfreduzierten Substrate mit den Kontrollsubstraten (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; einfaktorielles ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzhomogenität Tamhane-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Die ermittelten Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe sowie die berechneten statistischen Signifikanzen (p-Wert) der Testsubstrate gegenüber den Kontrollsubstraten sind der Tabelle 4.2 zu entnehmen. Die berechneten Gruppenunterschiede der einzelnen Testpflanzen mittels Mehrfachvergleiche sind in den Tabellen B-1 bis B-4 im Anhang B aufgeführt.

Darstellung der Ergebnisse

Tab. 4.2: Vergleich der Mittelwerte (MW) und Signifikanzwerte (p-Wert) der erhobenen Pflanzenparameter, Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe der Testsubstrate (IR0, IR15, F0, F15) mit den Kontrollsubstraten (K); (fett geschriebene p-Werte stellen die statistische Signifikanz gegenüber den Kontrollen dar mit $p < 0,05$ (einfaktorielle ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzinhomogenität Tamhane-Test))

Testpflanze	Substrat	N	Blattanzahl			Biomasse [g]			Pflanzenhöhe [cm]		
			MW	STABW	p-Wert	MW	STABW	p-Wert	MW	STABW	p-Wert
Aglaonema commutatum	K	4	97,3	7,4		355,5	32,8		/	/	/
	IR0	4	106,0	7,0	0,9	373,2	22,0	0,9	/	/	/
	IR15	4	92,3	11,8	0,9	306,9	43,0	0,3	/	/	/
	F0	4	103,5	15,3	0,9	394,8	29,2	0,5	/	/	/
	F15	4	75,0	20,9	0,2	286,1	43,4	0,09	/	/	/
Carica papaya	K	5	4,6	1,1		17,4	4,0		29,4	2,7	
	IR0	5	14,4	3,2	<0,001	154,0	52,7	0,04	56,8	11,4	0,047
	IR15	5	11,8	1,9	<0,001	163,1	15,4	<0,001	63,3	3,1	<0,001
	F0	5	11,2	1,9	0,001	158,9	16,8	<0,001	52,8	9,6	0,04
	F15	5	12,4	2,1	<0,001	176,5	12,8	<0,001	67,2	4,5	<0,001
Coffea arabica	K	4	208,3	14,4		425,7	42,5		68,3	4,5	
	IR0	4	162,0	44,2	0,2	370,3	72,2	0,6	65,4	4,9	0,9
	IR15	4	167,8	12,8	0,3	366,0	63,2	0,6	64,0	7,3	0,8
	F0	4	207,0	26,2	1,0	462,2	45,4	0,9	68,5	3,7	1,0
	F15	4	177,5	32,9	0,6	365,5	52,9	0,6	62,7	5,4	0,6
Digitalis trojana	K	6	9,8	1,5		2,5	0,04		/	/	/
	IR0	6	26,0	7,6	0,045	17,4	2,9	0,001	/	/	/
	IR15	6	29,8	7,5	0,009	13,4	2,6	0,001	/	/	/
	F0	6	33,0	3,1	0,002	14,6	3,7	0,005	/	/	/
	F15	6	40,2	17,7	<0,001	15,3	1,4	<0,001	/	/	/
Geranium maderense	K	4	32,0	4,2		1213,0	78,3		24,8	1,6	
	IR0	4	48,8	3,9	0,047	1507,4	44,9	0,02	29,5	2,3	0,02
	IR15	4	39,0	12,1	0,7	1291,9	10,4	0,8	24,6	1,7	1,0
	F0	4	36,8	9,5	0,9	1365,7	91,6	0,4	25,4	1,7	1,0
	F15	4	46,0	4,2	0,1	1496,1	120,6	0,09	24,1	1,9	1,0
Nerium oleander	K	4	22,8	6,0		25,2	4,1		22,6	3,4	
	IR0	4	18,3	6,3	1,0	27,1	5,9	1,0	24,8	1,5	0,8
	IR15	4	55,5	30,4	0,7	24,7	10,0	1,0	23,2	4,4	1,0
	F0	4	56,0	16,6	0,2	22,5	4,5	1,0	19,9	2,7	0,7
	F15	4	54,8	9,4	0,02	21,7	5,2	0,9	20,9	1,6	0,9
Silphium perfoliatum	K	6	19,8	5,4		100,7	28,7		83,3	15,3	
	IR0	6	19,7	7,2	1,0	105,0	29,1	1,0	84,5	13,2	1,0
	IR15	6	16,8	2,7	0,9	81,5	22,4	0,7	83,1	9,8	1,0
	F0	6	24,7	7,4	0,6	101,7	23,5	1,0	78,5	8,2	1,0
	F15	6	21,2	5,1	1,0	84,3	18,9	0,8	65,2	15,9	0,1

N - Stichprobenanzahl; STABW – Standardabweichung

Aglaonema commutatum

Aglaonema zeigte in allen vier Testsubstraten keine signifikanten Unterschiede in Blattanzahl und Biomasse im Vergleich zur Kontrolle (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Mittels ANOVA und anschließendem post-hoc-Test konnten anhand von Mehrfachvergleichen innerhalb der Testsubstrate jedoch signifikante Unterschiede in Blattanzahl und Biomasse für die Varianten ohne Biokohle (IR0 und F0) gegenüber den Varianten mit Biokohle (IR15 und F15) nachgewiesen werden. Die entsprechenden Signifikanzwerte sind der Tabelle B-1 im Anhang B zu entnehmen. Das Testsubstrat mit kompostiertem Material ohne Biokohle (IR0) zeigte eine signifikant erhöhte Blattanzahl von 31 ($p=0,038$) sowie einen signifikanten Biomassezuwachs von 87,1 g ($p=0,022$) gegenüber dem Testsubstrat mit fermentiertem Material und Biokohlezugabe (F15). Für das Testsubstrat mit fermentiertem Material ohne Biokohle (F0) konnten signifikante Biomassezuwächse von 87,9 g ($p=0,021$) gegenüber dem Testsubstrat mit kompostiertem Material und Biokohle (IR15) sowie von 108,7 g ($p=0,004$) gegenüber dem Testsubstrat mit fermentiertem Material und Biokohle (F15) festgestellt werden (vgl. Tab.B-1 im Anhang B). Die Blattanzahl lag zwischen $75 \pm 20,9$ beim Testsubstrat mit fermentiertem Material und Biokohlezugabe (F15) und 106 ± 7 beim Testsubstrat mit kompostiertem Material ohne Biokohle (IR0) (vgl. Tab. 4.2). Die Biomasse variierte zwischen $286,1 \text{ g} \pm 43,4$ beim Testsubstrat F15 und $394,8 \text{ g} \pm 29,2$ beim Testsubstrat mit fermentiertem Material ohne Biokohle (F0). Ein möglicher Grund der schlechteren Wuchsleistungen in den Testsubstraten mit Biokohle (IR15 und F15) könnte eine pH-Wertverschiebung durch die Biokohle in den alkalischen Bereich sein. Aglaonema bevorzugt zum optimalen Gedeihen ein Substrat mit einem pH-Wert zwischen 5,5 und 6. Ein weiterer möglicher Grund könnte ein nicht optimales Kohlenstoff-Stickstoffverhältnis (C/N-Verhältnis) des Substrats sein, so dass die Stickstoffverfügbarkeit für die Pflanzen reduziert war. Viele Pflanzenarten werden ausreichend mit Stickstoff versorgt bei einem C/N-Verhältnis kleiner als 20.

Einen visuellen Eindruck der Pflanzenentwicklung am Versuchsende vermittelt die Abb. 4.3.



Abb. 4.3: Pflanzenentwicklung von *Aglaonema commutatum* am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)

Carica papaya

Bei Papaya konnte in allen vier Testsubstraten mittels Varianzanalyse und anschließendem Tukey-Post-hoc-Test und Tamhane-Test bei Varianzinhomogenität hoch signifikante Unterschiede in Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe im Vergleich zur Kontrolle festgestellt werden, jedoch gab es keine anderen signifikanten Gruppenunterschiede (vgl. vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Die Blattanzahl der Testsubstrate variierte zwischen $11,2 \pm 1,9$ bei F0 und $14,4 \pm 3,2$ bei IR0 im Vergleich zur Kontrolle mit $4,6 \pm 1,1$ (vgl. Tab. 4.2). Die Biomasse der Testsubstrate lag zwischen $154 \text{ g} \pm 52,7$ bei IR0 und $176,5 \text{ g} \pm 12,8$ bei F15 im Vergleich zur Kontrolle mit $17,4 \pm 4,0$. Bei den Testsubstraten wurden Pflanzenhöhen von $52,8 \text{ cm} \pm 9,6$ bei F0 und $67,2 \text{ cm} \pm 4,5$ bei F15 im Vergleich zur Kontrolle mit $29,4 \text{ cm} \pm 2,7$ festgestellt. Die signifikant höchste Steigerung der Blattanzahl mit 9,8 wurde beim Testsubstrat mit kompostiertem Material ohne Biokohle (IR0) gegenüber der Kontrolle ermittelt. Die signifikant höchste Biomassezunahme von 159,1 g sowie die höchste Zunahme der Pflanzenhöhe von 37,8 cm gegenüber der Kontrolle zeigte das Testsubstrat mit fermentiertem Material und Biokohlezugabe (F15) (vgl. Tab. B-2 im Anhang B). Die starken Wachstumsunterschiede zwischen den Kontrollen und den Testsubstraten lassen sich nicht mit den zur Verfügung stehenden Nährstoffgehalten erklären, da diese für die Kontrollen und Testsubstrate auf einem vergleichbaren Niveau waren. Die zusätzliche Volldüngung der Kontrollen führte zu keinem besseren Pflanzenwachstum. Daraus lässt sich vermuten, dass andere Substratparameter die Ursache für das unterschiedliche Pflanzenwachstum gewesen sein müssen.

Einen visuellen Eindruck der Pflanzenentwicklung am Versuchsende sowie der deutliche Unterschied zwischen den Testsubstraten und den Kontrollen vermitteln die Abbildungen 4.4 und 4.5.



Abb. 4.4: Pflanzenentwicklung von *Carica papaya* am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)



Abb. 4.5: Direkter Vergleich der Pflanzenentwicklung von *Carica papaya* in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)

Coffea arabica

Für die untersuchten Testsubstrate wurden keine signifikanten Unterschiede in Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe im Vergleich zur Kontrolle und keine signifikanten Gruppenunterschiede nachgewiesen (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Die ermittelten Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter sind in der Tabelle 4.2 aufgeführt. Die Kaffeepflanzen in den Testsubstraten zeigten ein gleichwertiges Pflanzenwachstum wie die Kontrollen (vgl. Abb. 4.6). Der Wachstumsversuch mit den Kaffeepflanzen verdeutlicht, dass Wachstums-effekte sehr pflanzenspezifisch sein können, da die Kaffeepflanzen im gleichen Substrat gewachsen sind wie die Papayapflanzen, aber kaum Unterschiede zeigten.



Abb. 4.6: Pflanzenentwicklung von *Coffea arabica* am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)

Digitalis trojana

Im Vergleich zur Kontrolle wurden in allen vier Testsubstraten signifikante Unterschiede in Blattanzahl und Biomasse ermittelt, jedoch wurden keine anderen signifikanten Gruppenunterschiede nachgewiesen (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Verglichen mit der Kontrolle entwickelten Digitalispflanzen in den Testsubstraten drei- bis viermal so viele Blätter. Die höchste Blattzunahme von 30,3 wurde beim Testsubstrat mit fermentiertem Material und Biokohlezugabe (F15) gegenüber der Kontrolle festgestellt. Die höchste Biomassezunahme von $14,9 \text{ g} \pm 1,4$ gegenüber der Kontrolle zeigte das Testsubstrat mit kompostiertem Material ohne Biokohle (IR0) und die geringste von $10,9 \text{ g} \pm 1,4$ im Testsubstrat mit kompostiertem Material mit Biokohlezugabe (IR15). Die Blattanzahl lag

zwischen $26 \pm 7,6$ bei IR0 und $40,2 \pm 17,7$ bei F15 gegenüber der Kontrolle mit $9,8 \pm 1,5$. Die Biomasse variierte zwischen $13,4 \text{ g} \pm 2,6$ bei IR15 und $17,4 \text{ g} \pm 2,9$ bei IR0 gegenüber der Kontrolle mit $2,5 \text{ g} \pm 0,04$ (vgl. Tab. 4.2).

Einen visuellen Eindruck der Pflanzenentwicklung vor dem ersten Umtopfen vermittelt die Abbildung 4.7. Hier sind die Unterschiede zwischen den Kontrollen und Testsubstraten noch nicht so deutlich ausgeprägt. Das zeigt, dass die Zeitkomponente einen wesentlichen Einfluss hinsichtlich der Wirkung der Testsubstrate hat, d.h. dass sich positive Effekte auf das Pflanzenwachstum verzögert zeigen können und nicht gleich von Anfang an.



Abb. 4.7: Pflanzenentwicklung von *Digitalis trojana* vor dem ersten Umtopfen, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen

Geranium maderense

Signifikante Unterschiede in Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe gegenüber der Kontrolle wurden für das Testsubstrat mit kompostiertem Material ohne Biokohle (IR0) festgestellt (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Im Vergleich zur Kontrolle erhöhte sich die Blattanzahl um 52,5 %, die Biomasse nahm um 294,4 g zu und die Pflanzenhöhe erhöhte sich um 4,7 cm (vgl. Tab.4.2). Für die Testsubstrate IR15 mit kompostiertem Material und Biokohlezugabe sowie F15 und F0 mit fermentiertem Material mit und ohne Biokohle ließen sich keine signifikanten Unterschiede in den Pflanzenparametern gegenüber der Kontrolle nachweisen. Es wurden signifikante Gruppenunterschiede innerhalb der Testsubstrate festgestellt. Die entsprechenden Signifikanzwerte der Mehrfachvergleiche sind in der Tabelle B-3 im Anhang B aufgeführt. Das Testsubstrat mit kompostiertem Material ohne Biokohle (IR0) zeigte gegenüber dem Testsubstrat mit kompostiertem Material und Biokohlezugabe (IR15) einen signifikanten Biomassezuwachs von 215,6 g sowie eine signifikante Steigerung der Pflanzenhöhe um 4,9 cm. Darüber hinaus konnte für IR0 eine signifikante Steigerung der Pflanzenhöhe um 4,2 cm gegenüber dem Testsubstrat mit fermentiertem Material ohne Biokohle (F0) und um 5,5 cm gegenüber dem Testsubstrat mit fermentiertem Material und Biokohlezugabe (F15) festgestellt

werden (vgl. Tab. B-3 im Anhang B). Einen visuellen Eindruck der Pflanzenentwicklung am Versuchsende vermittelt die Abbildung 4.8.



Abb. 4.8: Pflanzenentwicklung von *Geranium maderense* am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen

Nerium oleander

Das Testsubstrat mit fermentiertem Material und Biokohlezugabe (F15) zeigte als einziges eine signifikante Erhöhung der Blattanzahl von 32 gegenüber der Kontrolle (vgl. Tab. 4.2 und Abb.4.2). Mittels Mehrfachvergleiche konnten für die Blattanzahl signifikante Gruppenunterschiede ermittelt werden. Die berechneten Signifikanzwerte sind in der Tabelle B-4 im Anhang B aufgeführt. Für das Testsubstrat mit fermentiertem Material und Biokohlezugabe (F15) wurde eine signifikante Blattzunahme von 36,5 gegenüber dem Testsubstrat mit kompostiertem Material ohne Biokohle (IR0) festgestellt. Es wurden keine signifikanten Unterschiede für die Parameter Biomasse und Pflanzenhöhe im Vergleich zur Kontrolle und auch keine Gruppenunterschiede nachgewiesen. Einen visuellen Eindruck der Pflanzenentwicklung am Versuchsende zeigt die Abbildung 4.9.

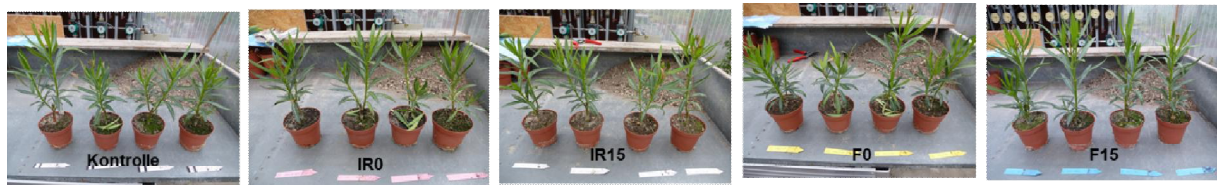


Abb. 4.9: Pflanzenentwicklung von *Nerium oleander* am Versuchsende, Vergleich der Pflanzen in den Testsubstraten (IR0, IR15, F0 und F15) mit den Kontrollen (K)

Silphium perfoliatum

Für die untersuchten Testsubstrate wurden keine signifikanten Unterschiede in Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe im Vergleich zur Kontrolle und keine signifikanten Gruppenunterschiede festgestellt (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Die ermittelten Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter sind in der Tabelle 4.2 aufgeführt. Aus den errechneten Signifikanzwerten (p-Wert), die in der Tabelle 4.2 aufgelistet sind, lässt sich erkennen, dass die untersuchten Testsubstrate gleichwertige Wuchsleitungen im Vergleich zur Kontrolle zeigten. Anhand der Signifikanzwerte, die alle einen Wert größer oder gleich 0,1 haben, lassen sich keine Tendenzen für ein besseres Pflanzenwachstum in bestimmten Testsubstraten ableiten.

Die größten Effekte im Pflanzenwachstum konnten bei *Carica papaya* und *Digitalis trojana* festgestellt werden. Die beiden Testpflanzen zeigten in allen vier untersuchten Testsubstraten (IR0, IR15, F0, F15) eine signifikant höhere Blattanzahl und Biomasse im Vergleich zur Kontrolle (s. Abb. 4.10). Die positiven Pflanzenwachstumsergebnisse für *Carica papaya* in den Testsubstraten wurden gleich praktisch verwertet und führten dazu, dass im BG für die Kultivierung von *Carica papaya* nunmehr die Substratmischung mit Biokohlekompost verwendet wird.

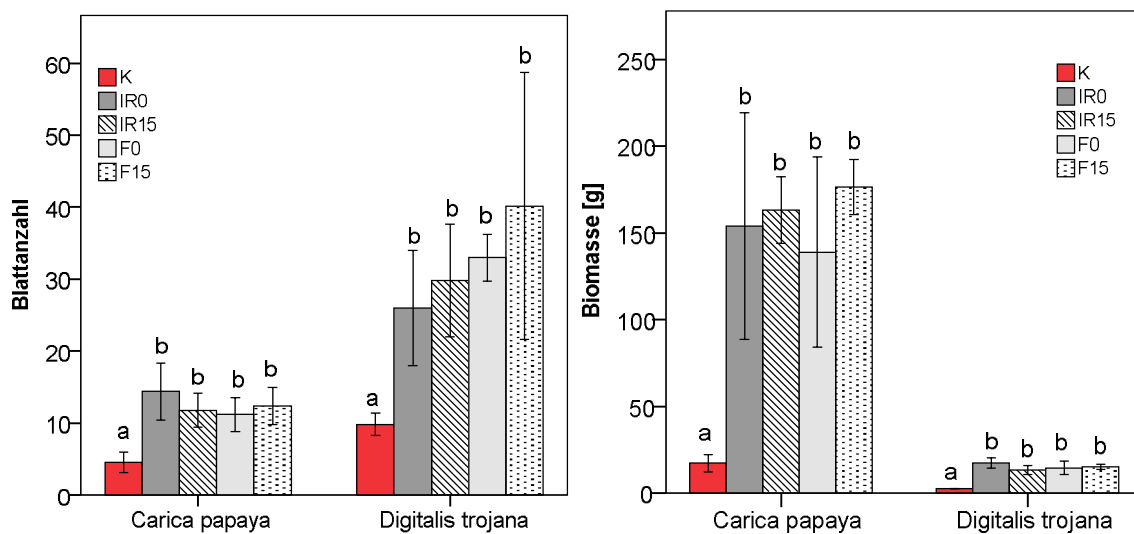


Abb. 4.10: Mittlere Blattanzahl und Biomasse von *Carica papaya* und *Digitalis trojana* im Topfversuch (unterschiedliche Buchstaben bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ (einfaktorielle ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzhomogenität Tamhane-Test); Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Die Unterschiede in den Wuchsleistungen sind pflanzenspezifisch und können nicht ausschließlich mit mangelnder Nährstoffversorgung erklärt werden, da alle Kontrollen nach gärtnerischer Praxis mit einem Volldünger ausreichend mit Nährstoffen versorgt wurden. Somit liegt die Vermutung nahe, dass spezifische Substratparameter die Ursache für die Wachstumsunterschiede sein können. *Carica papaya* und *Coffea arabica* wuchsen im gleichen Substrat zeigten aber deutliche Unterschiede im Pflanzenwachstum. Ähnliche Feststellungen konnten für *Digitalis trojana*, *Geranium maderense* sowie *Nerium oleander* gemacht werden, die im gleichen Pflanzsubstrat wuchsen. Das C/N-Verhältnis im Substrat stellt einen wichtigen Indikator für die Stickstoffverfügbarkeit der Pflanzen dar. Viele Pflanzenarten werden bei einem C/N-Verhältnis < 20 ausreichend mit Stickstoff versorgt.

Die Torfreduzierung in den Testsubstraten der sieben untersuchten Testpflanzen führte zu keinem negativen Effekt auf das Pflanzenwachstum und kann zur weiteren Anwendung empfohlen werden.

4.1.4 Vergleich der Frisch- und Trockenmasse sowie Nährstoffgehalte ausgewählter Blattproben der Pflanzen in den torfreduzierten Testsubstraten

Von den Pflanzen *Aglaonema commutatum*, *Coffea arabica* und *Geranium maderense* wurden Blattproben entnommen und deren Frisch- und Trockenmasse sowie Nährstoffgehalte bestimmt. Anhand der berechneten Signifikanzwerte (p-Werte) konnten keine signifikanten Unterschiede in der Frisch- und Trockenmasse zu den Kontrollen nachgewiesen werden. Der Tabelle C-1 im Anhang C sind die mittleren Frisch- und Trockenmassen der ausgewählten Blattproben sowie die berechneten p-Werte zu entnehmen. Die Frisch- und Trockenmassen der Testsubstrate bewegten sich auf einem vergleichbaren Niveau wie die der Kontrollen (vgl. Abb. 4.11).

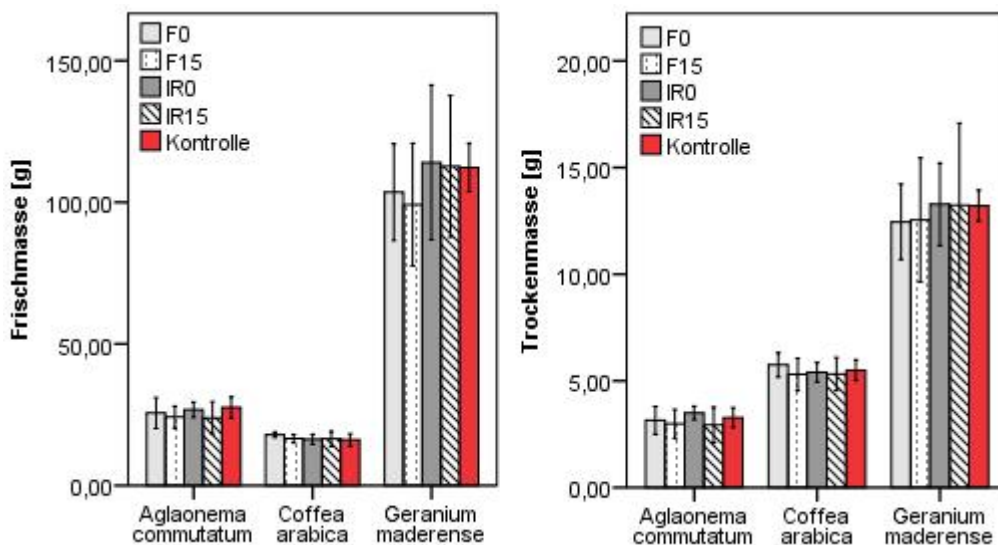


Abb. 4.11: Mittlere Frischmasse (FM) / Trockenmasse (TM) der Blattproben von *Aglaonema commutatum*, *Coffea arabica* und *Geranium maderense* im Topfversuch (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Die Gesamtgehalte der untersuchten Makronährstoffe Calcium, Kalium, Magnesium und Phosphor der entnommenen Blattproben sind in der Tabelle 4.3 aufgeführt. Überwiegend wurden vergleichbare Nährstoffgehalte zwischen den Kontrollen und Testsubstraten festgestellt. Große Unterschiede im Kaliumgehalt konnten zwischen dem Kontrollsubstrat

und den Testsubstraten von *Coffea arabica* sowie zwischen der Kontrolle und den beiden Testsubstraten ohne Biokohle (IR0 und F0) von *Aglaonema commutatum* nachgewiesen werden, ansonsten bewegten sich die Nährstoffgehalte auf einem vergleichbaren Niveau wie die Kontrollen. Die nachgewiesenen Unterschiede im Kaliumgehalt hatten keinen signifikant negativen Einfluss auf das Pflanzenwachstum (vgl. Kapitel 4.1.2). Die untersuchten Testsubstrate von *Coffea arabica* wiesen alle einen höheren Calcium- und Phosphorgehalt, aber einen niedrigeren Magnesiumgehalt auf als die Kontrolle, jedoch zeigten die Kontrollen und Testsubstrate ein vergleichbares Pflanzenwachstum. Höhere Phosphor- und Magnesiumgehalte gegenüber der Kontrolle als auch den Testsubstraten mit Biokohle (IR15 und F15) wurden für die Testsubstrate ohne Biokohle (IR0 und F0) für *Geranium maderense* festgestellt. Die Phosphorgehalte der Testsubstrate IR0, IR15 und F0 von *Aglaonema commutatum* waren geringer als die der Kontrollen und dem Testsubstrat F15.

Tab. 4.3: Vergleich der mittleren Gesamtnährstoffgehalte der Blattproben der Testsubstrate (IR0, IR15, F0, F15) mit den Kontrollsubstraten von *Aglaonema commutatum*, *Coffea arabica* und *Geranium maderense*

<i>Aglaonema commutatum</i>				
	Ca [mg/kg]	K [mg/kg]	Mg [mg/kg]	P [mg/kg]
Kontrolle	26518 ± 2510	22657 ± 2727	1952 ± 87	2870 ± 269
IR0	25788 ± 3233	15649 ± 2831	1824 ± 228	1938 ± 253
IR15	24560 ± 3483	19676 ± 5369	1791 ± 408	2529 ± 882
F0	26755 ± 2564	15894 ± 3457	2424 ± 193	2496 ± 460
F15	22620 ± 2245	21446 ± 5801	1688 ± 331	2847 ± 1426
<i>Coffea arabica</i>				
Kontrolle	14940 ± 969	12959 ± 6687	3874 ± 690	1725 ± 832
IR0	18093 ± 1094	23718 ± 1643	3230 ± 101	2817 ± 152
IR15	18733 ± 1323	24979 ± 730	3114 ± 209	2348 ± 201
F0	17315 ± 1540	20672 ± 1664	3234 ± 202	2985 ± 181
F15	18855 ± 481	23310 ± 1950	3108 ± 210	2208 ± 206
<i>Geranium maderense</i>				
Kontrolle	16010 ± 1859	24557 ± 4346	1991 ± 41	3203 ± 430
IR0	15940 ± 1541	24568 ± 1792	2130 ± 321	4156 ± 661
IR15	16803 ± 783	25059 ± 2987	2022 ± 108	3341 ± 189
F0	17795 ± 1866	23340 ± 2758	2243 ± 193	4264 ± 505
F15	15693 ± 2662	23796 ± 2895	1888 ± 104	3053 ± 278

4.1.5 Vergleich der Wachstumsparameter der Testsubstrate mit und ohne Biokohlezugabe

Um den Einfluss der Biokohle auf das Pflanzenwachstum zu bestimmen, wurden bei allen Pflanzen auf zwei verschiedene Art und Weisen die Testsubstrate mit Biokohle mit den Testsubstraten ohne Biokohle verglichen:

1. Gepoolte Daten: gemessene Pflanzenparameter der Kompost- und Fermentationsvarianten mit Biokohle (IR15+F15) sowie der Kompost- und Fermentationsvarianten ohne Biokohle (IR0+F0) wurden zusammengefasst und verglichen

2. Ungepoolte Daten: gemessene Pflanzenparameter der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (IR15 und IR0) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (F15 und F0) wurden miteinander verglichen

4.1.5.1 Pflanzen der tropischen Klimazone

Signifikante Unterschiede in Blattanzahl und Biomasse konnten für die Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle für *Aglaonema commutatum* festgestellt werden (vgl. Abb. 4.12 (A) und (B)). In der Tabelle C-2 im Anhang C sind die mittleren Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter der gepoolten Daten der Varianten mit und ohne Biokohle sowie die berechneten Signifikanzen aufgeführt. Die mittlere Blattanzahl der Variante ohne Biokohle betrug $104,8 \pm 11,1$ im Vergleich zur Variante mit Biokohle von $78,6 \pm 25$. Ein signifikanter Biomassezuwachs von 125 g wurde für die Variante ohne Biokohle gegenüber der Variante mit Biokohle nachgewiesen. *Carica papaya* zeigte nur in der Pflanzhöhe einen signifikanten Unterschied von 10,5 cm in der Variante mit Biokohle gegenüber der Variante ohne Biokohle, in der Blattanzahl und Biomasse wurden keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen (vgl. Abb. 4.12 (A) bis (C)). *Coffea arabica* zeigte keine signifikanten Unterschiede in den untersuchten Pflanzenparametern. Das Pflanzenwachstum beider Varianten kann als gleichwertig bewertet werden (vgl. Abb. 4.12 (A) bis (C)).

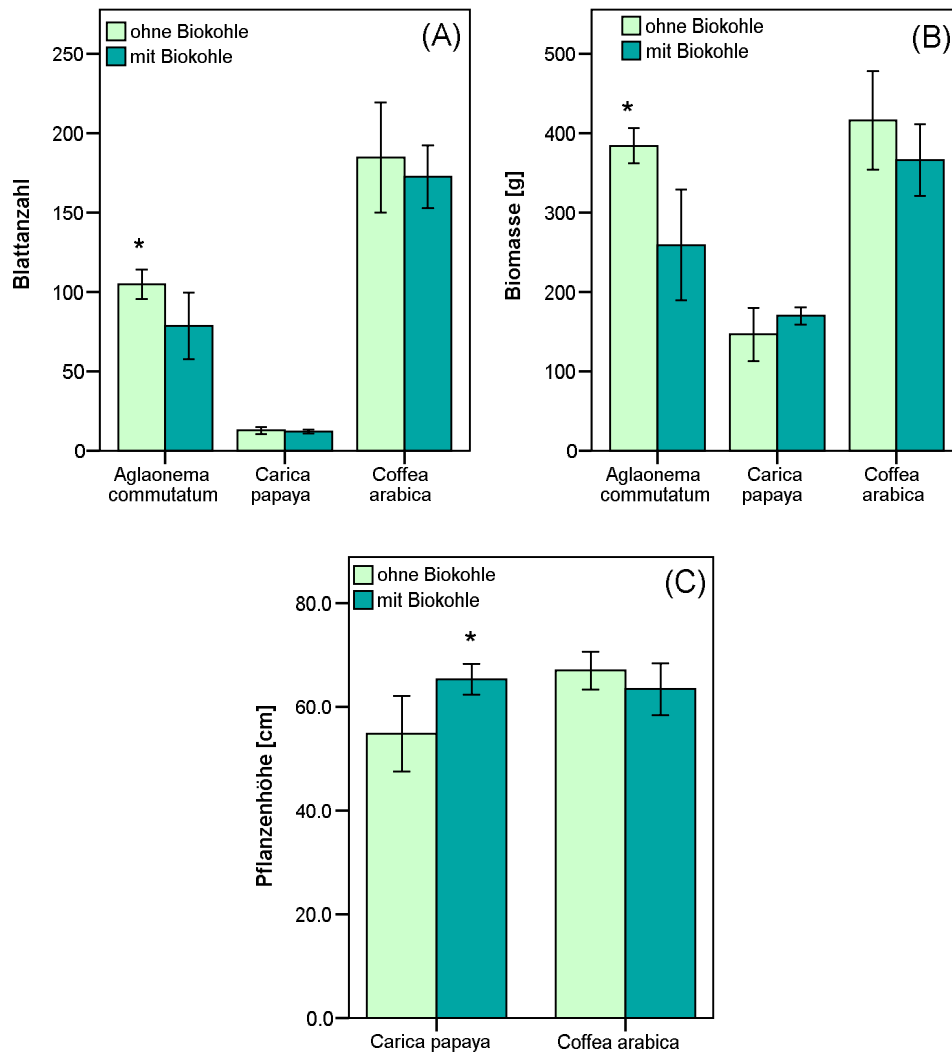


Abb. 4.12: Mittlere Blattanzahl (A), Biomasse (B) und Pflanzenhöhe (C) der Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle (gepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Beim Vergleich der beiden Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (IR0 und IR15) wurden bei keiner Testpflanze der tropischen Klimazone signifikante Unterschiede in der Pflanzenhöhe, Blattanzahl und Biomasse festgestellt (vgl. Abb. 4.13 bis 4.15). In den Tabellen C-3 und C-4 im Anhang sind die mittleren Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter der ungepoolten Daten der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle als auch die berechneten Signifikanzen aufgeführt. *Aglaonema commutatum* zeigte tendenziell in der Kompostvariante ohne Biokohle (IR0) eine höhere Biomasse als in der Kompostvariante mit Biokohle (IR15). Die Fermentationsvariante mit Biokohle (F15) zeigte für *Carica papaya* einen signifikanten Unterschied in der Pflanzenhöhe von 5,1 cm gegenüber der Fermentationsvariante ohne Biokohle (F0) (vgl. Abb. 4.13), für alle anderen Pflanzen und Parameter wurden keine

signifikanten Unterschiede nachgewiesen. Für die Fermentationsvariante ohne Biokohle (F0) konnten signifikante Unterschiede in der Biomasse von 158,7 g für *Aglaonema commutatum* und von 96,7 g für *Coffea arabica* gegenüber der Fermentationsvariante mit Biokohle (F15) festgestellt werden (vgl. Abb. 4.15). Die schlechteren Wachstumsergebnisse der Fermentations- und Kompostvarianten mit Biokohle (F15 und IR15) gegenüber den Fermentations- und Kompostvarianten ohne Biokohle (F0 und IR0) bei *Aglaonema commutatum* könnten mit dem C/N-Verhältnis zusammenhängen. Beide Biokohlevarianten weisen ein C/N-Verhältnis von 22 und 23 auf. Pflanzen zeigen eine verminderte Stickstoffaufnahme bei einem C/N-Verhältnis größer 20. Es lässt sich vermuten, dass es durch die Biokohle zu einer Stickstofffestlegung kam, die die Pflanzenverfügbarkeit reduzierte und es somit zu Wachstumsbeeinträchtigungen kam. Beide Biokohlevarianten weisen einen leicht erhöhten pH-Wert auf von 6,6 bei der Fermentationsvariante (F15) und von 6,8 bei der Kompostvariante (IR15) gegenüber den Varianten ohne Biokohle (F0 und IR0). Zum optimalen Gedeihen von *Aglaonema* werden pH-Werte zwischen 5,5 und 6 im Substrat bevorzugt. Es liegt die Vermutung nahe, dass durch die Biokohle, die basisch wirkend ist, sich der pH-Wert erhöht hat und somit keine optimalen Wachstumsbedingungen vorlagen.

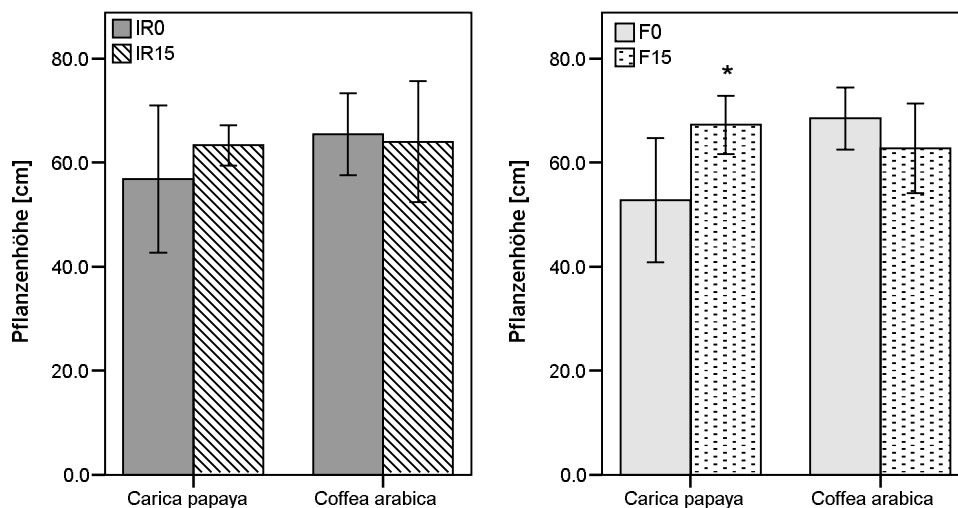


Abb. 4.13: Mittlere Pflanzenhöhe der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

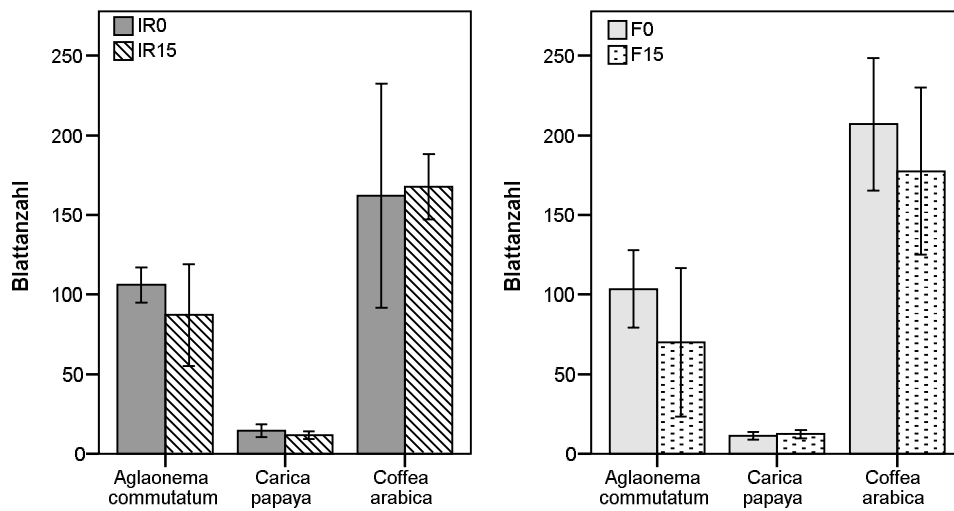


Abb. 4.14: Mittlere Blattanzahl der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

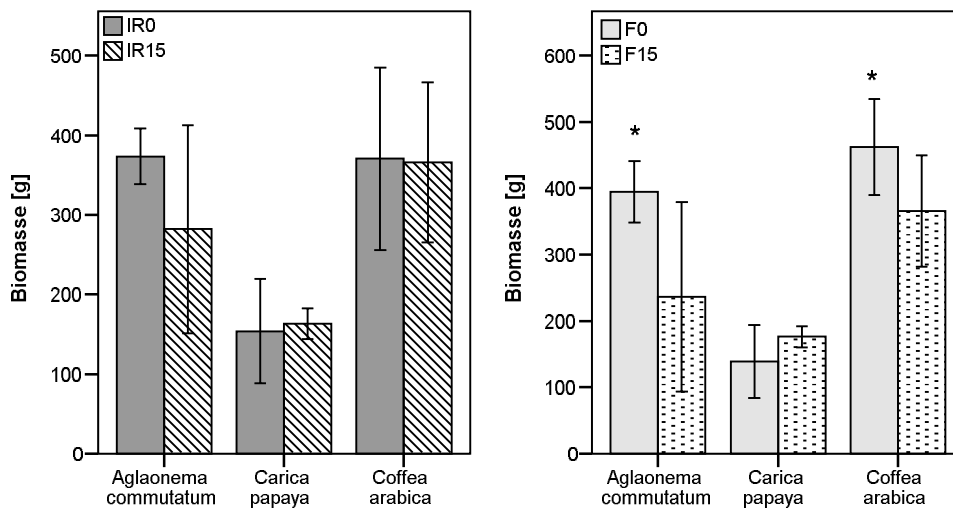


Abb. 4.15: Mittlere Biomasse der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

4.1.5.2 Pflanzen der subtropischen Klimazone

Signifikante Unterschiede in Biomasse und Pflanzenhöhe konnten für die Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle nur für *Geranium maderense* festgestellt werden (vgl. Abb. 4.16 (B) und (C)). Es wurde ein signifikanter Biomassezuwachs von 213,6 g für die Variante ohne Biokohle gegenüber der Variante mit Biokohle ermittelt. Hinsichtlich der Pflanzenhöhe zeigte sich ein signifikanter Unterschied von 3,1 cm in der Variante ohne Biokohle gegenüber der Variante mit Biokohle. Bei allen anderen Pflanzen wurden keine signifikanten Unterschiede für die untersuchten Pflanzenparameter nachgewiesen (vgl. Abb. 4.16 A-C). In der Tabelle C-5 im Anhang C sind die mittleren Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter der gepoolten Daten der Varianten mit und ohne Biokohle sowie die berechneten Signifikanzen aufgeführt.

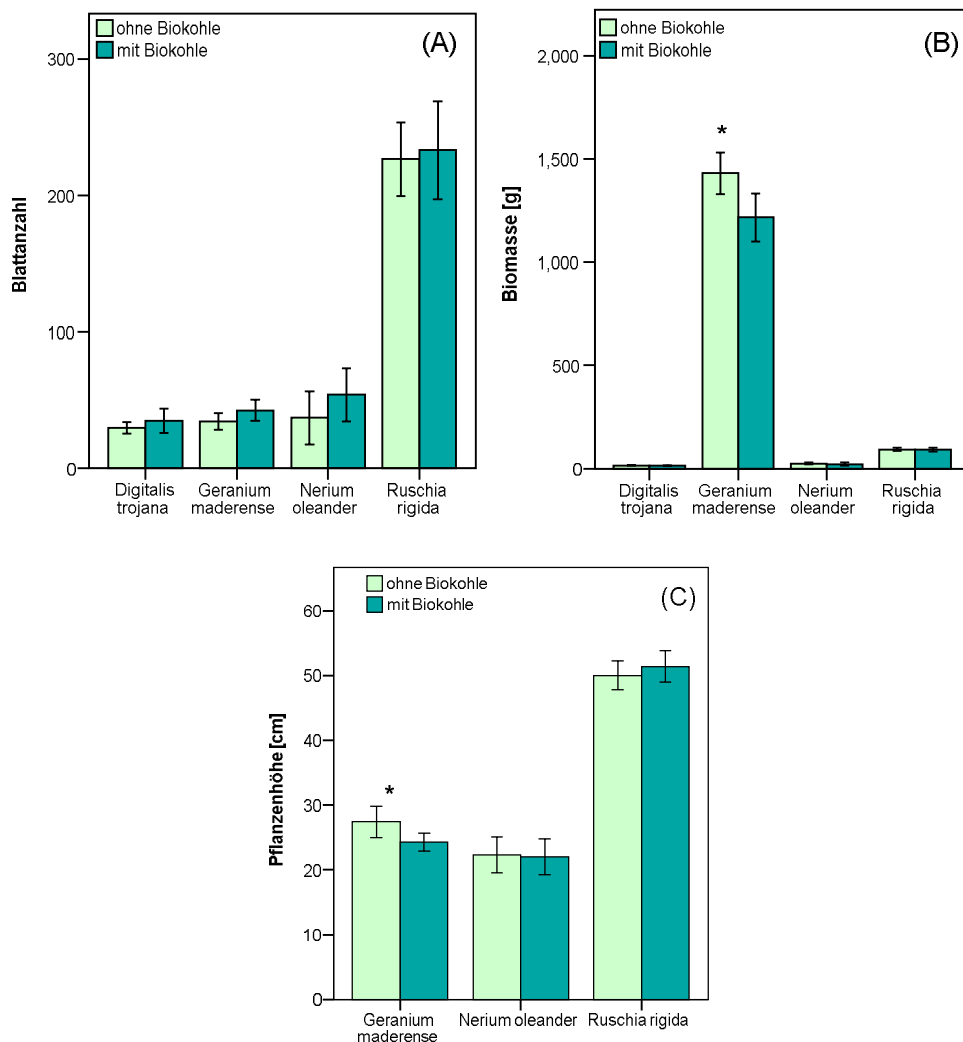


Abb. 4.16: Mittlere Blattanzahl (A), Biomasse (B) und Pflanzenhöhe (C) der Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle (gepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Beim Vergleich der beiden Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (IR0 und IR15) wurden signifikante Unterschiede in der Biomasse für *Digitalis trojana* und *Geranium maderense* sowie in der Pflanzenhöhe für *Geranium maderense* festgestellt (vgl. Abb. 4.17 und 4.19). Im Vergleich zu den Kompostvarianten mit Biokohle (IR15) zeigten die Kompostvarianten ohne Biokohle (IR0) einen signifikanten Biomassezuwachs von 4 g für Digitalispflanzen und von 204,2 g für Geraniumpflanzen. Für die Kompostvariante ohne Biokohle (IR0) wurde ein signifikanter Unterschied in der Pflanzenhöhe von 4,9 cm gegenüber der Kompostvariante mit Biokohle (IR15) für die Geraniumpflanzen nachgewiesen. Für alle anderen Pflanzen konnten keine signifikanten Unterschiede in den untersuchten Pflanzenparametern festgestellt werden. Anhand der errechneten Signifikanzwerte, die alle $\geq 0,1$ sind, lassen sich keine Tendenzen hinsichtlich eines besseren Pflanzenwachstums in den Testsubstraten ableiten. Beim Vergleich der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (F15 und F0) konnten für keine der Testpflanzen signifikante Unterschiede in den untersuchten Pflanzenparametern identifiziert werden (vgl. Abb. 4.17 bis 4.19). In den Tabellen C-6 und C-7 im Anhang C sind die mittleren Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter der ungepoolten Daten der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle als auch die berechneten Signifikanzen aufgeführt.

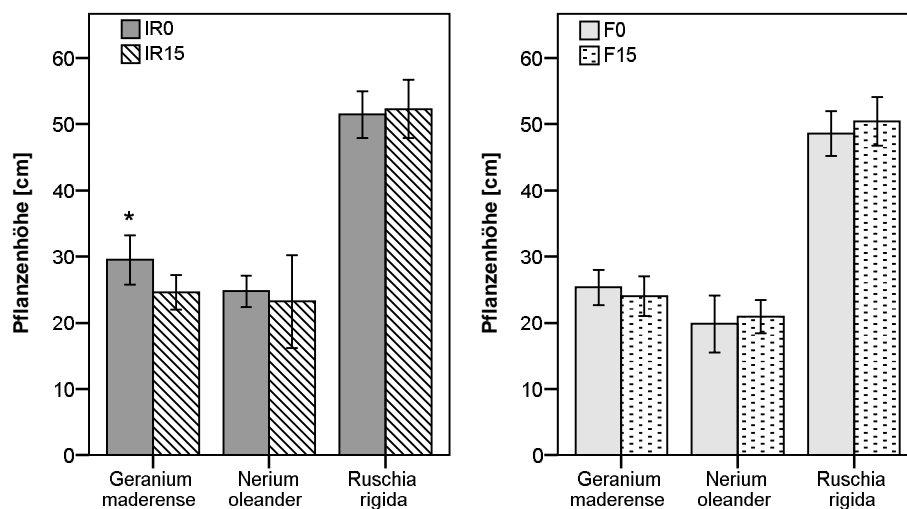


Abb. 4.17: Mittlere Pflanzenhöhe der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentations-varianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

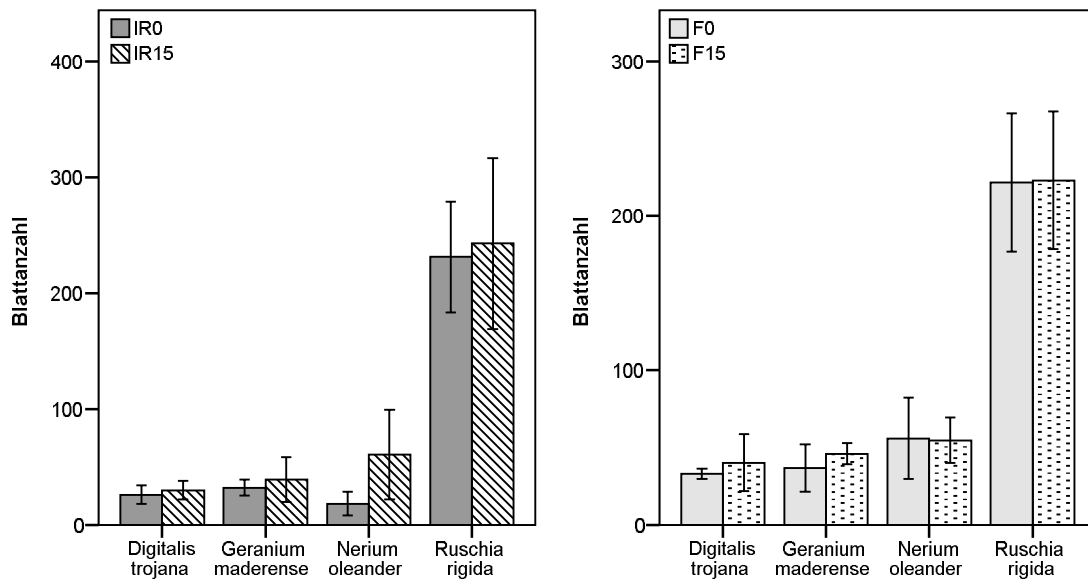


Abb. 4.18: Mittlere Blattanzahl der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

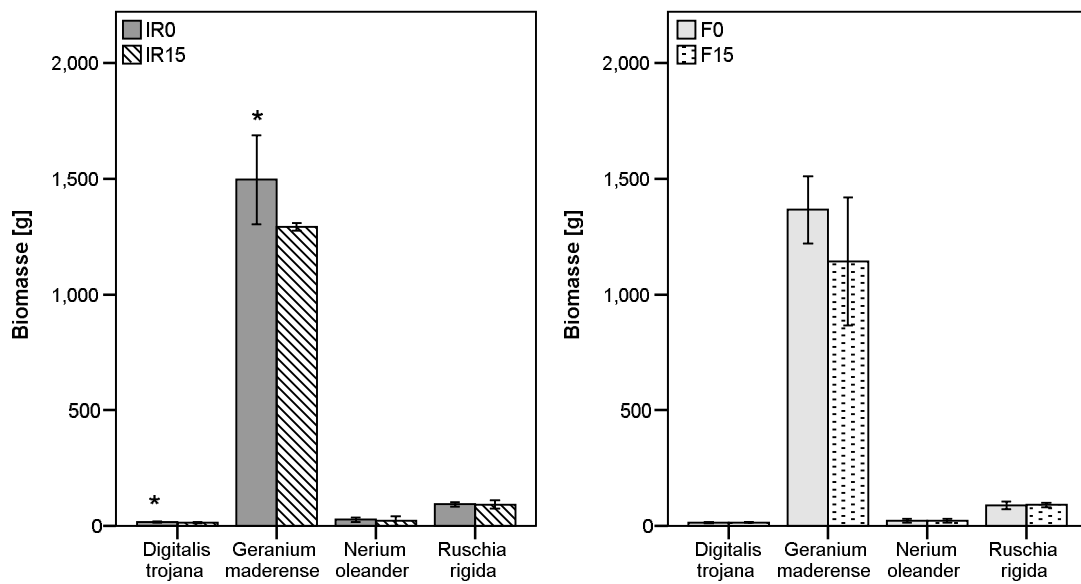


Abb. 4.19: Mittlere Biomasse der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (links) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (rechts) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

4.1.5.3 Pflanzen der gemäßigten Klimazone

Wie aus der Abbildung 4.20 sowie Tabelle C-8 im Anhang C ersichtlich, konnten die einzigen signifikanten Unterschiede bei den Silphiumpflanzen hinsichtlich der Biomasse in den Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle festgestellt werden. Es wurde ein signifikanter Biomassezuwachs von 21,2 g für die Variante ohne Biokohle gegenüber der Variante mit Biokohle ermittelt. Bei allen anderen Pflanzen wurden keine signifikanten Unterschiede für die untersuchten Pflanzenparameter nachgewiesen.

In der Tabelle C-8 im Anhang C sind die mittleren Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter der gepoolten Daten der Varianten mit und ohne Biokohle sowie die berechneten Signifikanzen aufgeführt.

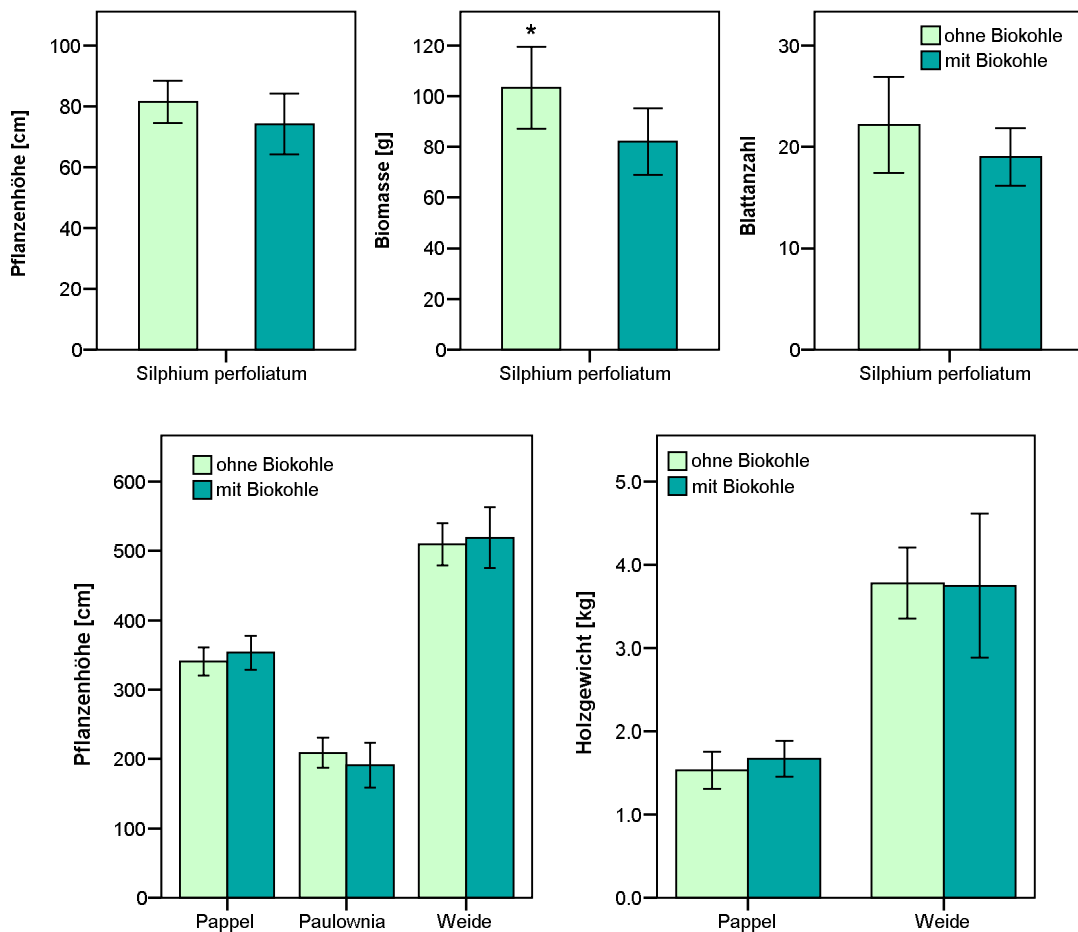


Abb. 4.20: Mittlere/s Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattanzahl und Holzgewicht der Varianten ohne Biokohle gegenüber den Varianten mit Biokohle (gepoolte Daten) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Beim Vergleich der beiden Kompostvarianten mit und ohne Biokohle als auch der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle konnten bei keiner Pflanze signifikante Unterschiede in den untersuchten Pflanzenparametern identifiziert werden (vgl. Abb. 4.21 und 4.22). In den Tabellen C-9 und C-10 im Anhang C sind die mittleren Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter der ungepoolten Daten der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (IR15 und IR0) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (F15 und F0) als auch die berechneten Signifikanzen aufgeführt. Alle Pflanzen zeigten ein gleichwertiges Pflanzenwachstum.

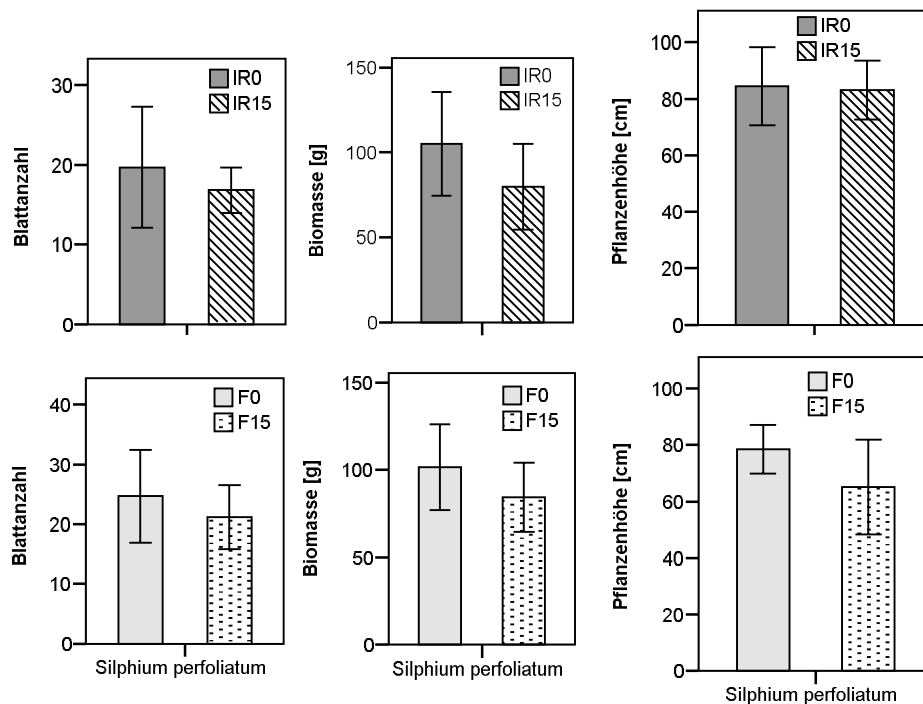


Abb. 4.21: Mittlere Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (oben) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (unten) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

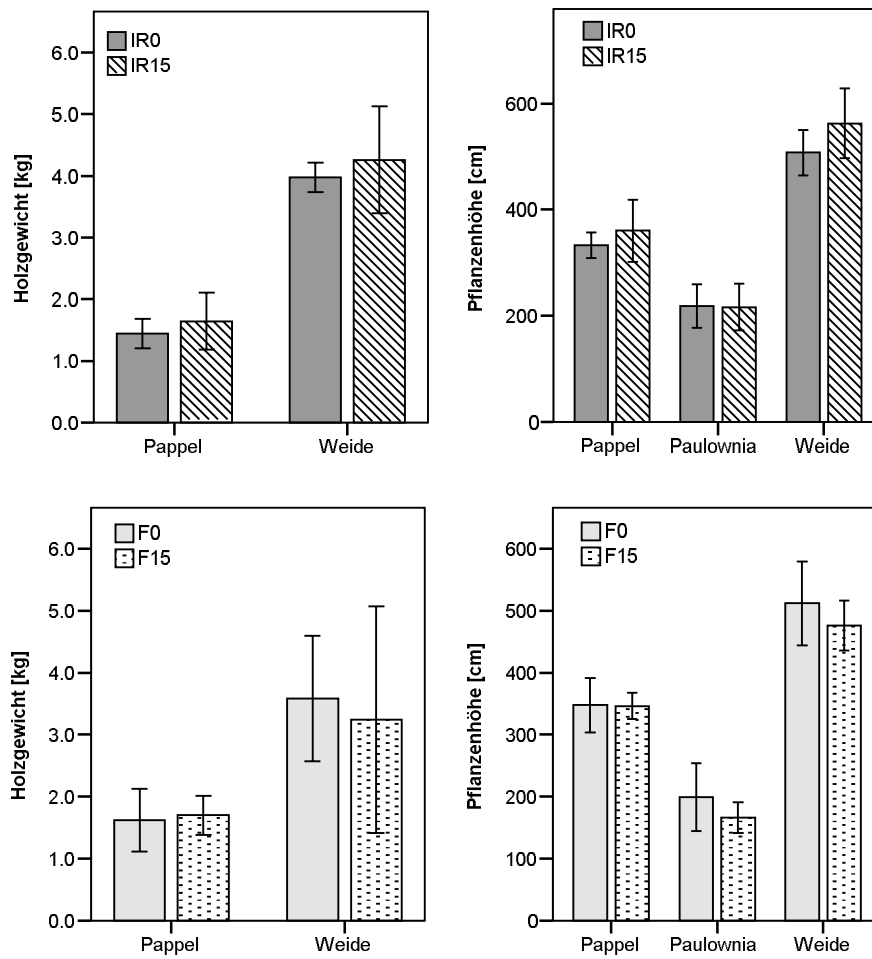


Abb. 4.22: Mittleres Holzgewicht und mittlere Pflanzenhöhe der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (oben) sowie der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (unten) (ungepoolte Daten) der Gehölze der gemäßigten Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

4.1.6 Vergleich der Wachstumsparameter der Testsubstrate mit kompostiertem und fermentiertem Material

Um herauszufinden, ob der Herstellungsprozess (Fermentation und Kompostierung) einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum hat, wurden bei allen Pflanzen auf zwei verschiedene Art und Weisen die Fermentationsvarianten mit den Kompostvarianten verglichen:

1. Gepoolte Daten: gemessene Pflanzenparameter der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (F0 und F15) sowie der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (IR0 und IR15) wurden miteinander gepoolt und verglichen

2. Ungepoolte Daten: gemessene Pflanzenparameter der Kompostvarianten mit Biokohle (IR15) wurden mit den Fermentationsvarianten mit Biokohle (F15) verglichen als auch die Kompostvarianten ohne Biokohle (IR0) mit den Fermentationsvarianten ohne Biokohle (F0)

4.1.6.1 Pflanzen der tropischen Klimazone

Beim Vergleich der Fermentationsvarianten mit den Kompostvarianten verdeutlicht die Abbildung 4.23, dass es kaum Unterschiede in den Pflanzenparametern Pflanzenhöhe, Blattanzahl und Biomasse für die Pflanzen der tropischen Klimazone gab. In der Tabelle C-11 im Anhang C sind die mittleren Messwerte der untersuchten Pflanzenparameter der gepoolten Daten der Fermentations- und Kompostvarianten sowie die berechneten Signifikanzen aufgeführt.

Anhand der errechneten Signifikanzwerte (p-Wert) in der Tabelle C-11 im Anhang C wird ersichtlich, dass keine signifikanten Unterschiede für die untersuchten Pflanzenparameter beim Vergleich der Fermentationsvarianten mit den Kompostvarianten nachgewiesen werden konnten. Alle Pflanzen zeigten ein gleichwertiges Pflanzenwachstum (vgl. Abb. 4.23). Somit kann davon ausgegangen werden, dass sowohl in den Fermentations- als auch Kompostvarianten ausreichend Nährstoffe zur Verfügung standen und der Herstellungsprozess keinen Einfluss auf das Pflanzenwachstum hatte.

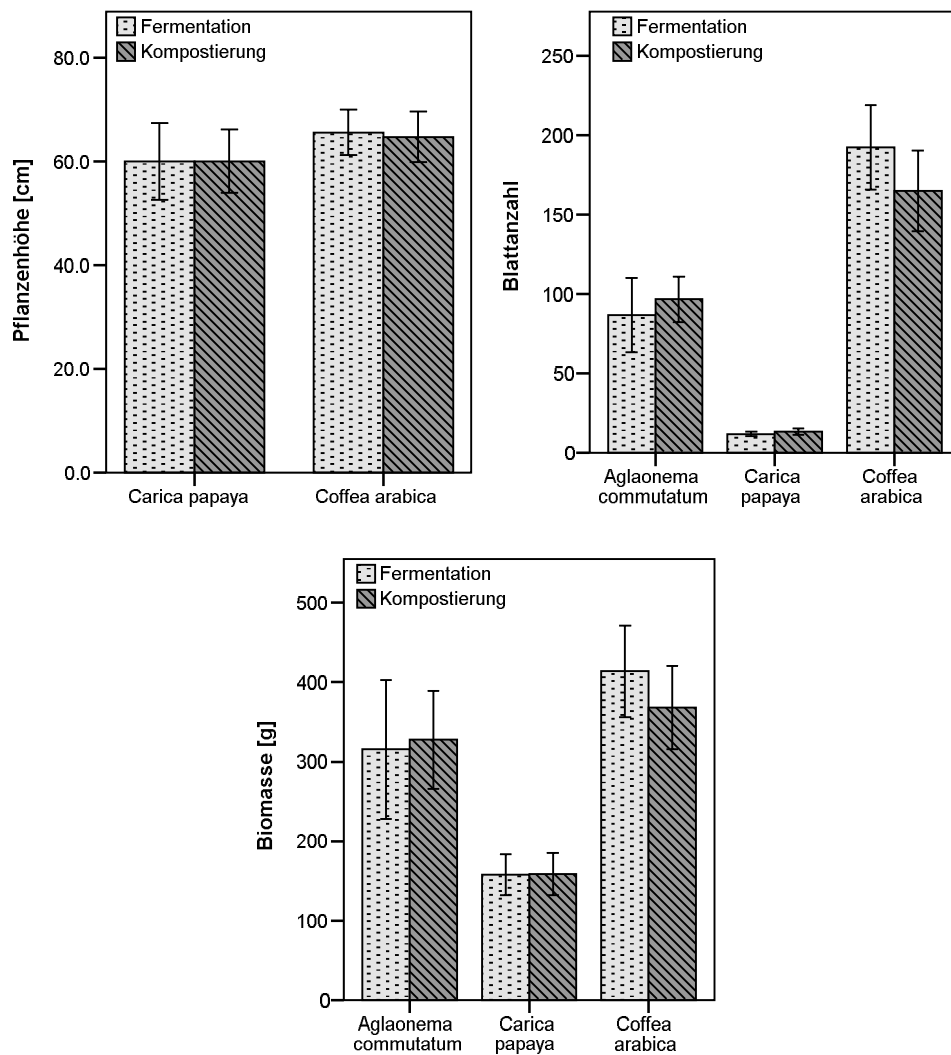


Abb. 4.23: Mittlere Pflanzenhöhe, Blattanzahl und Biomasse der Fermentationsvarianten gegenüber den Kompostvarianten (gepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Anhand der berechneten Signifikanzen, die den Tabellen C-12 und C-13 im Anhang C zu entnehmen sind, wird ersichtlich, dass keine signifikanten Unterschiede in den untersuchten Pflanzenparametern beim Vergleich der ungepoolten Daten der Kompost- und Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle festgestellt werden konnten. Alle Pflanzen zeigten ein gleichwertiges Pflanzenwachstum (vgl. Abb.4.24).

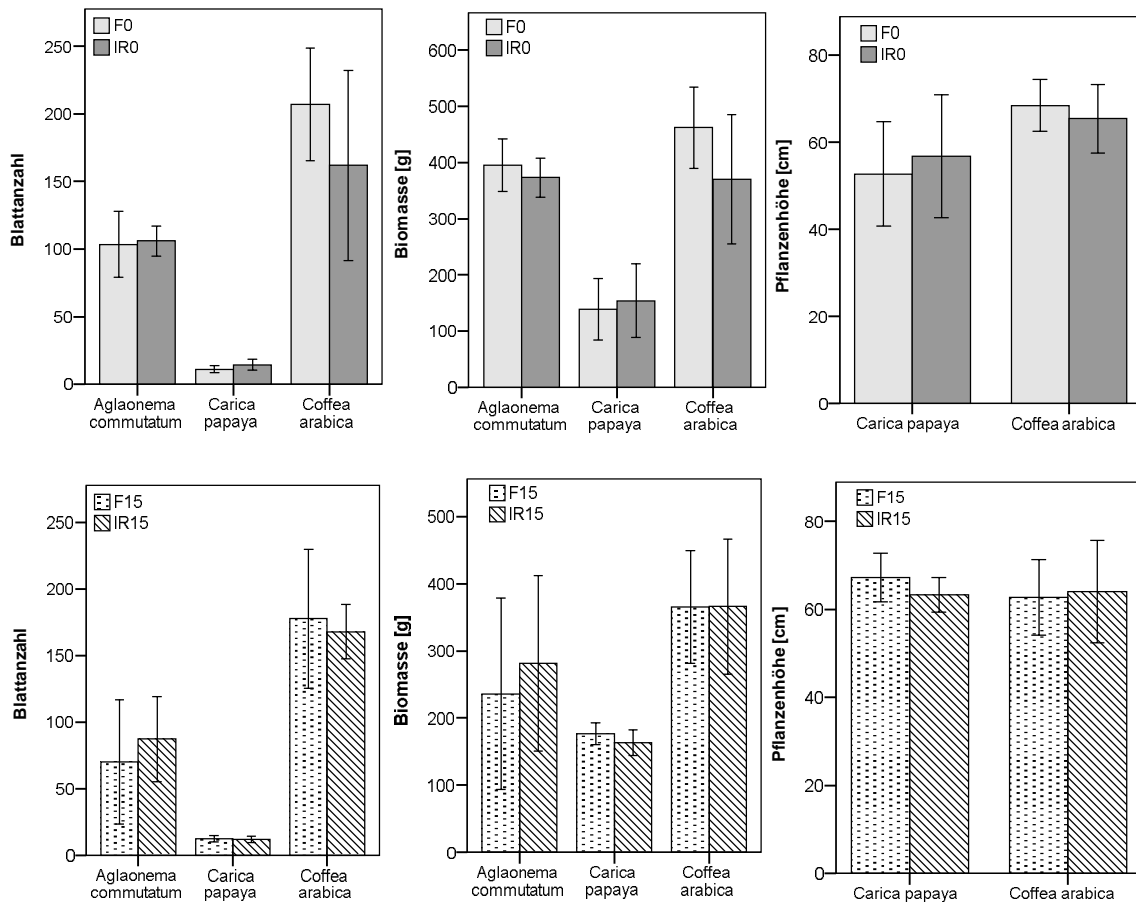


Abb. 4.24: Vergleich der mittleren Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe der Fermentationsvarianten ohne Biokohle mit den Kompostvarianten ohne Biokohle (oben) sowie der Fermentationsvarianten mit Biokohle mit den Kompostvarianten mit Biokohle (unten) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der tropischen Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

4.1.6.2 Pflanzen der subtropischen Klimazone

Aus der Abbildung 4.25 sind für *Nerium oleander* signifikante Unterschiede in der Pflanzenhöhe zu erkennen. Es wurde ein Unterschied in der Pflanzenhöhe von 3,6 cm für die Kompostvariante gegenüber der Fermentationsvariante festgestellt. Geranium- und Ruschiapflanzen zeigten in den Kompostvarianten leicht höhere Pflanzenhöhen, aber nicht als signifikanten Unterschied (vgl. Abb. 4.25). Anhand des berechneten Signifikanzwertes mit $p=0,053$ zeigte sich für die Digitalispflanzen eine Tendenz zu einer erhöhten Blattanzahlentwicklung in den Fermentationsvarianten gegenüber den Kompostvarianten (vgl. Tab.C-14 im Anhang C). Für Geranium- und Neriumpflanzen wurde eine höhere Blattanzahl in den Fermentationsvarianten gegenüber den Kompostvarianten bestimmt, aber nicht als signifikanten Unterschied. Ruschiapflanzen zeigten in den Kompostvarianten eine höhere Blattanzahl, aber nicht signifikant. Es wurden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Biomasse in den Kompost- und

Fermentationsvarianten festgestellt, aber alle Kompostvarianten zeigten höhere Biomassen (vgl. Tab.C-14 im Anhang C).

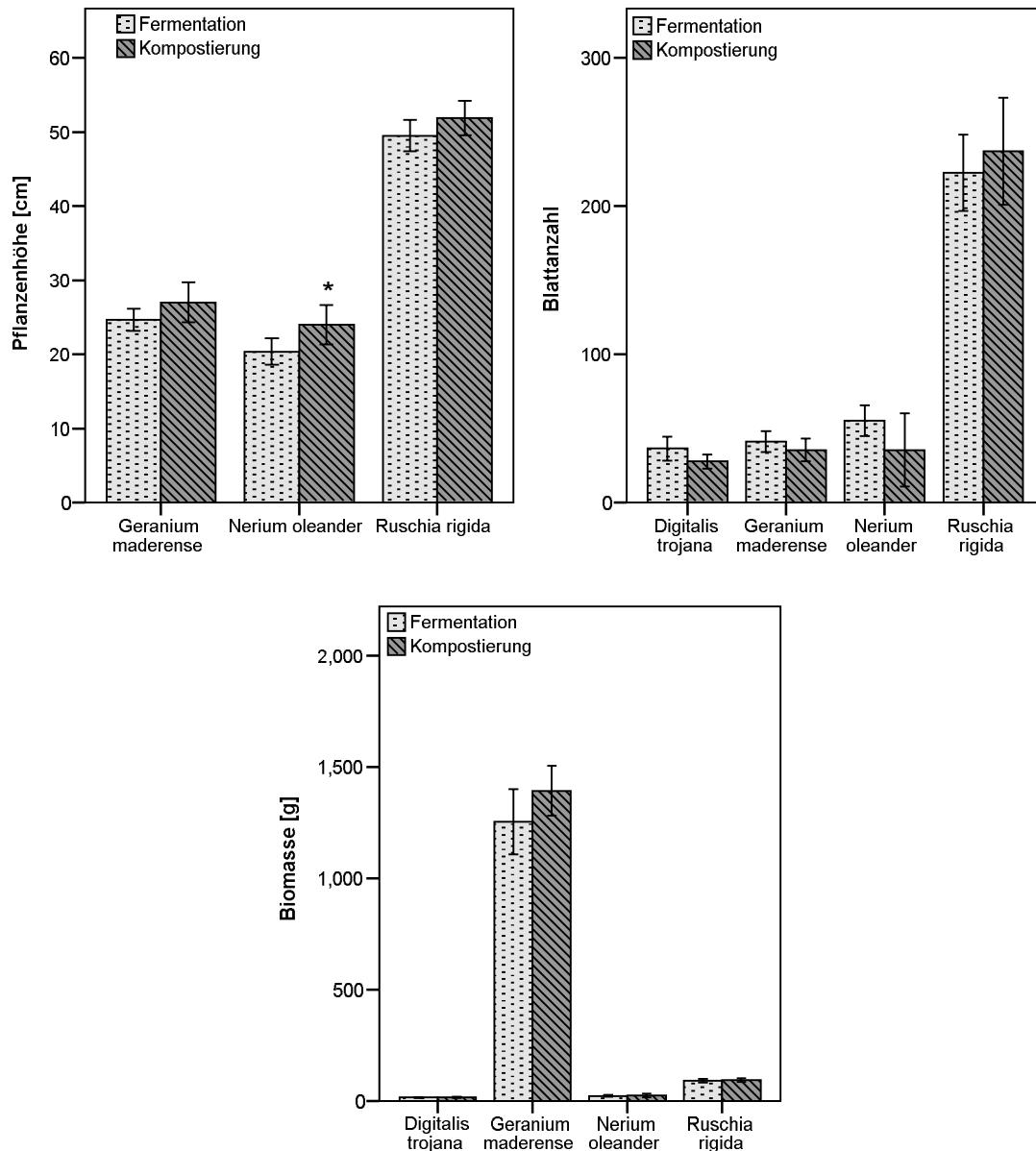


Abb. 4.25: Mittlere Pflanzenhöhe, Blattanzahl und Biomasse der Fermentationsvarianten gegenüber den Kompostvarianten (gepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Für die Nerium- und Geraniumpflanzen wurden hinsichtlich der Pflanzenhöhe signifikante Unterschiede für die Kompostvarianten ohne Biokohle (IR0) gegenüber den Fermentationsvarianten ohne Biokohle (F0) nachgewiesen (vgl. Abb. 4.26 obere Reihe) Die berechneten Signifikanzwerte sind der Tabelle C-15 im Anhang C zu entnehmen. Der Unterschied in der Pflanzenhöhe von IR0 zu F0 betrug bei den Geraniumpflanzen 4,1 cm

und 4,9 cm bei den Neriumpflanzen. Darüber hinaus zeigten die Neriumpflanzen hoch signifikante Unterschiede in der Blattanzahl für die Fermentationsvarianten ohne Biokohle gegenüber den Kompostvarianten ohne Biokohle. Die mittlere Blattanzahl für F0 betrug $56 \pm 16,6$ und für IR0 $18,3 \pm 6,3$. Es wurden keine weiteren signifikanten Unterschiede in den untersuchten Pflanzenparametern für die Testpflanzen festgestellt. Digitalispflanzen tendierten dazu in den Fermentationsvarianten ohne Biokohle mehr Blätter auszubilden als in den Kompostvarianten ohne Biokohle.

Aus der Tabelle C-16 im Anhang C geht hervor, dass die Signifikanzwertberechnung für den Vergleich der Kompost- und Fermentationsvarianten mit Biokohle keine signifikanten Unterschiede in den untersuchten Pflanzenparametern ergeben hat. Aus der Abbildung 4.26 (untere Reihe) wird ersichtlich, dass die Pflanzen ein gleichwertiges Pflanzenwachstum in den Kompost- und Fermentationsvarianten mit Biokohle zeigten.

Darstellung der Ergebnisse

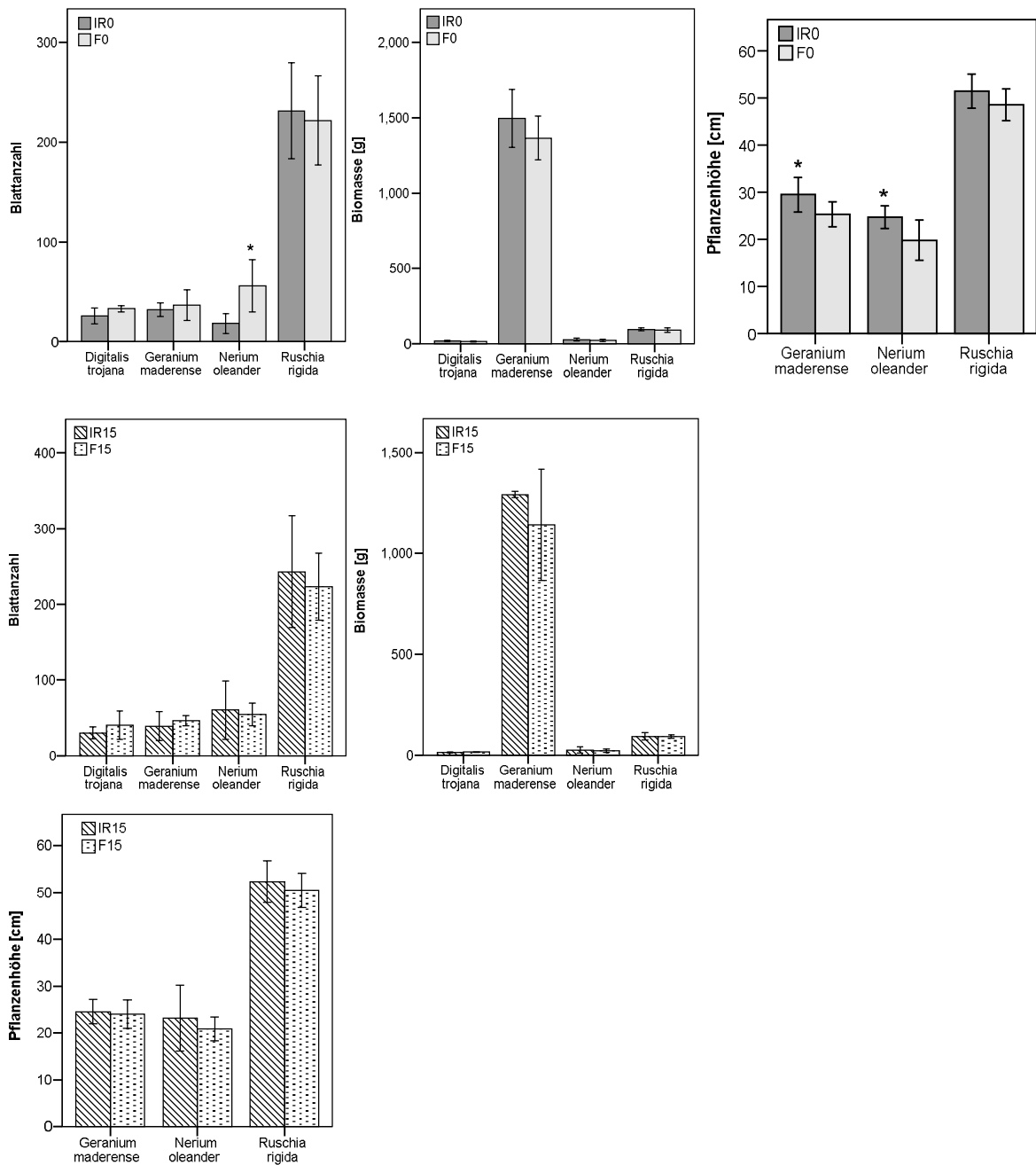


Abb. 4.26: Vergleich der mittleren Blattanzahl, Biomasse und Pflanzenhöhe der Fermentationsvarianten ohne Biokohle mit den Kompostvarianten ohne Biokohle (oben) sowie der Fermentationsvarianten mit Biokohle mit den Kompostvarianten mit Biokohle (unten) (ungepoolte Daten) der Pflanzen der subtropischen Klimazone (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

4.1.6.3 Pflanzen der gemäßigten Klimazone

Beim Vergleich der Kompostvarianten mit den Fermentationsvarianten wurden signifikante Unterschiede in der Pflanzenhöhe von 35,5 cm bei Paulownia und 12 cm bei den Silphiumpflanzen festgestellt. Weide tendierte zu einer höheren Pflanzenhöhe in der Kompostvariante, Pappel zeigte keine Unterschiede (vgl. Abb. 4.27). Die berechneten Signifikanzwerte (p -Werte) sind der Tabelle C-17 im Anhang C zu entnehmen. Hinsichtlich der Blattanzahl tendierten die Silphiumpflanzen zu einer höheren Blattanzahl in den Fermentationsvarianten. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in der Biomasse für die Silphiumpflanzen festgestellt. Weide und Pappel zeigten keine signifikanten Unterschiede im Holzgewicht (vgl. Abb. 4.27).

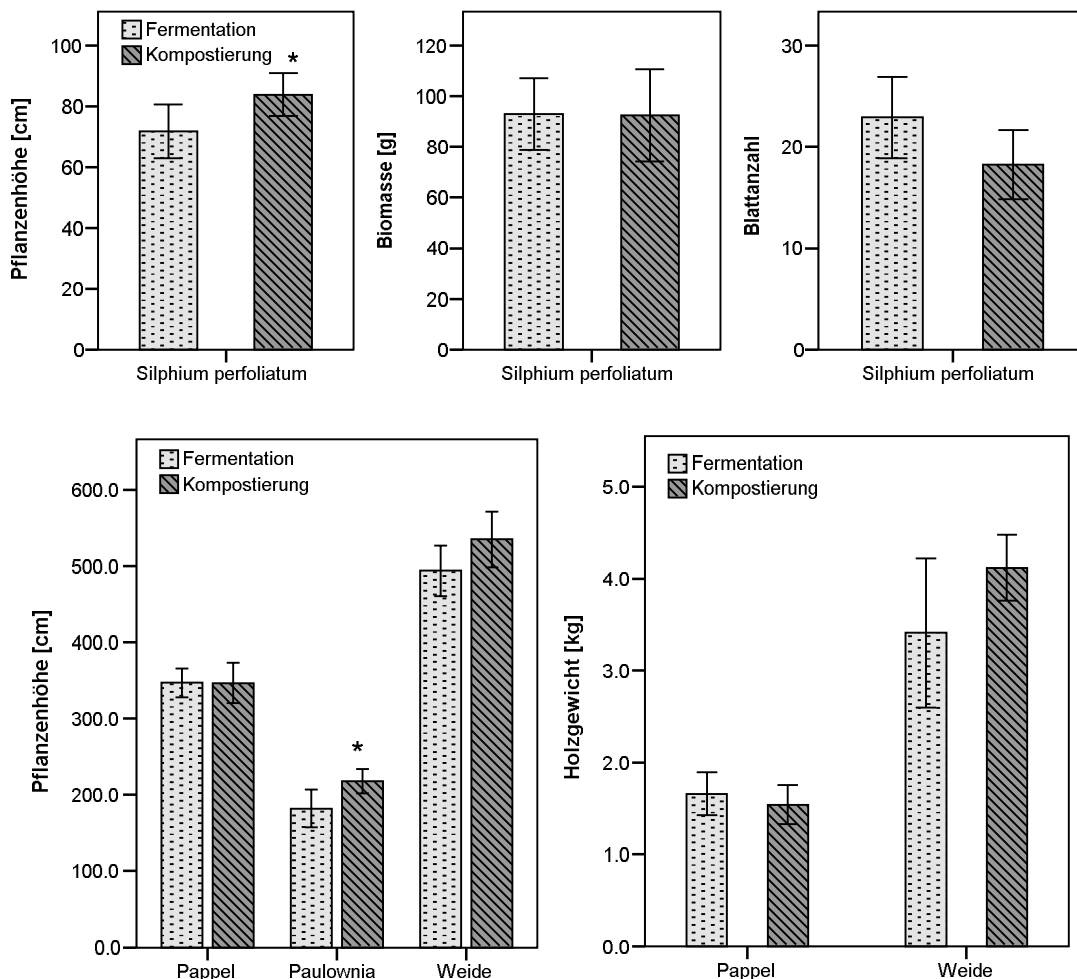


Abb. 4.27: Mittlere Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattanzahl und Holzgewicht der Fermentationsvarianten gegenüber den Kompostvarianten (gepoolte Daten) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Die berechneten p-Werte in der Tabelle C-18 im Anhang C zeigten keine signifikanten Unterschiede in den untersuchten Pflanzenparametern hinsichtlich des Vergleichs der Kompost- und Fermentationsvarianten ohne Biokohle. Alle Pflanzen wiesen ein gleichwertiges Pflanzenwachstum auf (vgl. Abb 4.28).

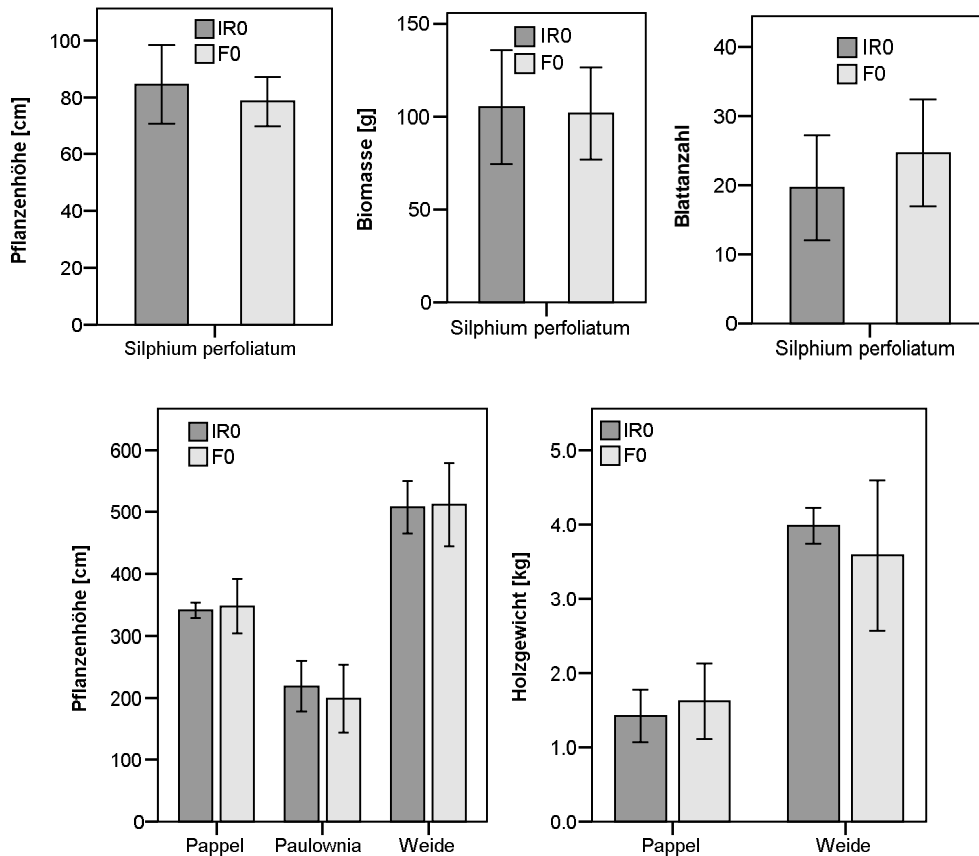


Abb. 4.28: Mittlere/s Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattanzahl und Holzgewicht der Fermentationsvarianten ohne Biokohle (F0) gegenüber den Kompostvarianten ohne Biokohle (IR0) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone (Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

Es wurden signifikante Unterschiede in der Pflanzenhöhe für Paulownia, Weide und Silphium für die Kompostvarianten mit Biokohle (IR15) gegenüber den Fermentationsvarianten mit Biokohle (F15) festgestellt. Die Unterschiede in der Pflanzenhöhe von IR15 zu F15 lagen bei 51 cm für Paulownia, bei 86,8 cm für Weide und bei 17,9 cm für Silphium. In der Tabelle C-19 im Anhang C sind die berechneten Signifikanzwerte (p-Werte) aufgeführt.

Für die Pflanzenparameter Holzgewicht, Blattanzahl und Biomasse konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Wie aus der Abbildung 4.29 ersichtlich, zeigten die untersuchten Pflanzen diesbezüglich ein gleichwertiges Pflanzenwachstum.

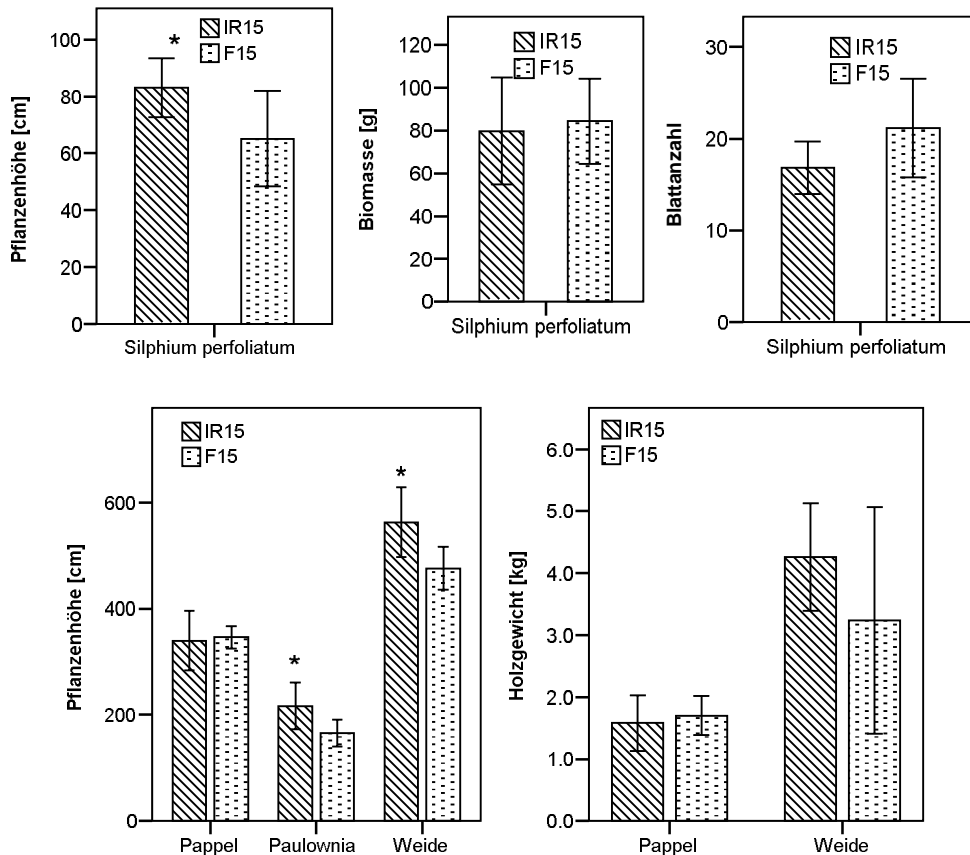


Abb. 4.29: Mittlere/s Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattanzahl und Holzgewicht der Fermentationsvarianten mit Biokohle (F15) gegenüber den Kompostvarianten mit Biokohle (IR15) der Pflanzen der gemäßigten Klimazone (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test; Fehlerbalken präsentieren das 95 % Konfidenzintervall)

4.1.7 Zusammenfassung der untersuchten Pflanzenparameter aller Topfversuche

Die umfassenden Ergebnisse aus den Topfversuchen haben gezeigt, dass es möglich ist, aus den anfallenden Reststoffen des Botanischen Gartens Kompost/Biokohlekompost und fermentiertes Material mit und ohne Biokohle herzustellen, welcher/s für die Verwendung als Mischkomponente in Pflanzsubstraten geeignet ist ohne das Pflanzenwachstum signifikant negativ zu beeinträchtigen. Aus der Abbildung 4.30 geht hervor, dass die vier Testvarianten (F0, F15, IR0 und IR15) der sechs untersuchten Pflanzsubstrate in den gesamten Topfversuchen im Mittel eine bessere Wachstumsleistung hinsichtlich Pflanzenhöhe, Biomasse und Blattanzahl zeigten als die entsprechenden Kontrollen. Weiterhin ist erkennbar, dass keines der Testsubstrate deutlich bessere oder schlechtere Wachstumsergebnisse hervorbrachte. Hinsichtlich der untersuchten Pflanzenparameter zeigten die vier Testsubstrate ein gleichwertiges Pflanzenwachstum.

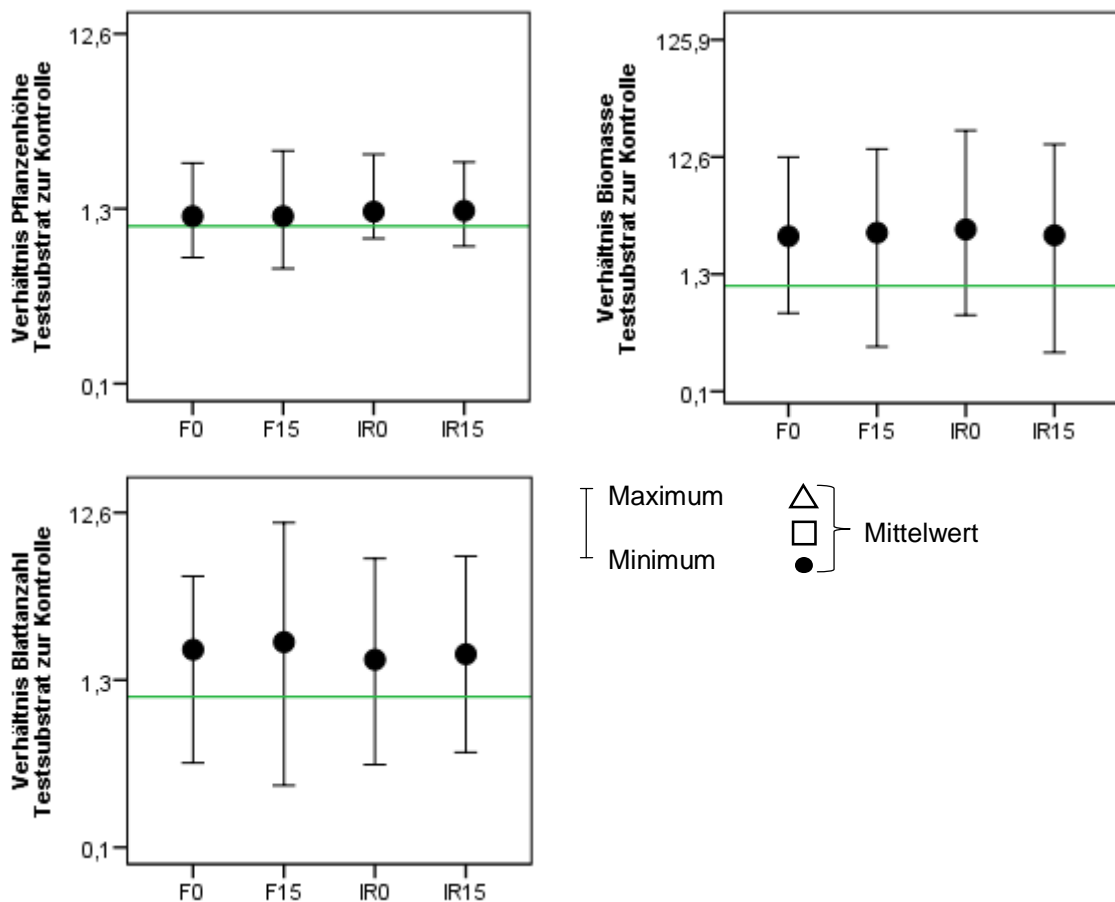


Abb. 4.30: Mittlere Pflanzenhöhe, Biomasse und Blattanzahl der einzelnen Testsubstrate (F0, F15, IR0, IR15) im Verhältnis zur Kontrolle zusammengefasst von allen untersuchten Pflanzen (log10 Skalierung; Daten gepoolt; grüne Linie ist der Bezug zur Kontrolle)

Um Herauszufinden, ob die Zugabe von Biokohle und der Herstellungsprozess (Fermentation, Kompostierung) einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum haben, wurden die Daten der untersuchten Pflanzenparameter der Varianten mit und ohne Biokohle (IR15+F15 und IR0+F0) sowie die Fermentations- und Kompostvarianten (IR0+IR15 und F0+F15) aller Topfversuche zusammengefasst und ins Verhältnis zu den entsprechenden Kontrollen gesetzt und in Abbildung 4.31 graphisch dargestellt. Aus der Abbildung 4.31 kann entnommen werden, dass sowohl die Varianten mit und ohne Biokohle als auch die Fermentations- und Kompostvarianten im Mittel über alle ein besseres Pflanzenwachstum gegenüber den Kontrollen aufzeigen, aber im Vergleich untereinander sind keine Unterschiede ersichtlich. Diese Ergebnisse lassen erkennen, dass bei den hier durchgeführten Topfversuchen weder die Zugabe von Biokohle noch die Herstellungsart (Kompostierung oder Fermentation) einen entscheidenden Einfluss auf die Pflanzenentwicklung hatte. Es ist hervorzuheben, dass die untersuchten Testvarianten zur weiteren Anwendung im Zierpflanzenbau geeignet sind.

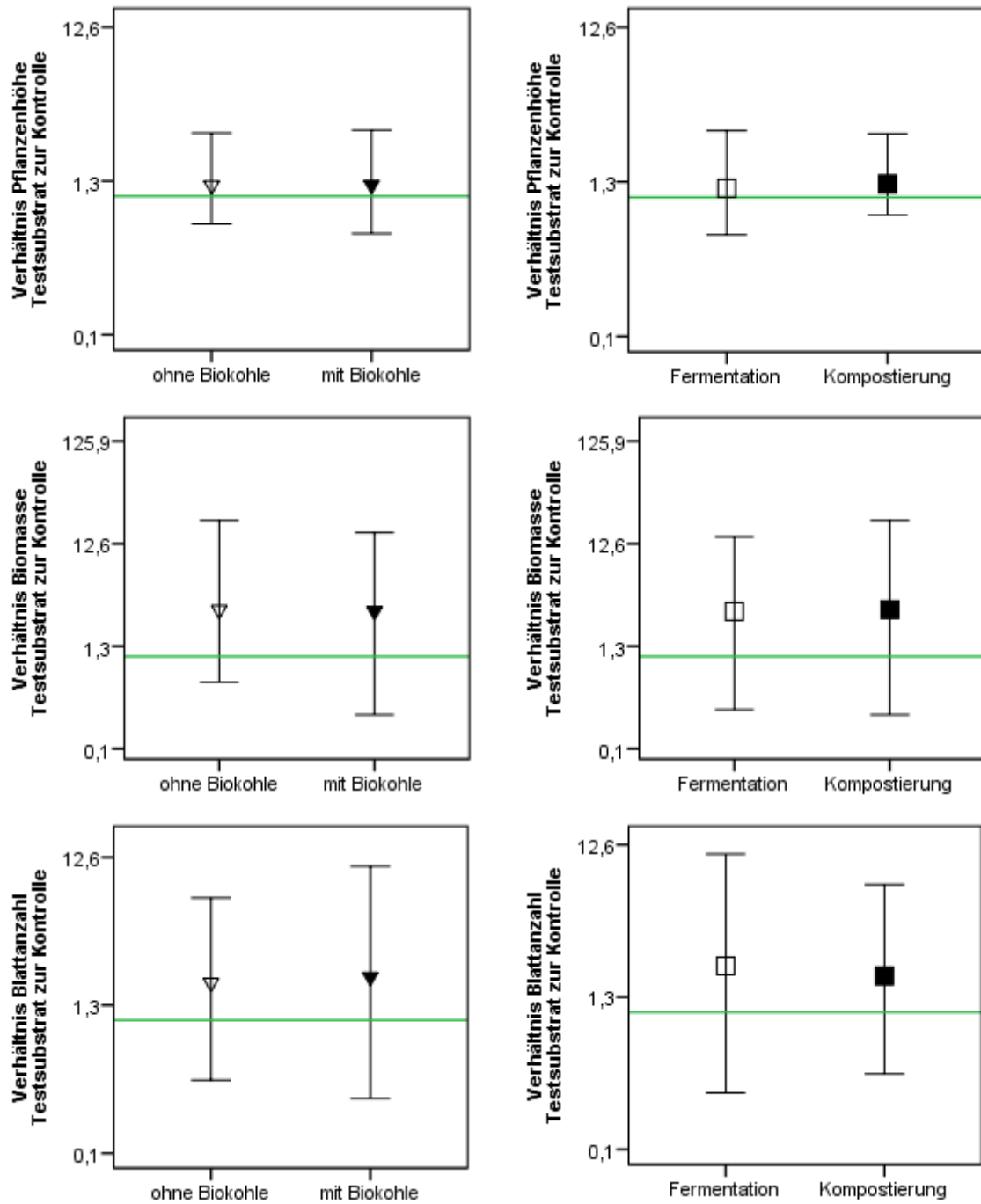


Abb. 4.31: Mittlere Pflanzenhöhe, Biomasse und Blattanzahl der Varianten mit und ohne Biokohle (linke Spalte) sowie der Fermentations- und Kompostvarianten (rechte Spalte) im Verhältnis zur Kontrolle zusammengefasst von allen untersuchten Pflanzen (log₁₀ Skalierung; Daten gepoolt; grüne Linie ist der Bezug zur Kontrolle)

4.1.8 Torf- und Düngereinsparpotenzial der hergestellten Testsubstrate

In Abbildung 4.32 ist die Anzahl der Düngergaben mit dem entsprechenden verwendeten Düngemittel für alle Kontroll- und Testsubstrate zusammengefasst. Die Kontrollen wurden 26 mal mit einem Volldünger gedüngt, 25 mal mit Harnstoff und 20 mal mit Hornspänen. Die Volldüngergaben machten 37 % von den verwendeten Düngemitteln aus. Insgesamt haben alle Kontrollen 71 mal eine Düngung erhalten über die gesamte Kultivierungszeit. Demgegenüber stehen die Düngergaben der Testsubstrate, die keine Volldüngung erhielten und nur 30 mal mit Harnstoff und 20 mal mit Hornspänen gedüngt wurden. Insgesamt haben die Testsubstrate 50 mal eine Düngung erhalten. Hieraus wird ersichtlich, dass die untersuchten Testsubstrate ein 30 %iges Düngereinsparpotenzial aufweisen. Wie die Untersuchungsergebnisse zeigten, wurden bei allen untersuchten Testsubstraten gleichwertige oder bessere Pflanzenwachstumsergebnisse gegenüber den Kontrollen erzielt. Hieraus lässt sich schließen, dass die Nährstoffversorgung der Pflanzen in den Testsubstraten ausreichend für ein optimales Pflanzenwachstum ist und der Einsatz von Volldünger reduziert werden könnte. Dadurch ließen sich Kosten für die Beschaffung von Düngemitteln einsparen. Die optimale Nährstoffversorgung der Pflanzen in den Kontrollsubstraten durch Anwendung von Volldünger führte in keinem der durchgeführten Pflanzversuche zu einem signifikant besseren Pflanzenwachstum im Vergleich zu den Testsubstraten.

In Abbildung 4.33 ist der prozentuale Torfanteil in den untersuchten torfreduzierten Pflanzsubstraten und den entsprechenden Kontrollsubstraten graphisch dargestellt. Die Torfeinsparung der untersuchten Pflanzsubstrate lag zwischen 21,7 und 33,8 %. Es wurden für die sieben untersuchten Testpflanzen, die in den torfreduzierten Pflanzsubstraten wuchsen, keine signifikanten negativen Wachstumsergebnisse festgestellt. Somit kann nach diesen Ergebnissen eine Torfreduzierung von 33 % im Pflanzsubstrat für die Pflanzen *Aglaonema commutatum*, *Digitalis trojana*, *Geranium maderense*, *Nerium oleander* und *Silphium perfoliatum* und für das Pflanzsubstrat für *Carica papaya* und *Coffea arabica* von 22 % empfohlen werden. Über diese Torfeinsparung werden nicht nur Kosten gespart, sondern es wird ein wesentlicher Beitrag geleistet, den Torfabbau zu reduzieren und somit die Moore zu schützen.

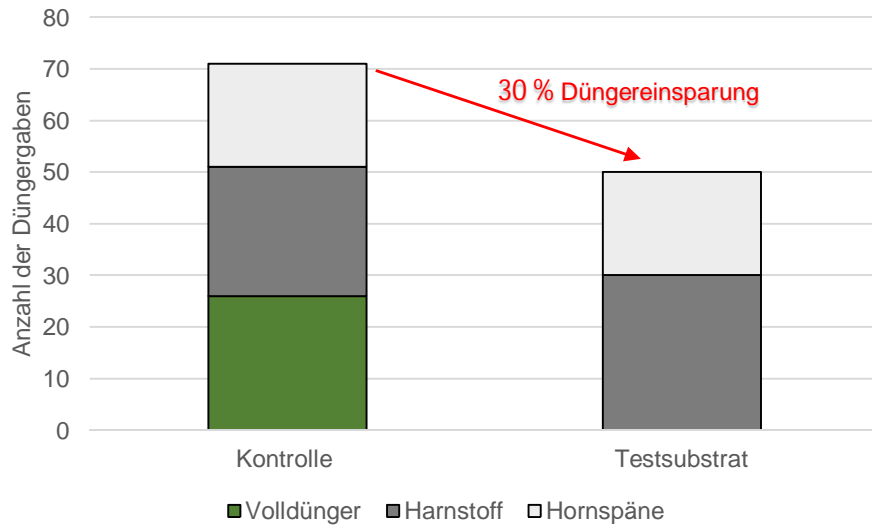


Abb. 4.32: Anzahl der Düngergaben mit den entsprechend verwendeten Düngemitteln für die Kontroll- und Testsubstrate

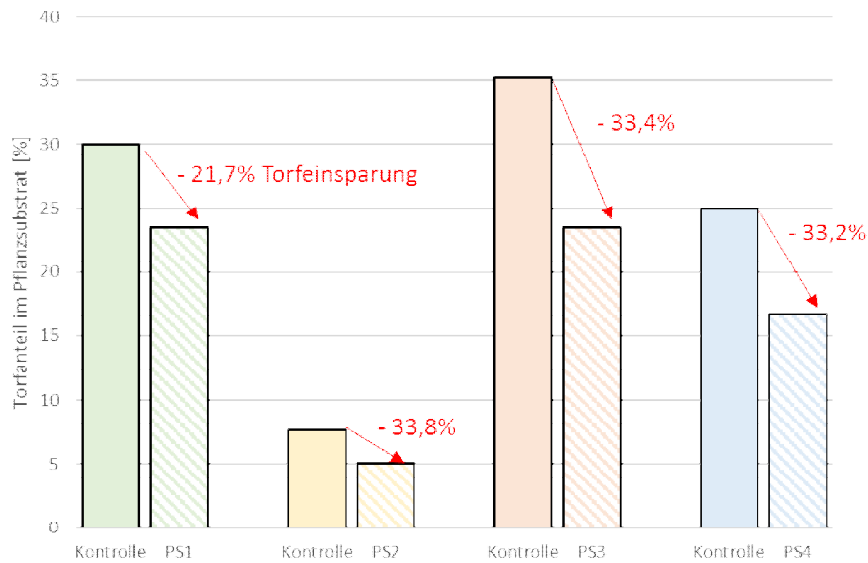


Abb. 4.33: Prozentualer Torfanteil der Kontrollsubstrate und der entsprechenden torfreduzierten Pflanzsubstrate (PS1-Pflanzsubstrat für *Carica papaya* und *Coffea arabica*; PS2- Pflanzsubstrat für *Aglaonema commutatum*; PS3- Pflanzsubstrat für *Digitalis trojana*, *Geranium maderense* und *Nerium oleander*; PS4- Pflanzsubstrat für *Silphium perfoliatum*)

4.2 Feldversuche in Ghana

4.2.1 Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Eigenschaften der Versuchsf lächen

Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Eigenschaften sowie Gesamtgehalte und verfügbare Gehalte der Kontrollflächen (K) als auch der mit Biokohlekompost (BKK) applizierten Flächen sind der Tabelle 4.4 zu entnehmen. Anhand der durchgeführten Korngrößenanalyse konnte den Versuchsf lächen die Bodenart schwach bis stark lehmiger Sand zugeordnet werden. Alle Versuchsf lächen enthielten sehr hohe Aluminium- und Eisen- Gesamtgehalte.

Tab. 4.4: Physikalische, physikalisch-chemische und chemische Parameter sowie Gesamtgehalte und verfügbare Gehalte an Nährstoffen und Aluminium und Eisen der Versuchsf lächen der Standorte Gbilugu (GB), Kukuio Yepalsi (KY), N'Bannayili (NB), Mogtandi (MT) und Tamale (TA); (K- Kontrollfläche, BKK-Biokohlekompostfläche)

Parameter	Einheit	GB-K	GB-BKK	KY-K	KY-BKK	NB-K	NB-BKK	MT-K	MT-BKK	TA-K	TA-BKK
pH (CaCl ₂)		5,93	6,01	4,59	5,26	5,08	5,2	5,86	5,92	5,5	5,84
Wassergehalt	% w/w	0,99	1,17	0,79	0,98	0,78	1,02	0,81	0,99	2,93	3,21
KAK	cmol +/kg	6,34	8,84	1,85	2,24	2,03	2,76	5,48	6,76	5,83	6,94
N _{total}	%	0,1	0,1	0,06	0,06	0,05	0,07	0,08	0,09	0,03	0,04
C _{total}	%	1,4	1,89	0,83	0,97	0,67	0,98	1,17	1,41	0,36	0,48
C:N Verhältnis		14	18	13	17	12	15	14	15	11	12
org. Substanz	%	2,8	3,8	1,7	1,9	1,3	2	2,3	2,8	0,7	1
Ca	mg kg ⁻¹	1413	1502	504	1092	655	1762	1250	1399	667	1458
K	mg kg ⁻¹	3532	3715	3541	4790	2456	3447	2042	2141	1418	1911
Mg	mg kg ⁻¹	1864	1910	1297	1389	769	1062	870	965	570	807
P	mg kg ⁻¹	241	293	332	529	133	399	332	363	88	201
Al	mg kg ⁻¹	24130	28890	30870	21310	14510	20540	24200	27210	12260	16040
Fe	mg kg ⁻¹	29400	32600	30900	35400	21300	34000	33000	34700	10300	25500
K (verfügbar)	mg kg ⁻¹	49	72	62	82	25	37	33	43	39	41
Mg (verfügbar)	mg kg ⁻¹	192	217	72	91	79	98	64	110	83	102
P (verfügbar)	mg kg ⁻¹	28	41	23	35	18	29	25	34	22	33
Al (verfügbar)	mg kg ⁻¹	71	53	77	48	69	54	70	62	68	52
Fe (verfügbar)	mg kg ⁻¹	48	38	34	27	36	28	37	28	33	21
Sand %		55,2		63,9		68,8		56,1		59,9	
Schluff %		30,8		28,2		23,6		33,5		30,7	
Ton %		14,1		7,9		7,6		10,5		9,4	
Bodenart		stark lehmiger		mittel lehmiger		schwach		mittel lehmiger		mittel lehmiger	

Es lässt sich feststellen, dass durch die Applikation von Biokohlekompost bei allen untersuchten Flächen im Vergleich zu den Kontrollen der pH-Wert und die Kationenaustauschkapazität (KAK) angestiegen sind. Für die Standorte Kukuio Yepalsi und N'Bannayili kann die KAK sowohl für die Kontroll- als auch für die Biokohlekompostflächen als sehr gering eingestuft werden mit Werten zwischen 0 und < 4 cmol +/kg. Eine geringe KAK mit Werten zwischen 4 und < 8 cmol +/kg wurden für die Kontrollflächen von Gbilugu als auch für die Kontroll- und Biokohlekompostflächen von Mogtandi und Tamale festgestellt. Die Biokohlekompostflächen von Gbilugu zeigten mit Werten zwischen 8 und < 12 cmol +/kg eine mittlere KAK. Der Wassergehalt war bei den

Biokohlekompostflächen geringfügig erhöht gegenüber den Kontrollen. Beim Gesamtstickstoffgehalt (N_{total}) zeigten sich nur minimale Unterschiede zwischen den Kontrollen und Biokohlekompostflächen, jedoch wiesen die Biokohlekompostflächen höhere Gesamtkohlenstoffgehalte (C_{total}) auf. Bei allen Biokohlekompostflächen wurde ein höheres Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis (C:N) als auch eine Erhöhung der organischen Substanz gegenüber den Kontrollen festgestellt. Die Standorte Gbilugu und Mogtandi wiesen einen höheren Gehalt ($> 2\%$) an organischer Substanz auf als die anderen drei untersuchten Standorte. Vermutlich ist dies auf die unterschiedliche Bodenbearbeitungsweise zurückzuführen. An beiden Standorten wurden innerhalb der letzten Jahre die Ernterückstände in den Boden eingearbeitet, um somit dem Boden wieder organisches Material hinzu zu fügen. Für alle untersuchten Biokohlekompostflächen konnten im Vergleich zu den Kontrollen höhere Gesamtgehalte der Nährstoffe Calcium, Kalium, Magnesium und Phosphor festgestellt werden (vgl. Tab. 4.4), die durch die organische Düngung mit Biokohlekompost in den Boden eingebracht wurden. Die für die Pflanzen relevanten verfügbaren Nährstoffe Kalium, Magnesium und Phosphor wurden durch die Zugabe von Biokohlekompost erhöht, bei Phosphor sogar signifikant wie aus der Abbildung 4.34 ersichtlich. Die mittleren verfügbaren Gehalte an Phosphor lagen bei den Kontrollflächen bei $23,2 \pm 3,7 \text{ mg kg}^{-1}$, bei den Biokohlekompostflächen bei $34,4 \pm 4,3 \text{ mg kg}^{-1}$.

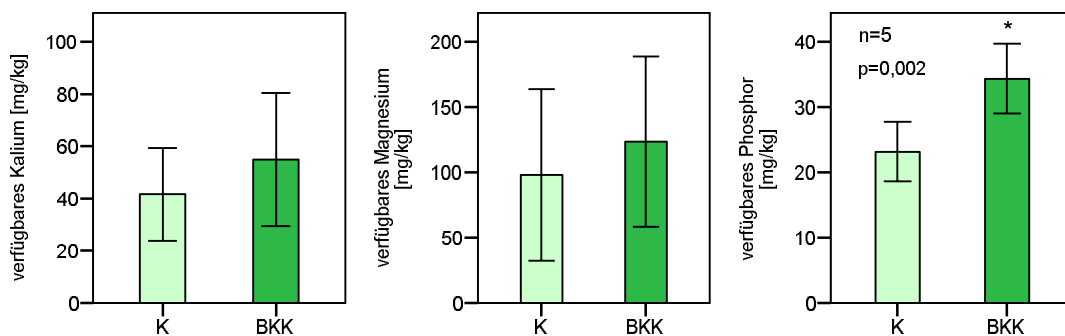


Abb. 4.34: Mittlere verfügbare Gehalte der Nährstoffe Kalium, Magnesium und Phosphor auf den Kontroll- (K) und Biokohlekompostflächen (BKK); (n=5; * bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test bei unabhängigen Stichproben; Fehlerbalken präsentieren das 95%ige Konfidenzintervall); Daten der fünf untersuchten Standorte wurden jeweils für BKK und K zusammengefasst

Darüber hinaus lässt sich aus den Abbildungen 4.35 und 4.36 erkennen, dass durch die Zugabe von Biokohlekompost die Verfügbarkeit von Aluminium signifikant reduziert wird. Dies steht vermutlich im Zusammenhang mit der pH-Werterhöhung, die durch Anwendung von Biokohlekompost nachgewiesen wurde.

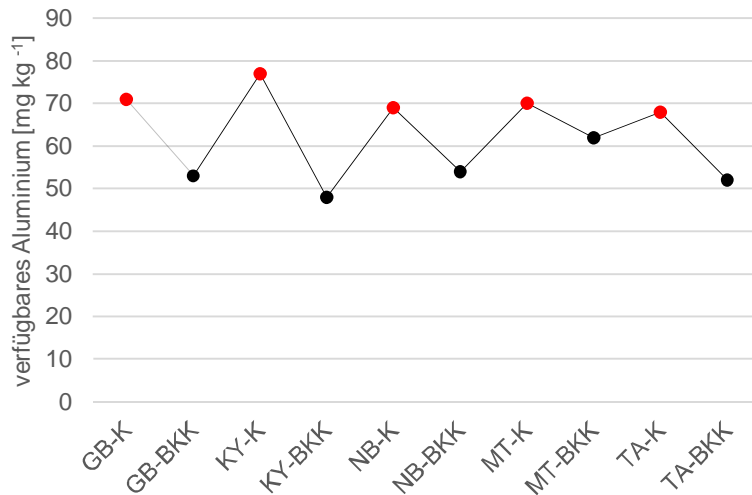


Abb. 4.35: Vergleich der verfügbaren Aluminiumgehalte auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte Gbilugu (GB), Kukuio Yepalsi (KY), N'Bannayili (NB), Mogtandi (MT) und Tamale (TA); (K-Kontrollfläche, BKK-Biokohlekompostfläche)

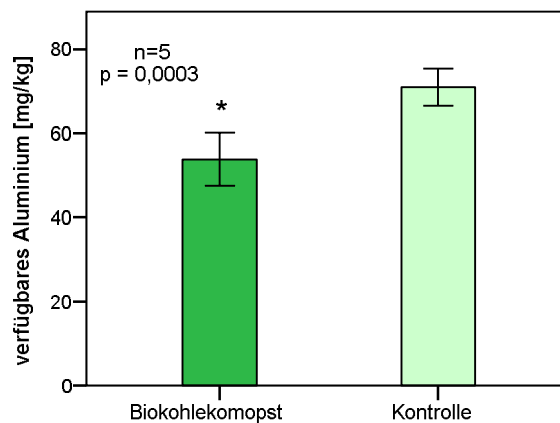


Abb. 4.36: Mittlere verfügbare Aluminiumgehalte auf den Kontrollflächen und Biokohlekompostflächen; (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; t-Test bei unabhängigen Stichproben; Fehlerbalken präsentieren das 95 % ige Konfidenzintervall); Daten aller untersuchten Standorte wurden jeweils für BKK und K zusammengefasst

Die mittleren verfügbaren Aluminiumgehalte der Biokohlekompostflächen lagen mit $53,8 \pm 5,1 \text{ mg kg}^{-1}$ deutlich unterhalb der Aluminiumgehalte der Kontrollflächen mit $71 \pm 3,5 \text{ mg kg}^{-1}$.

4.2.2 Vergleich der Maiskolbenentwicklung des Feldversuchs im Jahr 2012

Auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen wurden aus den entsprechenden Kernzonen jeweils zwanzig Maispflanzen hinsichtlich der Maiskolbenentwicklung untersucht. Es wurde das Gewicht sowie die Länge der Maiskolben bestimmt. Der Tabelle D-1 im Anhang D können die entsprechenden mittleren Maiskolbengewichte und –längen der Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte entnommen werden. Mittels Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben wurden die Signifikanzen zwischen den Kontroll- und Biokohlekompostflächen für die Maiskolbenlängen und –gewichte berechnet. Anhand der berechneten Signifikanzwerte (p-Werte) aus der Tabelle D-1 im Anhang D sowie aus der Abbildung 4.37 A und B sind die hoch signifikanten Unterschiede im Maiskolbengewicht und in der Maiskolbenlänge für alle untersuchten Biokohlekompost-flächen gegenüber den Kontrollflächen ersichtlich. Die mittleren Maiskolbengewichte und –längen der Biokohlekompostflächen liegen deutlich über alle Kontrollflächen.

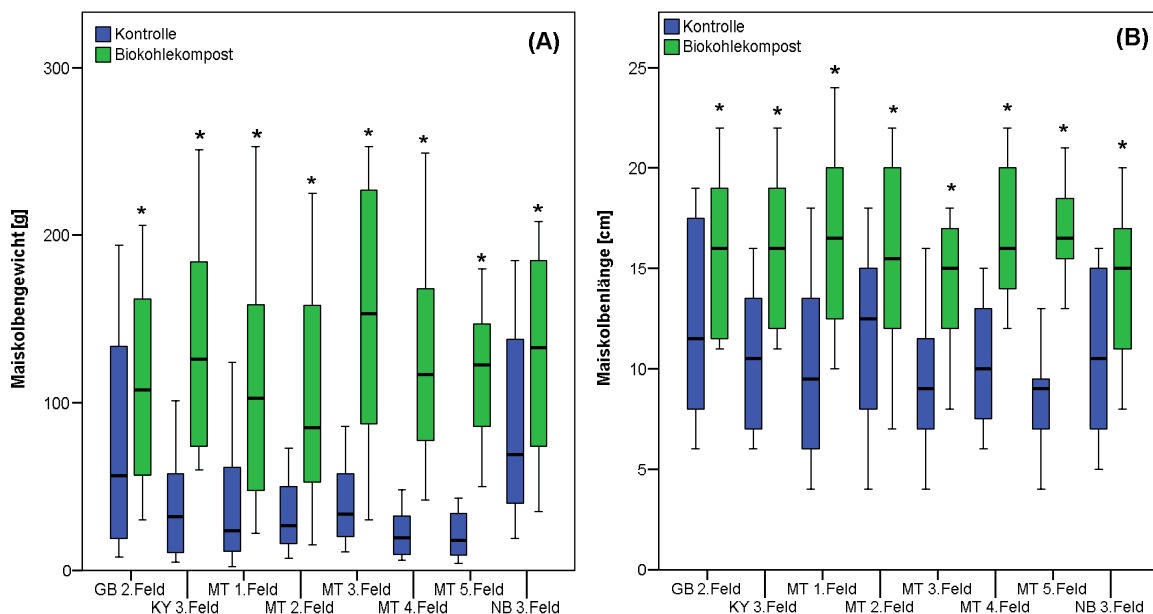


Abb. 4.37: Verteilung der Maiskolbengewichte (A) und Maiskolbenlänge (B) auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2012 (KY- Kukuio Yepalsi, MT – Mogtandi, NB- N'Bannayil; n=20; * bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$)

Am Standort Mogtandi (MT 5.Feld) wurde der größte Unterschied von 8,35 cm hinsichtlich der Maiskolbenlänge zwischen der Kontroll- und Biokohlekompostfläche festgestellt. Die mittlere Maiskolbenlänge von $8,55 \pm 2,70$ cm wurde für die Kontrollfläche und von $16,9 \pm 2,22$ cm für die Biokohlekompostfläche bestimmt. Der geringste Unterschied in der Maiskolbenlänge von 3,2 cm zwischen Kontroll- und Biokohlekompostfläche wurde für den Standort Gbilugu (GB 2.Feld) ermittelt. Die mittlere Maiskolbenlänge der Kontrollfläche betrug $12,3 \pm 4,79$ cm, die der Biokohlekompostfläche $15,5 \pm 3,87$ cm.

Die mittlere Maiskolbenlänge aller untersuchten Biokohlekompostflächen lag zwischen 14,25 und 16,9 cm, die der Kontrollfläche zwischen 8,55 und 12,3 cm.

Bezüglich des Maiskolbengewichts konnte der größte Unterschied von 111,9 g zwischen der Kontroll- und Biokohlekompostfläche für den Standort Mogtandi (MT 3.Feld) nachgewiesen werden und der geringste Unterschied von 35,25 g für den Standort Gbilugu (GB 2.Feld).

Die mittleren Maiskolbengewichte aller untersuchten Biokohlekompostflächen lagen zwischen 104,15 und 133,5 g, die der Kontrollflächen zwischen 21 und 84,5 g.

Einen visuellen Eindruck über den deutlichen Unterschied in der Maiskolbenentwicklung zwischen den Kontroll- und Biokohlekompostflächen vermittelt die Abbildung 4.38 in der exemplarisch die Maiskolben von zwei untersuchten Standorten dargestellt ist.

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass die Anwendung von Biokohlekompost sich positiv auf die Maiskolbenentwicklung auswirkt und ausreichend Nährstoffe für ein optimales Pflanzenwachstum zur Verfügung stellt.



Abb. 4.38: Visueller Vergleich der Maiskolbenentwicklung ausgewählter Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte (obere Fotos GB-Standort Gbilugu, untere Fotos MT-Standort Mogtandi)

Eine Spearman's Rangkorrelation wurde für die Kontroll- und Biokohlekompostflächen durchgeführt, um die Beziehung zwischen der Maiskolbenlänge und dem Maiskolbengewicht zu beschreiben. In Abbildung 4.39 ist der Zusammenhang zwischen der Maiskolbenlänge und dem Maiskolbengewicht für die Kontroll- und Biokohlekompostflächen graphisch in Form eines Streudiagramms dargestellt. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Kontroll- und Biokohlekompostvarianten der gleichen Korrelation

folgen und ein ähnliches Muster für die Maiskolbenentwicklung aufweisen, d.h. sie zeigen das gleiche Verhältnis zwischen Maiskolbenlänge und –gewicht. Es konnten sowohl für die Kontrollflächen als auch für die Biokohlekompostflächen positive Korrelationen zwischen dem Maiskolbengewicht und der Maiskolbenlänge nachgewiesen werden. Für die Kontrollflächen wurde ein Spearman´s Rangkorrelationskoeffizient von $r_s = 0,80$ ($p < 0,0001$) und für die Biokohlekompostflächen von $r_s = 0,81$ ($p < 0,0001$) berechnet.

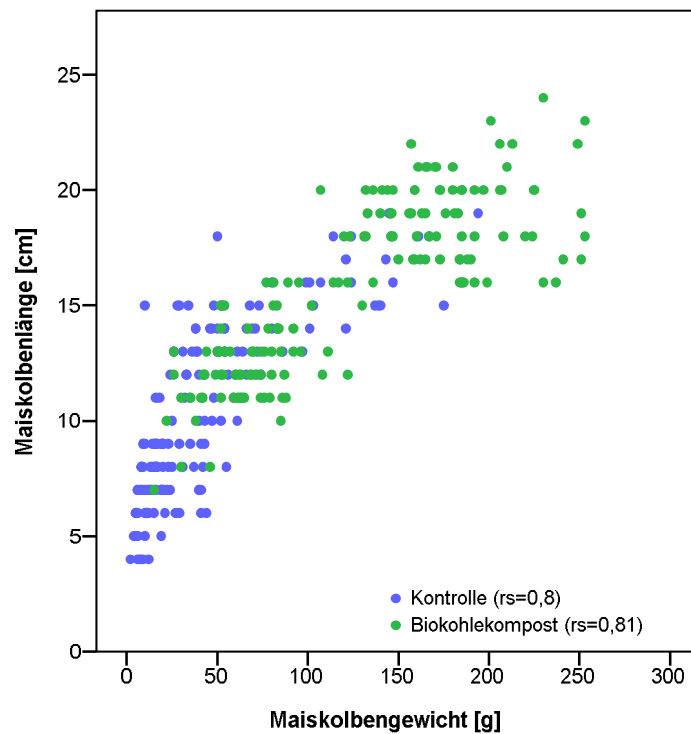


Abb. 4.39: Korrelation zwischen dem Maiskolbengewicht und der Maiskolbenlänge der Kontrollflächen und der Biokohlekompostflächen ($n=160$; r_s = Spearman´s Rangkorrelationskoeffizient)

4.2.3 Vergleich der Maiskolbenentwicklung des Feldversuchs im Jahr 2013

Die Datenerhebung und -auswertung des Jahres 2013 erfolgte analog dem Prozedere aus dem Jahr 2012. Die mittleren Maiskolbengewichte und –längen von zwanzig Maiskolbenproben der Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte sind in der Tabelle D-2 im Anhang D aufgeführt. Mittels Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben wurden die Signifikanzen zwischen den Kontroll- und Biokohlekompostflächen für die Maiskolbenlängen und – gewichte berechnet. Anhand der berechneten Signifikanzwerte (p -Werte) aus der Tabelle D-2 im Anhang D sowie aus der Abbildung 4.40 A und B konnten für die Felder NB 2.Feld und TA 2.Feld signifikante Unterschiede im Maiskolbengewicht und in der Maiskolbenlänge für die untersuchten Biokohlekompostflächen gegenüber den Kontrollflächen nachgewiesen werden.

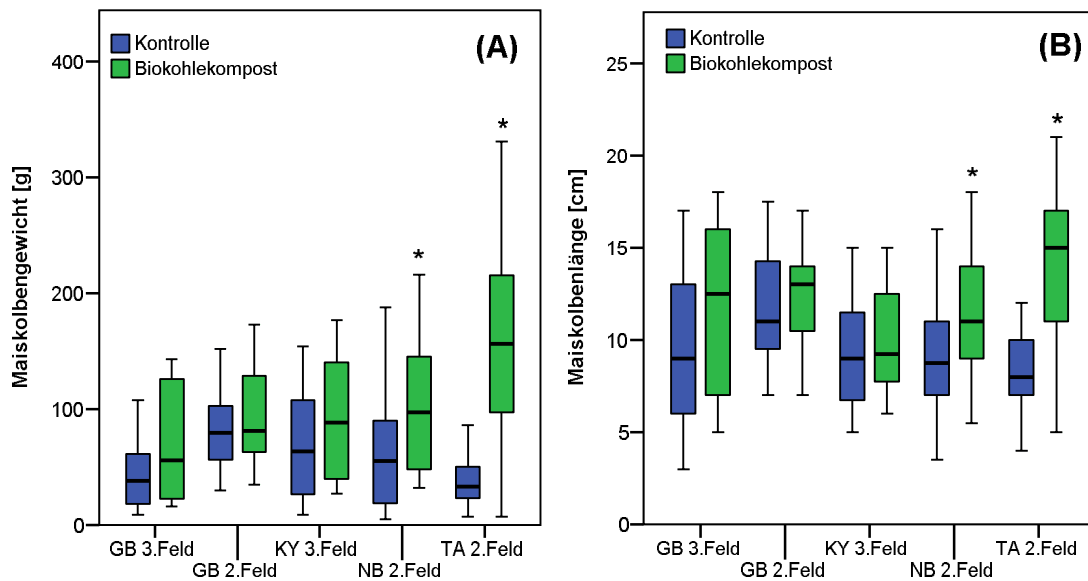


Abb. 4.40: Verteilung der Maiskolbengewichte (A) und Maiskolbenlänge (B) auf den Kontrollflächen und mit Biokohlekompost applizierten Testflächen der untersuchten Standorte in 2013 (GB- Gbilugu, KY- Kukuo Yepalsi, NB- N'Bannayili, TA- Tamale; n=20; * bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$)

Für die Felder GB 3.Feld, GB 2.Feld und KY 3.Feld wurden keine signifikanten Unterschiede in den erhobenen Pflanzenparametern festgestellt. Der größte signifikante Unterschied in der Maiskolbenlänge von 5,53 cm sowie im Maiskolbengewicht von 120,1 g wurde auf der Biokohlekompostfläche des Feldes TA 2.Feld bestimmt. Der geringste Unterschied in der Maiskolbenlänge von 0,65 cm zwischen Kontroll- und Biokohlekompostfläche wurden für die Standorte Gbilugu und Kukuo Yepalsi (GB 2.Feld und KY 3.Feld) ermittelt. Der geringste Unterschied im Maiskolbengewicht von 13,75 g zwischen Kontroll- und Biokohlekompostfläche wurde für den Standort Gbilugu (GB 2.Feld) festgestellt.

Die mittlere Maiskolbenlänge aller untersuchten Biokohlekompostflächen lag zwischen 9,93 cm und 13,88 cm, die der Kontrollfläche zwischen 8,35 cm und 11,8 cm. Die mittleren Maiskolbengewichte aller untersuchten Biokohlekompostflächen bewegten sich im Bereich zwischen 72,25 g und 157,6 g, die der Kontrollflächen zwischen 41,7 g und 82,25 g.

Einen visuellen Eindruck über den deutlichen Unterschied in der Maiskolbenentwicklung zwischen den Kontroll- und Biokohlekompostflächen vermittelt die Abbildung 4.41, in der exemplarisch die Maiskolben von zwei untersuchten Standorten dargestellt sind.

Analog zu den Ergebnissen des Vorjahres konnte auch für 2013 eine positive Wirkung auf die Maiskolbenentwicklung durch die Anwendung von Biokohlekompost nachgewiesen werden.



Abb. 4.41: Visueller Vergleich der Maiskolbenentwicklung ausgewählter Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte (obere Fotos TA-Standort Tamale, untere Fotos GB-Standort Gbilugu)

Für die Daten aus 2013 wurde auch eine Spearman's Rangkorrelation für die Kontroll- und Biokohlekompostflächen durchgeführt, um die Beziehung zwischen der Maiskolbenlänge und dem Maiskolbengewicht zu beschreiben. Der Zusammenhang zwischen der Maiskolbenlänge und dem Maiskolbengewicht für die Kontroll- und Biokohlekompost-flächen ist graphisch in Abbildung 4.42 dargestellt. Es konnten sowohl für die Kontrollflächen als auch für die Biokohlekompostflächen positive Korrelationen zwischen dem Maiskolbengewicht und der Maiskolbenlänge nachgewiesen werden.

Für die Kontrollflächen wurde ein Spearman's Rangkorrelationskoeffizient von $r_s = 0,88$ ($p < 0,0001$) und für die Biokohlekompostflächen von $r_s = 0,82$ ($p < 0,0001$) berechnet. Weiterhin ist aus der Abbildung erkennbar, dass die Maispflanzen der Kontrollflächen dem gleichen Wachstumsbild folgen wie die der Biokohlekompostflächen.

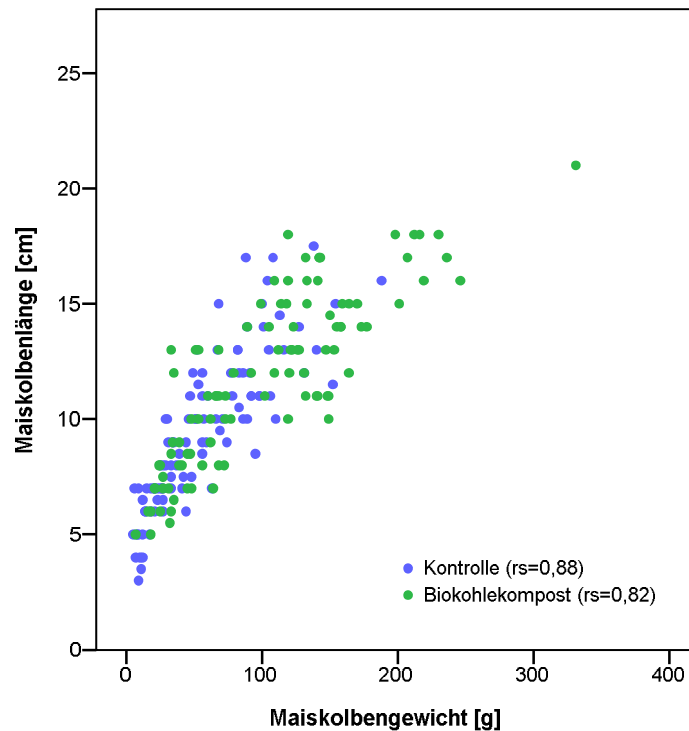


Abb. 4.42: Korrelation zwischen dem Maiskolbengewicht und der Maiskolbenlänge der Kontrollflächen und der Biokohlekompostflächen (n=100; r_s = Spearman's Rangkorrelationskoeffizient)

4.2.4 Vergleich der Maiserträge im Jahr 2012

Aus der Abbildung 4.43 sind die Kornerträge, die aus den ermittelten Korngewichten innerhalb der Kernzone für jede Kontroll- und Biokohlekompostfläche in Tonnen je Hektar berechnet wurden, graphisch dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass alle Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte die Kornerträge der Kontrollflächen übersteigen. Durch die Anwendung von Biokohlekompost konnten deutliche Mehrerträge gegenüber der Kontrolle erzielt werden. Selbst der geringste Kornertrag auf der Biokohlekompostfläche liegt über dem höchsten Kornertrag der Kontrollfläche. Die berechneten Kornerträge können für die Biokohlekompostflächen zwischen 2,5 und 3,9 t ha⁻¹ angegeben werden, die der Kontrollflächen zwischen 0,5 und 2,2 t ha⁻¹. In der Abbildung 4.44 sind die berechneten Ertragssteigerungen der Biokohlekompostflächen in Bezug zu den Kontrollflächen dargestellt. Es wurden Ertragssteigerungen auf den Biokohlekompostflächen gegenüber den Kontrollflächen um das 1,3 bis 5,8-Fache ermittelt. Die höchsten Ertragssteigerungen wurden am Standort Mogtandi auf dem vierten und fünften Feld festgestellt. Die geringste Ertragssteigerung war auf dem zweiten Feld des Standortes Gbilugu. Für den Standort Gbilugu sei zu erwähnen, dass es sich hier um eine ökologische Farm handelt, die bereits seit mehreren Jahren Kompostwirtschaft betreibt und den Ackerboden ausschließlich mit organischer Düngung versorgt, um Humus aufzubauen und Nährstoffe zur Verfügung zu stellen. Daraus lässt

sich schließen, dass die Kontrollflächen ausreichend Nährstoffe zur Verfügung hatten, so dass die Unterschiede hinsichtlich der Pflanzenentwicklung durch die Anwendung von Biokohlekompost nicht so groß waren.

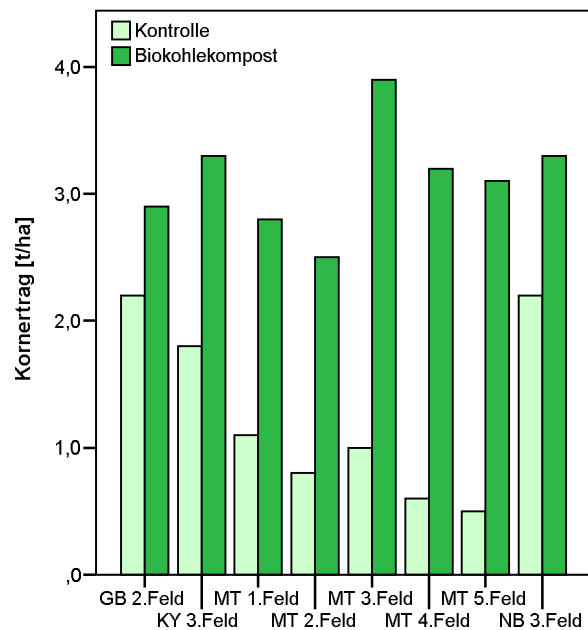


Abb. 4.43: Vergleich des Kornertrages der Maiskultur der einzelnen Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2012 (GB – Gbilugu, KY - Kukuo Yepalsi, MT - Mogtandi, NB - N'Bannayili)

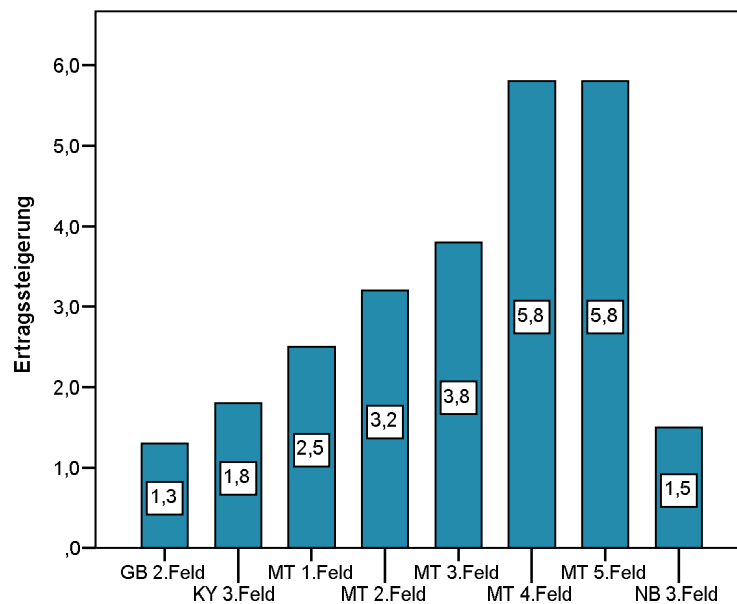


Abb. 4.44: Berechnete Ertragssteigerungen für Mais auf den Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2012 (GB – Gbilugu, KY - Kukuo Yepalsi, MT - Mogtandi, NB - N'Bannayili); Biokohlekompostfläche wurde in Bezug zur Kontrollfläche gesetzt

Um die Daten statistisch auszuwerten, wurden die Kornerträge aller acht Kontroll- und Biokohlekompostflächen miteinander gepoolt und mittels t-Test bei unabhängigen Stichproben ein Signifikanzwert von $p < 0,0001$ berechnet. Aus den zusammengefassten Daten wurden für die Kontrollflächen durchschnittliche Kornerträge von $1,2 \text{ t ha}^{-1}$ und für die Biokohlekompostflächen von $3,1 \text{ t ha}^{-1}$ ermittelt. Daraus lässt sich eine Ertragssteigerung um das 2,6-Fache für die Biokohlekompostflächen berechnen. Der hoch signifikante Unterschied im Kornertrag der Biokohlekompostflächen gegenüber den Kontrollflächen ist in Abbildung 4.45 deutlich erkennbar.

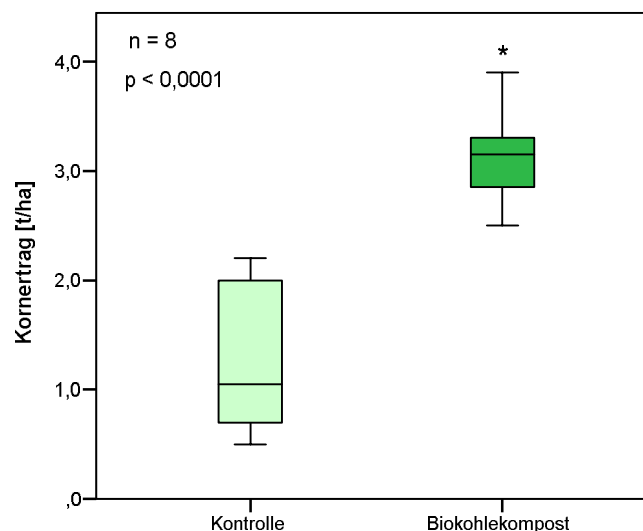


Abb. 4.45: Mittlerer Kornertrag für Mais auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen in 2012; Daten der jeweils 8 Versuchsfelder wurden gepoolt (* bedeutet statistische Signifikanz, t-Test bei unabhängigen Stichproben bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$)

Die Versuchsergebnisse aus dem praxisorientierten Freilandversuch in 2012 lassen erkennen, dass durch die Anwendung von Biokohlekompost mit einer relativ geringen Aufbringungsmenge von $12,5 \text{ t ha}^{-1}$ die Maiserträge deutlich gesteigert werden können sowie positive Effekte hinsichtlich des Pflanzenwachstums, des Maiskolbengewichts und der Maiskolbenlänge erzielt werden.

4.2.5 Vergleich der Maiserträge im Jahr 2013

Für die Auswertung der Daten aus 2013 muss auf eine Besonderheit hingewiesen werden. Die Versuchsfelder GB 2.Feld und KY 3.Feld wurden nur einmalig mit Biokohlekompost im Jahr 2012 appliziert, aber nicht in 2013. Diese zwei Felder werden in Kapitel 4.2.6 näher beleuchtet.

Die Abbildung 4.46 lässt erkennen, dass die Kornerträge, die aus den ermittelten Korngewichten innerhalb der Kernzone für jede Kontroll- und Biokohlekompostfläche in

Tonnen je Hektar berechnet wurden, von den Biokohlekompostflächen deutlich überstiegen werden. Alle untersuchten Biokohlekompostflächen weisen einen höheren Kornertrag auf als die entsprechenden Kontrollflächen. Für die Biokohlekompostflächen konnten Kornerträge zwischen 2,0 und 3,8 t ha⁻¹ und für die Kontrollflächen zwischen 0,9 und 1,9 t ha⁻¹ festgestellt werden. Ähnlich wie in 2012 liegen die geringsten Kornerträge der Biokohlekompostflächen über den Kontrollflächen mit den höchsten Kornerträgen. In Abbildung 4.47 wurden für die statistische Auswertung jeweils die Kontroll- und Biokohlekompostflächen zusammengefasst, allerdings ohne Betrachtung des Standortes Tamale (TA), da dieser einen Ausreißerwert hatte und nicht in die Signifikanzberechnung einbezogen wurde. Mittels t-Test bei unabhängigen Stichproben wurde ein Signifikanzwert von $p=0,04$ berechnet. Die mittleren Kornerträge der vier betrachteten Kontrollflächen lagen bei $1,4 \pm 0,6$ t ha⁻¹ die der Biokohlekompostflächen bei $2,3 \pm 0,3$ t ha⁻¹. Somit waren die mittleren Kornerträge der Biokohlekompostflächen um das 1,6-Fache signifikant höher als die Kontrollflächen. Die berechneten Ertragssteigerungen der einzelnen Biokohlekompost-flächen gegenüber den Kontrollflächen sind in Abbildung 4.48 aufgeführt und liegen zwischen dem 1,3 und 4,1-Fachen. Die Versuchsergebnisse aus 2013 zeigen vergleichbare Ergebnisse wie aus 2012. Durch die Anwendung von Biokohlekompost kann die Ertragsleistung für Mais deutlich gesteigert werden.

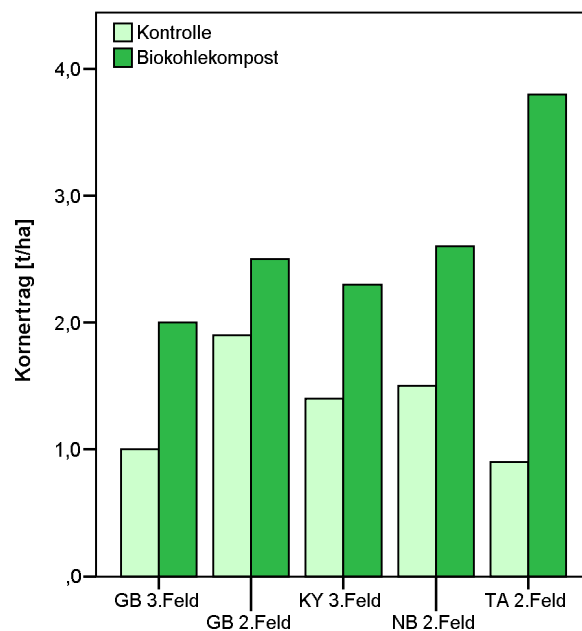


Abb. 4.46: Vergleich des Kornertrages der Maiskultur der einzelnen Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2013 (GB - Gbilugu, KY- Kukuio Yepalsi, NB - N'Bannayili, TA - Tamale)

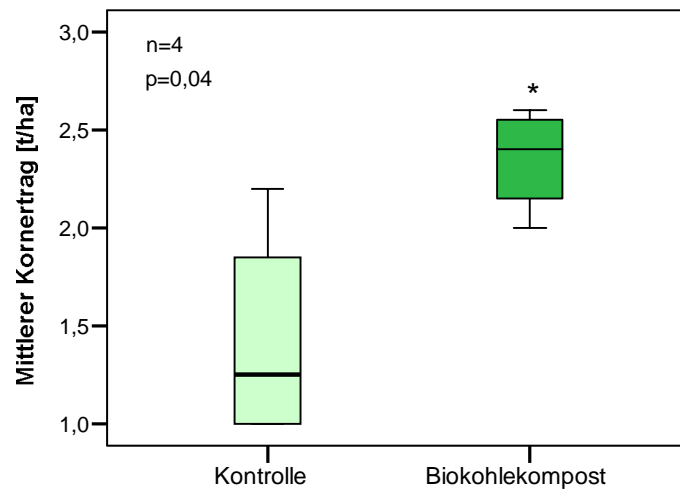


Abb. 4.47: Mittlerer Kornertrag der Maiskultur auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen in 2013; (* bedeutet statistische Signifikanz, t-Test bei unabhängigen Stichproben mit einem Signifikanzniveau von $p=0,05$)

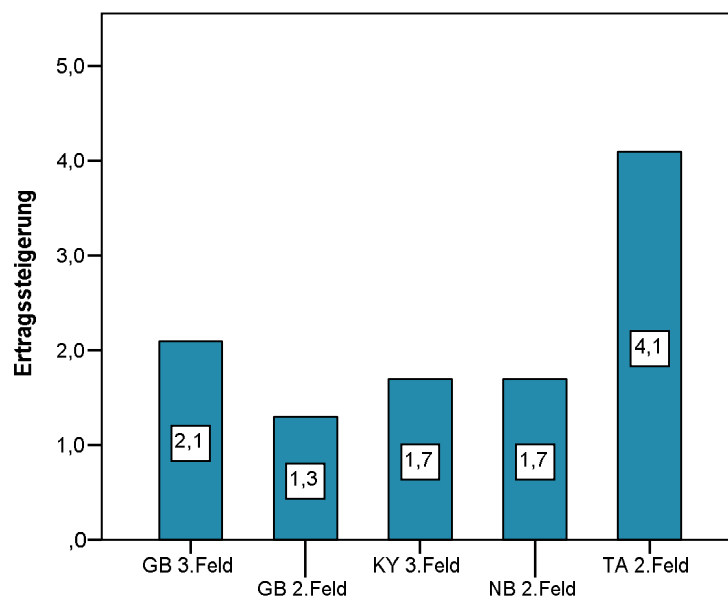


Abb. 4.48: Berechnete Ertragssteigerungen für Mais auf den Biokohlekompostflächen der untersuchten Standorte in 2013 (GB–Gbilugu, KY-Kukuo Yepalsi, NB-N´Bannayili, TA-Tamale); Biokohlekompostfläche wurde in Bezug zur Kontrollfläche gesetzt

4.2.6 Vergleich der Maiserträge zwei aufeinanderfolgender Vegetationsperioden

Um herauszufinden wie sich die Maiserträge in der zweiten Vegetationsperiode entwickeln nach einmaliger Applikation von Biokohlekompost in 2012 wurden die Felder GB 2.Feld und KY 3.Feld in 2013 nicht mit Biokohlekompost appliziert. Wie in Abbildung 4.49 ersichtlich, konnte im Jahr 2013 für das Versuchsfeld GB 2.Feld eine Ertragssteigerung von 31,6 % und für das Versuchsfeld KY 3.Feld von 64,3 % auf den Biokohlekompostflächen gegenüber den Kontrollflächen nachgewiesen werden.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich vermuten, dass die einmalige Applikation von Biokohle-kompost in 2012 für den in 2013 erzielten Mehrertrag auf den Biokohlekompostflächen noch ausreichend Nährstoffe zur Verfügung gestellt hat.

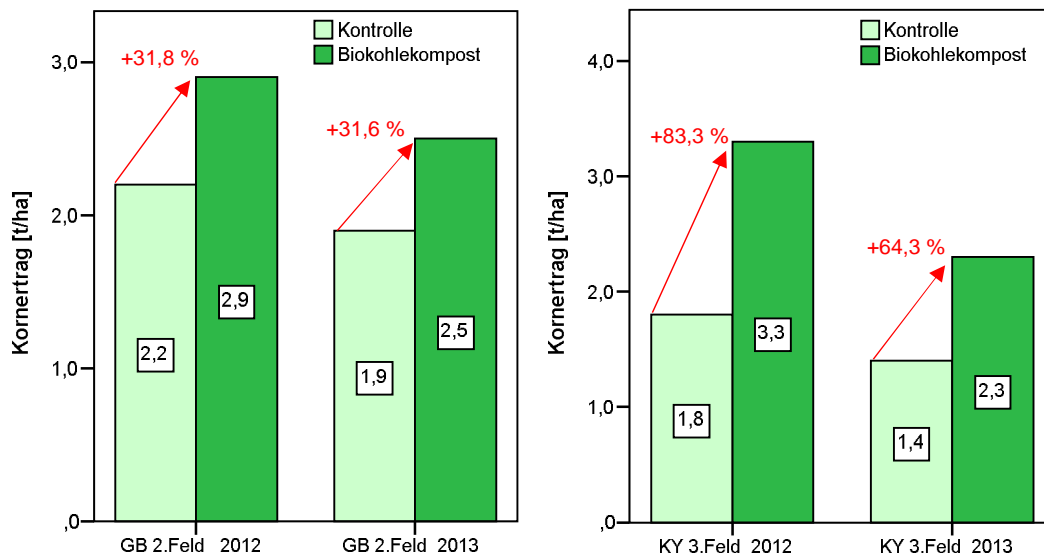


Abb. 4.49: Vergleich der Kornerträge zwei aufeinanderfolgender Vegetationsperioden nach einmaliger Anwendung von Biokohlekompost im Jahr 2012 auf den Testflächen der untersuchten Standorte (GB – Gbilugu und KY- Kukuo Yepalsi)

Beim Zusammenfassen der Daten aus den Jahren 2012 und 2013 der Felder GB 2.Feld und KY 3.Feld lassen sich signifikante Unterschiede im Kornertrag für die Biokohlekompost-flächen gegenüber den Kontrollflächen feststellen wie die Abbildung 4.50 zeigt.

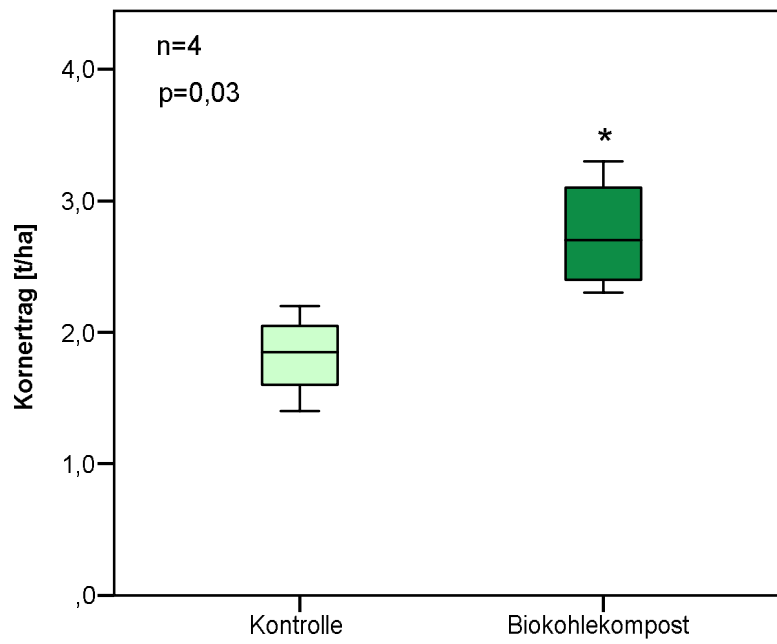


Abb. 4.50: Vergleich der Kornerträge für Mais auf den Kontroll- und Biokohlekompostflächen der untersuchten Felder GB 2.Feld und KY 3.Feld; Daten aus den Jahren 2012 und 2013 wurden gepoolt (* bedeutet statistische Signifikanz mit $p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben)

5 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Im ersten Teil der Arbeit wurde der Einfluss von Biokohlekompost auf das Pflanzenwachstum ausgewählter Pflanzen aus drei unterschiedlichen Klimazonen anhand zahlreicher Topfversuche im Botanischen Garten Berlin untersucht. Für die Bewertung der Pflanzenentwicklung wurden sowohl generative und vegetative Wachstumsparameter, Nährstoffgehalte in den Substraten als auch physikalische, physikalisch-chemische und chemische Substratparameter bestimmt. Darüber hinaus wurde die Eignung von Biokohlekompost als Torfersatz in Kultursubstraten als auch die Möglichkeit der Düngereinsparung geprüft.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde anhand eines praxisorientierten Feldversuchs in der nördlichen Region der Republik Ghana der Einfluss von Biokohlekompost auf Ertragsleistung, Pflanzenwachstum sowie Bodeneigenschaften untersucht. Den Kleinbauern sollten einfache Möglichkeiten der Verwendung organischer Reststoffe zur Verbesserung der Böden aufgezeigt werden, um Erträge der angebauten Kultur zu erhöhen und somit einen Beitrag zur Ernährungssicherheit leisten.

5.1 Biokohlekompostanwendung im Botanischen Garten Berlin

5.1.1 Einfluss auf die Substrateigenschaften

Ein gutes Substrat muss den unterschiedlichen Ansprüchen der Pflanzen hinsichtlich ihres Nährstoffbedarfs und bestimmter Substrateigenschaften gerecht werden. Es muss den Pflanzen einen guten Halt gewährleisten und dem Wurzelbereich eine ausreichende Belüftung bieten. Weiterhin muss es über eine gute Puffereigenschaft verfügen, sollte ausreichend Wasser speichern können, muss genügend Nährstoffe enthalten und darf seine vorteilhaften Eigenschaften nicht über einen längeren Zeitraum verlieren. Eine gute Pufferkapazität des Substrats verhindert u.a. schnelle Veränderungen des pH-Wertes sowie Schwankungen im Nährstoffvorrat.

Im Folgenden wird der Einfluss von Biokohlekompost auf die Substratparameter pH-Wert, Salzgehalt, Wasserhaltekapazität, Rohdichte sowie C/N-Verhältnis näher beleuchtet. Aufgrund der vorhandenen Datenlage können nur Tendenzen aufgezeigt werden, jedoch keine statistisch abgesicherten Ergebnisse.

pH-Wert

Für die Entwicklung eines gesunden Wurzelsystems, welches die Voraussetzung für das Pflanzenwachstum ist, spielt der pH-Wert im Substrat eine entscheidende Rolle. Auch die Verfügbarkeit von Nährstoffen wird maßgeblich vom pH-Wert beeinflusst. In der Substratherstellung werden die üblicherweise verwendeten Fertigsubstrate mit einem pH-

Bereich von 5,5 bis 6,5 eingestellt, da normalerweise bei diesen Werten keine Ernährungsstörungen auftreten (SEIPEL 2007). Übersteigen Substrate im Zierpflanzenbau pH-Werte von über 7,5 können laut (INGRAM UND HENLEY 1991) Mikronährstoffe immobilisiert werden, so dass sie den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung stehen und es zu Wachstumsstörungen kommen kann. Es gibt aber auch spezielle Substrate, wie z.B. für Moorbeetpflanzen, die einen niedrigeren pH-Wert von 4,0 bis 4,5 benötigen. Bei den in dieser Arbeit zusammengemischten Pflanzsubstraten lagen die meisten pH-Werte in dem empfohlenen Bereich mit Ausnahme beim Pflanzsubstrat für Weide, Pappel und Paulownia, die einen pH-Wert zwischen 5,1 bis 5,4 aufwiesen. Die als optimal geltenden pH-Werte liegen für Pappel, Paulownia und Weide bei 5,5 bis 7,5. Trotz der nicht optimalen pH-Werte wurden jedoch keine Wachstumsbeeinträchtigungen festgestellt. Bei den sechs untersuchten Pflanzsubstraten wurde die Feststellung gemacht, dass bei den biokohlehaltigen Testvarianten (IR15 und F15) die pH-Werte um 0,1 bis 0,6 pH-Einheiten höher lagen als bei den nicht biokohlehaltigen Testvarianten (IR0 und F0). Es ist bekannt, dass Biokohle im Allgemeinen alkalisch ist und als Mischkomponente für Substrate den pH-Wert anheben kann (SPARKES 2011). Bei der Verwendung von Biokohle bzw. biokohlehaltigen Materialien als Beimischung in Substraten muss die pH erhöhende Wirkung berücksichtigt werden. Darüber hinaus weist Biokohle aufgrund ihrer stark porösen Struktur und der großen inneren Oberfläche eine gute Pufferwirkung auf (ATKINSON ET AL. 2010; SOHI ET AL. 2010; LEHMANN 2003), die zur pH-Stabilität im Substrat beitragen kann. Laut HARM (2007) weisen die praxisüblichen Substrate keine ausreichende pH-Pufferung auf, so dass hier sich weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der längerfristigen Auswirkung von Biokohlekompost auf die pH-Stabilität im Substrat anschließen könnten.

Salzgehalt

Der Salzgehalt im Substrat ist ein wichtiger Substratparameter, der erste Hinweise auf mögliche Fehlernährung der Pflanze geben kann. Hohe Salzgehalte beeinträchtigen das Pflanzenwachstum, da durch Erhöhung des osmotischen Potentials des Bodenwassers die Wasseraufnahme der Pflanzen erschwert ist (AMBERGER 1996). Besonders salzempfindlich sind Pflanzen im Keim- und frühen Jugendstadium. Im Zierpflanzenbau gibt es unterschiedliche Richtwerte, die Pflanzen in drei Salzverträglichkeitsstufen einteilen (HARM 2007):

- Stufe I – geringe Salzverträglichkeit (Salzgehalt 0,5 – 1,0 (1,5) g/l)
- Stufe II – mittlere Salzverträglichkeit (Salzgehalt 1,0 – 2,0 (3,0) g/l)
- Stufe III – hohe Salzverträglichkeit (Salzgehalt 1,5 – 3,0 (4,0) g/l)

Von den sechs untersuchten Pflanzsubstraten wurden überwiegend Salzgehalte zwischen 0,3 und 1,6 g/l bestimmt, wobei die meisten Werte der Stufe I zugeteilt werden konnten.

Erhöhte Salzgehalte mit Werten zwischen 3,1 und 7,1 g/l, die die Richtwerte der Stufe III überstiegen, wurden für die Pflanzsubstrate für *Aglaonema commutatum* und *Ruschia rigida* festgestellt. Ursachen für diese hohen Salzgehalte sind unklar. Vermutlich sind Fehler in der Probenahme oder der Messung zu suchen. Trotz der hohen Salzgehalte zeigten die beiden Pflanzen in den Testsubstraten kein signifikant schlechteres Pflanzenwachstum gegenüber den Kontrollen.

Für die vier anderen untersuchten Pflanzsubstrate konnte die Feststellung gemacht werden, dass die biokohlehaltigen Varianten gegenüber den Varianten ohne Biokohlezugabe geringere Salzgehalte aufwiesen. Hier liegt die Vermutung nahe, dass durch Biokohlezugabe der Salzgehalt verringert werden kann, was mit der hohen Sorptionsfähigkeit der Biokohle zusammenhängen kann, an deren Oberfläche sich die Salzionen binden können. Ähnliche Beobachtungen wurden in den Untersuchungen von TERYTZE ET AL. (2015) gemacht.

Wasserhaltekapazität (WHK)

Die Versorgung der Pflanzen mit Wasser ist für deren Nährstoffaufnahme sowie für ein optimales Wachstum und eine gute Pflanzenentwicklung unerlässlich. Ein gutes Substrat sollte aus diesem Grund ein gutes Wasserhaltvermögen aufweisen. Alle untersuchten Pflanzsubstrate zeigten ein gutes Wasserhaltevermögen mit ähnlichen Werten (vgl. Tabelle 3.6 Kapitel 3.1.7). Ein hoher WHK-Wert bedeutet, dass eine größere Menge an Wasser im Substrat gehalten werden kann. Torf weist eine sehr hohe Wasserhaltekapazität auf, die nach den RAL¹⁹- Gütekriterien für Hochmoortorf (RAL-GZ 250/5-2) je nach Zersetzungsgrad mit einem Wertebereich von 42-85 % angegeben wird. Alle Kontroll- und Testsubstrate lagen mit WHK-Werten zwischen 45,2 und 78,7 % in diesem Bereich. Für die torfreduzierten biokohlehaltigen Pflanzsubstrate wurden überwiegend höhere WHK-Werte ermittelt als für die torfhaltigen Kontrollsubstrate. Für die biokohlehaltigen Testsubstrate wurden größtenteils höhere WHK-Werte bestimmt als für die Testsubstrate ohne Biokohlezugabe. Aus der Literatur ist bekannt, dass Biokohle aufgrund ihrer porösen Struktur die Wasserhaltekapazität steigert. In den Untersuchungen von KAMMANN ET AL. (2010) wurden ebenfalls leichte Steigerungen der Wasserhaltekapazität durch die Zugabe von Biokohle zum Substrat beobachtet.

¹⁹ Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung; Festlegung individueller Güteanforderungen für Produkte und Dienstleistungen und Überwachung derer Einhaltung

Rohdichte

Die Rohdichte oder Lagerungsdichte eines Substrats gibt Hinweise auf dessen Porosität und lässt auf den Lufthaushalt des Substrats schließen. Im Zierpflanzenbau sind Substrate mit geringerer Rohdichte optimal, da dadurch die Durchwurzelbarkeit und die Regulation der Bodenluft positiv beeinflusst werden können (BILDERBACK ET AL. 2005). Eine optimale Lagerungsdichte der Trockensubstanz für Substrate im Zierpflanzenbau wird von BILDERBACK ET AL. (2005) mit Werten zwischen 190 bis 700 g/l angegeben. Für die untersuchten Pflanzsubstrate wurden Rohdichten der Trockensubstanz von 257 bis 1410 g/l bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Pflanzsubstrate variierten die Rohdichten stark. Beim Vergleich der biokohlehaltigen Varianten mit den Varianten ohne Biokohle konnte die Feststellung gemacht werden, dass durch Zugabe von Biokohle die Rohdichte des Substrats sich verringerte. In den Untersuchungen von OHSOWSKI ET AL. (2012) wurde durch die Beimengung von Biokohle zu Kompostsubstraten eine Verringerung der Rohdichte festgestellt, wodurch der Bodenlufthaushalt positiv beeinflusst wurde.

Unter Berücksichtigung des pH-Wertes sowie des Salzgehaltes von Biokohle/Biokohlekompost könnte sich nach weiterer Prüfung Biokohle/Biokohlekompost als geeigneter organischer Zuschlagstoff für Substrate erweisen, der den Luft- und Wasserhaushalt positiv beeinflusst.

Kohlenstoff-Stickstoff-(C/N) Verhältnis

Das C/N-Verhältnis gibt darüber Auskunft, wie schnell organische Materialien abgebaut werden. Je enger das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (d.h. je kleiner die Zahl) ist, umso schneller erfolgt der Abbau (AMBERGER 1996). Organische Stoffe mit einem engen C/N-Verhältnis von 10 bis 15 werden demnach schneller mineralisiert als organische Stoffe mit einem weiten C/N-Verhältnis von >30. Weiterhin ist das C/N-Verhältnis ein gängiger Indikator der Stickstoffverfügbarkeit für Pflanzen und Mikroorganismen. Für viele Pflanzenarten gilt ab einem C/N-Verhältnis < 20, dass genügend Stickstoff zur Verfügung steht und ab einem C/N-Verhältnis > 25 verlangsamt sich die mikrobielle Aktivität infolge nicht ausreichender Stickstoffverfügbarkeit (SCHEFFER ET AL. 2002). Für Komposte sollte das C/N-Verhältnis 15 nicht überschreiten, da es sonst kurzzeitig zu Stickstoffimmobilisierung kommen kann, die sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirkt (BRINKJANS ET AL. 2002). Andere Autoren nennen C/N-Verhältnisse von 25 bis 30, die eine Stickstofffestlegung hervorrufen können (LEHMANN UND JOSEPH 2009).

Die untersuchten Pflanzsubstrate wiesen C/N-Verhältnisse zwischen 10 und 47 auf. Weite C/N-Verhältnisse > 20 wurden für die biokohlehaltigen Varianten festgestellt, was auf den hohen Kohlenstoffgehalt der Biokohle zurückgeführt werden kann. Untersuchungen von LEHMANN UND JOSEPH (2009) und ZHANG ET AL. (2014) zeigten ebenfalls eine Erhöhung

des C/N-Verhältnisses durch Zugabe von Biokohle. Die Kohlenstoffverbindungen der Biokohlen gelten als stabil (SPARKES 2011), die sehr langsam von Mikroorganismen mineralisiert werden (FORNES ET AL. 2015), so dass trotz weiter C/N-Verhältnisse in biokohlehaltigen Substraten die Stickstoffmobilisierung meist relativ gering ist, jedoch in verschiedenen Untersuchungen nachgewiesen wurde (LEHMANN UND JOSEPH 2009).

5.1.2 Nährstoffversorgung/-verfügbarkeit der Substrate

Vor Beginn der Wachstumstests wurden die sechs zu untersuchenden unterschiedlichen Pflanzsubstrate vor der Bepflanzung hinsichtlich ihrer Nährstoffgehalte analysiert. Im überwiegenden Fall hatten die Kontroll- und Testsubstrate vergleichbare Nährstoffniveaus (vgl. Tabellen 3.7 und 3.8 Kapitel 3.1.7). Diese Analysenergebnisse spiegeln den momentanen Nährstoffgehalt zum Zeitpunkt der Probenahme wider (HARM 2007). Aussagen zur Nährstoffdynamik im Substrat können nicht gemacht werden, da nur eine Substratbeprobung zum Versuchsbeginn und am Versuchsende durchgeführt wurde. Während der Wachstumstests wurden die Testpflanzen ständig von erfahrenen Gärtnern beobachtet, um anhand des Erscheinungsbildes der Pflanzen über eine eventuell notwendige Düngung zu entscheiden. Weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Freisetzung von Nährstoffen sowie der Nährstoffdynamik in biokohlehaltigen Pflanzsubstraten im Vergleich zu Pflanzsubstraten ohne Biokohle sollten sich anschließen.

5.1.3 Einfluss der neu hergestellten Pflanzsubstrate auf das Pflanzenwachstum

Entsprechend der Zielstellungen der Arbeit (siehe Kapitel 1) wurden unter Gewächshaus- und Freilandbedingungen im Botanischen Garten Berlin Pflanzenwachstumstests mit ausgewählten Pflanzen aus unterschiedlichen Klimazonen durchgeführt, um die Qualität der neu hergestellten Pflanzsubstrate auf Basis von fermentierten und kompostierten Material jeweils mit und ohne Biokohlezugabe im Vergleich zu den herkömmlich verwendeten Pflanzsubstraten zu untersuchen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die anfallenden organischen Materialien des Botanischen Gartens (BG) durch Kompostierung und Fermentation mit und ohne Biokohlezugabe ein qualitativ hochwertiges Material hervorbringen, das als Mischungs-komponente in Pflanzsubstraten geeignet ist, ohne sich negativ auf das Pflanzenwachstum auszuwirken. Die über mehrere Monate laufenden Pflanzenwachstumstests in den Testsubstraten zeigten ein gleichwertiges und teilweise ein besseres Pflanzenwachstum gegenüber den Kontrollen. Die insgesamt 39 unterschiedlichen einfaktoriellen ANOVA-Tests zur Bestimmung von Mittelwertsunterschieden zwischen den Kontroll- und Testsubstraten zeigten 13 mal

signifikant bessere Wachstumsleistungen hinsichtlich der untersuchten Pflanzenparametern in den Testsubstraten gegenüber den Kontrollen. Somit ist eine reine Zufälligkeit der erzielten Ergebnisse unwahrscheinlich. Dennoch sollte erwähnt werden, dass die Ergebnisse sicherlich eine höhere Robustheit erzielt hätten, wenn statt der drei- bis sechsfachen Wiederholungen eine größere Wiederholungsanzahl verwendet worden wäre. Demgegenüber stehen aber die elf unterschiedlichen Pflanzenspezies mit denen die Wachstumstests durchgeführt wurden. Keine der elf Pflanzenspezies zeigten signifikant schlechtere Ergebnisse hinsichtlich der untersuchten Pflanzenparameter in den Testsubstraten im Vergleich zu den Kontrollsubstraten. Diese Ergebnisse erbringen den Nachweis, dass der Botanische Garten in der Lage ist über den neu optimierten Verwertungsprozess, seinen eigenen Kompost aus den anfallenden organischen Reststoffen herzustellen, der den erforderlichen Qualitätskriterien als Substratkomponente entspricht. Somit werden nicht nur Kosten gespart, die für die Beschaffung von Kompost notwendig wären, sondern es wird auch eine zusätzliche Kostenersparnis für die Entsorgung von organischen Restmaterialien erzielt. Der BG konnte aufgrund des neu etablierten Kompostierprozesses den Einkauf von Kompost einstellen. Darüber hinaus birgt die eigene Herstellung von Biokohlekompost ein hohes Umweltentlastungspotenzial im Hinblick klimarelevanter Emissionen und Nährstoffrecycling. In den unterschiedlichen Studien konnte gezeigt werden, dass die Zugabe von Biokohle zum Kompostierprozess klimarelevante Emissionen und die Auswaschung von Nährstoffen reduziert (TERYTZE ET AL. 2015; SCHATTEN ET AL. 2015; KAMMANN 2010; WOOLF ET AL. 2010). In den Elutionsstudien von SCHATTEN ET AL. (2015) wurde das Freisetzungsverhalten von Nährstoffen von Biokohlekompost im Vergleich zu Kompost ohne Biokohle untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch co-kompostierter Biokohle die Nährstofffreisetzung aus frisch hergestellten Komposten deutlich reduziert wird gegenüber Komposten ohne Biokohle und somit weniger Nährstoffe ausgewaschen werden. Es wurde eine Reduzierung der Auswaschung bis zu annähernd 50 % für Nitrat, 45 % für Phosphor und 41 % für Kalium festgestellt.

5.1.4 Einfluss der Biokohle auf das Pflanzenwachstum

Um den Einfluss von Biokohle auf das Pflanzenwachstum zu klären, wurden die Biokohlevarianten mit den Testvarianten ohne Biokohlezugabe verglichen. Die 81 durchgeführten t-Tests zur Überprüfung von Mittelwertsunterschieden der untersuchten Pflanzenparameter zeigten in 85,2 % der Fälle ein gleichwertiges Pflanzenwachstum für die Testvarianten mit und ohne Biokohle. In 12,3 % der Fälle wurden für die Varianten ohne Biokohlezugabe signifikant bessere Wuchsleistungen gegenüber den Biokohlevarianten festgestellt. Die Biokohlevarianten zeigten in 2,5 % der Fälle ein

signifikant besseres Pflanzenwachstum als die Varianten ohne Biokohlezugabe. Zu den Pflanzen, die in den biokohlehaltigen Testsubstraten schlechtere Wuchsleistungen zeigten als in den Testsubstraten ohne Biokohle, zählten *Aglaonema commutatum*, *Coffea arabica*, *Digitalis trojana*, *Geranium maderense* und *Silphium perfoliatum*. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass keine der genannten Pflanzen in allen drei untersuchten Pflanzenparametern schlechtere Ergebnisse zeigte, sondern überwiegend nur in einem Pflanzenparameter. Gründe für das schlechtere Pflanzenwachstum in den biokohlehaltigen Testsubstraten sind nicht in den Nährstoffgehalten der Pflanzsubstrate zu suchen, da diese für die Testsubstrate mit und ohne Biokohlezugabe auf einem vergleichbaren Nährstoffniveau waren (vgl. Tabellen 3.7 und 3.8 Kapitel 3.1.7), sondern vermutlich in den physikalischen Substratparametern. Aufgrund der vorhandenen Datenlage hinsichtlich der physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Substratparameter können keine konkreten Aussagen zu möglichen Zusammenhängen gemacht werden, da diese Daten nicht pro Topf und Testpflanze erhoben wurden, sondern pro angemischtes Pflanzsubstrat als Mischprobe. Es lassen sich eventuell Tendenzen erkennen.

Für *Aglaonema commutatum* wurde in der biokohlehaltigen Fermentationsvariante (F15) eine geringere Biomasse bestimmt als in der Fermentationsvariante ohne Biokohle (F0). Die Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (IR15 und IR0) zeigten eine gleichwertige Biomasse. Die Ursachen hierfür sind nicht ganz eindeutig und können nicht mit den vorhandenen Daten ausführlicher erklärt werden. Eine Vermutung für das schlechtere Wachstum wäre der erhöhte Salzgehalt oder das weite C/N-Verhältnis in der biokohlehaltigen Fermentationsvariante. Zu hohe Salzkonzentrationen verursachen bei Pflanzen den sogenannten Salzstress, der das Wachstum hemmt. Im Pflanzenexperiment von (MCLOUGHLIN ET AL. 2012) wurde festgestellt, dass Salzstress zu einer Veränderung der Wurzelarchitektur führt. Als Stressreaktion werden vermehrt Phytohormone gebildet, die eine hemmende Wirkung auf pflanzliche Prozesse haben. Es bleibt ungeklärt, woher der erhöhte Salzgehalt in der biokohlehaltigen Fermentationsvariante resultiert, da bei allen anderen Pflanzsubstraten in den biokohlehaltigen Varianten geringere Salzgehalte nachgewiesen wurden als in den Varianten ohne Biokohle. Die reduzierten Salzgehalte durch Einmischung von Biokohle decken sich mit den Ergebnissen von TERYTZE ET AL. (2015).

Bei einem weiten C/N-Verhältnis (>20) kann es zur Beeinträchtigung der Stickstoffversorgung für die Pflanze kommen, so dass aus dieser Unterversorgung mit Stickstoff Wachstumsdepressionen resultieren können.

Coffea arabica, *Digitalis trojana*, *Geranium maderense* und *Silphium perfoliatum* wiesen ebenfalls in den biokohlehaltigen Varianten weite C/N-Verhältnisse auf, wodurch

vermutlich die Stickstoffversorgung beeinträchtigt wurde. Es ist zu empfehlen, das C/N-Verhältnis von Biokohlekompost vor der Anwendung als Substratkomponente zu bestimmen, um durch gezielte Maßnahmen einer Stickstoffunterversorgung entgegenzuwirken.

Eine erwähnenswerte Beobachtung, die während des Wachstumstests mit *Digitalis trojana* gemacht wurde, soll an dieser Stelle noch angeführt werden. Diese Pflanze wurde während der Versuchszeit von Schädlingen befallen. Die biokohlehaltigen Varianten wiesen einen deutlich geringeren Schädlingsbefall auf als die Kontrollen. Aus der Literatur ist bekannt, dass Kompost und Biokohle eine phytopathogene Wirkung aufweisen, d.h. es können Resistenzen gegenüber Pflanzenkrankheiten, Pathogenen und Schädlingen gebildet werden (ELAD ET AL. 2010; KRAUSE ET AL. 2003; MATSUBARA ET AL. 2002; HOITINK ET AL. 1996). Hier könnten sich weitere Untersuchungen anschließen, die die phytopathogene Wirkung von Biokohlekompost genauer untersucht, um den Pestizideinsatz zu reduzieren.

5.1.5 Einfluss des Herstellungsprozesses (Kompostierung / Fermentation) auf das Pflanzenwachstum

Hinsichtlich des Einflusses des Verwertungsprozesses von organischem Material auf das Pflanzenwachstum wurden die Kompostvarianten mit den Fermentationsvarianten verglichen. Von den 81 durchgeführten t-Tests zur Überprüfung von Mittelwertunterschieden der untersuchten Pflanzenparameter Pflanzenhöhe, Blattanzahl, oberirdische Biomasse, und Holzgewicht der 11 Pflanzenspezies wurde in 90,1 % der Fälle ein gleichwertiges Pflanzenwachstum zwischen den Fermentations- und Kompostvarianten festgestellt. In 7,4 % der Fälle zeigten die Kompostvarianten mit und ohne Biokohlezugabe der Pflanzen *Geranium maderense*, *Nerium oleander*, *Silphium perfoliatum* und *Paulownia tomentosa* eine signifikant bessere Wuchsleistung als die Fermentationsvarianten. Für die Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohlezugabe wurde in 2,5 % der Fälle ein signifikant besseres Pflanzenwachstum gegenüber den Kompostvarianten nachgewiesen. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass der Herstellungsprozess kaum Einfluss auf das Pflanzenwachstum hat, was vermutlich mit einer vergleichbaren Nährstoffversorgung in den Kompost- und Fermentationsvarianten zusammenhängt. Die Analyse der verfügbaren Nährstoffgehalte (siehe Tabelle 3.8 Kapitel 3.1.7) bestätigte die Annahme eines vergleichbaren Nährstoffniveaus zwischen den Kompost- und Fermentationsvarianten. Im Hinblick auf die Etablierung eines Verwertungsprozesses im Botanischen Garten hat sich herausgestellt, dass die Kompostierung geeigneter als die Fermentation ist, da sie leichter in die bestehenden internen Arbeitsabläufe des BG integrierbar ist. Derzeit ist die Kompostierung mit Zugabe

von Biokohle ein fester Bestandteil der Verwertung organischer Reststoffe und des Nährstoffrecyclings im Botanischen Garten.

5.1.6 Biokohlekompost als Substratmischungskomponente mit Torf- und Düngereinsparpotenzial

Im Fokus stand die Verwertung der im Botanischen Garten Berlin anfallenden organischen Reststoffe zur Herstellung eines qualitativ hochwertigen Materials mit und ohne Biokohlezugabe, das als Substratmischungskomponente dient.

Substrate sind ein Gemisch aus verschiedenen organischen und mineralischen Ausgangsmaterialien, die den Ansprüchen für ein gesundes Pflanzenwachstum gerecht werden müssen (SEIPEL 2007). Die gebräuchlichsten Substrate sind Einheitserden, die aus 70 % Torf und 30 % Ton bestehen, sowie Torfkultursubstrate, die ebenfalls einen hohen Torfanteil aufweisen. Torf verbessert die Wasserspeicherkapazität sowie die Durchlüftung der Substrate. Weitere hervorragende Eigenschaften von Torf, die für die Substrat-herstellung bedeutend sind, sind u.a. folgende: hohe Strukturstabilität, sehr geringe mikrobielle Aktivität, müheloses Einstellen des pH-Wertes und einfache Abschätzung der Verfügbarkeit von Nährstoffen (SEIPEL 2007). Aufgrund der zahlreichen unübertroffenen Eigenschaften ist Torf für den Erwerbsgartenbau als Substrat bislang kaum substituierbar (KÖNIG UND EYSEL 2004). Laut der Studie von ALTMANN (2008) werden ca. 37 Mio. m³ des jährlich in Europa abgebauten Torfs für Pflanz- und Kultursubstrate verwendet. Torf wird vorzugsweise im Gemüseanbau sowie für den Anbau von Blumen und Zierpflanzen eingesetzt. Aufgrund der bestehenden Torfproblematik werden derzeit Alternativen gesucht, den Torfanteil in Substraten zu begrenzen oder möglicherweise zu substituieren, ohne Verlust der positiven Eigenschaften, die Torf bietet. Bereits 1978 wurden von WORRALL erste Untersuchungen zum Torfersatz veröffentlicht. Er prüfte die Eignung von kompostierten Holzresten als möglichen Torfersatz (WORRALL 1978). Zahlreiche Untersuchungen wurden durchgeführt, um geeignete Torfersatzstoffe zu finden. Alternative Substratkomponenten u.a. Biokohle, die den Torf ersetzen können, wurden bereits in den erwähnten Studien (s. Kapitel 2.4.1) aufgeführt. Wenige Untersuchungen haben Biokohlekompost als Torfersatzstoff geprüft, aber nicht speziell für den Anwendungsbereich Zierpflanzenbau. In der Arbeit von (KAMMANN ET AL. 2010) wurde die Eignung von Biokohlekompost als Torfersatzsubstrat in drei verschiedenen Pflanzentests mit Radieschen, Erdbeere und Gerste untersucht.

Nach ausgiebiger Recherche liegen kaum Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Anwendung von Biokohlekompost als möglicher Torfersatz im Zierpflanzenbau vor.

Entsprechend dem Untersuchungsziel (s. Kapitel 1) zeigen die erzielten Ergebnisse deutlich, dass Biokohlekompost zur Torfsubstitution in Pflanzsubstraten für den

Zierpflanzenbau geeignet ist. Weiterhin ergänzen diese Ergebnisse die Untersuchungsergebnisse von (KAMMANN ET AL. 2010) um ein erweitertes Pflanzenspektrum für die Anwendung von Biokohlekompost als Torfersatz. Für die Testpflanzen *Carica papaya*, *Coffea arabica*, *Aglaonema commutatum*, *Digitalis trojana*, *Geranium maderense*, *Nerium oleander* und *Silphium perfoliatum* wurden die Wuchsergebnisse in den torfreduzierten Testsubstraten mit den torfhaltigen herkömmlich verwendeten Pflanzsubstraten verglichen. Es wurde die Pflanzenentwicklung durch zahlreiche Bonituren in unterschiedlichen Entwicklungsstadien über einen längerfristigen Zeitraum (5 bis 30 Monate) dokumentiert. Während dieser Wachstumsperiode zeigte keine der sieben Pflanzen signifikant negative Wachstumsergebnisse in den torfreduzierten Testsubstraten gegenüber den Kontrollsubstraten. Der reduzierte Torfanteil betrug für die untersuchten Pflanzsubstrate zwischen 22 – 33 %. Hier liegt die Frage nahe, ob es möglich ist, den Torfanteil um mehr als 33 % durch die Anwendung von Biokohlekompost als Substratmischungskomponente zu ersetzen ohne negative Wirkung auf die Wuchsergebnisse von Pflanzen. Weiterführende Untersuchungen von Pflanzsubstraten mit abgestuften Torfanteilen sowie einer 100 % torfsubstituierten Variante wären anzustreben.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass für die zuvor genannten Testpflanzen, die in den torfreduzierten Pflanzsubstraten gewachsen sind, eine Torfreduzierung bis zu einem Drittel durch Biokohlekompost empfohlen werden kann, ohne das Wachstumsbeeinträchtigungen zu erwarten sind. Die Substitution von Torf in Pflanzsubstraten unterstützt den Schutz der Moore und bringt dem Botanischen Garten eine zusätzliche Kostenersparnis, da geringere Mengen an Torf eingekauft werden müssen.

Abschließend sei zu erwähnen, dass die neu hergestellten Pflanzsubstrate neben der Torfeinsparung ein Düngereinsparpotenzial aufweisen (vgl. Abb. 4.32 und 4.33 Kapitel 4.1.8). Alle Pflanzen in den Kontroll- und Testsubstraten erhielten Hornspäne, ein stickstoffhaltiger organischer Dünger mit Langzeitwirkung, als Grunddüngung. Nach gärtnerischer Praxis wurden die Pflanzen in den Testsubstraten bedarfsgerecht zusätzlich mit Harnstoff gedüngt, Pflanzen in den Kontrollsubstraten erhielten zusätzlich eine Harnstoff- und/oder Volldüngung (vgl. Tabelle 3.10 Kapitel 3.1.8). Die Testsubstrate erhielten keine Volldüngung, einige Kontrollsubstrate wurden mehrmals mit den handelsüblichen Volldünger Wuxal und/oder Flory3 gedüngt. Die sechs Kontrollsubstrate, die eine Volldüngung erhielten, zeigten keine signifikant besseren Wachstumsergebnisse gegenüber den Testsubstraten. Pflanzen in den Testsubstraten zeigten ein gleichwertiges oder besseres Pflanzenwachstum gegenüber den Kontrollen. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass die Testsubstrate eine ausreichende Nährstoffversorgung der Pflanzen

gewährleisten und in ihren Substrateigenschaften den Pflanzenansprüchen genügen. Für die Testsubstrate wurde ein 30 % iges Düngereinsparpotenzial ermittelt. Die neuen Pflanz-substrate können dem Botanischen Garten eine Kostenersparnis bringen durch die Reduzierung des Einsatzes von Volldünger.

5.2 Biokohlekompostanwendung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen semiarider Gebiete

Der Fokus dieses Teils der Arbeit lag auf der praxisorientierten Anwendung von Biokohlekompost, der vor Ort aus lokalen organischen Reststoffen hergestellt wurde. Den Kleinbauern sollten Möglichkeiten gezeigt werden, wie vorhandene organische Materialien effektiv genutzt werden können, um auf einfache Art und Weise Bodenverbesserungsmittel herzustellen, die eine Alternative zur mineralischen Düngung darstellen und Erträge steigern können. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass durch die nachhaltige Anwendung von Biokohlekompost Erträge gesteigert werden können und somit ein wichtiger Beitrag geleistet wird hinsichtlich der Ernährungssicherheit in dieser Region. Darüber hinaus stellt Biokohlekompost eine nachhaltige Alternative zur mineralischen Düngung dar und hat einen positiven Effekt auf die Verbesserung der Bodenfunktionen sowie boden-physikalische und chemische Eigenschaften.

5.2.1 Einfluss auf physikalische, physikalisch-chemische und chemische Bodenparameter

Hinsichtlich einer bodenverbessernden Wirkung von Biokohlekompost wurden physikalische, physikalisch-chemische und chemische Bodenparameter von den Versuchsflächen untersucht.

Diese Untersuchungen haben eindeutig gezeigt, dass durch die Applikation von Biokohlekompost die Bodenqualität verbessert wird, insbesondere im Hinblick auf pH-Wert, Kationenaustauschkapazität, Gehalt an organischer Substanz und Nährstoffversorgung.

pH-Wert

Der pH-Wert ist eine bedeutende Bodenkenngroße, die weitestgehend das chemische Gleichgewicht des Bodens bestimmt und somit eine große Rolle bei der Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen und Schadstoffen spielt. Zu niedrige pH-Werte können die Verfügbarkeit von Nährsalzen stark reduzieren und sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken. Als optimal gelten pH-Werte zwischen 5,5 und 7,0 um eine gute Nährstoff-versorgung und ein gut funktionierendes Bodenleben zu gewährleisten (AMBERGER 1996). Die ermittelten pH-Werte bewegten sich zwischen 4,6 und 5,9, können als stark bis mäßig sauer eingestuft werden und lagen oft unterhalb des optimalen pH-

Werts von 5,5 (vgl. Tab. 4.4 Kapitel 4.2.1). Durch die Zugabe von Biokohlekompost wurde der pH-Wert zwischen 0,06 und 0,67 pH-Einheiten erhöht. Sowohl Biokohle als auch Kompost haben eine pH-erhöhende Wirkung. Die festgestellte pH-Wert-Erhöhung deckt sich mit den Ergebnissen zahlreicher anderer Publikationen, die besonders für die Biokohlezugabe eine Anhebung des pH-Wertes bestätigen (MOLNÁR ET AL. 2016; MÉNDEZ ET AL. 2013; HASS ET AL. 2012; LAIRD ET AL. 2010; MAJOR ET AL. 2010; LEHMANN 2003; GLASER ET AL. 2002). Eine pH-Wert-Anhebung ist besonders für die stark sauren Böden dieser Region, die hohe Aluminiumgehalte aufweisen, von Vorteil, da dadurch die Freisetzung von phytotoxischen Aluminiumkonzentrationen unterbunden wird. Hohe Aluminiumkonzentrationen in der Bodenlösung können bei empfindlichen Pflanzenarten zu einem stark gehemmten Wurzelwachstum führen und Wachstumsdepressionen hervorrufen (BLUME ET AL. 2010). Studien von (NOVAK ET AL. 2009) und (ZHAO ET AL. 2015) haben gezeigt, dass Biokohle die Menge an austauschbarem Aluminium (Al^{3+}) im Boden herabsetzt. Die Anwendung von Biokohlekompost führte auf den Versuchsflächen zu einer Reduzierung des verfügbaren Gehalts an Aluminium (vgl. Abb. 4.35 und 4.36, Kapitel 4.2.1).

Kationenaustauschkapazität (KAK)

Die KAK kann als Bodenbewertungsmaß angesehen werden und spiegelt in Abhängigkeit vom pH-Wert die sowohl basisch wirksamen als auch sauren austauschbaren Kationen wieder, die an organischer Substanz, Tonmineralen oder Ton-Humus-Komplexen im Boden gebunden sind. Die ermittelte KAK der Versuchsflächen lag im Bereich zwischen 1,85 und 8,84 cmol +/kg und kann als eine sehr geringe bis mittlere KAK eingestuft werden.

Durch die Zugabe von Biokohlekompost, der eine sehr hohe KAK von 37,5 cmol +/kg hatte, konnte bei allen Testflächen die KAK im Boden um den Faktor 1,2 bis 1,4 erhöht werden. Auch andere Studien bestätigen eine Erhöhung der KAK im Boden von biokohlehaltigen Bodenverbesserungsmitteln (ATKINSON ET AL. 2010; LIANG ET AL. 2006; GLASER ET AL. 2002). Sowohl Biokohlekompost als auch Biokohle für sich haben eine sehr hohe KAK und können somit zahlreiche Nährstoffe binden und auch wieder nachliefern. Durch die Fähigkeit der Adsorption von Nährstoffen sind diese vor Auswaschung geschützt. Eine Erhöhung der KAK im Boden ist anzustreben, da dadurch die Auswaschungsgefahr für Nährstoffe deutlich verringert wird.

Organische Substanz

Die organische Bodensubstanz (OBS) spielt eine herausragende Rolle als Lieferant von Nährstoffen und für den Aufbau und die Erhaltung wichtiger Bodenfunktionen (Produktionsfunktion, Lebensraumfunktion, Transformatorfunktion), der Bodenfruchtbarkeit und der Bodengesundheit. Sie hat eine wichtige Bedeutung für das

Wasserbindungsvermögen und die Bearbeitbarkeit des Bodens sowie für die Speicherkapazität von Nährstoffen. Die OBS hat ein hohes Adsorptionsvermögen für Nährstoffe, so dass diese weniger schnell ausgewaschen werden. Weiterhin hat die OBS einen positiven Einfluss auf physikalische und biologische Bodeneigenschaften. Sie ist ein wichtiger Stabilisierungsfaktor des Bodengefüges, hat eine lockernde Wirkung auf ton- und schluffreichen Böden und macht sandige Böden bindiger, so dass diese vor Nährstoffauswaschung geschützt werden (BUCHGRABER 2000). Sie ermöglicht einen verbesserten Gasaustausch, erhöht die Durchlässigkeit und Kationenaustauschkapazität eines Bodens, hat ein hohes Puffervermögen und erhöht die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen für Pflanzen (SCHEFFER ET AL. 2002). Darüber hinaus hat die OBS eine klimarelevante Bedeutung, da sie als potenzielle Kohlenstoffsенke dient.

Da der Gehalt an organischer Substanz durch Mineralisation (Abbauprozesse des Bodenlebens) stetig abnimmt, muss dem Boden wieder organisches Material zugeführt werden. Ein Rückgang des Gehalts an organischer Substanz im Boden beeinträchtigt die Nachlieferung von Nährstoffen für eine nachhaltige Pflanzenproduktion, so dass sinkende Erträge und negative Auswirkungen auf die Ernährungssicherheit die Folge sein können. Böden mit ausreichender OBS sind weniger anfällig gegenüber Bodenverdichtung und Bodenerosion. Die Böden des Untersuchungsgebietes unterliegen schwankenden Klimabedingungen und sind durch Regen- und ausgeprägte Trockenzeiten starken Erosionsprozessen ausgesetzt. Eine langfristige Erhöhung der OBS ist aus diesem Grund anzustreben, um diesen Erosionsprozessen entgegenzuwirken. Dass die OBS durch Kompostgaben erhöht werden kann, wurde bereits in zahlreichen Publikationen bestätigt (BUCHGRABER 2000; HARTL ET AL. 1999; PARKINSON ET AL. 1999). In aktuellen Studien sowie auch in der vorliegenden Arbeit wird die Erhöhung der organischen Bodensubstanz durch Zugabe von Biokohlekompost belegt (AGEGNEHU ET AL. 2016; BASS ET AL. 2016; FISCHER UND GLASER 2012).

Der Gehalt an organischer Substanz wies auf den Versuchsflächen eine breite Spannweite auf mit Werten zwischen 0,7 und 3,8 % und lag in der Einstufungsklasse zwischen sehr niedrig und mittel. Am Standort Gbilugu wurden für die Kontrollflächen die höchsten organischen Gehalte mit 2,8 % ermittelt im Vergleich zu den Kontrollen der anderen untersuchten Standorte. Dies kann damit erklärt werden, dass der Standort Gbilugu seit mehreren Jahren ökologische Landwirtschaft mit intensiven Humusaufbau betreibt.

Durch die Zugabe von Biokohlekompost erhöhte sich bei allen behandelten Versuchsflächen der Gehalt an organischer Substanz im Vergleich zu den Kontrollflächen um den Faktor 1,1 bis 1,5. Diese Ergebnisse lassen aber noch keine Aussagen zu wie stark der Zersetzungsprozess ist und ab welchem Zeitpunkt eine erneute Zugabe von

organischem Material sinnvoll wäre, um die OBS nachhaltig zu steigern. Um diesen Aspekt näher zu beleuchten, müssten Langzeitversuche durchgeführt werden mit dem Ziel, optimale Auftragungsmengen zu ermitteln, die den Aufbau an OBS gewährleisten. In diesem Zusammenhang wäre es auch lohnenswert zu untersuchen, ob durch die Anwendung von Biokohlekompost der Zeitpunkt einer erneuten Aufbringung nach hinten verschoben werden könnte und wie lange die Wirkung von Biokohlekompost hinsichtlich zufriedenstellender Ernteerträge anhält.

Aus der Literatur ist bekannt, dass Biokohle ein kohlenstoffstabilisierendes Potenzial hat, d.h. nahezu resistent gegenüber mikrobiellen Abbauprozessen ist (MARKS ET AL. 2016; JIANG ET AL. 2016; NGO ET AL. 2016; WU ET AL. 2016) und somit Kohlenstoffverlusten im Boden entgegenwirken kann. Das Zumischen von Biokohle zu organischen Materialien wie z.B. Kompost hat sich bewährt, um Kohlenstoffverluste in tropischen Böden zu reduzieren wie die Studie von NGO ET AL. (2016) belegt. Hier wurde Biokohle mit drei unterschiedlichen organischen Materialien (Büffelmist, Kompost und Wurmkompost) vermischt und deren Zersetzung unter tropischen Bedingungen in einem einjährigen Feldversuch untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass die Zumischung von Biokohle zu organischem Material zu einem höheren Kohlenstoffverbleib führte als organisches Material ohne Biokohle und überraschenderweise auch Biokohle in Singelapplikation. Infolgedessen empfehlen die Autoren die Zumischung von Biokohle zu organischen Materialien, um Kohlenstoffverluste vorzubeugen und die Bodenfruchtbarkeit tropischer Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung zu verbessern.

Um die Bodenfruchtbarkeit landwirtschaftlich genutzter Flächen nachhaltig und langfristig zu steigern, ist es nicht nur wichtig die OBS zu erhalten und zu erhöhen durch Zugabe von organischen Bodenverbesserungsmitteln, sondern auch eine angepasste Bodennutzung zu berücksichtigen, die schonende Bodenbearbeitungsverfahren und Fruchtfolgen beinhaltet.

5.2.2 Einfluss auf die Nährstoffverfügbarkeit

Verschiedene Untersuchungen bestätigten, dass durch die Anwendung von Biokohle und biokohlehaltigen organischen Bodenverbesserungsmitteln den Pflanzen Nährstoffe zugeführt werden und die Auswaschung von Nährstoffen in Böden reduziert wird (BEESLEY ET AL. 2011; LEHMANN ET AL. 2011; MAJOR ET AL. 2010; STEINER ET AL. 2008). Der verbesserte Nährstoffrückhalt durch die Anwendung von Biokohle erfolgt durch Kationen-adsorption an der Oberfläche der Biokohle (LIANG ET AL. 2006). In den Labor-Sorptionsexperimenten von YAO ET AL. (2012) wurde festgestellt, dass die Effekte der Biokohle hinsichtlich der Auswaschung von Nährstoffen in Böden nicht einheitlich ist, sondern von der Art der Biokohle und den entsprechenden Nährstoffen abhängt. Aus

diesem Grund empfehlen die Autoren die Nährstoffsorptionseigenschaften von Biokohle vor Anwendung als Bodenverbesserungsmittel zu untersuchen.

Die Anwendung von Biokohlekompost auf den Untersuchungsflächen führte zur Erhöhung der Gesamtgehalte und verfügbaren Gehalte der Nährstoffe. Es wurde für den verfügbaren Phosphor eine signifikante Steigerung auf den Biokohlekompostflächen gegenüber den Kontrollen festgestellt (vgl. Abb. 4.34 Kapitel 4.2.1). Der mittlere Gehalt an verfügbarem Phosphor erhöhte sich um das 1,5 Fache auf den Biokohlekompostflächen. Ursachen hierfür könnten die zunehmenden pH-Werte mit Zugabe von Biokohlekompost sein, die eine Desorption von an Eisen- und Aluminiumoxiden gebundenem Phosphor bewirkt. In sauren, tonhaltigen Böden wird Phosphor als Eisen- bzw. Aluminiumphosphat fixiert, welches mit steigenden pH-Werten wieder in Lösung gehen kann. Weitere Ursachen können diverse physikalisch-chemische Eigenschaften der Biokohle aber auch des Bodens sein, die die Phosphorverfügbarkeit beeinflussen (BIEDERMAN UND HARPOLE 2013; LEHMANN ET AL. 2011). In Abhängigkeit vom Ausgangsstoff und des Nährstoffgehalts der Biokohle sowie der Bodeneigenschaften kann die Verfügbarkeit von Phosphor reduziert werden (HUSSAIN ET AL. 2016).

Die Anwendung von Biokohlekompost hat gezeigt, dass ausreichend Nährstoffe zur Verfügung gestellt werden für ein verbessertes Pflanzenwachstum und eine Steigerung der Ertragsleistung bewirken. Die Deckung des Nährstoffbedarfs des Bodens mit organischen Materialien hilft den Boden zu verbessern und die Bodenfruchtbarkeit zu steigern sowie den Einsatz von mineralischen Düngern zu reduzieren.

5.2.3 Einfluss auf Ertragsleistung und Pflanzenwachstum

Zahlreiche Studien belegen, dass durch die Anwendung von biokohlehaltigen organischen Bodenverbesserungsmitteln die Bodenfruchtbarkeit sowie die Ertragsleistung gesteigert werden können (AGEGNEHU ET AL. 2016; DOAN ET AL. 2015; MAJOR ET AL. 2010; LEHMANN 2003; GLASER ET AL. 2002).

Die Applikation von Biokohlekompost mit einer Auftragungsmenge von $12,5 \text{ t ha}^{-1}$ auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen in Nordghana hatte einen signifikant positiven Effekt auf das Pflanzenwachstum und die Ertragsleistung von den untersuchten Maispflanzen. Es wurden Ertragssteigerungen mit einem Faktor zwischen 1,3 und 5,8 nachgewiesen. Aufgrund der vorhandenen Datenlage, d. h. der Vergleich der Biokohlekompostflächen mit ungedüngten Kontrollflächen, zeigen diese Ergebnisse aber nur, dass es möglich ist durch Biokohlekompost die Ertragsleistung degradierter Böden nachhaltig zu steigern sowie die Bodenqualität zu verbessern. Aussagen darüber, ob Biokohlekompost eine bessere Wirkung gegenüber mineralischer Düngung oder puren Kompost zeigt, können gegenwärtig nicht getroffen werden.

Auch in anderen Studien wurden von Ertragssteigerungen von Mais durch die Anwendung von Biokohlekompost berichtet (AGEGNEHU ET AL. 2016; DOAN ET AL. 2015; MEKURIA ET AL. 2014; NUR ET AL. 2014). Im Feldversuch von AGEGNEHU ET AL. (2016) wurden auf einem tropischen Ferralsol die Einflüsse von Biokohle, Kompost, co-kompostierter Biokohle und mit Biokohle gemischter Kompost im Hinblick auf Bodenfruchtbarkeit, Maisertrag und Treibhausgasemissionen untersucht und mit einer gedüngten Kontrolle verglichen. Für alle vier Behandlungen wurden gegenüber der Kontrolle Ertragssteigerungen zwischen 10 und 29 % festgestellt. MEKURIA ET AL. (2014) untersuchten auf einem Gleyic Acrisol in Lao PDR (People's Democratic Republic) die Effekte auf den Ertrag von Mais, auf die Nährstoffaufnahme sowie auf Bodeneigenschaften neun verschiedener organischer Bodenverbesserungsmittel im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Der zweijährige Feldversuch mit Mais als Testpflanze wurde an zwei Standorten durchgeführt, wobei die Testflächen nur im ersten Jahr mit den entsprechenden Bodenverbesserungsmitteln appliziert wurden. Die verwendete Biokohle wurde aus Reisspelzen hergestellt. Im ersten Erntejahr direkt nach der Applikation der Bodenverbesserungsmittel konnte für alle untersuchten Behandlungen an einem der Standorte signifikante Ertragssteigerungen für Mais zwischen 0,9 und 3,3 t ha⁻¹ gegenüber der Kontrolle nachgewiesen werden, jedoch wurden keine signifikanten Ertragsteigerungen im darauffolgendem Jahr festgestellt.

Der Feldversuch mit acht unterschiedlichen organischen Bodenverbesserungsmitteln von NUR ET AL. (2014) zeigte für einen kalkhaltigen Boden in Indonesien für einen mit Biokohle angereicherten Kompost Ertragssteigerungen für Mais sowohl in der Regen- als auch in der Trockenzeit gegenüber einer ungedüngten Kontrolle.

Diese drei näher beleuchteten Feldversuche sowie die Ergebnisse der Dissertation zeigen für ganz unterschiedliche Bodentypen positive Ertragssteigerungen für Mais als Anbaukultur durch die Anwendung von Biokohlekompost.

Die pflanzenwachstumsfördernden und bodenverbessernden Wirkungen von Kompost sind weitgehend bekannt. In weiteren Meta-Analysen wurden die Wirkungen von Biokohle in Singleapplikation auf das Pflanzenwachstum und den Ernteertrag untersucht und bewertet (BIEDERMAN UND HARPOLE 2013; SPOKAS ET AL. 2012; JEFFERY ET AL. 2011).

Insbesondere unter tropischen und subtropischen Klimabedingungen wurden Steigerungen des Ernteertrages und der oberirdischen Biomasse durch Zugabe von Biokohle festgestellt.

BIEDERMAN UND HARPOLE (2013) konnten mit ihrer Meta-Analyse zeigen, dass die höchsten Wachstumssteigerungen durch die Anwendung von Biokohle, die bei hohen Temperaturen durch Pyrolyse hergestellt wurde, erzielt wurden.

In der zusammenfassenden Bewertung von SPOKAS ET AL. (2012) zur ertragssteigernden Wirkung von Biokohlen wurden aufgrund der großen Heterogenität der verwendeten

Biokohlen sehr unterschiedliche Wirkungen auf den Pflanzenertrag festgestellt. Es wurden sowohl positive und negative als auch keine Effekte auf den Pflanzenertrag nachgewiesen.

JEFFERY ET AL. (2011) stellten eine mittlere Ertragssteigerung von 10 % gegenüber unbehandelten Kontrollböden fest nach Biokohlezugabe. Es wurden aber auch Ertragsdepressionen nachgewiesen. Klare Aussagen über die Biokohlemenge und der Veränderung der Ertragsleistung konnten in den Meta-Analysen nicht herausgearbeitet werden. Nach Ansicht von (JEFFERY ET AL. 2011) sollten zukünftig längerfristige Untersuchungszeiträume angestrebt werden, um bessere Aussagen sowohl über die Veränderungen und Stabilität der Biokohlen als auch die Berücksichtigung der Einflüsse von z.B. Klima, Fruchtfolgen und Bodenbearbeitung machen zu können.

Die Mischung von Biokohle und Kompost insbesondere co-kompostierte Biokohle scheint einen positiven Synergieeffekt zu ergeben im Hinblick auf das Pflanzenwachstum und die Ertragsleistung wie die Ergebnisse dieser Arbeit als auch die zuvor erwähnten Studien belegen.

Anhand der Ausgangsbodenbedingungen der Versuchsflächen konnten teilweise ertragsbegrenzende Bodeneigenschaften nachgewiesen werden (z.B. niedriger pH-Wert, niedrige Gehalte an organischer Substanz, hohe Aluminiumgehalte), die durch die Anwendung von Biokohlekompost verbessert wurden und sich somit eine ertragssteigernde Wirkung zeigte. Veränderungen entsprechender Bodenparameter durch die Anwendung von Biokohlekompost werden im Kapitel 5.2.1 näher beleuchtet.

Durch die Anwendung von Biokohlekompost konnten eindeutig wachstumsfördernde Effekte insbesondere signifikant bessere Maiskolbenentwicklungen nachgewiesen werden, die auf eine verbesserte Nährstoffversorgung und positiv veränderte Bodenbedingungen zurückzuführen sind. Die Maiskolben der Biokohlekompostflächen waren im Vergleich zu den Kontrollen der beiden untersuchten Vegetationsperioden im Mittel um das 1,4 Fache länger und um das 2,2 Fache schwerer.

Entsprechend der Zielstellung (s. Kapitel 1), können hinsichtlich Ertragsleistung und Pflanzenwachstum der zweiten Vegetationsperiode nach einmaliger Applikation von Biokohlekompost folgende Aussagen getroffen werden:

In der Maiskolbenentwicklung konnten im zweiten Vegetationsjahr ohne Biokohlekompostapplikation Unterschiede zwischen den Kontroll- und Testflächen festgestellt werden. Die Maiskolben der Biokohlekompostflächen waren im Mittel länger und schwerer als die der Kontrollen, zeigten aber keine nachweisbaren signifikanten Unterschiede wie im Jahr zuvor. Die Unterschiede in der Maiskolbenentwicklung zwischen den Kontroll- und Biokohlekompostflächen spiegelten sich auch in den unterschiedlichen Körnerträgen wieder. Auf den Biokohlekompostflächen wurden im zweiten Vegetationsjahr Mehrerträge

nachgewiesen mit Ertragssteigerungen um das 1,3 bis 1,7-Fache. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die einmalige Applikation von Biokohlekompost im ersten Jahr die Nährstoffversorgung im zweiten Jahr noch ausreichend gewesen sein muss, um die Mehrerträge hervorzubringen. Ähnliche Ergebnisse wurden im Feldversuch von MEKURIA ET AL. (2014) festgestellt. Ausgehend von diesen Ergebnissen stellt sich die Frage, wie lange Mehrerträge durch eine einmalige Applikation von Biokohlekompost erzielt werden können und wie hoch die Applikationsmengen mindestens sein müssen.

Eine erwähnenswerte Beobachtung, die hier angeführt werden soll, ist, dass einige Kontrollflächen mit dem Maisschädling *Ostrinia nubilalis* (Maiszünsler) befallen waren, aber die Biokohlekompostflächen nur einen geringen Befall zeigten. Aus der Literatur ist bekannt, dass Kompost und Biokohle einen positiven Effekt hinsichtlich Resistenzen gegenüber Pflanzenkrankheiten, Pathogenen und Schädlingen haben können (ELAD ET AL. 2010; KRAUSE ET AL. 2003; MATSUBARA ET AL. 2002; HOITINK ET AL. 1996). Aus dieser Beobachtung heraus lassen sich weiterführende Forschungsfragen anschließen, die die phytosanitären Eigenschaften von Biokohlekompost untersuchen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann eventuell der Einsatz von Pestiziden reduziert werden.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die im Botanischen Garten Berlin (BG) erzielten Untersuchungsergebnisse bestätigen die Möglichkeit der Herstellung qualitativ hochwertiger Komposte/Substrate mit und ohne Zugabe von Biokohle aus den im BG anfallenden organischen Reststoffen auf Basis einer neuen kreislauforientierten und ressourcenschonenden Produktionstechnik.

Die zahlreichen Pflanzenwachstumstests zur Untersuchung der pflanzenbaulichen Wirkung dieser Substrate/Komposte zeigten vielversprechende Ergebnisse. Zum einen konnte gezeigt werden, dass die neu hergestellten Substrate gleichwertige oder bessere Pflanzenwachstumsergebnisse lieferten gegenüber den herkömmlich verwendeten Substraten und sich somit als Substratkomponente eignen, wodurch der Zukauf des bisher im BG verwendeten Komposts eingestellt werden konnte. Die Herstellung des eigenen Komposts aus den anfallenden organischen Materialien spart dem BG Kosten für die Beschaffung von Kompost und Entsorgung von pflanzlichen Reststoffen. Zum anderen sind die neu hergestellten Substrate geeignet, den Torfanteil in den untersuchten Pflanzsubstraten bis zu einem Drittel zu ersetzen ohne beeinträchtigende Wirkungen auf das Pflanzenwachstum zu zeigen. Die neuen Pflanzsubstrate bieten hinsichtlich ihres Wasser- und Lufthaushalts gleichwertige Eigenschaften wie Torfsubstrate. Durch die Zumischung von Biokohle wurden leichte Steigerungen der Wasserhaltekapazität sowie eine Verringerung der Substratdichte festgestellt. Es sollten sich weiterführende Untersuchungen anschließen, die den Torfersatz in weiteren Abstufungen bis zu einem vollständigen Torfersatz überprüfen.

Aus der Anwendung als Substratkomponente konnte ein 30 %iges Düngereinsparpotenzial erschlossen werden, wodurch Ressourcen geschont und Kosten für den Kauf von Düngemitteln gespart werden können. Die neuen Pflanzsubstrate stellten ausreichend Nährstoffe für ein gutes Pflanzenwachstum zur Verfügung.

Die zwei untersuchten Verwertungsprozesse Fermentation und Kompostierung zeigten in Bezug auf das hergestellte Substrat kaum Unterschiede in der pflanzenbaulichen Wirkung, so dass beide Prozesse empfohlen werden können zur Verwertung organischer Reststoffe. Allerdings ist für den Botanischen Garten die Kompostierung geeigneter, da sie besser in bestehende interne Arbeitsabläufe integrierbar ist.

Beim Vergleich der biokohlehaltigen Testsubstrate mit den Testsubstraten ohne Biokohle zeigte sich hinsichtlich der Pflanzenentwicklung kein einheitliches Bild. Überwiegend wurde ein gleichwertiges Pflanzenwachstum festgestellt, was mit einem vergleichbaren Nährstoffgehalt in den untersuchten Pflanzsubstraten zusammenhängt. Vereinzelt zeigten einige Pflanzen bessere oder schlechtere Pflanzenwachstumsergebnisse in den biokohlehaltigen Pflanzsubstraten, die auf physikalisch-chemische Substratparameter zurückzuführen sind. Ein entscheidender Einfluss auf die Wuchsleistung durch Zugabe

von Biokohle konnte nicht nachgewiesen werden, jedoch soll an dieser Stelle die phytopathogene Wirkung von Biokohlekompost erwähnt werden, die während der Wachstumstests bei einigen Pflanzen beobachtet wurde. In diesem Zusammenhang wäre es lohnenswert weiterführende Untersuchungen hinsichtlich Resistenzbildung gegenüber Pflanzenkrankheiten und Schädlingen durch die Anwendung von Biokohlekompost durchzuführen, um mögliche Einsparpotenziale hinsichtlich des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln zu erschließen.

Abschließend lässt sich durch die Herstellung und Anwendung von Biokohlekompost im Botanischen Garten Berlin ein ökonomischer und ökologischer Nutzen ableiten. Der ökonomische Nutzen liegt in der Kostenersparnis für die Beschaffung von Kompost, Torf und Düngemitteln sowie für die Entsorgung von pflanzlichen Reststoffen. Der ökologische Nutzen ist in der Reduzierung schädlicher Treibhausgasemissionen, in der Reduzierung von Nährstoffverlusten, in der Reduzierung des Einsatzes von Torf und Düngemitteln sowie im Kohlenstoff-Sequestrierungspotenzial der Biokohle zu sehen.

Hinsichtlich der Anwendung von Biokohlekompost auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in semiariden Gebieten zeigten die Ergebnisse der Feldversuche in der nördlichen Region der Republik Ghana, dass Biokohlekompost ein geeignetes nachhaltiges Bodenverbesserungsmittel ist, dass aus den vor Ort verfügbaren organischen Materialien durch Kompostierung hergestellt werden kann. Der hergestellte Biokohlekompost hat eine ausreichende Nährstoffwirkung, um ein verbessertes Pflanzenwachstum sowie Ertragssteigerungen hervorzubringen, wodurch der Einsatz von Mineraldünger reduziert werden kann oder überflüssig wird. Selbst bei einmaliger Anwendung von Biokohlekompost konnte im zweiten Vegetationsjahr ein Mehrertrag gegenüber den Kontrollen nachgewiesen werden.

Die wachstumsfördernden und ertragssteigernden Wirkungen von Biokohlekompost können somit einen wichtigen Beitrag leisten, die lokale Nahrungsmittelproduktion zu verbessern und die Ernährungssicherheit in Regionen mit degradierten Böden zu gewährleisten.

Darüber hinaus hat Biokohlekompost ein bodenverbesserndes Potenzial im Hinblick auf boden-physikalisch-chemische Eigenschaften. Die Anwendung von Biokohlekompost trägt u.a. zum Aufbau und Erhalt organischer Bodensubstanz bei, wodurch das Puffervermögen des Bodens erhöht und die Bodenfruchtbarkeit gesteigert werden. Ertragsbegrenzende Faktoren wie z.B. geringe Kationenaustauschkapazität sowie geringe pH-Werte werden positiv durch die Applikation von Biokohlekompost beeinflusst.

Weiterhin zeigte Biokohlekompost auf den untersuchten Böden eine reduzierende Wirkung gegenüber der Verfügbarkeit von Aluminium, das in hohen Konzentrationen phytotoxisch wirken kann.

Die Anwendung von Biokohlekompost kombiniert mit einer angepassten Bodennutzung, die schonende Bodenbearbeitungsverfahren und Fruchtfolgen berücksichtigt, kann einen wichtigen Beitrag leisten, nachhaltig die Bodenqualität und die Bodenfunktionen positiv zu beeinflussen sowie langfristige Ertragssteigerungen zu gewährleisten.

Abschließend lässt sich für beide Untersuchungen, die unterschiedliche Anwendungsbereiche für Biokohlekompost berücksichtigt, folgendes zusammenfassen:

1. Durch die Herstellung von Biokohlekompost werden organische Materialien wiederverwertet, die einen Mehrwert schaffen.
2. Die Kompostierung mit Zugabe von Biokohle kann als wesentliche Behandlungsmethode organischer Reststoffe angesehen werden, die zur lokalen/regionalen Schließung von Stoffkreisläufen beiträgt, Ressourcen schont und Nährstoffverlusten entgegenwirkt.
3. Biokohlekompost eignet sich als Substratmischungskomponente mit vergleichbaren Substrateigenschaften wie Torf.
4. Biokohlekompost kann als Torfersatzstoff im Zierpflanzenbau bis zu einer Torfreduzierung von 33 % ohne Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums empfohlen werden.
5. Die Anwendung von Biokohlekompost als Bodenverbesserungsmittel steigert die Ertragsleistung und bringt ein verbessertes Pflanzenwachstum hervor.
6. Beide untersuchten Anwendungsbereiche zeigen sowohl ein ökologisches als auch ökonomisches Potenzial von Biokohlekompost

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die hochwertige Verwertung anfallender organischer Reststoffe trägt zum Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz bei. Durch lokal und regional angepasste intelligente Stoffkreislaufkonzepte können aus vorhandenen Ressourcen qualitativ hochwertige Substrate nachhaltig erzeugt werden, die ein attraktives Anwendungspotenzial in der Landwirtschaft sowie im Garten- und Zierpflanzenbau aufweisen.

Kompostierung als effektive Behandlungsmethode organischer Abfälle kann einen wesentlichen Beitrag leisten, Ressourcen zu schonen und den Nährstoffkreislauf zu stabilisieren. Eine große Bedeutung wird in diesem Zusammenhang der Optimierung des Nährstoff-Managements während der Kompostierung beigemessen.

Die vorliegende Dissertation untersucht die pflanzenbauliche Wirkung von Biokohlekompost, der auf der Basis einer neuen kreislauforientierten und ressourcenschonenden Produktionstechnik unter Zugabe von Biokohle aus anfallenden organischen Reststoffen hergestellt wurde. Zahlreiche Pflanzenwachstumstests unter Gewächshaus- und Freilandbedingungen sowie unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wurden durchgeführt, um das Nutzpotenzial von Biokohlekompost ableiten zu können. Die Anwendung von Biokohlekompost als Substratkomponente und Torfersatzstoff im Zierpflanzenbau sowie als Bodenverbesserungsmittel mit ertragssteigernder Wirkung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in Gebieten mit semiaridem Klima bildeten den Schwerpunkt dieser Untersuchung.

Nach einer kurzen Einleitung wird zunächst ein Überblick zum derzeitigen Stand der Biokohleforschung gegeben. Darüber hinaus wird insbesondere auf die Definition, Eigenschaften sowie Wirkungen der Biokohle eingegangen. Anschließend werden die gängigen Herstellungsverfahren beleuchtet. Weiterhin wird der Kenntnisstand zur Anwendung von Biokohle im Zierpflanzenbau als auch in der Landwirtschaft zusammengefasst.

Die durchgeführten Topfversuche im Botanischen Garten Berlin mit Biokohlekompost als Substratmischungskomponente sowie die Feldversuche in der Republik Ghana mit Biokohlekompost als Bodenverbesserungsmittel auf landwirtschaftlichen Nutzflächen werden beschrieben. Weiterhin werden die dabei verwendeten Mess- und Analysemethoden dokumentiert sowie die verwendeten statistischen Methoden erläutert.

Die Topfversuche erfolgten nach gärtnerischer Praxis unter kontrollierten Gewächshausbedingungen oder im Freien im Botanischen Garten Berlin. Mit den 11 durchgeführten Pflanzenwachstumstests mit ausgewählten Pflanzen aus drei unterschiedlichen Klimazonen (tropisch, subtropisch und gemäßigt) wurde versucht, ein

breites Spektrum der Anforderungen im Botanischen Garten abzudecken. Folgende Pflanzen aus den drei Klimazonen wurden untersucht:

- Ø Tropische Klimazone: Kolbenfarn (*Aglaonema commutatum*), Papaya (*Carica papaya*), Kaffeestrauch (*Coffea arabica*)
- Ø Subtropische Klimazone: Fingerhut (*Digitalis trojana*), Storchschnabel (*Geranium maderense*), Oleander (*Nerium oleander*), Mittagsblume (*Ruschia rigida*)
- Ø Gemäßigte Klimazone: Durchwachsende Silphie (*Silphium perfoliatum*), Blauglockenbaum (*Paulownia tomentosa*), Pappelhybride (*Populus „Max1“*), Weidenhybride (*Salix „Tordis“*)

Insgesamt wurden sechs pflanzenspezifische Substrate in vier unterschiedlichen Testvarianten unter Zugabe von weiteren Additiven angemischt. Die Testvarianten wurden aus den anfallenden organischen Reststoffen des Botanischen Gartens mittels Kompostierung und Fermentation hergestellt und setzten sich wie folgt zusammen:

1. Kompostiertes Material ohne Biokohle (IR0)
2. Kompostiertes Material mit Biokohle (IR15) (Biokohle co-kompostiert)
3. Fermentiertes Material ohne Biokohle (F0)
4. Fermentiertes Material mit Biokohle (F15) (Biokohle co-fermentiert)

Um die Eignung als Torfersatzstoff dieser vier unterschiedlichen Materialien zu überprüfen, wurde bei sieben Testpflanzen der Torfanteil um ein Drittel gegenüber den Kontrollen reduziert. Zusätzlich sollte ein mögliches Düngereinsparpotenzial der Testsubstrate gegenüber den Kontrollsubstraten anhand unterschiedlicher Düngemaßnahmen erfasst werden. Darüber hinaus wurde untersucht, ob die Zugabe von Biokohle sowie der Verwertungsprozess (Fermentation/Kompostierung) einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum haben.

Um die pflanzenbauliche Wirkung von Biokohlekompost in semiariden Gebieten zu untersuchen, wurden Feldversuche in einer praxisorientierten Anwendung in der nördlichen Region der Republik Ghana auf ausgewählten landwirtschaftlichen Nutzflächen der Kleinbauern vor Ort durchgeführt.

Es wurden die Ertragsleistungen sowie die Pflanzenentwicklung auf den mit Biokohlekompost applizierten Versuchsfeldern untersucht und mit den entsprechenden Kontrollflächen verglichen. Den Kleinbauern sollten nachhaltige Alternativen zur mineralischen Düngung sowie Verbesserung der Bodenqualität aufgezeigt werden durch die Anwendung von Biokohlekompost, der aus den vorhandenen organischen Reststoffen vor Ort hergestellt werden kann.

Die erzielten Untersuchungsergebnisse der Topf- und Feldversuche werden vorgestellt, statistisch ausgewertet und diskutiert sowie Schlussfolgerungen gezogen, die sich aus den Ergebnissen ableiten lassen.

Zunächst werden die erzielten Ergebnisse der Topfversuche im Botanischen Garten Berlin (BG) betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass aus den im BG anfallenden organischen Reststoffen mittels Kompostierung und Fermentation mit und ohne Zugabe von Biokohle ein Material von hoher Qualität hergestellt werden kann und somit der Zukauf des bisher im BG verwendeten Komposts eingestellt werden konnte. Dadurch spart der BG nicht nur Kosten für die Beschaffung von Kompost, sondern auch für die Entsorgung von pflanzlichen Reststoffen. Die untersuchten Testsubstrate zeigten in keinen der durchgeführten Topfversuche signifikant schlechtere Wachstleistungen hinsichtlich der untersuchten Pflanzenparameter Pflanzenhöhe, Biomasse und Blattanzahl im Vergleich zu den herkömmlich verwendeten Pflanzsubstraten (Kontrollen). 55% der untersuchten Testpflanzen zeigten in den Testsubstraten ein signifikant besseres Pflanzenwachstum und 45% ein gleichwertiges Pflanzenwachstum gegenüber den Kontrollsubstraten. Aus diesen Ergebnissen lässt sich folgern, dass die untersuchten Testsubstrate zur weiteren Anwendung als Substratmischungskomponente im Zierpflanzenbau geeignet sind.

Darüber hinaus wurde kein signifikant negatives Pflanzenwachstum in den torfreduzierten Testsubstraten gegenüber den Kontrollen festgestellt. Für die untersuchten Pflanzsubstrate war die Torfsubstitution mit den Testvarianten erfolgreich, somit können diese als Torfersatzstoff für eine Torfreduzierung von 22 bis 33% ohne Wachstumsbeeinträchtigung empfohlen werden. Über den reduzierten Torfanteil in den Pflanzsubstraten lassen sich innerbetriebliche Kosten einsparen und es wird ein wesentlicher und nachhaltiger Beitrag zum Erhalt der Moore geleistet. Weiterhin wurde das Düngereinsparpotenzial der untersuchten Testsubstrate abgeschätzt. Die Kontrollsubstrate wurden zusätzlich mit einem Volldünger und Harnstoff gedüngt wohin gegen die Testsubstrate bedarfsgemäß mit Harnstoff gedüngt wurden. Die optimale Nährstoffversorgung der Pflanzen in den Kontrollsubstraten durch Anwendung von Volldünger führte in keinem der durchgeführten Pflanzversuche zu einem signifikant besseren Pflanzenwachstum im Vergleich zu den Testsubstraten. Alle Testsubstrate zeigten ein gleichwertiges oder verbessertes Pflanzenwachstum gegenüber den Kontrollen. Hieraus lässt sich schließen, dass die Nährstoffversorgung der Pflanzen in den Testsubstraten ausreichend für ein optimales Pflanzenwachstum ist und somit der Einsatz von Volldünger reduziert werden kann. Für die untersuchten Testsubstrate konnte ein 30 % iges Düngereinsparpotenzial hinsichtlich der Anwendung von Volldünger abgeleitet werden, das die Reduzierung der Kosten für die Beschaffung von Volldünger ermöglicht.

Die untersuchten Verwertungsprozesse Fermentation und Kompostierung zeigten hinsichtlich des hergestellten Substrats kaum Unterschiede in der pflanzenbaulichen Wirkung, so dass beide Prozesse zur Verwertung organischer Reststoffe empfohlen werden können. Es stellte sich heraus, dass die optimierte Kompostierung besser in bestehende interne Arbeitsabläufe integriert werden konnte als die Fermentation. Im Nachhinein wurde die Kompostierung mit Zugabe von Biokohle als wesentliche Behandlungsmethode organischer Reststoffe im BG implementiert und trägt somit zur lokalen Schließung von Stoffkreisläufen bei und wirkt Nährstoffverlusten entgegen.

Beim Vergleich der biokohlehaltigen Testsubstrate mit den Testsubstraten ohne Biokohle zeigte sich hinsichtlich der Pflanzenentwicklung kein einheitliches Bild. Überwiegend wurde ein gleichwertiges Pflanzenwachstum festgestellt, was mit einem vergleichbaren Nährstoffgehalt in den untersuchten Pflanzsubstraten zusammenhängt. Vereinzelt zeigten einige Pflanzen bessere oder schlechtere Pflanzenwachstumsergebnisse in den biokohlehaltigen Pflanzsubstraten, die auf physikalisch-chemische Substratparameter zurückzuführen sind. Ein entscheidender Einfluss auf die Wuchseistung durch Zugabe von Biokohle konnte nicht nachgewiesen werden, jedoch soll an dieser Stelle die Resistenzbildung gegenüber Pflanzenkrankheiten und Schädlingen von Biokohlekompost erwähnt werden, die während der Wachstumstests bei einigen Pflanzen beobachtet wurde.

Anhand des praxisorientierten Feldversuchs auf einem lehmigen Sandboden mit pH-Werten zwischen 4,6 und 5,9 sowie Gehalten an organischer Substanz zwischen 0,7 und 2,8 in der Republik Ghana konnte gezeigt werden, dass Biokohlekompost (BKK) ein geeignetes nachhaltiges Bodenverbesserungsmittel ist, das aus den vor Ort verfügbaren organischen Materialien unter Zugabe von Biokohle durch Kompostierung hergestellt werden kann. Die Applikation von BKK mit einer Auftragsmenge von $12,5 \text{ t ha}^{-1}$ führte zu einer durchschnittlichen Steigerung der Maiserträge um das 1,3 bis 4,9-Fache gegenüber den Kontrollflächen. Selbst nach einmaliger Anwendung von BKK konnte im zweiten Vegetationsjahr bei gleicher Anbaukultur eine Ertragssteigerung von 31,6 % bzw. 64,3 % für Mais auf den BKK-Flächen festgestellt werden. Daraus lässt sich vermuten, dass die einmalige Applikation von BKK auch noch im zweiten Vegetationsjahr ausreichend Nährstoffe zur Verfügung gestellt hat. Hinsichtlich der Pflanzenentwicklung zeigten die Maispflanzen auf den BKK-Flächen signifikante Unterschiede im Maiskolbengewicht und in der Maiskolbenlänge gegenüber den Kontrollflächen. Die Maispflanzen der BKK-Flächen entwickelten durchschnittlich um das 1,4-Fache längere und um das 2,3-Fache schwerere Maiskolben im Vergleich zu den Kontrollen. Darüber hinaus zeigte BKK ein bodenverbesserndes Potenzial im Hinblick auf boden-physikalisch-chemische Eigenschaften. Es wurde eine pH-Wert-Erhöhung von durchschnittlich 0,3 pH-Einheiten festgestellt. Weiterhin konnte durch BKK die Kationenaustauschkapazität sowie die

organische Bodensubstanz durchschnittlich um das 1,3-Fache erhöht werden. Die wachstumsfördernden und ertragssteigernden Wirkungen von BKK können einen wichtigen Beitrag leisten, die lokale Nahrungsmittelproduktion zu verbessern und die Ernährungssicherheit in Regionen mit degradierten Böden zu gewährleisten.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Agegehu, G.; Bass, A. M.; Nelson, P. N.; Bird, M. I. (2016): Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. In: *Science of The Total Environment* 543, Part A, S. 295–306. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.054.
- Altmann, M. (2008): Socio-economic impact of the peat and growing media industry on horticulture in the EU. Luxemburg. Online verfügbar unter http://coconcept.lu/fileadmin/Downloads/Socio_Economic_Study1.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2014.
- Amberger, A. (1996): Pflanzenernährung. Ökologische und physiologische Grundlagen, Dynamik und Stoffwechsel der Nährelemente. 4., völlig neubearbeitete Aufl. Stuttgart: E. Ulmer (Uni-Taschenbücher, 846).
- Atkinson, C. J.; Fitzgerald, J. D.; Hipps, N. A. (2010): Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. In: *Plant and Soil* 337 (1), S. 1–18. DOI: 10.1007/s11104-010-0464-5.
- Barry, B.; Obuobie, E.; Andreini, M.; Andah, W.; Pluquet, M. (2005): Comprehensive assessment of water management in agriculture (comparative study of river basin development and management. In: *International Water Management Institute: Colombo, Sri Lanka*. online verfügbar unter http://www.iwmi.cgiar.org/assessment/files_new/research_projects/River_Basin_Development_a_Management/VoltaRiverBasin_Boubacar.pdf, zuletzt geprüft am 25.03.2015
- Bass, A. M.; Bird, M. I.; Kay, G.; Muirhead, B. (2016): Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems. In: *The Science of the total environment* 550, S. 459–470. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.143.
- Basso, A. S.; Miguez, F. E.; Laird, D. A.; Horton, R.; Westgate, M. (2013): Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. In: *GCB Bioenergy* 5 (2), S. 132–143.
- Beesley, L.; Moreno-Jiménez, E.; Gomez-Eyles, J. L.; Harris, E.; Robinson, B.; Sizmur, T. (2011): A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. In: *Environmental Pollution* 159 (12), S. 3269–3282. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.07.023.
- Bernal, M. P.; Albuquerque, J. A.; Moral, R. (2009): Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. In: *Bioresource technology* 100 (22), S. 5444–5453.
- Biederman, L. A.; Harpole, W. S. (2013): Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling. A meta-analysis. In: *GCB Bioenergy* 5 (2), S. 202–214. DOI: 10.1111/gcbb.12037.
- Bilderback, T. E.; Warren, S. L.; Owen, J. S.; Albano J.P. (2005): Healthy substrates needs physicals too! In: *HortTechnology* (15), S. 747–751.
- Blackwell, P.; Riethmuller, G.; Collins, M. (2009): Biochar application to soil. In: *Biochar for environmental management: Science and technology*, S. 207–226.
- Blume, H.-P.; Brümmer, G.W.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R. et al. (2010): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Brinkjans, H.J.; Bergs, C.G.; Gartenbau, Z. (2002): Handbuch Kompost im Gartenbau: FGG Fördergesellschaft Gartenbau mbH.

- Buchgraber, K. (2000): Einsatz von Biokompost in der Landwirtschaft. In: 6. Alpenländisches Expertenforum: Kompostanwendung in der Landwirtschaft, 16. – 17. März 2000. Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein. Irdning.
- Busch, D.; Kammann, C.; Grunhage, L.; Müller, C. (2012): Simple biotoxicity tests for evaluation of carbonaceous soil additives: establishment and reproducibility of four test procedures. In: *Journal of Environmental Quality* 41 (4), S. 1023–1032. DOI: 10.2134/jeq2011.0122.
- Chan, K. Y.; van Zwieten, L.; Meszaros, I.; Downie, A.; Joseph, S. (2008): Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. In: *Soil Research* 45 (8), S. 629–634.
- Chan, K. Y.; Xu, Z. (2009): Biochar: nutrient properties and their enhancement. In: *Biochar for environmental management: Science and technology*, S. 67–84.
- Clough, T. J.; Condon, L. M.; Kammann, C.; Müller, C. (2013): A review of biochar and soil nitrogen dynamics. In: *Agronomy* 3 (2), S. 275–293.
- Cornelissen, G.; Martinsen, V.; Shitumbanuma, V.; Alling, V.; Breedveld, G. D.; Rutherford, D. W. et al. (2013): Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia. In: *Agronomy* 3 (2), S. 256–274.
- Dias, B. O.; Silva, C. A.; Higashikawa, F. S.; Roig, A.; Sanchez-Monedero, M. A. (2010): Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: effect on organic matter degradation and humification. In: *Bioresource technology* 101 (4), S. 1239–1246. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.024.
- Doan, T. T.; Henry-des-Tureaux, T.; Rumpel, C.; Janeau, J.-L.; Jouquet, P. (2015): Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. In: *Science of The Total Environment* 514, S. 147–154. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.005.
- Downie, A.; Crosky, A.; Munroe, P. (2009): Physical properties of biochar. In: *Biochar for environmental management: Science and technology*, S. 13–32.
- EBC (2012): European Biochar Certificate. Guidelines for a Sustainable Production of Biochar, European Biochar Foundation (EBC) (Version 4.8 of 13th December 2013). Arbaz, Switzerland. Online verfügbar unter <http://www.european-biochar.org/en/download>, zuletzt geprüft am 09.01.2015.
- Elad, Y.; David, D. R.; Harel, Y. M.; Borenshtein, M.; Kalifa, H. B.; Silber, A.; Graber, E. R. (2010): Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. In: *J Phytopathol*.
- Elmer, W. H.; Pignatello, J. J. (2011): Effect of Biochar Amendments on Mycorrhizal Associations and Fusarium Crown and Root Rot of Asparagus in Replant Soils. In: *Plant Disease* 95 (8), S. 960–966. DOI: 10.1094/PDIS-10-10-0741.
- Evans, M. R.; Gachukia, M. M. (2007): Physical properties of sphagnum peat-based root substrates amended with perlite or parboiled fresh rice hulls. In: *HortTechnology* 17 (3), S. 312–315. Online verfügbar unter <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-34250710606&partnerID=40&md5=f63d0b5037d9b89ce8e1b4edc7c6a396>. zuletzt geprüft am 09.06.2015.
- Evans, M. R.; Konduru, S.; Stamps, R. H. (1996): Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. In: *HortScience* 31 (6), S. 965–967. Online verfügbar unter <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0030471040&partnerID=40&md5=2b56404b8267bf3b5d37212ce3a2a398>. zuletzt geprüft am 18.03.2015.

- Farrell, M.; Jones, D. L. (2010): Food waste composting: its use as a peat replacement. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 30 (8-9), S. 1495–1501. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.032.
- Fascella, G.; Dispensa, V.; De Pasquale C.; Fontana G.; Zizzo, G. (2013): Evaluation of biochar as growing substrate for ornamental plants. 1st Mediterranean Biochar Symposium. Online verfügbar unter http://meditbiochar2.weebly.com/uploads/1/1/0/8/1108765/sp1_09_poster_fascella_et_al.pdf. zuletzt geprüft am 24.02.2016.
- Fischer, D.; Glaser, B. (2012): Synergisms between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration. In: S. Kumar (Hg.): *Management of Organic Waste: InTech*.
- Fornes, F.; Belda, R. M.; Lidón, A. (2015): Analysis of two biochars and one hydrochar from different feedstock: focus set on environmental, nutritional and horticultural considerations. In: *Journal of Cleaner Production* 86, S. 40–48. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.057.
- Free, H. F.; McGill, C. R.; Rowarth, J. S.; Hedley, M. J. (2010): The effect of biochars on maize (*Zea mays*) germination. In: *New Zealand journal of agricultural research* 53 (1), S.1-4.
- Funke, A.; Reeb, F.; Kruse, A. (2013): Experimental comparison of hydrothermal and vapothermal carbonization. In: *Fuel Processing Technology* 115, S. 261–269. DOI: 10.1016/j.fuproc.2013.04.020.
- Funke, A.; Ziegler, F. (2011): Heat of reaction measurements for hydrothermal carbonization of biomass. In: *Bioresource technology* 102 (16), S. 7595–7598. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.05.016.
- Gerlach, A. (2012): Pflanzenkohle in der Rinderhaltung. In: *Ithaka Journal* 2012, S. 80–84. Online verfügbar unter www.ithaka-journal.net. zuletzt geprüft am 23.05.2015
- Gerlach, H.; Schmidt, H. P. (2012): Pflanzenkohle in der Geflügelhaltung. In: *Ithaka Journal* 2012, S. 26–28. Online verfügbar unter <http://www.ithaka-journal.net>. zuletzt geprüft am 23.05.2015
- Glaser, B. (2007): Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 362 (1478), S. 187–196. DOI: 10.1098/rstb.2006.1978.
- Glaser, B.; Birk, J. J. (2012): State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). In: *Environmental Records of Anthropogenic Impacts* 82, S. 39–51. DOI: 10.1016/j.gca.2010.11.029.
- Glaser, B.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W. (2001a): The 'Terra Preta' phenomenon. A model for sustainable agriculture in the humid tropics. In: *Naturwissenschaften* 88 (1), S. 37–41. DOI: 10.1007/s001140000193.
- Glaser, B.; Kammann, C. (2013): Wechselwirkung zwischen Kompost und Pflanzenkohle. Möglichkeiten und Grenzen von Terra Preta-ähnlichen Produkten. In: *Abfallwirtschaft meets Biochar - Perspektiven für den Klimaschutz?*, S. 135–148.
- Glaser, B.; Lehmann, J.; Führböter, M.; Solomon, D.; Zech, W. (2001b): Carbon and nitrogen mineralization in cultivated and natural savanna soils of Northern Tanzania. In: *Biology and Fertility of Soils* 33 (4), S. 301–309. DOI: 10.1007/s003740000324.
- Glaser, B.; Lehmann, J.; Zech, W. (2002): Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. In: *Biology and Fertility of Soils* 35 (4), S. 219–230. DOI: 10.1007/s00374-002-0466-4.

- Glaser, B.; Woods, W.I. (2004): Amazonian dark earths. Explorations in space and time. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Goldberg, E. (1985): Black carbon in the environment. Wiley, New York.
- Hammer, E. C.; Balogh-Brunstad, Z.; Jakobsen, I.; Olsson, P. A.; Stipp, S. L. S.; Rillig, M. C. (2014): A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. In: *Soil Biology and Biochemistry* 77, S. 252–260.
- Harel, Y. M.; Elad, Y.; Rav-David, D.; Borenstein, M.; Shulchani, R.; Lew, B.; Graber, E. R. (2012): Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. In: *Plant and Soil* 357 (1-2), S. 245–257.
- Harm, U. (2007): Neustadter Heft: Bodenanalyse und Düngung im Zierpflanzenbau. Hg. v. DLR Rheinpfalz. Neustadt an der Weinstraße.
- Hartl, W.; Erhart, E.; Putz, B. (1999): Beitrag von Biotonnenkompost zur Nährstoffversorgung in viehlosen ökologisch wirtschaftenden Betrieben. In: Beiträge zur 5. Wissenschaftstagung zum ökologischen Landbau „Vom Rand zur Mitte“. Hg. v. H. Hoffmann und S. Müller. Berlin.
- Hass, A.; Gonzalez, J. M.; Lima, I. M.; Godwin, H. W.; Halvorson, J. J.; Boyer, D. G. (2012): Chicken Manure Biochar as Liming and Nutrient Source for Acid Appalachian Soil. In: *Journal of Environmental Quality* 41, S. 1096–1106. DOI: 10.2134/jeq2011.0124.
- Haubold-Rosar, M.; Lukas, S.; Worzyk, F.; Terytze, K. (2016): Pilotversuch zum Einfluss von Biokohlesubstraten auf den MKW-Abbau in kontaminierten Böden bei der Off-Site-Sanierung. In: *altlasten spektrum* (4), S. 134–141.
- Hitzl, M.; Corma, A.; Pomares, F.; Renz, M. (2015): The hydrothermal carbonization (HTC) plant as a decentral biorefinery for wet biomass. In: *Biomass valorization into fuels, energy, materials and chemicals (UBIOCHEM-IV)* 257, Part 2, S. 154–159. DOI: 10.1016/j.cattod.2014.09.024.
- Hoitink, H. A. J.; Stone, A. G.; Grebus, M. E. (1996): Suppression of Plant Diseases by Composts. In: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes und T. Papi (Hg.): *The Science of Composting*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 373–381.
- Hua, L.; Chen, Y.; Wu, W. (2012): Impacts upon soil quality and plant growth of bamboo charcoal addition to composted sludge. In: *Environmental technology* 33 (1), S. 61–68.
- Hussain, M.; Farooq, M.; Nawaz, A.; Al-Sadi, A. M.; Solaiman, Z. M.; Alghamdi, S. S. et al. (2016): Biochar for crop production: potential benefits and risks. In: *Journal of Soils and Sediments*, S. 1–32. DOI: 10.1007/s11368-016-1360-2.
- Ingram, D.L.; Henley, R.W. (1991): Growth media for container grown ornamental plants. [Gainesville, Fla.]: Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida (Bulletin / Florida Cooperative Extension Service, 241).
- Ippolito, J. A.; Laird, D. A.; Busscher, W. J. (2012): Environmental benefits of biochar. In: *Journal of Environmental Quality* 41 (4), S. 967–972.
- Jayasinghe, G. Y.; Arachchi, I. LiyanaD.; Tokashiki, Yoshihiro (2010): Evaluation of containerized substrates developed from cattle manure compost and synthetic aggregates for ornamental plant production as a peat alternative. In: *Resources, Conservation and Recycling* 54 (12), S. 1412–1418. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.06.002.

- Jeffery, S.; Verheijen, F.G.A.; van der Velde, M.; Bastos, A. C. (2011): A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144 (1), S. 175–187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.
- Jiang, X.; Haddix, M. L.; Cotrufo, M. F. (2016): Interactions between biochar and soil organic carbon decomposition: Effects of nitrogen and low molecular weight carbon compound addition. In: *Soil Biology and Biochemistry* 100, S. 92–101. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.05.020.
- Joosten, H.; Couwenberg, J. (2008): Peatlands and Carbon. In: Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Hg. v. F. Parish, A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius und L. Stringer. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International. Wageningen.
- Kadota, M.; Niimi, Y. (2004): Effects of charcoal with pyroligneous acid and barnyard manure on bedding plants. In: *Scientia Horticulturae* 101 (3), S. 327–332. DOI: 10.1016/j.scienta.2004.01.002.
- Kammann, C. (2010): Biokohle in Böden: C-Sequestrierungsoption und Veränderung der N₂O-Emissionen nach Pflanzenkohleapplikation. Hg. v. S. Wulf. KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden). Kloster Banz, Bad Staffelstein.
- Kammann, C. (2011): Chancen und Risiken von Pflanzenkohle. In: *Ithaka Journal* 2011 (1), S. 98–105. Online verfügbar unter www.ithaka-journal.net. zuletzt geprüft am 23.05.2015
- Kammann, C.; Glaser, B.; Schmidt, H.-P. (2015): Combining biochar and organic amendments. Hg. v. Shackley et al. (Biochar in European Soils and Agriculture). Routledge, London.
- Kammann, C.; Kühnel, Y.; von Bredow, C.; Gößling, J. (2010): C-Sequestrierungspotential und Eignung von Torfersatzstoffen, hergestellt aus Produkten der Landschaftspflege und Biochar. Abschlussbericht für das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter <http://www.kompost.ch/aktuell/xmedia/TuBSAbschlussbericht-31Jan2011.pdf>, zuletzt geprüft am 02.11.2013.
- Kammann, C.; Ratering, S.; Eckhard, C.; Müller, C. (2012): Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils. In: *Journal of Environmental Quality* 41 (4), S. 1052–1066.
- Kaudal, B. B.; Chen, D.; Madhavan, D. B.; Downie, A.; Weatherley, A. (2016): An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate. In: *Biomass and Bioenergy* 84, S. 49–58. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.11.012.
- 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.
- Krause, M. S.; Ceuster, T.J.J. de; Tiquia, S. M.; Michel, F. C.; Madden, L. V.; Hoitink, H.A.J. (2003): Isolation and characterization of rhizobacteria from composts that suppress the severity of bacterial leaf spot of radish. In: *J Phytopathol* (93), S. 1292–1300. DOI: 10.1094/PHYTO.2003.93.10.1292.
- Kuzyakov, Y.; Subbotina, I.; Chen, H.; Bogomolova, I.; Xu, X. (2009): Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. In: *Soil Biology and Biochemistry* 41 (2), S. 210–219. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.10.016.

- Laird, D. A.; Fleming, P.; Davis, D. D.; Horton, R.; Wang, B.; Karlen, D. L. (2010): Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. In: *Geoderma* 158 (3–4), S. 443–449. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.05.013.
- Lehmann, J. (2003): Amazonian dark earths. Origin properties management. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Lehmann, J. (2007): A handful of carbon. In: *Nature* 447 (7141), S. 143–144. DOI: 10.1038/447143a.
- Lehmann, J.; Joseph, S. (2009): Biochar for environmental management. Science and technology. London, Sterling, VA: Earthscan.
- Lehmann, J.; Rillig, M. C.; Thies, J.; Masiello, C. A.; Hockaday, W. C.; Crowley, D. (2011): Biochar effects on soil biota – A review. In: *19th International Symposium on Environmental Biogeochemistry* 43 (9), S. 1812–1836. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.
- Liang, B.; Lehmann, J.; Solomon, D.; Kinyangi, J.; Grossman, J.; O'Neill, B. et al. (2006): Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. In: *Soil Science Society of America Journal* 70, S. 1719–1730. DOI: 10.2136/sssaj2005.0383.
- Liang, F.; Li, G.-T.; Lin, Q.-M.; Zhao, X.-R. (2014): Crop Yield and Soil Properties in the First 3 Years After Biochar Application to a Calcareous Soil. In: *Journal of Integrative Agriculture* 13 (3), S. 525–532. DOI: 10.1016/S2095-3119(13)60708-X.
- Lin, C. M.; Chang, C. W. (2008): Production of thermal insulation composites containing bamboo charcoal. In: *Textile Research Journal* 78 (7), S. 555–560.
- Liu, J.; Schulz, H.; Brandl, S.; Miehtke, H.; Huwe, B.; Glaser, B. (2012): Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175 (5), S. 698–707.
- 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. In: *Plant and Soil* 333 (1), S. 117–128. DOI: 10.1007/s11104-010-0327-0.
- Major, J.; Steiner, C.; Downie, A.; Lehmann, J. (2009): Biochar effects on nutrient leaching. In: *Biochar for environmental management: Science and technology* 271.
- Marks, E. A.N.; Mattana, S.; Alcañiz, J. M.; Pérez-Herrero, E.; Domene, X. (2016): Gasifier biochar effects on nutrient availability, organic matter mineralization, and soil fauna activity in a multi-year Mediterranean trial. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 215, S. 30–39. DOI: 10.1016/j.agee.2015.09.004.
- Matsubara, Y.; Hasegawa, N.; Fukui, H. (2002): Incidence of Fusarium root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments. In: *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci* (71), S. 370–374.
- McLoughlin, F.; Galvan-Ampudia, C. S.; Julkowska, M. M.; Caarls, L.; van der Does, D.; Lauriere, C. et al. (2012): The Snf1-related protein kinases SnRK2.4 and SnRK2.10 are involved in maintenance of root system architecture during salt stress. In: *The Plant journal : for cell and molecular biology* 72 (3), S. 436–449. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2012.05089.x.
- Mekuria, W.; Noble, A.; Sengtaheuanghoung, O.; Hoanh, T.; Bossio, D.; Sipaseuth, N.; Langan, S. (2014): Organic and Clay-Based Soil Amendments Increase Maize Yield, Total Nutrient Uptake, and Soil

- Properties in Lao PDR. In: *Agroecology and Sustainable Food Systems* (38(8)), S. 936–961. DOI: 10.1080/21683565.2014.917144.
- Méndez, A.; Terradillos, M.; Gascó, G. (2013): Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 102, S. 124–130. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.03.006.
- Molnár, M.; Vaszita, E.; Farkas, É.; Ujaczki, É.; Fekete-Kertész, I.; Tolner, M. et al. (2016): Acidic sandy soil improvement with biochar — A microcosm study. In: *Science of The Total Environment* 563–564, S. 855–865. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.091.
- Ngo, P. T.; Rumpel, C.; Janeau, J.-L.; Dang, D.-K.; Doan, T. T.; Jouquet, P. (2016): Mixing of biochar with organic amendments reduces carbon removal after field exposure under tropical conditions. In: *Ecological Engineering* 91, S. 378–380. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.011.
- Nieto, A.; Gascó, G.; Paz-Ferreiro, J.; Fernández, J. M.; Plaza, C.; Méndez, A. (2016): The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties. In: *Scientia Horticulturae* 199, S. 142–148. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.12.012.
- Noguera, P.; Abad, M.; Puchades, R.; Maquieira, A.; Noguera, V. (2003): Influence of Particle Size on Physical and Chemical Properties of Coconut Coir Dust as Container Medium. In: *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34 (3-4), S. 593–605. DOI: 10.1081/CSS-120017842.
- Novak, J. M.; Lima, I.; Xing, B.; Gaskin, J. W.; Steiner, C.; Das, K. C. et al. (2009): Characterization of Designer Biochar Produced at Different Temperatures and Their Effects on a Loamy Sand. In: *Annals of Environmental Science; Vol 3 (2009)*.
- Nur, M.S.M.; Islami, T.; Handayanto, E.; Nugroho, W. H.; Utomo, W. H. (2014): The use of biochar fortified compost on calcareous soil of East Nusa Tenggara, Indonesia: 2. Effect on the yield of maize (*Zea mays* L.) and phosphate absorption. In: *Am. Eurasian J. Sustainable Agric.* 8 (5), S. 105–111.
- Ohsowski, B. M.; Klironomos, J. N.; Dunfield, K. E.; Hart, M. M. (2012): The potential of soil amendments for restoring severely disturbed grasslands. In: *Selected Papers from the 2011 Soil Ecology Society Conference* 60, S. 77–83. DOI: 10.1016/j.apsoil.2012.02.006.
- Parkinson, R. J.; Fuller, M. P.; Groenhof, A. C. (1999): An Evaluation of Greenwaste Compost for the Production of Forage Maize (*Zea mays* L.). In: *Compost Science & Utilization* 7 (1), S. 72–80. DOI: 10.1080/1065657X.1999.10701955.
- Peterson, S. C.; Jackson, M. A. (2014): Simplifying pyrolysis: Using gasification to produce corn stover and wheat straw biochar for sorptive and horticultural media. In: *Industrial Crops and Products* 53, S. 228–235. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.12.028.
- Prost, K.; Borchard, N.; Siemens, J.; Kautz, T.; Séquaris, J.-M.; Möller, A.; Amelung, W. (2013): Biochar affected by composting with farmyard manure. In: *Journal of Environmental Quality* 42 (1), S. 164–172. DOI: 10.2134/jeq2012.0064.
- Rößler, K.; Schatten, R.; Wagner, R. und Terytze, K. (2015): Effects of biochar-compost on plant growth, biomass and crop yield in pot and field trials of selected plants from different climate zones. In: *Bornimer Agrartechnische Berichte* 2015 (89).
- Schatten, R.; Terytze, K. (2016): Elutionsverhalten von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) aus mit Biokohlesubstraten und Biokohle behandelten kontaminierten Böden. In: *altlasten spektrum* 2016 (4), S. 150–157.

- Schatten, R.; Wagner, R.; Rößler, K., Suer, U. und Terytze, K. (2015): Verwertung pflanzlicher Reststoffe zu Biokohle und Biokohlesubstraten und deren Einsatz im Zierpflanzenbau - Ergebnisse des TerraBoGa-Projektes im Botanischen Garten Berlin Dahlem. In: *Müll und Abfall* 2015 (3), S. 137–143.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P.; Blume, H.-P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl. Heidelberg [u.a.]: Spektrum, Akad. Verl. (Spektrum Lehrbuch).
- Schinner, F.; Öhlinger, R.; Kandeler, E. (1991): Bodenbiologische Arbeitsmethoden. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schmidt, H. P. (2011a): Güllebehandlung durch Pflanzenkohle. In: *Ithaka Journal* 2011, S. 94–97. Online verfügbar unter www.ithaka-journal.net. zuletzt geprüft am 23.05.2015
- Schmidt, H. P. (2011b): Wege zu Terra Preta – Aktivierung von Pflanzenkohle. In: *Ithaka Journal* 2011, S. 28–32. Online verfügbar unter www.ithaka-journal.net. zuletzt geprüft am 23.05.2015
- Schmidt, H. P. (2012): 55 Anwendungen von Pflanzenkohle. In: *Ithaka Journal* 2012 (1), S. 99–102. Online verfügbar unter www.ithaka-journal.net. zuletzt geprüft am 23.05.2015
- Schmidt, H. P. (2013): Pflanzenkohle als Baustoff für optimales Raumklima. In: *Ithaka Journal* 2013, S. 9–12. Online verfügbar unter www.ithaka-journal.net. zuletzt geprüft am 23.05.2015
- Schmidt, M. W. I.; Noack, A. G. (2000): Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges. In: *Global biogeochemical cycles* 14 (3), S. 777–793.
- Seipel, H. (2007): Fachkunde für Gärtner. 8., aktualisierte und überarb. Aufl. Hamburg: BÜCHNER
- Sohi, S. P.; Krull, E.; Lopez-Capel, E.; Bol, R. (2010): A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. In: *Advances in agronomy*, Bd. 105. London: Academic (Advances in Agronomy), S. 47–82.
- Sparkes, J. (2011): Biochar. Implications for agricultural productivity. Canberra, A.C.T.: ABARES.
- Spokas, K. A.; Cantrell, K. B.; Novak, J. M.; Archer, D. W.; Ippolito, J. A.; Collins, H. P. et al. (2012): Biochar: A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration. In: *Journal of Environmental Quality* 41 (4), S. 973–989. DOI: 10.2134/jeq2011.0069.
- Steinbeiss, S.; Gleixner, G.; Antonietti, M. (2009): Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. In: *Soil Biology and Biochemistry* 41 (6), S. 1301–1310.
- Steiner, C.; Das, K. C.; Melear, N.; Lakly, D. (2010): Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. In: *Journal of Environmental Quality* 39 (4), S. 1236–1242.
- Steiner, C.; Glaser, B.; Geredes Teixeira, W.; Lehmann, J.; Blum, W. E.H.; Zech, W. (2008): Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. In: *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 171 (6), S. 893–899. DOI: 10.1002/jpln.200625199.
- Steiner, C.; Melear, N.; Harris, K.; Das, K. C. (2011): Biochar as bulking agent for poultry litter composting. In: *Carbon Management* 2 (3), S. 227–230.
- Taghizadeh-Toosi, A.; Clough, T. J.; Condon, L. M.; Sherlock, R. R.; Anderson, C. R.; Craigie, R. A. (2011): Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches. In: *Journal of Environmental Quality* 40 (2), S. 468–476.
- Terytze, K.; Wagner, R.; Schatten, R.; Rößler, K.; König, N. (2015): Endbericht zum Forschungsvorhaben "Schließung von Kreisläufen durch Energie- und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie im Botanischen Garten im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Klimaschutz - Modellprojekt

- Urban farming" (TerraBoGa). Online verfügbar unter http://edocs.fu-berlin.de/docs/servlets/MCRFileNodeServlet/FUODOCS_derivate_000000006177/Endbericht_TerraBoGa_Endversion-1.pdf. zuletzt geprüft am 23.07.2016
- Thies, J. E.; Rillig, M. C. (2009): Characteristics of biochar: biological properties. In: *Biochar for environmental management: Science and technology*, S. 85–105.
- Tian, Y.; Sun, X.; Li, S.; Wang, H.; Wang, L.; Cao, J.; Zhang, L. (2012): Biochar made from green waste as peat substitute in growth media for *Calathea rotundifolia* cv. Fasciata. In: *Scientia Horticulturae* 143, S. 15–18. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.05.018.
- 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: *Biochar for environmental management: Science and technology*, S. 227–250.
- Vaughn, S. F.; Kenar, J. A.; Thompson, A. R.; Peterson, S. C. (2013): Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates. In: *Industrial Crops and Products* 51, S. 437–443. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.10.010.
- Verheijen, F.; Jeffery, S.; Bastos, A.C. (2010): Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: Publications Office (EUR. Scientific and technical research series, 24099).
- Wagner, R.; König, N.; Schatten, R.; Röbller, K.; Tertytze, K. (2014): Utilization of organic waste in the Botanic Garden Berlin by producing and applying biochar substrates - Introduction and first results of the terraboga project. Hg. v. T. Bettendorf, C. Wendland und R. Otterpohl (Terra Preta Sanitation).
- Wang, C.; Lu, H.; Dong, D.; Deng, H.; Strong, P. J.; Wang, H.; Wu, W. (2013): Insight into the effects of biochar on manure composting: evidence supporting the relationship between N₂O emission and denitrifying community. In: *Environmental science & technology* 47 (13), S. 7341–7349. DOI: 10.1021/es305293h.
- Warnock, D. D.; Lehmann, J.; Kuyper, T. W.; Rillig, M. C. (2007): Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms. In: *Plant and Soil* 300 (1-2), S. 9–20.
- Wiedner, K.; Fischer, D.; Walther, S.; Criscuoli, I.; Favilli, F.; Nelle, O.; Glaser, B. (2015): Acceleration of Biochar Surface Oxidation during Composting? In: *Journal of agricultural and food chemistry* 63 (15), S. 3830–3837. DOI: 10.1021/acs.jafc.5b00846.
- Woods, W.I.; Teixeira, W.G.; Lehmann, J.; Steiner, C.; WinklerPrins, A.; Rebellato, L. (2009): Amazonian dark earths: Wim Sombroek's vision: Springer.
- Wolf, D.; Amonette, J. E.; Street-Perrott, F. A.; Lehmann, J.; Joseph, S. (2010): Sustainable biochar to mitigate global climate change. In: *Nature communications* 1, S. 56.
- Worrall, R. J. (1978): The use of composted wood waste as a peat substitute. In: *Acta Hort.* (82), S. 79–86. DOI: 10.17660/ActaHortic.1978.82.10.
- Worzyk, F.; Albrecht, S.; Derz, K.; Tertytze, K. (2016): Abbau von 14C-markiertem Pyren beim Einsatz von Biokohle, Kompost und Biokohlekompost. In: *altlasten spektrum* 2016 (4), S. 142–149.
- Wu, M.; Han, X.; Zhong, T.; Yuan, M.; Wu, W. (2016): Soil organic carbon content affects the stability of biochar in paddy soil. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 223, S. 59–66. DOI: 10.1016/j.agee.2016.02.033.

- Yao, Y.; Gao, B.; Zhang, M.; Inyang, M.; Zimmerman, A. R. (2012): Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. In: *Chemosphere* 89 (11), S. 1467–1471. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.06.002.
- Zech, W.; Haumaier, L.; Reinhold, H. (1990): Ecological aspects of soil organic matter in tropical land use. In: *Humic substances in soil and crop sciences: Selected readings* (humicsubstances), S. 187–202.
- Zhang, A.; Liu, Y.; Pan, G.; Hussain, Q.; Li, L.; Zheng, J.; Zhang, X. (2012): Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. In: *Plant and Soil* 351 (1), S. 263–275. DOI: 10.1007/s11104-011-0957-x.
- Zhang, L.; Sun, X.; Tian, Y.; Gong, X.; Niedz, R. P. (2013): Composted Green Waste as a Substitute for Peat in Growth Media: Effects on Growth and Nutrition of *Calathea insignis*. In: *PLoS ONE* 8 (10), e78121. DOI: 10.1371/journal.pone.0078121.
- Zhang, L.; Sun, X.-y.; Tian, Y.; Gong, X.-q. (2014): Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis*. In: *Scientia Horticulturae* 176, S. 70–78. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.06.021.
- Zhao, R.; Coles, N.; Kong, Z.; Wu, J. (2015): Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions. In: *Soil and Tillage Research* 146, Part B, S. 133–138. DOI: 10.1016/j.still.2014.10.014.
- Zwart, D. C.; Kim, S.-H. (2012): Biochar amendment increases resistance to stem lesions caused by *Phytophthora* spp. in tree seedlings. In: *HortScience* 47 (12), S. 1736–1740.

Normen, Gesetze

- BBodSchV (1999). Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554).
- BGK-Bundesgütegemeinschaft Kompost (Hg.) (2006): Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate. Köln-Gremberghoven.
- BIOABFV (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden – Bioabfallverordnung. BGBl. I 1998, S. 2955, Gl.-Nr. 2129-27-11
- DIN EN 13037:2012-01: Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate - Bestimmung des pH-Wertes
- DIN EN ISO 11260:2011-09: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität und der Basensättigung unter Verwendung von Bariumchloridlösung
- DIN EN 15936:2012-11: Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung (EN 15936:2012)
- DIN EN 15169:2007-05: Charakterisierung von Abfall - Bestimmung des Glühverlustes in Abfall, Schlamm und Sedimenten; Deutsche Fassung EN 15169:2007
- DIN ISO 11466:1995-03: Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden - Aufschluss von mit Königswasser löslichen Anteilen von Elementen (DIN EN 16174:2012-11)
- DIN ISO 13877:2000-01: Bodenbeschaffenheit Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie - (HPLC-)Verfahren (ISO 13877:1998)
- DIN EN 15169:2007-05: Charakterisierung von Abfall - Bestimmung des Glühverlustes in Abfall, Schlamm und Sedimenten
- DüMV (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultur-substraten und Pflanzenhilfsmitteln Düngemittelverordnung - DüMV). Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), Geändert durch Art. 1 V v. 27.5.2015 worden
- DüV (2006): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen Düngemittelverordnung - DüV). Düngemittelverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden
- EBC (2012): European Biochar Certificate. Guidelines for a Sustainable Production of Biochar, European Biochar Foundation (EBC). Arbaz, Switzerland (Version 4.8 of 13th December 2013). Online verfügbar unter <http://www.european-biochar.org/en/download>, zuletzt geprüft am 09.01.2015
- VDLUFA-Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (Hg.) (1991): Methodenbuch Band 1 Böden. 4. Aufl. Darmstadt

Relevante Internetseiten

<http://www.biochar-international.org>

<http://www.european-biochar.org/en>

<http://cost.european-biochar.org>

<http://abokobi.ch/47/projekte/biochar>

<http://www.deco-farming.com/index.php?seite=5>

http://www.hortipendium.de/Willkommen_bei_Hortipendium

ANHANG

Anhang A: Substratansprüche der untersuchten Pflanzen

Anhang B: Mehrfachvergleiche (SPSS Tabellenauszüge)

Anhang C: Tabellen zum Kapitel 4.1

Anhang D: Tabellen zum Kapitel 4.2

Anhang A: Substratansprüche der untersuchten Pflanzen

Tab. A-1: Substratansprüche der untersuchten Pflanzen

Pflanze	Substratanspruch
<i>Aglaonema commutatum</i>	<ul style="list-style-type: none"> pH-Wert sollte 5,5 bis 6,0 betragen typische Warmhauspflanze (15 bis 18 °C und über 50 % Luftfeuchte) Luxwerte von 500 bis 700 Bewässerung sollte grundsätzlich nur von unten erfolgen Ruhezeit von Oktober bis Februar sind nur mäßige Wassergaben erforderlich Jungpflanzen vorsichtig mit einem stickstoffbetonten Mehrnährstoffdünger von 1 bis 2 g/l nachdüngen Gut angewurzelte Pflanzen werden im Wechsel mit einem N-betonten Dünger und ausgeglichenem Mehrnährstoffdünger von 4 g/l Wasser im Abstand von 14 Tagen gedüngt
<i>Carica papaya</i>	<ul style="list-style-type: none"> pH-Wert sollte 6,0 bis 6,5 betragen Substrat sollte durchlässig und nährstoffreich sein, sehr gute Drainage Wasserbedarf ist gering bis mittel; mäßige Bewässerung mit Regenwasser (kein kalkhaltiges Wasser) Substrat darf nur leicht feucht gehalten werden; bei höherer Feuchtigkeit nehmen die Wurzeln Schaden im Sommer Standort in voller Sonne Nährstoffbedarf zwischen April und September besonders hoch; wöchentliche Düngung mit einem Komplettdünger
<i>Coffea arabica</i>	<ul style="list-style-type: none"> leicht saurer pH-Wert Substrat sollte durchlässig und nährstoffreich sein, sehr gute Drainage Keine Staunässe Während der Wachstumsphase Düngung alle 14 Tage mit einem Volldünger
<i>Digitalis trojana</i>	<ul style="list-style-type: none"> pH-Wert neutral gut durchlässiges Substrat Substrat sollte lehmig, sandig-lehmig, kiesig-lehmig, sandig-tonig oder lehmig-tonig sein Halbschattiger Standort
<i>Geranium maderense</i>	<ul style="list-style-type: none"> leicht saurer pH-Wert Substrat sollte durchlässig und nährstoffreich sein, sehr gute Drainage hoher Wasserbedarf, aber keine Staunässe Verwendung von Langzeitdünger Halbschattiger Standort
<i>Nerium oleander</i>	<ul style="list-style-type: none"> pH-Wert zwischen 5,8 bis 7,0 gleichmäßig und durchdringend gießen; Substrat darf niemals ganz austrocknen Bewässerung mit Weichwasser heller Standort mit möglichst kräftiger Sonnenbestrahlung Düngung während der Vegetationsperiode alle 14 Tage mit einem flüssigen Volldünger
<i>Ruschia rigida</i>	<ul style="list-style-type: none"> neutral bis schwach saures Substrat Substrat sollte gut durchlässig sein Pflanze nicht sehr anspruchsvoll
<i>Paulownia tomentosa</i>	<ul style="list-style-type: none"> idealer pH-Wert zwischen 5,5 bis 7,5 nährstoffreicher Boden; Niederschlagsmenge > 600 mm durchlässiger Boden, sandiger bis leichter Lehmboden; keine Staunässe ist ein Tiefwurzler (2 m) hoher Nährstoffbedarf; Stickstoff fördert schnelles Wachstum

	<ul style="list-style-type: none">· Stickstoffdüngung nur zu Beginn der Vegetationsperiode· Verwendung eines Volldüngers
<i>Populus</i> "Max 1"	<ul style="list-style-type: none">· pH-Wert zwischen 5,5 und 7,5· hoher Nährstoffbedarf· keine Verdichtung des Bodens· warme Standorte mit guter Wasserversorgung
<i>Salix</i> "Tordis"	<ul style="list-style-type: none">· pH-Wert 5,5 – 7,5 (neutral bis schwach saure Böden)· Boden sandig - lehmig bis stark lehmig· hoher Wasserbedarf, aber keine Staunässe· hoher Nährstoffbedarf· Flachwurzler, weiträumiger Standort· Vertragen Sonne und lichten Schatten
<i>Silphium perfoliatum</i>	<ul style="list-style-type: none">· humoser Boden mit guter Wasserführung, aber keine Staunässe· Stickstoffbedarf beträgt im Pflanz- und in jedem weiteren Vegetationsjahr 150 bis 200 kg pro Hektar· Phosphor- und Kaliumdüngung sollte nach Entzug erfolgen; (P-Bedarf 20 – 30 kg / ha; K-Bedarf 80 -220 kg / ha)

Anhang B: Mehrfachvergleiche (SPSS Tabellenauszüge)

Tab. B-1: Mehrfachvergleiche mittels Tukey HSD-Test der untersuchten Pflanzenparameter Blattanzahl (BA) und Biomasse (oBM) für *Aglaonema commutatum* in den Kontroll- und Testsubstrate (K, IR0, IR15, F0, F15) (in der Spalte „Significance“ bedeuten fett geschriebene Werte statistische Signifikanz mit $p < 0,05$)

Multiple Comparisons^a

Post Hoc Tests - Tukey HSD

Dependent Variable			Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significance	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
BA	K	IR0	-8,750	9,565	,887	-38,29	20,79
		IR15	5,000	9,565	,984	-24,54	34,54
		F0	-6,250	9,565	,963	-35,79	23,29
		F15	22,250	9,565	,190	-7,29	51,79
	IR0	K	8,750	9,565	,887	-20,79	38,29
		IR15	13,750	9,565	,615	-15,79	43,29
		F0	2,500	9,565	,999	-27,04	32,04
		F15	31,000*	9,565	,038	1,46	60,54
	IR15	K	-5,000	9,565	,984	-34,54	24,54
		IR0	-13,750	9,565	,615	-43,29	15,79
		F0	-11,250	9,565	,764	-40,79	18,29
		F15	17,250	9,565	,407	-12,29	46,79
	F0	K	6,250	9,565	,963	-23,29	35,79
		IR0	-2,500	9,565	,999	-32,04	27,04
		IR15	11,250	9,565	,764	-18,29	40,79
		F15	28,500	9,565	,061	-1,04	58,04
	F15	K	-22,250	9,565	,190	-51,79	7,29
		IR0	-31,000*	9,565	,038	-60,54	-1,46
		IR15	-17,250	9,565	,407	-46,79	12,29
		F0	-28,500	9,565	,061	-58,04	1,04
oBM	K	IR0	-17,72500	24,79304	,950	-94,2840	58,8340
		IR15	48,62250	24,79304	,330	-27,9365	125,1815
		F0	-39,32500	24,79304	,527	-115,8840	37,2340
		F15	69,34	24,79304	,085	-7,2190	145,8990
	IR0	K	17,72500	24,79304	,950	-58,8340	94,2840
		IR15	66,34750	24,79304	,105	-10,2115	142,9065
		F0	-21,60000	24,79304	,903	-98,1590	54,9590
		F15	87,06500*	24,79304	,022	10,5060	163,6240
	IR15	K	-48,62250	24,79304	,330	-125,1815	27,9365
		IR0	-66,34750	24,79304	,105	-142,9065	10,2115
		F0	-87,94750*	24,79304	,021	-164,5065	-11,3885
		F15	20,71750	24,79304	,915	-55,8415	97,2765
	F0	K	39,32500	24,79304	,527	-37,2340	115,8840
		IR0	21,60000	24,79304	,903	-54,9590	98,1590
		IR15	87,94750*	24,79304	,021	11,3885	164,5065
		F15	108,66500*	24,79304	,004	32,1060	185,2240
	F15	K	-69,34	24,79304	,085	-145,8990	7,2190
		IR0	-87,06500*	24,79304	,022	-163,6240	-10,5060
		IR15	-20,71750	24,79304	,915	-97,2765	55,8415
		F0	-108,66500*	24,79304	,004	-185,2240	-32,1060

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

a. Pflanze = *Aglaonema commutatum*

Tab. B-2: Mehrfachvergleiche mittels Tukey HSD-Test der untersuchten Pflanzenparameter Blattanzahl (BA), Biomasse (oBM) und Pflanzenhöhe (H) für *Carica papaya* in den Kontroll- und Testsubstrate (K, IR0, IR15, F0, F15) (in der Spalte „Significance“ bedeuten fett geschriebene Werte statistische Signifikanz mit $p < 0,05$)

Multiple Comparisons^a

Post Hoc Tests

Dependent Variable			Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significance	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
BA (Tukey HSD - Test)	K	IR0	-9,800 [*]	1,365	,000	-13,89	-5,71
		IR15	-7,200 [*]	1,365	,000	-11,29	-3,11
		F0	-6,600 [*]	1,365	,001	-10,69	-2,51
		F15	-7,800 [*]	1,365	,000	-11,89	-3,71
	IR0	K	9,800 [*]	1,365	,000	5,71	13,89
		IR15	2,600	1,365	,347	-1,49	6,69
		F0	3,200	1,365	,172	-.89	7,29
	IR15	F15	2,000	1,365	,595	-2,09	6,09
		K	7,200 [*]	1,365	,000	3,11	11,29
		IR0	-2,600	1,365	,347	-6,69	1,49
	F0	F0	,600	1,365	,992	-3,49	4,69
		F15	-.600	1,365	,992	-4,69	3,49
		K	6,600 [*]	1,365	,001	2,51	10,69
	F15	IR0	-3,200	1,365	,172	-7,29	,89
		IR15	-.600	1,365	,992	-4,69	3,49
		F15	-1,200	1,365	,901	-5,29	2,89
		K	7,800 [*]	1,365	,000	3,71	11,89
	IR0	IR0	-2,000	1,365	,595	-6,09	2,09
		IR15	,600	1,365	,992	-3,49	4,69
		F0	1,200	1,365	,901	-2,89	5,29
K		-136,61800 [*]	23,62302	,042	-266,7735	-6,4625	
oBM (Tamhane - Test)	K	IR15	-145,70600 [*]	7,11719	,000	-181,6459	-109,7661
		F0	-141,55600 [*]	7,73725	,000	-181,1693	-101,9427
		F15	-159,12800 [*]	6,01348	,000	-188,4760	-129,7800
		IR0	136,61800 [*]	23,62302	,042	6,4625	266,7735
	IR0	IR15	-9,08800	24,53925	1,000	-130,6510	112,4750
		F0	-4,93800	24,72621	1,000	-125,2545	115,3785
		F15	-22,51000	24,24215	,994	-146,3694	101,3494
	IR15	K	145,70600 [*]	7,11719	,000	109,7661	181,6459
		IR0	9,08800	24,53925	1,000	-112,4750	130,6510
		F0	4,15000	10,19768	1,000	-34,8731	43,1731
	F0	F15	-13,42200	8,96043	,852	-48,0046	21,1606
		K	141,55600 [*]	7,73725	,000	101,9427	181,1693
		IR0	4,93800	24,72621	1,000	-115,3785	125,2545
	IR15	IR15	-4,15000	10,19768	1,000	-43,1731	34,8731
		F15	-17,57200	9,46045	,662	-54,5638	19,4198
		K	159,12800 [*]	6,01348	,000	129,7800	188,4760
	F15	IR0	22,51000	24,24215	,994	-101,3494	146,3694
		IR15	13,42200	8,96043	,852	-21,1606	48,0046
		F0	17,57200	9,46045	,662	-19,4198	54,5638
		K	-27,4000 [*]	5,2396	,047	-54,315	-,485
H (Tamhane - Test)	K	IR15	-33,9000 [*]	1,8431	,000	-40,994	-26,806
		F0	-23,3600 [*]	4,4613	,042	-45,660	-1,060
		F15	-37,8400 [*]	2,3329	,000	-47,474	-28,206
		IR0	27,4000 [*]	5,2396	,047	,485	54,315
	IR0	IR15	-6,5000	5,2902	,962	-33,005	20,005
		F0	4,0400	6,6703	1,000	-21,670	29,750
		F15	-10,4400	5,4801	,698	-35,840	14,960
	IR15	K	33,9000 [*]	1,8431	,000	26,806	40,994
		IR0	6,5000	5,2902	,962	-20,005	33,005
		F0	10,5400	4,5207	,510	-11,359	32,439
	F0	F15	-3,9400	2,4445	,803	-13,657	5,777
		K	23,3600 [*]	4,4613	,042	1,060	45,660
		IR0	-4,0400	6,6703	1,000	-29,750	21,670
	IR15	IR15	-10,5400	4,5207	,510	-32,439	11,359
		F15	-14,4800	4,7415	,217	-35,462	6,502
		K	37,8400 [*]	2,3329	,000	28,206	47,474
	F15	IR0	10,4400	5,4801	,698	-14,960	35,840
		IR15	3,9400	2,4445	,803	-5,777	13,657
		F0	14,4800	4,7415	,217	-6,502	35,462
		K	14,4800	4,7415	,217	-6,502	35,462

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

a. Pflanze = *Carica papaya*

Tab. B-3: Mehrfachvergleiche mittels Tukey HSD-Test und Tamhane-Test der untersuchten Pflanzenparameter Blattanzahl (BA), Biomasse (oBM) und Pflanzenhöhe (H) für *Geranium maderense* in den Kontroll- und Testsubstrate (K, IR0, IR15, F0, F15) (in der Spalte „Significance“ bedeuten fett geschriebene Werte statistische Signifikanz mit $p < 0,05$)

Multiple Comparisons^a

Post Hoc Tests

Dependent Variable		Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significance	95% Confidence Interval			
					Lower Bound	Upper Bound		
BA (TukeyHSD - Test)	K	IR0	-16,750 [†]	5,371	,047	-33,34	-,16	
		IR15	-7,000	5,371	,693	-23,59	9,59	
		F0	-4,750	5,371	,898	-21,34	11,84	
		F15	-14,000	5,371	,119	-30,59	2,59	
	IR0	K	16,750 [†]	5,371	,047	,16	33,34	
		IR15	9,750	5,371	,401	-6,84	26,34	
		F0	12,000	5,371	,220	-4,59	28,59	
		F15	2,750	5,371	,985	-13,84	19,34	
	IR15	K	7,000	5,371	,693	-9,59	23,59	
		IR0	-9,750	5,371	,401	-26,34	6,84	
		F0	2,250	5,371	,993	-14,34	18,84	
		F15	-7,000	5,371	,693	-23,59	9,59	
	F0	K	4,750	5,371	,898	-11,84	21,34	
		IR0	-12,000	5,371	,220	-28,59	4,59	
		IR15	-2,250	5,371	,993	-18,84	14,34	
		F15	-9,250	5,371	,451	-25,84	7,34	
	F15	K	14,000	5,371	,119	-2,59	30,59	
		IR0	-2,750	5,371	,985	-19,34	13,84	
		IR15	7,000	5,371	,693	-9,59	23,59	
		F0	9,250	5,371	,451	-7,34	25,84	
	oBM (Tamhane - Test)	K	IR0	-294,48500 [*]	45,13555	,015	-514,9287	-74,0413
			IR15	-78,90000	39,49701	,770	-359,4962	201,6962
			F0	-152,74750	60,24412	,371	-414,6130	109,1180
			F15	-283,16250	71,90346	,099	-618,5880	52,2630
		IR0	K	294,48500 [*]	45,13555	,015	74,0413	514,9287
			IR15	215,58500 [*]	23,04275	,017	63,3133	367,8567
			F0	141,73750	50,99322	,370	-123,4485	406,9235
			F15	11,32250	64,35108	1,000	-361,0849	383,7299
IR15		K	78,90000	39,49701	,770	-201,6962	359,4962	
		IR0	-215,58500 [*]	23,04275	,017	-367,8567	-63,3133	
		F0	-73,84750	46,07716	,899	-404,6214	256,9264	
		F15	-204,26250	60,52981	,351	-644,1686	235,6436	
F0		K	152,74750	60,24412	,371	-109,1180	414,6130	
		IR0	-141,73750	50,99322	,370	-406,9235	123,4485	
		IR15	73,84750	46,07716	,899	-256,9264	404,6214	
		F15	-130,41500	75,71788	,777	-467,4608	206,6308	
F15		K	283,16250	71,90346	,099	-52,2630	618,5880	
		IR0	-11,32250	64,35108	1,000	-383,7299	361,0849	
		IR15	204,26250	60,52981	,351	-235,6436	644,1686	
		F0	130,41500	75,71788	,777	-206,6308	467,4608	
H (Tukey HSD - Test)		K	IR0	-4,7500 [†]	1,3122	,018	-8,802	-,698
			IR15	,1750	1,3122	1,000	-3,877	4,227
			F0	-,6000	1,3122	,990	-4,652	3,452
			F15	,7000	1,3122	,982	-3,352	4,752
		IR0	K	4,7500 [†]	1,3122	,018	,698	8,802
			IR15	4,9250 [†]	1,3122	,014	,873	8,977
			F0	4,1500 [†]	1,3122	,043	,098	8,202
			F15	5,4500 [†]	1,3122	,006	1,398	9,502
	IR15	K	-,1750	1,3122	1,000	-4,227	3,877	
		IR0	-4,9250 [†]	1,3122	,014	-8,977	-,873	
		F0	-,7750	1,3122	,974	-4,827	3,277	
		F15	,5250	1,3122	,994	-3,527	4,577	
	F0	K	,6000	1,3122	,990	-3,452	4,652	
		IR0	-4,1500 [†]	1,3122	,043	-8,202	-,098	
		IR15	,7750	1,3122	,974	-3,277	4,827	
		F15	1,3000	1,3122	,855	-2,752	5,352	
	F15	K	-,7000	1,3122	,982	-4,752	3,352	
		IR0	-5,4500 [†]	1,3122	,006	-9,502	-1,398	
		IR15	-,5250	1,3122	,994	-4,577	3,527	
		F0	-1,3000	1,3122	,855	-5,352	2,752	

^{*}. The mean difference is significant at the 0.05 level.

a. Pflanze = *Geranium maderense*

Tab. B-4: Mehrfachvergleiche mittels Tukey HSD-Test und Tamhane-Test der untersuchten Pflanzenparameter Blattanzahl (BA), Biomasse (oBM) und Pflanzenhöhe (H) für Nerium oleander in den Kontroll- und Testsubstrate (K, IR0, IR15, F0, F15) (in der Spalte „Significance“ bedeuten fett geschriebene Werte statistische Signifikanz mit $p < 0,05$)

Post Hoc Tests			Multiple Comparisons ^a				
Dependent Variable	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significance	95% Confidence Interval			
				Lower Bound	Upper Bound		
BA (Tamhane -Test)	K	IR0	4,500	4,354	,985	-14,22	23,22
		IR15	-32,750	15,491	,716	-137,93	72,43
		F0	-33,250	8,826	,198	-84,79	18,29
		F15	-32,000	5,564	,020	-58,04	-5,96
	IR0	K	-4,500	4,354	,985	-23,22	14,22
		IR15	-37,250	15,518	,606	-141,87	67,37
		F0	-37,750	8,873	,134	-88,76	13,26
		F15	-36,500	5,638	,011	-62,50	-10,50
	IR15	K	32,750	15,491	,716	-72,43	137,93
		IR0	37,250	15,518	,606	-67,37	141,87
		F0	-,500	17,313	1,000	-86,71	85,71
		F15	,750	15,900	1,000	-97,15	98,65
	F0	K	33,250	8,826	,198	-18,29	84,79
		IR0	37,750	8,873	,134	-13,26	88,76
		IR15	,500	17,313	1,000	-85,71	86,71
		F15	1,250	9,525	1,000	-45,57	48,07
	F15	K	32,000	5,564	,020	5,96	58,04
		IR0	36,500	5,638	,011	10,50	62,50
		IR15	-,750	15,900	1,000	-98,65	97,15
		F0	-1,250	9,525	1,000	-48,07	45,57
oBM (Tukey HSD Test)	K	IR0	-1,81750	4,46935	,994	-15,6185	11,9835
		IR15	,50750	4,46935	1,000	-13,2935	14,3085
		F0	2,72250	4,46935	,971	-11,0785	16,5235
		F15	3,52500	4,46935	,930	-10,2760	17,3260
	IR0	K	1,81750	4,46935	,994	-11,9835	15,6185
		IR15	2,32500	4,46935	,984	-11,4760	16,1260
		F0	4,54000	4,46935	,844	-9,2610	18,3410
		F15	5,34250	4,46935	,754	-8,4585	19,1435
	IR15	K	-,50750	4,46935	1,000	-14,3085	13,2935
		IR0	-2,32500	4,46935	,984	-16,1260	11,4760
		F0	2,21500	4,46935	,987	-11,5860	16,0160
		F15	3,01750	4,46935	,959	-10,7835	16,8185
	F0	K	-2,72250	4,46935	,971	-16,5235	11,0785
		IR0	-4,54000	4,46935	,844	-18,3410	9,2610
		IR15	-2,21500	4,46935	,987	-16,0160	11,5860
		F15	,80250	4,46935	1,000	-12,9985	14,6035
	F15	K	-3,52500	4,46935	,930	-17,3260	10,2760
		IR0	-5,34250	4,46935	,754	-19,1435	8,4585
		IR15	-3,01750	4,46935	,959	-16,8185	10,7835
		F0	-,80250	4,46935	1,000	-14,6035	12,9985
H (Tukey HSD Test)	K	IR0	-2,2000	2,0883	,827	-8,649	4,249
		IR15	-,6500	2,0883	,998	-7,099	5,799
		F0	2,7000	2,0883	,699	-3,749	9,149
		F15	1,6500	2,0883	,930	-4,799	8,099
	IR0	K	2,2000	2,0883	,827	-4,249	8,649
		IR15	1,5500	2,0883	,943	-4,899	7,999
		F0	4,9000	2,0883	,184	-1,549	11,349
		F15	3,8500	2,0883	,386	-2,599	10,299
	IR15	K	,6500	2,0883	,998	-5,799	7,099
		IR0	-1,5500	2,0883	,943	-7,999	4,899
		F0	3,3500	2,0883	,517	-3,099	9,799
		F15	2,3000	2,0883	,803	-4,149	8,749
	F0	K	-2,7000	2,0883	,699	-9,149	3,749
		IR0	-4,9000	2,0883	,184	-11,349	1,549
		IR15	-3,3500	2,0883	,517	-9,799	3,099
		F15	-1,0500	2,0883	,986	-7,499	5,399
	F15	K	-1,6500	2,0883	,930	-8,099	4,799
		IR0	-3,8500	2,0883	,386	-10,299	2,599
		IR15	-2,3000	2,0883	,803	-8,749	4,149
		F0	1,0500	2,0883	,986	-5,399	7,499

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Pflanze = Nerium oleander

Anhang C: Tabellen zum Kapitel 4.1

Tab. C-1: Vergleich der mittleren Frischmasse (FM) / Trockenmasse (TM) und Signifikanzwerte (p-Wert) der Blattproben der Testsubstrate (IR0, IR15, F0, F15) mit den Kontrollsubstraten von *Aglaonema commutatum*, *Coffea arabica* und *Geranium maderense* (einfaktorielle ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test Tukey HSD-Test; bei Varianzhomogenität Tamhane-Test)

<i>Aglaonema commutatum</i>						
	N	FM [g] ± STABW*	p-Wert	TM [g] ± STABW	p-Wert	
Kontrolle	4	27,6 ± 2,37		3,28 ± 0,29		
IR0	4	26,8 ± 1,69	0,9	3,5 ± 0,2	0,9	
IR15	4	23,9 ± 3,58	0,4	2,93 ± 0,52	0,7	
F0	4	25,6 ± 3,41	0,9	3,15 ± 0,41	0,9	
F15	4	24,2 ± 2,42	0,5	2,99 ± 0,42	0,8	
<i>Coffea arabica</i>						
Kontrolle	4	16,1 ± 1,35		5,5 ± 0,31		
IR0	4	16,3 ± 1,12	0,9	5,4 ± 0,29	0,9	
IR15	4	16,5 ± 1,69	0,9	5,32 ± 0,49	0,9	
F0	4	17,9 ± 0,6	0,3	5,75 ± 0,36	0,9	
F15	4	16,6 ± 0,9	0,9	5,3 ± 0,48	0,9	
<i>Geranium maderense</i>						
Kontrolle	4	112 ± 5,36		13,21 ± 0,46		
IR0	4	114 ± 17,2	1	13,28 ± 1,22	1	
IR15	4	113 ± 15,69	1	13,24 ± 2,41	1	
F0	4	104 ± 10,73	0,9	12,45 ± 1,11	0,9	
F15	4	99,2 ± 13,63	0,6	12,54 ± 1,83	0,9	

N-Anzahl der Blattproben; STABW-Standardabweichung

Tab. C-2: Mittelwerte der Pflanzenparameter der Pflanzen der tropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Testsubstrate mit und ohne Biokohle (gepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich mBK/oBK	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Aglaonema commutatum</i>	BA	oBK	8	104,8 ± 11,1		0,02
		mBK	8	78,6 ± 25		
	oBM [g]	oBK	8	384 ± 26,6		0,003
		mBK	8	259 ± 83,2		
<i>Carica papaya</i>	BA	oBK	10	12,8 ± 3		0,5
		mBK	10	12,1 ± 1,9		
	oBM [g]	oBK	10	146,4 ± 46,5		0,1
		mBK	10	169,8 ± 15,1		
	H [cm]	oBK	10	54,8 ± 10,2		0,007
		mBK	10	65,3 ± 4,2		
<i>Coffea arabica</i>	BA	oBK	8	184,5 ± 41,4		0,5
		mBK	8	172,6 ± 23,7		
	oBM [g]	oBK	8	416,3 ± 74,3		0,1
		mBK	8	365,7 ± 53,9		
	H [cm]	oBK	8	67 ± 4,4		0,2
		mBK	8	63,4 ± 6		

BA-Blattanzahl; oBM-Biomasse (Frischmasse); H-Pflanzenhöhe; mBK-mit Biokohle; oBK-ohne Biokohle; N-Stichprobenanzahl; MW-Mittelwert; STABW-Standardabweichung; Sig.(2-seitig)-zweiseitiger Signifikanztest

Tab. C-3: Mittelwerte der Pflanzenparameter der Pflanzen der tropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (ungepoolte Daten)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR0/IR15	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Aglaonema commutatum</i>	BA	IR0	4	106 ± 7		0,1
		IR15	4	87,3 ± 20,1		
	oBM [g]	IR0	4	373,2 ± 22		0,08
		IR15	4	281,9 ± 82		
<i>Carica papaya</i>	BA	IR0	5	14,4 ± 3,2		0,2
		IR15	5	11,8 ± 1,9		
	oBM [g]	IR0	5	154 ± 52,7		0,7
		IR15	5	163,1 ± 15,4		
	H [cm]	IR0	5	56,8 ± 11,4		0,3
		IR15	5	63,3 ± 3,1		
<i>Coffea arabica</i>	BA	IR0	4	162 ± 44,2		0,8
		IR15	4	167,8 ± 12,8		
	oBM [g]	IR0	4	370,3 ± 72,2		0,9
		IR15	4	366 ± 63,2		
	H [cm]	IR0	4	65,4 ± 4,9		0,8
		IR15	4	64 ± 7,3		

Tab. C-4: Mittelwerte der Pflanzenparameter der Pflanzen der tropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (ungepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR0/IR15	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Aglaonema commutatum</i>	BA	F0	4	103,5	± 15,3	0,1
		F15	4	70	± 29,3	
	oBM [g]	F0	4	394,8	± 29,2	0,02
		F15	4	236,1	± 89,7	
<i>Carica papaya</i>	BA	F0	5	11,2	± 1,9	0,4
		F15	5	12,4	± 2,1	
	oBM [g]	F0	5	138,9	± 44,1	0,1
		F15	5	176,5	± 12,8	
	H [cm]	F0	5	52,8	± 9,6	0,02
		F15	5	67,2	± 4,5	
<i>Coffea arabica</i>	BA	F0	4	207	± 26,2	0,2
		F15	4	177,5	± 32,9	
	oBM [g]	F0	4	462,2	± 45,4	0,03
		F15	4	365,5	± 52,9	
	H [cm]	F0	4	68,5	± 3,7	0,1
		F15	4	62,7	± 5,4	

Tab. C-5: Mittelwerte der Pflanzenparameter der Pflanzen der subtropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Testsubstrate mit und ohne Biokohle (gepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich oBK/mBK	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Digitalis trojana</i>	BA	oBK	12	29,5	± 6,6	0,2
		mBK	12	35	± 14	
	oBM [g]	oBK	12	16	± 3,5	0,2
		mBK	12	14,4	± 2,2	
<i>Geranium maderense</i>	BA	oBK	8	34,4	± 7,3	0,07
		mBK	8	42,5	± 9,2	
	oBM [g]	oBK	8	1430,9	± 121,2	0,01
		mBK	8	1217,3	± 139	
	H [cm]	oBK	8	27,4	± 2,9	0,02
		mBK	8	24,3	± 1,7	
<i>Nerium oleander</i>	BA	oBK	8	37,1	± 23,3	0,2
		mBK	8	53,9	± 23,2	
	oBM [g]	oBK	8	24,8	± 5,5	0,5
		mBK	8	22	± 9,4	
	H [cm]	oBK	8	22,3	± 3,3	0,9
		mBK	8	22,1	± 3,3	
<i>Ruschia rigida</i>	BA	oBK	12	226,5	± 42,5	0,7
		mBK	12	233,1	± 56,3	
	oBM [g]	oBK	12	92,2	± 12,3	0,9
		mBK	12	91,8	± 13	
	H [cm]	oBK	12	50	± 3,5	0,4
		mBK	12	51,4	± 3,8	

Tab. C-6: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der subtropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (ungepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR0/IR15	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Digitalis trojana</i>	BA	IR0	6	26	± 7,6	0,4
		IR15	6	29,8	± 7,5	
	oBM [g]	IR0	6	17,4	± 2,9	0,03
		IR15	6	13,4	± 2,6	
<i>Geranium maderense</i>	BA	IR0	4	32	± 4,2	0,3
		IR15	4	39	± 12,1	
	oBM [g]	IR0	4	1496,1	± 120,6	0,04
		IR15	4	1291,9	± 10,4	
H [cm]	IR0	4	29,5	± 2,3	0,01	
	IR15	4	24,6	± 1,7		
<i>Nerium oleander</i>	BA	IR0	4	18,3	± 6,3	0,1
		IR15	4	53	± 34,1	
	oBM [g]	IR0	4	27,1	± 5,9	0,5
		IR15	4	22,2	± 13,3	
H [cm]	IR0	4	24,8	± 1,5	0,5	
	IR15	4	23,2	± 4,4		
<i>Ruschia rigida</i>	BA	IR0	6	231,3	± 45,7	0,7
		IR15	6	243	± 70,3	
	oBM [g]	IR0	6	94,5	± 9,1	0,8
		IR15	6	92,6	± 17,2	
H [cm]	IR0	6	51,5	± 3,4	0,7	
	IR15	6	52,3	± 4,2		

Tab. C-7: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der subtropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (ungepoolte Daten)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich F0/F15	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Digitalis trojana</i>	BA	F0	6	33 ± 3,1		0,4
		F15	6	40,2 ± 17,7		
	oBM [g]	F0	6	14,6 ± 3,7		0,7
		F15	6	15,3 ± 1,4		
<i>Geranium maderense</i>	BA	F0	4	36,8 ± 9,5		0,1
		F15	4	46 ± 4,2		
	oBM [g]	F0	4	1365,7 ± 91,6		0,06
		F15	4	1142,7 ± 173,6		
	H [cm]	F0	4	25,4 ± 1,7		0,3
		F15	4	24,1 ± 1,9		
<i>Nerium oleander</i>	BA	F0	4	56 ± 16,6		0,9
		F15	4	54,8 ± 9,4		
	oBM [g]	F0	4	22,5 ± 4,5		0,8
		F15	4	21,7 ± 5,2		
	H [cm]	F0	4	19,9 ± 2,7		0,5
		F15	4	20,9 ± 1,6		
<i>Ruschia rigida</i>	BA	F0	6	221,7 ± 42,7		0,9
		F15	6	223,2 ± 42,4		
	oBM [g]	F0	6	89,9 ± 15,4		0,9
		F15	6	91 ± 8,7		
	H [cm]	F0	6	48,6 ± 3,2		0,4
		F15	6	50,4 ± 3,5		

Tab. C-8: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der gemäßigten Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Testsubstrate mit und ohne Biokohle (gepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich oBK/mBK	N	MW	STABW	p-Wert
Pappel	H [cm]	oBK	10	340,5 ± 27,9		0,4
		mBK	10	353,3 ± 34,1		
	HG [kg]	oBK	10	1,5 ± 0,3		0,3
		mBK	10	1,7 ± 0,3		
Paulownia	H [cm]	oBK	6	208,7 ± 20,6		0,3
		mBK	6	191,2 ± 30,7		
Weide	H [cm]	oBK	10	509,6 ± 42,8		0,7
		mBK	10	519,2 ± 61,6		
	HG [kg]	oBK	10	3,8 ± 0,6		0,9
		mBK	10	3,8 ± 1,2		
Silphium perfoliatum	BA	oBK	12	22,2 ± 7,4		0,2
		mBK	12	19 ± 4,5		
	oBM [g]	oBK	12	103,3 ± 25,3		0,04
		mBK	12	82,1 ± 20,7		
	H [cm]	oBK	12	81,5 ± 10,9		0,2
mBK		12	74,1 ± 15,7			

Tab. C-9: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der gemäßigten Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompostvarianten mit und ohne Biokohle (ungepoolte Daten)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR0/IR15	N	MW	STABW	p-Wert
Pappel	H [cm]	IR0	5	333,2 ± 19,3		0,3
		IR15	5	360,4 ± 46,9		
	HG [kg]	IR0	5	1,4 ± 0,2		0,3
		IR15	5	1,6 ± 0,4		
Paulownia	H [cm]	IR0	3	218,7 ± 16,6		0,9
		IR15	3	216,7 ± 17,7		
Weide	H [cm]	IR0	5	507,4 ± 34,2		0,08
		IR15	5	562,6 ± 52,8		
	HG [kg]	IR0	5	4 ± 0,2		0,4
		IR15	5	4,3 ± 0,7		
Silphium perfoliatum	BA	IR0	6	19,7 ± 7,2		0,4
		IR15	6	16,8 ± 2,7		
	oBM [g]	IR0	6	105 ± 29,1		0,1
		IR15	6	79,8 ± 23,9		
	H [cm]	IR0	6	84,5 ± 13,2		0,8
IR15		6	83,1 ± 9,8			

Tab. C-10: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der gemäßigten Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Fermentationsvarianten mit und ohne Biokohle (ungepoolte Daten)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich F0/F15	N	MW	STABW	p-Wert
Pappel	H [cm]	F0	5	347,8 ± 35,3		0,9
		F15	5	346,2 ± 17		
	HG [kg]	F0	5	1,6 ± 0,4		0,7
		F15	5	1,7 ± 0,3		
Paulownia	H [cm]	F0	3	198,7 ± 22,1		0,08
		F15	3	165,7 ± 10		
Weide	H [cm]	F0	5	511,8 ± 54,2		0,2
		F15	5	475,8 ± 32,4		
	HG [kg]	F0	5	3,6 ± 0,8		0,7
		F15	5	3,2 ± 1,5		
Silphium perfoliatum	BA	F0	6	24,7 ± 7,4		0,4
		F15	6	21,2 ± 5,1		
	oBM [g]	F0	6	101,7 ± 23,5		0,2
		F15	6	84,3 ± 18,9		
	H [cm]	F0	6	78,5 ± 8,2		0,1
F15		6	65,2 ± 15,9			

Tab. C-11: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der tropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Testsubstrate mit kompostiertem und fermentiertem Material (gepoolte Daten) (F - Fermentation; K – Kompostierung)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich F/K	N	MW	STABW	p-Wert
Aglaonema commutatum	BA	F	8	86,8 ± 28,1		0,4
		K	8	96,6 ± 17,2		
	oBM [g]	F	8	315,5 ± 104,9		0,8
		K	8	327,5 ± 74		
Carica papaya	BA	F	10	11,8 ± 2		0,3
		K	10	13,1 ± 2,8		
	oBM [g]	F	10	157,7 ± 36,5		0,9
		K	10	158,5 ± 36,9		
	H [cm]	F	10	60 ± 10,4		0,9
K		10	60,1 ± 8,6			
Coffea arabica	BA	F	8	192,3 ± 31,7		0,1
		K	8	164,9 ± 30,3		
	oBM [g]	F	8	413,8 ± 69		0,2
		K	8	368,2 ± 62,8		
	H [cm]	F	8	65,6 ± 5,3		0,8
K		8	64,7 ± 5,8			

Tab. C-12: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der tropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompost- und Fermentationsvarianten ohne Biokohle (ungepoolte Daten)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR0/F0	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Aglaonema commutatum</i>	BA	IR0	4	106 ± 7		0,8
		F0	4	103,5 ± 15,3		
	oBM [g]	IR0	4	373,2 ± 22		0,3
		F0	4	394,8 ± 29,2		
<i>Carica papaya</i>	BA	IR0	5	14,4 ± 3,2		0,09
		F0	5	11,2 ± 1,9		
	oBM [g]	IR0	5	154 ± 52,7		0,6
		F0	5	138,9 ± 44,1		
	H [cm]	IR0	5	56,8 ± 11,4		0,6
		F0	5	52,8 ± 9,6		
<i>Coffea arabica</i>	BA	IR0	4	162 ± 44,2		0,1
		F0	4	207 ± 26,2		
	oBM [g]	IR0	4	370,3 ± 72,2		0,08
		F0	4	462,2 ± 45,4		
	H [cm]	IR0	4	65,4 ± 4,9		0,4
		F0	4	68,5 ± 3,7		

Tab. C-13: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der tropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompost- und Fermentationsvarianten mit Biokohle (ungepoolte Daten)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR15/F15	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Aglaonema commutatum</i>	BA	IR15	4	87,3 ± 20,1		0,4
		F15	4	70 ± 29,3		
	oBM [g]	IR15	4	281,9 ± 82		0,5
		F15	4	236,1 ± 89,7		
<i>Carica papaya</i>	BA	IR15	5	11,8 ± 1,9		0,6
		F15	5	12,4 ± 2,1		
	oBM [g]	IR15	5	163,1 ± 15,4		0,2
		F15	5	176,5 ± 12,8		
	H [cm]	IR15	5	63,3 ± 3,1		0,1
		F15	5	67,2 ± 4,5		
<i>Coffea arabica</i>	BA	IR15	4	167,8 ± 12,8		0,6
		F15	4	177,5 ± 32,9		
	oBM [g]	IR15	4	366 ± 63,2		0,9
		F15	4	365,5 ± 52,9		
	H [cm]	IR15	4	64 ± 7,3		0,8
		F15	4	62,7 ± 5,4		

Tab C-14: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der subtropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Testsubstrate mit kompostiertem und fermentiertem Material (gepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich F/K	N	MW	STABW	p-Wert
<i>Digitalis trojana</i>	BA	F	12	36,6	± 12,7	0,053
		K	12	27,9	± 7,5	
	oBM [g]	F	12	14,9	± 2,7	0,7
		K	12	15,4	± 3,3	
<i>Geranium maderense</i>	BA	F	8	41,4	± 8,4	0,2
		K	8	35,5	± 9,2	
	oBM [g]	F	8	1254,2	± 175,2	0,1
		K	8	1394	± 134,9	
H [cm]	F	8	24,7	± 1,8	0,1	
	K	8	27	± 3,2		
<i>Nerium oleander</i>	BA	F	8	55,4	± 12,5	0,1
		K	8	35,6	± 29,3	
	oBM [g]	F	8	22,1	± 4,5	0,5
		K	8	24,6	± 9,9	
H [cm]	F	8	20,4	± 2,1	0,02	
	K	8	24	± 3,2		
<i>Ruschia rigida</i>	BA	F	12	222,4	± 40,5	0,5
		K	12	237,2	± 56,9	
	oBM [g]	F	12	90,5	± 11,9	0,6
		K	12	93,5	± 13,2	
H [cm]	F	12	49,5	± 3,4	0,1	
	K	12	51,9	± 3,7		

Tab. C-15: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der subtropischen Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompost- und Fermentationsvarianten ohne Biokohle (ungepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR0/F0	N	MW	STABW	p-Wert
Digitalis trojana	BA	IR0	6	26	± 7,6	0,06
		F0	6	33	± 3,1	
	oBM [g]	IR0	6	17,4	± 2,9	0,2
		F0	6	14,6	± 3,7	
Geranium maderense	BA	IR0	4	32	± 4,2	0,4
		F0	4	36,8	± 9,5	
	oBM [g]	IR0	4	1496,1	± 120,6	0,1
		F0	4	1365,7	± 91,6	
	H [cm]	IR0	4	29,5	± 2,3	0,03
		F0	4	25,4	± 1,7	
Nerium oleander	BA	IR0	4	18,3	± 6,3	0,005
		F0	4	56	± 16,6	
	oBM [g]	IR0	4	27,1	± 5,9	0,3
		F0	4	22,5	± 4,5	
	H [cm]	IR0	4	24,8	± 1,5	0,02
		F0	4	19,9	± 2,7	
Ruschia rigida	BA	IR0	6	231,3	± 45,7	0,7
		F0	6	221,7	± 42,7	
	oBM [g]	IR0	6	94,5	± 9,1	0,5
		F0	6	89,9	± 15,4	
	H [cm]	IR0	6	51,5	± 3,4	0,2
		F0	6	48,6	± 3,2	

Tab. C-16: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der subtropischen Klima-zone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompost- und Fermentationsvarianten mit Biokohle (ungepoolte Daten); (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR15/F15	N	MW	STABW	p-Wert
Digitalis trojana	BA	IR15	6	29,8	± 7,5	0,2
		F15	6	40,2	± 17,7	
	oBM [g]	IR15	6	13,4	± 2,6	0,1
		F15	6	15,3	± 1,4	
Geranium maderense	BA	IR15	4	39	± 12,1	0,3
		F15	4	46	± 4,2	
	oBM [g]	IR15	4	1291,9	± 10,4	0,2
		F15	4	1142,7	± 173,6	
	H [cm]	IR15	4	24,6	± 1,7	0,7
		F15	4	24,1	± 1,9	
Nerium oleander	BA	IR15	4	60,5	± 24,3	0,7
		F15	4	54,8	± 9,4	
	oBM [g]	IR15	4	24,7	± 10	0,6
		F15	4	21,7	± 5,2	
	H [cm]	IR15	4	23,2	± 4,4	0,4
		F15	4	20,9	± 1,6	
Ruschia rigida	BA	IR15	6	243	± 70,3	0,6
		F15	6	223,2	± 42,4	
	oBM [g]	IR15	6	92,6	± 17,2	0,8
		F15	6	91	± 8,7	
	H [cm]	IR15	6	52,3	± 4,2	0,4
		F15	6	50,4	± 3,5	

Tab. C-17: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der gemäßigten Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Testsubstrate mit kompostiertem und fermentiertem Material (gepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich F/K	N	MW	STABW	p-Wert
Pappel	H [cm]	F	10	347 ± 26,1		0,9
		K	10	346,8 ± 36,7		
	HG [kg]	F	10	1,7 ± 0,3		0,4
		K	10	1,5 ± 0,3		
Paulownia	H [cm]	F	6	182,2 ± 23,7		0,01
		K	6	217,7 ± 15,4		
Weide	H [cm]	F	10	493,8 ± 46,2		0,07
		K	10	535 ± 51		
	HG [kg]	F	10	3,4 ± 1,1		0,1
		K	10	4,1 ± 0,5		
Silphium perfoliatum	BA	F	12	22,9 ± 6,3		0,07
		K	12	18,3 ± 5,4		
	oBM [g]	F	12	93 ± 22,3		0,9
		K	12	92,4 ± 28,6		
	H [cm]	F	12	71,8 ± 13,9		0,03
		K	12	83,8 ± 11,1		

F – Fermentation; K-Kompostierung; HG-Holzgewicht; H-Pflanzenhöhe; BA-Blattanzahl; oBM-Biomasse

Tab. C-18: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der gemäßigten Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompost- und Fermentationsvarianten ohne Biokohle (ungepoolte Daten); (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

Testpflanze	Pflanzenparameter	Vergleich IR0/F0	N	MW	STABW	p-Wert
Pappel	H [cm]	IR0	5	333,2 ± 19,3		0,4
		F0	5	347,8 ± 35,3		
	HG [kg]	IR0	5	1,4 ± 0,2		0,4
		F0	5	1,6 ± 0,4		
Paulownia	H [cm]	IR0	3	218,7 ± 16,6		0,3
		F0	3	198,7 ± 22,1		
Weide	H [cm]	IR0	5	507,4 ± 34,2		0,9
		F0	5	511,8 ± 54,2		
	HG [kg]	IR0	5	4 ± 0,2		0,3
		F0	5	3,6 ± 0,8		
Silphium perfoliatum	BA	IR0	6	19,7 ± 7,2		0,3
		F0	6	24,7 ± 7,4		
	oBM [g]	IR0	6	105 ± 29,1		0,8
		F0	6	101,7 ± 23,5		
	H [cm]	IR0	6	84,5 ± 13,2		0,4
		F0	6	78,5 ± 8,2		

Tab. C-19: Mittelwerte der untersuchten Pflanzenparameter der Pflanzen der gemäßigten Klimazone und berechnete Signifikanzwerte im Vergleich der Kompost- und Fermentationsvarianten mit Biokohle (ungepoolte Daten) (fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ nach 2-seitigem t-Test)

	Pflanzenparameter	Vergleich IR15/F15	N	MW	STABW	p-Wert
Pappel	H [cm]	IR15	5	360,4	± 46,9	0,5
		F15	5	346,2	± 17	
	HG [kg]	IR15	5	1,6	± 0,4	0,8
		F15	5	1,7	± 0,3	
Paulownia	H [cm]	IR15	3	216,7	± 17,7	0,01
		F15	3	165,7	± 10	
Weide	H [cm]	IR15	5	562,6	± 52,8	0,01
		F15	5	475,8	± 32,4	
	HG [kg]	IR15	5	4,3	± 0,7	0,2
		F15	5	3,2	± 1,5	
Silphium perfoliatum	BA	IR15	6	16,8	± 2,7	0,1
		F15	6	21,2	± 5,1	
	oBM [g]	IR15	6	79,8	± 23,9	0,7
		F15	6	84,3	± 18,9	
	H [cm]	IR15	6	83,1	± 9,8	0,04
		F15	6	65,2	± 15,9	

Anhang D: Tabellen zum Kapitel 4.2

Tab. D-1: Mittlere/s Maiskolbenlänge/Maiskolbengewicht \pm Standardabweichung der Kontrollflächen und der mit Biokohlekompost applizierten Testflächen der untersuchten Standorte sowie berechnete Signifikanzen (p-Wert); fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ gegenüber den Kontrollflächen (Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben); N=Anzahl der Stichprobe

Standort	Testfläche	N	Maiskolbenlänge [cm]	p - Wert	Maiskolbengewicht [g]	p - Wert
GB 2. Feld	Kontrolle	20	12,30 \pm 4,79		74,90 \pm 63,51	
GB 2. Feld	Biokohlekompost	20	15,50 \pm 3,87	0,02	110,15 \pm 59,92	0,04
KY 3. Feld	Kontrolle	20	10,50 \pm 3,44		36,65 \pm 29,01	
KY 3. Feld	Biokohlekompost	20	15,90 \pm 3,88	0,001	133,50 \pm 65,13	0,001
NB 3. Feld	Kontrolle	20	10,90 \pm 4,32		84,50 \pm 53,68	
NB 3. Feld	Biokohlekompost	20	14,25 \pm 3,32	0,007	128,85 \pm 60,72	0,01
MT 1. Feld	Kontrolle	20	10,00 \pm 4,42		43,90 \pm 41,14	
MT 1. Feld	Biokohlekompost	20	16,60 \pm 4,60	0,001	109,55 \pm 73,80	0,001
MT 2. Feld	Kontrolle	20	11,50 \pm 3,89		31,60 \pm 19,99	
MT 2. Feld	Biokohlekompost	20	15,60 \pm 4,64	0,01	104,15 \pm 62,17	< 0,0001
MT 3. Feld	Kontrolle	20	9,25 \pm 3,18		39,60 \pm 24,24	
MT 3. Feld	Biokohlekompost	20	14,35 \pm 2,91	< 0,0001	151,5 \pm 77,24	< 0,0001
MT 4. Feld	Kontrolle	20	10,25 \pm 2,97		21,80 \pm 12,37	
MT 4. Feld	Biokohlekompost	20	16,80 \pm 3,33	< 0,0001	126,75 \pm 60,33	< 0,0001
MT 5. Feld	Kontrolle	20	8,55 \pm 2,70		21,00 \pm 13,31	
MT 5. Feld	Biokohlekompost	20	16,90 \pm 2,22	< 0,0001	121,55 \pm 35,38	< 0,0001

(GB – Gbilugu, KY-Standort Kukuio Yepalsi, MT-Standort Mogtandi, NB-Standort N'Bannayili)

Tab. D-2: Mittlere/s Maiskolbenlänge/-gewicht \pm Standardabweichung der Kontrollflächen und der mit Biokohlekompost applizierten Testflächen der untersuchten Standorte sowie berechnete Signifikanzen (p-Wert); fett geschriebene p-Werte bedeuten statistische Signifikanz mit $p < 0,05$ gegenüber den Kontrollflächen (Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben); N=Anzahl der Stichprobe

Standort	Testfläche	N	Maiskolbenlänge [cm]	p - Wert	Maiskolbengewicht [g]	p - Wert
GB 3. Feld	Kontrolle	20	9,28 \pm 4,11		41,70 \pm 28,86	
GB 3. Feld	Biokohlekompost	20	11,55 \pm 4,76	0,09	72,25 \pm 52,91	0,06
GB 2. Feld	Kontrolle	20	11,80 \pm 3,05		82,25 \pm 34,18	
GB 2. Feld	Biokohlekompost	20	12,45 \pm 2,37	0,4	96,00 \pm 41,70	0,3
KY 3. Feld	Kontrolle	20	9,28 \pm 3,13		68,80 \pm 47,31	
KY 3. Feld	Biokohlekompost	20	9,93 \pm 2,80	1	91,45 \pm 54,01	0,3
NB 2. Feld	Kontrolle	20	8,95 \pm 3,01		59,20 \pm 46,01	
NB 2. Feld	Biokohlekompost	20	11,43 \pm 3,23	0,02	99,85 \pm 54,65	0,02
TA 2. Feld	Kontrolle	20	8,35 \pm 2,10		37,50 \pm 22,04	
TA 2. Feld	Biokohlekompost	20	13,88 \pm 3,95	< 0,0001	157,60 \pm 81,42	< 0,0001

CURRICULUM VITAE

Name: Ullum (geb.Rößler)
 Vorname: Kathrin
 Email: ullumkathrin@gmail.com
 Bildung: Promotion an der Freien Universität Berlin,
 Fachbereich Geowissenschaften Oktober
 2016

Veröffentlichungen

Wagner, R.; **Rößler, K.**; Schatten, R.; Vogel, I. und Terytze, K. (2016): Biochar as an integrated and decentralised environmental management tool in the Botanic Garden Berlin – Dahlem. In: Biochar – potentials to mitigate climate change. Cambridge 2016. (im Druck)

Terytze, K., Wagner, R., **Rößler, K.**, Schatten, R., König, N. und Thomas, P. (2015): Schließung von Kreisläufen durch Energie- und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie im Botanischen Garten im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Klimaschutz – Modellprojekt Urban farming (TerraBoGa) – Endbericht zum Forschungsvorhaben. FU Berlin, S. 174.

http://edocs.fu-berlin.de/docs/receive/FUDOCS_document_000000024218

Rößler, K.; Schatten, R.; Wagner, R. und Terytze, K. (2015): Effects of biochar-compost on plant growth, biomass and crop yield in pot and field trials of selected plants from different climate zones. In: Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 89. Potsdam-Bornim 2015

Rößler, K.; Schatten, R.; Wagner, R. und Terytze, K. (2015): Verwertung von Urin und Fäkalien und deren Hygienisierung mittels Fermentation und Vermikompostierung – Erzeugung von TerraPreta ähnlichen Biokohlesubstraten In: Müll und Abfall, 06.15.

Schatten, R.; Wagner, R.; **Rößler, K.**; Suer, U. und Terytze, K. (2015): Verwertung pflanzlicher Reststoffe zu Biokohle und Biokohlesubstraten und deren Einsatz im Zierpflanzenbau – Ergebnisse des TerraBoGa-Projektes im Botanischen Garten Berlin-Dahlem. In: Müll und Abfall, 03.15, S. 137-143.

Wagner, R.; König, N.; Schatten, R.; **Rößler, K.** und Terytze, K. (2014): Utilization of organic waste in the Botanic Garden Berlin by producing and applying biochar substrates - Introduction and first results of the terraboga project, In: Bettendorf, T.; Wendland, C.; Otterpohl, R. 2014. Terra Preta Sanitation.

Rößler, K. und Jenny, F. (2013): Potenzial von Biocharkompost zur Entwicklung nachhaltiger Agrarsysteme in Ghana. Kongreßband ANS-Abfallwirtschaft meets biochar. Potsdam 02/03/10/2013. S. 195-202

Vogel, I.; Terytze, K.; Wagner, R.; Worzyk, F.; Friede, K.; Schatten, R.; **Rößler, K.** und N. König (2013): Biochar meets compost – Ergebnisse unterschiedlicher Einsatzbereiche. Kongreßband ANS-Abfallwirtschaft meets biochar. Potsdam 02/03/10/2013. S. 149-158

Rößler, K. und Jenny, F. (2012): Biochar/compost project in Ghana. In: Geophysical Research Abstracts, Vol.14, EGU2012-13011

Terytze, K., Vogel, I., **Rößler, K.**, Friede, K., Worzyk, F., Schatten, R., Wagner, R., Haubold-Rosar, M., Rademacher, A., Weiß, U., Weinfurter, K., Drabkin, D., Zundel, S., Trabelsi, S. (2012): Sustainable land-use by regional energy and material flow management using "Terra-Preta-Technology" on military conversion areas and low-yield-locations (LaTerra). In: Geophysical Research Abstracts, Vol.14, EGU2012

Vorträge

Anwendung von Biokohle und Biokohlekomposten im Gartenbau – Ergebnisse aus dem Botanischen Garten Berlin-Dahlem. TerraBoGa-Workshop, 23.-24. Juni 2015 in Berlin

Effects of biochar-compost on plant growth, biomass and crop yield in pot and field trials of selected plants from different climate zones. International Biochar Symposium: Biochar Contribution to Sustainable Agriculture. 28.-29. Mai 2015 in Potsdam

Ausgewählte Ergebnisse der pflanzenbaulichen Wirkung von Biokohlekompost und Biokohlesubstraten in Topf- und Freilandversuchen im Botanischen Garten Berlin. ANS-Biokohle Fachausschuss, 30. September 2014 in Berlin

Pflanzenbauliche Wirkung von Biokohlekompost und Biokohlesubstraten in Topf- und Freilandversuchen mit ausgewählten Pflanzen unterschiedlicher Klimazonen. Biokohle Workshop, 22.-23. September 2014 in Bingen am Rhein

Biokohlekompost-Projekt-Ghana. ANS-Biokohle Fachausschuss, 6. März 2014 in Leonberg

Biokohle und Kompost-Ergebnisse aus unterschiedlichen Einsatzbereichen von Deutschland bis Afrika. ANS-Biokohle Fachausschuss, 6. März 2013 in Höxter

Potenzial von Biocharkompost zur Entwicklung nachhaltiger Agrarsysteme in Ghana. 74. Symposium des ANS: Abfallwirtschaft meets Biochar-Perspektiven für den Klimaschutz?. 2. Oktober 2013 in Potsdam

Biochar-Projekt-Ghana. Kooperationsworkshop in Israel; 14.-15. Oktober 2012 an der Hebräischen Universität in Rehovot, Israel

Anwendung von Biokohle auf landwirtschaftlich genutzten Böden in Ghana. Vereinsvorstands-sitzung des Entwicklungshilfevereins Abokobi Society Schweiz; 12. Januar 2012 in Zürich

Ghana Projekt-Anwendung von Biokohle auf landwirtschaftlich genutzten Böden. TU-Berlin Kolloquium, 10. Januar 2012 in Berlin

Posterpräsentation

73. Symposium des ANS: Biokohle im Blick-Herstellung, Einsatz und Bewertung, 19.-20. September 2012 in Berlin; Das Biocharkompost-Projekt in Ghana der Abokobi Society Switzerland (ASS)

European Geoscience Union (EGU), 22.-27. April 2012 in Wien; englische Posterpräsentation; Is biochar a solution for food security?