

Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften

**Nutzung von Biokohlesubstraten zur Wiederaufforstung
von Windwurfflächen und auf Weihnachtsbaumkulturen**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum naturalium

Vorgelegt von
Dipl.-Geogr. Dmitri Drabkin
2017

Berlin, 2017

Erstgutachter: Prof. Dr. mult. Dr. h.c. Konstantin Terytze
Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften

Zweitgutachter: Prof. Dr. Brigitta Schütt
Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften

Drittgutachter: Prof. Dr. Albert-Dieter Stevens
Freie Universität Berlin
Fachbereich Biologie

Datum der Disputation: 06.02.2018

Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass ich 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 23.08.2017

Dipl.-Geogr. Dmitri Drabkin

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei den Personen bedanken, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere bei

Herrn Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze für die Möglichkeit in dem „LaTerra“-Projekt mitzuarbeiten und für die Betreuung der Dissertation

Herrn Dipl.-Ing. agr. Karlheinz Weinfurtner für die fachliche Betreuung der praktischen Arbeiten im Rahmen dieser Dissertation

Frau Dr. Ines Vogel für anregende Diskussion der Arbeit und konstruktive Kritik

Den Mitarbeitern des Fraunhofer IME Ute Siebert, Rolf Ulrich, Bernd Kruse, Katja Mock, Theo Görtz für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche

Frau Prof. Dr. Brigitta Schütt für die Übernahme des Zweitgutachtens

Herrn Prof. Dr. Albert – Dieter Stevens für die Übernahme des weiteren Gutachtens

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Dissertation bestand darin, das Potential des Einsatzes von Biokohlesubstraten (BKS) im forstlichen Bereich zu erkunden. Dabei wurden zwei unterschiedliche, für die Modellregion Hochsauerlandkreis relevante, Anwendungsgebiete - Windwurfflächen und Weihnachtsbaumkulturen untersucht.

Die Zugabe von BKS hat einen geringfügigen Mehrertrag bei der Bepflanzung von Fichten (*Picea abies*) auf Windwurfflächen und Nordmantannen (*Abies nordmanniana*) auf Flächen der Weihnachtsbaumkulturen erbracht.

Durch Zugabe von BKS wurde ein deutlich verbesserter Wuchs bei der Bepflanzung von Rotbuchen (*Fagus sylvatica*) auf Windwurfflächen erzielt.

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Ergebnissen aus der Literatur, die zeigen, dass Laubbäume grundsätzlich deutlich stärker als Nadelbäume auf die Verbesserung der Nährstoffversorgung reagieren.

Abstract

The goal of this PhD thesis was the investigation of the potential of biochar-compost substrates (BKS) usage in forestry. For this purpose, the model region Hochsauerlandkreis (Nordrhein-Westfalia) and two potential application cases in the restoration of wind breakage areas and Christmas tree cultures were chosen.

The Application of BKS had only a small growth increasing effect on common spruce (*Picea abies*) on wind breakage areas and normann fir (*Abies nordmanniana*) in christmas tree cultures.

Through the Application of BKS a significant increase in growth of common beech (*Fagus sylvatica*) on wind breakage areas was reached.

These results are in accordance with results from literature, which indicate, that broad leaf trees show a stronger response to the increased supply with nutrients than conifer trees.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
2. Stand der Forschung	4
2.1. Überblick	4
2.2. Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum in Topf- und Feldversuchen	6
3. Versuchsbeschreibung	20
3.1. Biokohlesubstrate	20
3.2. Freilandversuche	22
3.2.1. Versuchsanlage	22
3.2.2. Erfassung von Wachstum und Vitalität	25
3.2.3. Statistische Auswertung	29
3.3. Lysimeterversuch.....	30
3.3.1. Versuchsanlage	30
3.3.2. Untersuchte Parameter.....	31
3.3.3. Statistische Auswertung	32
3.4. Labormethoden.....	32
3.4.1. Pflanzenverfügbare Phosphor und Kalium in CAL-Extraktion.....	32
3.4.2. Pflanzenverfügbare Stickstoff und Magnesium in CaCl-Lösung	34
3.4.3. pH.....	34
3.4.4. Effektive Kationenaustauschkapazität	34
3.4.5. Ionenchromatographie.....	34
3.4.6. Biologische Parameter.....	36
3.4.6.1. Potentielle Ammoniumoxidation.....	36
3.4.6.2. Bodenatmung	37
4. Ergebnisse der Lysimeter- und Freilanduntersuchungen	38
4.1. Physikalische, physikalisch-chemische, chemische und biologische Bodenparameter.....	38
4.1.1. Lysimeterversuch	38
4.1.2. Freilandversuch Weihnachtsbaumanbaufläche	42
4.1.3. Zusammenfassung	43
4.2. Auswaschung von Nährstoffen	43

4.3. Baumwachstum	46
4.3.1. Freilandversuch Windwurffläche	46
4.3.2. Freilandversuch Weihnachtsbaumkulturen	51
5. Diskussion	53
6. Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerung	58
6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse	58
6.2. Fazit	60
7. Literaturverzeichnis	62
8. Anhang	69
8.1. Bodenanalysen. Ergebnisse	69
8.2. Nährstoffauswaschung	74
8.2.1. Nitratauswaschung	74
8.2.2. Kaliumauswaschung.....	75
8.2.3. Magnesiumauswaschung	76
8.3. Baumwachstum. Lagemaße und Streuung.....	77
8.4. Signifikanzen	82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Landsat Aufnahme.....	3
Abbildung 2: Windwurffläche. Naturverjüngung. In unmittelbarer Nähe der Versuchsfläche	22
Abbildung 3: Versuchsaufbau Windwurffläche	23
Abbildung 4: Freilandversuchsflächen.....	24
Abbildung 5: Versuchsaufbau Weihnachtsbaumkulturen	25
Abbildung 6: Ausfälle an Bäumen in verschiedenen Parzellen.....	27
Abbildung 7: Messprinzip von CCM-300	29
Abbildung 8: Zeitliche Veränderung des Gehaltes am pflanzenverfügbaren Stickstoff im Lysimeterversuch.....	40
Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung der PAO im Lysimeterversuch.....	41
Abbildung 10: Nitratkonzentration des Sickerwassers im Lysimeterversuch	44
Abbildung 11: Kumulierter Nitrataustrag mit Sickerwasser im Lysimeterversuch.....	45

Abbildung 12: Projizierte Blattmasse pro Baum in g. Buche. Windwurffläche	47
Abbildung 13: Projizierter Chlorophyllgehalt pro Baum in mg. Buche	48
Abbildung 14: Zuwachs Terminaltrieb in cm. Fichte. Windwurffläche	50
Abbildung 15: 1000-Nadelgewicht der Windwurffläche	50
Abbildung 16: Zuwachs Terminaltrieb in cm. Weihnachtsbaumkulturen	52
Abbildung 17: 1000-Nadelgewicht der Weihnachtsbaumkulturen	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Studien zur Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum.....	8-12
Tabelle 2: Mischungsverhältnisse Biokohlesubstrate	20
Tabelle 3: Charakteristiken von Versuchsstandorten und Biokohlesubstraten	21
Tabelle 4: Mittelwerte von Bodenparametern, berechnet über die gesamte Untersuchungsperiode (2011-2015) im Lysimeterversuch	38
Tabelle 5: Basalatmung (BAT) und Substratinduzierte Atmung (SIR) in mg/100g/h. Mittelwert, berechnet über die gesamte Untersuchungsperiode (2011-2015) im Lysimeterversuch.	42
Tabelle 6: Mittelwerte von Bodenparametern, berechnet über die gesamte Untersuchungsperiode (2011-2015) im Freilandversuch	42
Tabelle A1: pH-Wert	69
Tabelle A2: KAKeff	69
Tabelle A3: Pflanzenverfügbare Phosphor. P-cal in mg/kg. Lysimeterversuch	70
Tabelle A4: Pflanzenverfügbare Phosphor. P-cal in mg/kg. Weihnachtsbaumkulturen	70
Tabelle A5: Pflanzenverfügbare Kalium. K-cal in mg/kg. Lysimeterversuch	71
Tabelle A6: Pflanzenverfügbare Kalium. K-cal in mg/kg. Weihnachtsbaumkulturen	71
Tabelle A7: Pflanzenverfügbare Magnesium. Mg-CaCl in mg/kg. Lysimeterversuch	72
Tabelle A8: Pflanzenverfügbare Magnesium. Mg-CaCl in mg/kg. Weihnachtsbaumkulturen	72
Tabelle A9: Pflanzenverfügbare Stickstoff. N _{min} in mg/kg. Weihnachtsbaumkulturen	73

Tabelle A10: Basalatmung. Lysimeterversuch	73
Tabelle A11: Substratinduzierte Atmung. Lysimeterversuch	73
Tabelle A12: Kumulierter Nitrataustrag in mg in Sickerwasser	74
Tabelle A13: Kumulierter Kaliumaustrag in mg in Sickerwasser	75
Tabelle A14: Kumulierter Magnesiumaustrag in mg Sickerwasser	76
Tabelle A15: Zuwachs Terminaltrieb in cm. Fichte	77
Tabelle A16: Mittlere Blattmasse in mg. Buche	78
Tabelle A17: Mittlerer Blattanzahl. Buche	78
Tabelle A18: Projizierte Blattmasse pro Baum in g. Buche	79
Tabelle A19: Mittlere Blattfläche. Buchenblätter	79
Tabelle A20: Mittlerer Chlorophyllgehalt Buchenblätter	80
Tabelle A21: Chlorophyllgehalt pro Baum. Buche	80
Tabelle A22: Zuwachs Terminaltrieb in cm. Nordmanntanne	81
Tabelle A23: P-Wert. Zuwachs Terminaltrieb. Fichte	82
Tabelle A24: P-Wert. Mittlere Blattmasse	82
Tabelle A25: P-Wert. Mittlerer Blattanzahl. Buche.....	82
Tabelle A26: P-Wert. Projizierte Blattmasse pro Baum. Buche	83
Tabelle A27: P-Wert. Mittlerer Blattfläche. Buche	83
Tabelle A28: P-Wert. Mittlerer Chlorophyllgehalt pro Blatt	83
Tabelle A29: P-Wert. Projizierter Chlorophyllgehalt pro Baum. Buche	83
Tabelle A30: P-Wert. Zuwachs Terminaltrieb. Nordmanntanne	84
Tabelle A31: P-Wert. pH-Wert. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode	84
Tabelle A32: P-Wert. KAK. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode ...	84
Tabelle A33: P-Wert. P-CAL. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode .	84
Tabelle A34: P-Wert. K-CAL. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode	85
Tabelle A35: P-Wert. Mg-CaCl. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode	85
Tabelle A36: P-Wert. pH und KAK. Oberkirchen. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode.....	85
Tabelle A37: P-Wert. P-cal und K-cal. Oberkirchen. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode.....	85
Tabelle A38: P-Wert. Mg-cacl und N _{min} . Oberkirchen. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode	86

Abkürzungsverzeichnis und Glossar:

Bodenchronosequen	Zeitlich bedingte Entwicklungsreihe, entlang eines geomorphologischen Profils, die aus einer Abfolge von verschiedenen Bodentypen besteht
BKS	Biokohlesubstrat
BKS15	Biokohlesubstrat mit 15 Vol-% Holzkohle
BKS30	Biokohlesubstrat mit 30 Vol-% Holzkohle
HSK	Hochsauerlandkreis
ECM	Ectomykorrhiza
t/ha	Tonnen pro Hektar
kg/ha	Kilogramm pro Hektar
NPK-Dünger	Stickstoff-Phosphor-Kalium-Dünger
CCM-300	Chlorophyll Content Meter 300
KAK	Kationenaustauschkapazität
CAL	Calcium-Acetat-Lactat-Extraktion
DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	Internationale Organisation für Normung
AFM	Arbuskulare Mykorrhiza
Stda	Standardabweichung
30t	30 Tonnen Variante
60t	60 Tonnen Variante
Nmin	pflanzenverfügbare Stickstoff

PAO

Potentielle Ammoniumoxidation

BAT

Basalatmung

SIR

Substratinduzierte Atmung

1. Einführung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „LaTerra – Nachhaltige Landnutzung durch regionales Energie- und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie auf militärischen Konversionsflächen und ertragsschwachen Standorten“. Das Ziel des Verbundprojektes bestand darin, anhand von drei ausgewählten Modellregionen die Einsatzmöglichkeit und Wirkung von Biokohle-Kompost-Gemischen zu untersuchen. Diese Gemische werden im Folgenden als Biokohlesubstrate (BKS) bezeichnet.

In der Modellregion 3 – Hochsauerlandkreis (HSK) wurde der Einsatz von BKS im forstlichen Bereich erprobt. Dabei wurden zwei unterschiedliche potentielle Anwendungsgebiete ausgewählt: Zum einen die nach dem Orkan „Kyrill“ im Jahre 2007 entstandene Windwurfflächen (auf die HSK entfiel etwa 40% des Gesamtwurfs in Nordrhein-Westfalen) und zum anderen die von Forstbetrieben betriebenen Weihnachtsbaumanbauflächen.

Im Hinblick auf die Anwendungsgebiete, wurden im Rahmen dieser Dissertation folgende Ziele verfolgt:

1. Verbesserung der Anwuchssicherheit und Vitalität von Jungbäumen
2. Verbesserung der Nährstoffspeicherung im Boden und der Nährstoffversorgung der Jungbäume
3. Optimierung des Düngungsmanagements

Hinsichtlich der Anwuchssicherheit und Vitalität sollten die BKS vor allem eine bessere Nährstoffversorgung der Jungbäume sicherstellen und damit Nährstoffmangel (durch verstärkte Auswaschung) sowie Trocken- und Frostschäden, die besonders unter den diffizilen Bedingungen einer großflächigen Windwurffläche entstehen können, vorbeugen.

Die Vitalität der Jungbäume ist gleichfalls hinsichtlich eines auf der Windwurffläche einsetzenden Sukzession und damit der Konkurrenzfähigkeit der Bäume gegenüber anderen Pflanzen von Bedeutung.

Bei den Weihnachtsbaumkulturen finden Nährstoffentzug und Humusverarmung dadurch statt, dass die Bäume im 15 Jahres–Rhythmus komplett geerntet werden.

Allerdings unterscheiden sich die Böden der Weihnachtsbaumkulturen in vielen Fällen grundlegend von den Waldböden und sind in Bezug auf Nährstoffgehalte und den pH-Wert, den landwirtschaftlich geprägten Böden ähnlicher (siehe Kapitel 3).

Ein weiterer Aspekt besteht darin, dass die BKS potentiell als Depotdünger (Punkt 3) dienen können. Dies ist vor allem wegen eines schwierigen Düngungsmanagements auf den Weihnachtsbaumanbauflächen von Bedeutung. Während der Bedarf von Jungbäumen an Düngemitteln noch relativ gering ist, steigt dieser kontinuierlich mit der Zeit (vgl. Baumgarten et al. 2008).

Die Forstverwaltung von Nordrhein-Westfalen strebt im Rahmen der Strategie hin zum Nachhaltigen Waldumbau, die Etablierung von Mischbeständen auf Windwurfflächen an. Somit sollen die nach dem Windwurf geräumten Flächen nicht ausschließlich mit Fichten, sondern verstärkt mit ursprünglichen standortangepassten Baumarten, vor allem Buchen, bepflanzt werden (vgl. Landesbetrieb Wald und Holz NRW 2007).

Das Vorherrschen der Fichten-Monokulturen war auch eine der entscheidenden Ursachen des großflächigen Windwurfs während des Orkans „Kyrill“. Die Analysen der Behörden in NRW direkt nach dem Sturmereignis ergaben, dass über 90% der umgeworfenen Bäume Fichten waren. Während die Fichten großflächig umgeworfen wurden, blieben die benachbarten Buchenbestände in vielen Fällen unversehrt (vgl. Abb. 1). Der „Brotbaum“ der Forstwirtschaft, die Gemeine Fichte, ist eine durch Sturmereignisse besonders gefährdete Baumart (vgl. Gardiner et al. 2013). Die Etablierung von Mischwäldern ist somit auch im Hinblick auf die Zunahme der Extremereignisse wie „Kyrill“ von Bedeutung.

Eine potentielle wachstumsfördernde Wirkung von Biokohle hängt mit ihrer Eigenschaft Nährstoffe zu speichern (Punkt 2) zusammen. Bereits vorhandene Studien deuteten darauf hin, dass Biokohle bei der Nährstoff- und vor allem Stickstoffretention eine bedeutende Rolle spielen kann (siehe Kapitel 2).

Dies ist auch im Hinblick auf die Nitratauswaschung und potentielle Trinkwasserbelastung wichtig. Auf den durch Windwurf entstandenen Kahlfleichen findet in der ersten Phase eine verstärkte Nitratauswaschung statt. Die Waldflächen liegen häufig innerhalb eines Wasserschutzgebietes und stellen ein wichtiges Reservoir für das Trinkwasser dar. Somit ist die Trinkwasserqualität durch Windwurf zunächst gefährdet. Die verstärkte Auswaschung klingt jedoch nach etwa fünf Jahren, mit dem verstärkten Aufkommen der Vegetation auf der Windwurffläche wieder ab (Hegg et al. 2004., S. 22). Die meisten Studien zu dieser Problematik stammen aus Bayern, einen umfassenden Überblick geben Hegg et al. 2004.

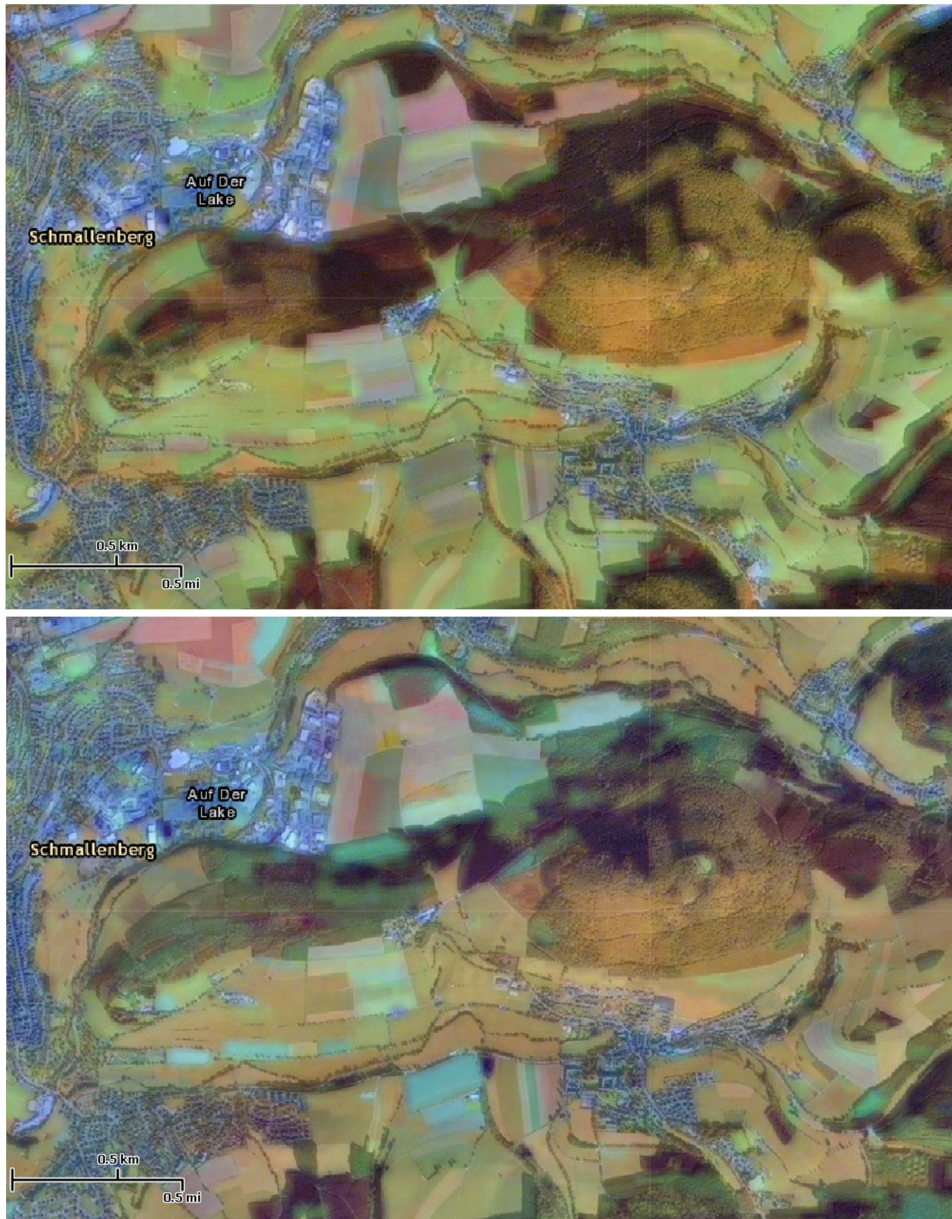


Abbildung 1: Landsat Aufnahmen

Die Landsat Bilder mit der Kanalkombination 4,5,1 (Vegetationsanalyse) zeigen die Umgebung der Stadt Schmallenberg rund um den Fraunhofer Institut für Angewandte Ökologie. Das Obere Bild stammt aus dem Jahr 2005, das untere aus 2010. Man sieht, dass der Fichtenwald (dunkel rote Farbe) deutlich reduziert wurde (an seiner Stelle treten hell grüne Farben – Windwurfflächen), während der Buchenwald (hell gelbe Farbe) weitgehend bestehen blieb. Quelle: Esri Change Matters: www.changematters.esri.com

2. Stand der Forschung

2.1. Überblick

Die Biokohle als Begriff bezeichnet jegliche Form der organischen Kohle, die im Pyrolyse- oder auch über das Hydrothermale Karbonisierungs-Verfahren aus unterschiedlichen pflanzlichen Stoffen produziert werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird ausschließlich auf pyrolytisch hergestellte Kohlen eingegangen.

In den vergangenen zehn Jahren zog die Diskussion über die Wirkung von Biokohle als mögliches Bodenverbesserungsmittel immer breitere Kreise. Dabei waren die Hinweise auf eine positive Wirkung keineswegs neu. So hat bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts Justus von Liebig auf die Möglichkeit der Bodenverbesserung mit Hilfe organischer Kohle hingewiesen (Wilson 2010).

In Bezug auf den forstlichen Bereich ist das Manuskript von Patrick Matthew (1831) hervorzuheben, in dem er die Möglichkeit der Nutzung organischer Kohle zur Wiederherstellung der Waldflächen erwähnt (Thomas, Gale 2015).

In jüngster Zeit (etwa seit dem Jahr 2000) hat die Anzahl der Publikationen zur Wirkung von Biokohle auf Boden und Pflanzenwachstum deutlich zugenommen:

Ausgehend von den Arbeiten von Wim Sombroek und seiner (Wieder-)Entdeckung der anthropogenen Schwarzerden im brasilianischen Amazonasgebiet (vgl. Woods et al. 2009), wurde eine immer breitere Diskussion über die Wirkung von Biokohle auf Böden angeregt. Die Grundlage dafür bildete die Identifizierung von Biokohle als eine der wichtigsten Komponenten in den anthropogenen Schwarzerden (vgl. Glaser 2007).

Auch, wurden zahlreiche Studien zur Wirkung von Biokohle auf verschiedene Bodenparameter und Pflanzenwachstum publiziert. Einen Überblick über den Stand der Erkenntnisse geben Lehmann und Joseph (2009).

Die steigende Anzahl der Studien zur Biokohle wird auch in einer Reihe von Metastudien dokumentiert (Jeffery et al. 2011; Biederman, Harpole 2013; Liu et al. 2013; Crane-Droesch et al. 2013).

Sowohl die Metastudie von Biederman und Harpole (2013) als auch die von Liu et al. (2013) konnten auf eine deutlich höhere Anzahl von Fallstudien als die Metaanalyse von Jeffrey et al. (2011) zurückgreifen. So wurden 81% der in der Metastudie von Liu et al. (2013) verwendeten Fallstudien zwischen 2010 und 2013 publiziert.

Die in den Metastudien erfassten Fallstudien, zeigen eine hohe Variabilität im Bezug auf die Art der Anwendung und das Versuchsdesign. Außerdem waren die meisten Fallstudien über einen Zeitraum von nur einer Vegetationsperiode angelegt. Dies beschränkt auch die Aussagekraft der auf diesen Fallstudien basierenden Metastudien. Dementsprechend wird die Notwendigkeit von Langzeitversuchen mit möglichst vergleichbarer Methodik deutlich.

Zur Erklärung der Wirkung von Biokohle auf das Pflanzenwachstum werden verschiedene mögliche Prozesse betrachtet. Biederman und Harpole (2013) identifizieren folgende wichtige potentielle Mechanismen:

- höhere Strahlungsabsorption (vgl. Genesio et al. 2012)
- verbesserte Wasserspeicherung (vgl. z.B. Laird et al. 2010)
- Nährstoffeintrag durch Biokohle selbst, als labile organische Komponente (unterscheidet sich von der Art der Biokohlen (vgl. Amonette, Joseph 2009; Haas et al. 2012)
- komplexe physikochemische Reaktionen mit Bodenpartikeln. Hier geht es um die Adsorption von Fe- und Al-Ionen in der Bodenlösung durch Biokohle. Dies kann wiederum zum Anstieg an pflanzenverfügbarem Phosphor, durch das teilweise Aufheben der Phosphorbindung in sauren Böden führen (vgl. Cui et al. 2011). Außerdem kann die verstärkte Al- und Cd-Bindung zum Anstieg des pH-Wertes in sauren Böden führen (vgl. DeLuca et al. 2009; Hass et al. 2012)
- Retention von Nährstoffen und Verringerung der Nährstoffauswaschung, bedingt durch solche Eigenschaften von Biokohle wie hohe Porosität, große Oberfläche und negative Oberflächenladung (vgl. Bird et al. 2008; Cheng et al. 2008; Clough et al. 2013; Downie et al. 2009; Major et al. 2009; Novak et al. 2009).
- Höhere biologische Aktivität durch lösliche organische Komponenten und bessere N-Fixierung (vgl. Rondon et al. 2007; Lehmann et al. 2011)
- Verstärkte Mykorrhizierung der Wurzeln (vgl. Warnock et al. 2007; Thies, Rillig 2009)

2.2. Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum in Topf- und Feldversuchen

Der Großteil der Studien zur Wirkung von Biokohle, die in diversen Metaanalysen zusammengefasst wurden (siehe Kapitel 2.1), bezieht sich auf eine potentielle Agrarnutzung. Nur wenige Studien befassen sich dagegen mit einer potentiellen Nutzung von Biokohle im forstlichen Bereich.

Bevor die einzelnen Fallstudien betrachtet werden, wird zunächst auf die Ergebnisse der Metaanalyse von Thomas und Gale (2015) eingegangen, die mehrere Fallstudien zusammenfassend darstellt.

Insgesamt wurden in dieser Metaanalyse 17 Studien mit 36 unterschiedlichen Baumarten bewertet. Die Studien sind unterschiedlich bezüglich der Klimazonen, der Baumarten und des Versuchsdesigns und damit nur schwer vergleichbar. Auch die Motivation der Studien ist unterschiedlich. Während bei den früheren Studien natürliche Prozesse wie Waldbrand den Ausgangspunkt bilden, ist in den letzten Jahren auch der gezielte Einsatz von Biokohle zum Gegenstand der Untersuchungen geworden.

Die Verteilung nach Klimazonen ist wie folgt: sechs Studien beziehen sich auf die Tropen, fünf auf boreale Zone und sechs auf die gemäßigte Breiten.

Beim Versuchsdesign handelt es sich bei den meisten Studien um Topfversuche (14 Studien). Nur bei drei Studien handelt es sich um Feldversuche.

Die meisten Studien waren darüber hinaus Kurzzeitstudien mit einer Dauer von 49 bis 180 Tagen (fast alle Topfversuche). Die Feldversuche waren naturgemäß in ihrer Dauer länger, zwischen 584 und 1460 Tagen. Man kann also feststellen, dass Langzeitstudien bis jetzt kaum vorhanden sind.

Die Ergebnisse der einzelnen Studien wurden für die Metaanalyse zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Die Analyse ergab folgendes:

Der mittlere Biomassenzuwachs bei Biokohle-Anwendung über den gesamten Datensatz beträgt 41% mit einer Signifikanz von $p < 0,001$ (nicht gepaarter Wilcoxon Test bzw. Mann-Whitney U-Test).

Die Zuwächse waren deutlich größer im tropischen und borealen Bereich und bei Laubbäumen deutlich größer als bei Nadelbäumen.

Kürzere Fallstudien zeigten tendenziell höhere Zuwächse als Studien über einen längeren Zeitraum. Bei den größeren Bäumen nimmt der Einfluss der Biokohle-Anwendung tendenziell ab.

Es wurden darüber hinaus keine signifikanten Unterschiede zwischen Topf- und Feldversuchen festgestellt, obwohl Topfversuche tendenziell höhere Zuwächse aufwiesen.

Bei den untersuchten Baumarten wurden signifikante Zuwächse bei *Picea abies* (Gemeine Fichte), *Pinus sylvestris* (Gemeine Kiefer), *Betula pubescens* (Moor Birke) und *Populus tremula* (Zitterpappel) festgestellt. Allerdings sind nur bei den letzten beiden Baumarten größere Zuwächse zu beobachten. *Betula pubescens* und *Populus tremula* sind auch die beiden schnell wüchsigen Baumarten die zu r-Strategen gehören. Bei den k-Strategen *Picea abies* und *Pinus sylvestris* sind die Zuwächse deutlich geringer. Außerdem wurden deutlich größere Zuwächse für die tropische und boreale Klimazone als für die gemäßigten Breiten beobachtet.

Insgesamt ist erneut zu betonen, dass die zusammengefassten Studien sehr unterschiedlich sind.

Im Folgenden soll ein Überblick über die einzelnen vorhandenen Fallstudien zur Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum gegeben werden.

Die Ergebnisse der einzelnen Fallstudien sind in der Tabelle 1 zu entnehmen. Die Studien sind nach Klimazone und Erscheinungsdatum eingeordnet. Kursiv sind die in der Metastudie nicht berücksichtigten Publikationen gekennzeichnet. Falls mehrere Ergebnisse aus einer Studie weitgehend übereinstimmen, werden nur die aussagekräftigsten in Tabelle 1 aufgeführt. Bei Publikationen, in denen nur Graphiken aufgeführt sind, werden Näherungszahlen angegeben.

Tabelle 1: Studien zur Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum

Publikation	Baumart	Klimazone	Versuchsdesign	Mittlerer Zuwachs im Vergleich zur Kontrolle
<i>Mikan, Abrams 1996</i>	Quercus rubra (Roteiche), Quercus alba (Weiß-Eiche), Quercus prinus (Kastanien-Eiche)	Gemäßigte Breiten	Typ: Topfversuch Dauer: 5 Monate Applikation: Köhlerboden	Längenwachstum: Quercus alba: - 24% Quercus rubra: - 37% Root/Shoot-ratio: Quercus alba: : + 102% + Quercus rubra: + 41%
Makoto et al. 2010	Larix gmelinii (Dahurische Lärche)	Gemäßigte Breiten	Typ: Topfversuch Dauer: 4 Monate Applikation: 20% Biokohle mit Varianten: oberflächlich (SUR); homogen gemischt (MIX); als Schicht im Wurzelbereich (MID) Alle Varianten: mit und ohne Ectomykorrhiza (ECM) getestet	Gesamtbiomasse: Ohne ECM: SUR: + 41%; MIX: - 6%; MID: + 64% Mit ECM: SUR: + 123%; MIX: + 49%; MID: + 236%
McElligott 2011	Populus tremula (Zitterpappel)	Gemäßigte Breiten	Typ: Topfversuch Dauer: 2 Monate Applikation: 25 und 50% Biokohle mit und ohne Mineraldünger	Gesamtbiomasse: kein Effekt von Biokohle kein Effekt von Mineraldünger Biokohle + Mineraldünger: +38%
Santalla et al. 2011	Betula alba (Hänge Birke), Castanea sativa (Edelkastanie), Quercus robur (Stieleiche)	Gemäßigte Breiten	Typ: Feldversuch Dauer: 4 Jahre Applikation: 7,5 t/ha kohlehaltige Holzasche mit und ohne 65 kg/ha P Mineraldünger Variante: 493 kg/ha Ca, 65 kg/ha P	Mittelwerte: Durchmesser: Holzasche: + 13% Holzasche + P: 40% Mineraldünger CaP: + 33%

Tabelle 1: Studien zur Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum (Fortsetzung)

Publikation	Baumart	Klimazone	Versuchsdesign	Mittlerer Zuwachs im Vergleich zur Kontrolle
Eyles et al. 2013	Apfelbaum	Gemäßigte Breiten	Typ: Feldversuch Dauer: 3 Jahre Applikation: 47 t/ha Biokohle 10 t/ha Kompost Biokohle + Kompost in gleichen Mengen wie oben	Mittlerer Fruchtgewicht: Biokohle: + 3,6% Kompost: + 7,6% Biokohle + Kompost: + 8,2%
Headlee et al. 2013	Populus hybrid (Pappel Hybrid)	Gemäßigte Breiten	Typ: Topfversuch Dauer: 2 Monate Applikation: 25% Vermiculit; 25% Biokohle Mit und ohne NPK-Dünger (38 mg pro Baum)	Gesamtbiomasse: Keine Unterschiede bei nicht gedüngten Varianten. Gedüngte Variante: Geringfügig höhere Werte sowohl bei Vermiculit als auch bei Biokohle
Scharenbroch et al. 2013	Acer sachharium (Zucker-Ahorn), Gleditsia. Triacantes (Gleditschien)	Gemäßigte Breiten	Typ: Topfversuch Dauer: 1,5 Jahre Applikation: Holzschnitzel, Kompost, Biokohle und Klärschlamm oberflächlich jeweils 25 t/ha/Jahr NK – Mineraldünger: 0,22 t N/ha/Jahr	Gesamtbiomasse: Mineraldünger: 36% Kompost: 24% Holzschnitzel: 16% Biokohle: 44% Klärschlamm: 54%
Wardle et al. 1998	Pinus sylvestris (Gemeine Kiefer), Betula pendula (Hänge-Birke)	Boreale Zone	Typ: Topfversuch Dauer: 2 Monate Applikation: 2 t/ha Biokohle mit und ohne Streuauflage von 3 t/ha Boden aus drei unterschiedlich geprägten Standorten	Kaum Unterschiede bei den Varianten, außer bei Betula pendula auf phenolhaltigem Boden. Hier war die Biomasse um etwa 450% höher

Tabelle 1: Studien zur Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum (Fortsetzung)

Publikation	Baumart	Klimazone	Versuchsdesign	Mittlerer Zuwachs im Vergleich zur Kontrolle
Robertson et al. 2012	Pinus contorta (Küsten Kiefer), Alnus viridis (Grün-Erle)	Boreale Zone	Typ: Topfversuch Dauer: 4 Monate Applikation: 5 und 10 % Biokohle mit und ohne Mineraldünger (Urea 150 mg N/kg)	Biomasse: Pinus contorta: Mineraldünger: Kein Unterschied Biokohle: tendenziell höher aber nicht signifikant Biokohle + Mineraldünger: Etwa signifikant höher Alnus viridis: Mineraldünger: Kein Unterschied Biokohle: signifikant höher Biokohle + Mineraldünger: signifikant höher
Heiskanen et al. 2013	Picea abies (Gemeine Fichte)	Boreale Zone	Typ: Topfversuch Dauer: 2 Monate Applikation: 15, 30, 45 und 60% Biokohle	Kein Unterschied bei Längenwachstum und Wurzelvolumen
Pluchon et al. 2014	Betula Pubescens (Moor-Birke), Picea abies (Gemeine Fichte), Pinus sylvestris (Gemeine Kiefer), Populus tremula (Zitterpappel)	Boreale Zone	Typ: Topfversuch Dauer: 2 Monate Applikation: 4,5% Biokohle Varianten mit Holzkohle aus unterschiedlichen Inputstoffen (Baumarten)	Gesamtbiomasse: Betula pubescens: Signifikante Steigerung bei 6 von 9 Holzkohlevarianten Pinus sylvestris: Signifikante Steigerung bei 2 von 9 Holzkohlevarianten

Tabelle 1: Studien zur Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum (Fortsetzung)

Publikation	Baumart	Klimazone	Versuchsdesign	Mittlerer Zuwachs im Vergleich zur Kontrolle
Reverchon et al. 2014	Acacia tetragonophylla (Curare)	Semi-Arid	Typ: Topfversuch Dauer: 6 Monate Applikation: 2,5 und 5% Biokohle + gleiche Varianten mit nährstoffaufgeladener Biokohle	Applikation 5%: Längenwachstum: Biokohle: + 6,7% Aufgeladene Biokohle: + 17,8% Blattmasse: Biokohle: + 22% Aufgeladene Biokohle: + 89%
Chidumayo 1994	Bauhinia petersiana (Orchideenbaum), Isoberlinia angolensis und andere	Tropen	Typ: Topfversuch Dauer: 3 Monate Applikation: Köhlerboden	Längenwachstum: Bauhinia petersiana: + 24% Isoberlinia angolensis: - 29%
Hoshi 2001	Teebaum	Tropen	Typ: Feldversuch Dauer: 10 Jahre Applikation: Biokohle: 5, 6 t/ha einmalig sowie Varianten mit 1 t/ha jährlich; alle Varianten mit zusätzlicher NPK -Düngung	Längenwachstum: Im Schnitt 20% höher bei Biokohle Varianten Durchmesser: Im Schnitt 40% höher bei Biokohle Varianten
Siregar 2007	Acacia mangium (Akazie) Michelia montana (Magnolia)	Tropen	Typ: Topfversuch Dauer: 6 Monate Applikation: 5, 10, 15 und 20% Biokohle	Michelia montana Applikation 20%: Längenwachstum: + 118% Durchmesser: + 110%
Sovu et al. 2012	Afzelia xylocarpa, Dalbergia choichinchinensis, und andere	Tropen	Typ: Feldversuch Dauer: 4 Jahre Applikation: Mineraldünger (15:15:15): 300g pro Baum Biokohle: 400g pro Baum	Längenwachstum: NPK: 7% Biokohle: 18% Durchmesser: NPK: 15% Biokohle: 17%

Tabelle 1: Studien zur Wirkung von Biokohle auf Baumwachstum (Fortsetzung)

Publikation	Baumart	Klimazone	Versuchsdesign	Mittlerer Zuwachs im Vergleich zur Kontrolle
Budi, Setyaningsih. 2013	Melia azedarach (Zedrachbaum)	Tropen	Typ: Topfversuch Dauer: 3 Monate Applikation: 5, 10 und 15% Biokohle; Biokohle (gleiche Mengen) + Mykorrhiza	Längenwachstum: Applikation 15%: + 39% Applikation 15% mit Mykorrhiza: + 90%
Fagbenro et al. 2013	Moringa oleifera (Meerretichbaum)	Tropen	Typ: Topfversuch Dauer: 3 Monate Applikation: 5, 10 und 20 t/ha Biokohle; 22,5; 45 und 90 kg/ha NPK – Dünger; Biokohle + NPK Dünger in allen oben genannten Mengen	Längenwachstum: 20 t/ha Biokohle: + 32% 90 kg/ha Mineraldünger: + 32% Gesamtbiomasse: 20 t/ha Biokohle: + 220% 90 kg/ha Mineraldünger: + 133%
Ghosh et al. 2014	Samanea saman (Regenbaum), Suregada multiflora	Tropen	Typ: Topfversuch Dauer: 6 Monate Applikation: 25% Biokohle; 25% Kompost sowie Boden-Kompost-Biokohle-Gemische in relativen Verhältnissen 3:1 bzw. 3:1:1 und 3:2:1	Samanea saman: Längenwachstum: Boden+Biokohle (3:1:1): keine Wirkung Boden + Kompost (3:1): + 43% Boden + Kompost + Biokohle (3:1:1): + 14% Durchmesser: Boden+Biokohle (3:1:1): + 39% Boden + Kompost (3:1): + 27% Boden + Kompost + Biokohle (3:1:1): + 29%

Die durchgeführten Studien können insgesamt in sechs Gruppen unterteilt werden:

- 1) Studien, die sich mit der Wirkung von organischer Kohle, als Produkt der Waldbrände, befassen. Dazu gehören die Studien von Wardle et al. (1998), Makoto et al. (2010) und Pluchon et al. (2014).
- 2) Die Studien von Mikan und Abrams (1996) sowie von Chidumayo (1994) befassen sich mit der Wirkung von Köhlerböden.
- 3) Mit dem gezielten Einsatz von Biokohle befassen sich die Arbeiten von Budi und Setyaningsih (2013), Siregar (2007), Heiskanen et al. (2013) und Scharenbroch et al. (2013).
- 4) Mit dem Einsatz von Biokohle in Kombination mit mineralischen Düngern befassen sich die Arbeiten von Fagbenro et al. (2013) McElligott (2011), Santalla et al. (2011), Headlee et al. (2013), Robertson et al. (2012), Reverchon et al. (2014), Hoshi (2001) und Sovu et al. (2012).
- 5) Die Kombination von Biokohle und Kompost wird in den Studien von Eyles et al. (2013) und Ghosh et al. (2014) untersucht.
- 6) Außerdem befassen sich folgende der genannten Studien mit dem Zusammenspiel von Biokohle und Mykorrhiza: Budi und Setyaningsih (2013), Makoto et al. (2010) und Robertson et al. (2012).

Bei den unter Punkt 1 aufgeführten Studien der orientiert man sich auf die Erfahrungswerte für die bei Waldbrand entstehenden Holzkohlemengen. Diese Mengen sind vergleichsweise gering (vgl. Tab. 1). Die deutlich höhere Menge in der Arbeit von Makoto et al. (2010) ist dadurch zu erklären, dass hier eine mehrjährige Holzkohleablagerung durch fortlaufende Waldbrandregime simuliert wird. Diese Studie unterscheidet sich auch in der Hinsicht von anderen Studien, dass hier unterschiedliche Verteilungsmuster der Biokohle in Böden untersucht werden (siehe Tab. 1).

Die Ergebnisse von Wardle et al. (1998) zeigen, dass nur auf dem phenolhaltigen Boden und nur bei dem Baumart *Betula pendula* (Hänge-Birke) ein signifikanter Unterschied im Wachstum besteht. Auf phenolhaltigem Boden wurde auch ein deutlich höherer Stickstoffgehalt in der Biomasse festgestellt. Diese Tatsache kann auf die Absorption von Phenolen durch Holzkohle zurückgeführt werden. Diese Beobachtung wird durch die Arbeiten von Berglund et al. (2004) sowie DeLuca et al. (2002), die sich mit Phenolakkumulation und Stickstoffmineralisierung im Boden beschäftigen, unterstützt. Phenole können Stickstoff binden und damit seine Verfügbarkeit mindern.

Da Birke weniger gut Stickstoffmangel verkraftet, ist die Wirkung auch sehr viel ausgeprägter als bei Fichte. Außerdem wurde in der Studie von Wardle et al. (1998) festgestellt, dass Farne und Moose eine positive Reaktion auf Biokohlezusatz zeigen, was auf ein verbessertes Stickstoffangebot zurückzuführen ist. Diese Reaktion ist, im Gegensatz zu den Bäumen, auch auf Böden aus anderer Standorte, deutlich zu sehen. Die Ergebnisse der Arbeit von Pluchon et al. (2014) zeigten, dass die Holzkohle in verschiedenen Fällen entweder eine neutrale oder eine positive Wirkung auf Baumwachstum hatte. Dabei konnte man auch Unterschiede im Wachstumsverhalten zwischen den Varianten mit Holzkohle aus unterschiedlichen Inputstoffen feststellen. Die Laubbäume zeigten insgesamt eine höhere Empfindlichkeit gegenüber dem Biokohle Zusatz als die Nadelbäume (vgl. Tab 1).

In der Arbeit von Makoto et al. (2010) werden die besten Ergebnisse in der Variante, in der Biokohle als durchgehender Schicht im Wurzelraum eingebracht wurde, erzielt (MID vgl. Tab. 1). Diese Tatsache ist dadurch zu erklären, dass hierbei die größte Kontaktfläche zwischen Wurzeln und Biokohle bestand. Diese Beobachtung wird dadurch unterstützt, dass auch die größte Zunahme an Wurzelfläche in dieser Studie beobachtet wurde.

Die Wirkung von Ectomykorrhiza (ECM) wurde in der Studie von Makoto et al. (2010) anhand von im Boden natürlich vorkommenden Spezies untersucht. Dafür wurden die Kontrollvarianten (ohne ECM) sterilisiert (Autoklave, 105°C) und mit nicht sterilisierten Varianten verglichen. Bezüglich des Baumwachstums zeigt die Kombination von ECM und Biokohle eine positive kumulative Wirkung (vgl. Tab 1). Die besten Ergebnisse bezüglich der ECM Vermehrung wurden in den Varianten MID und MIX (siehe Tab. 1) erzielt. Auch hier ist davon auszugehen, dass die größere Kontaktfläche der Biokohle eine entscheidende Rolle spielt.

In der Arbeit von Robertson et al. (2012) wurde dagegen die Zusammensetzung der Spezies in verschiedenen Varianten als Kriterium für ECM Entwicklung untersucht. Hier zeigte sich, dass die meisten ECM Gruppen keine Veränderung in ihrem Anteil bei Biokohle Zusatz erfahren haben. Einige spezielle Gruppen zeigten Veränderungen in ihren Anteilen, woraus sich jedoch keine eindeutige Tendenz ableiten lässt.

In der Studie von Budi und Setyaningsih (2013) wurde Arbuskulare Mykorrhiza (AFM) in die Wurzelzone beim Einsetzen in Pflanzlöcher geimpft. Die Ergebnisse zeigen, dass es zunächst eine Zunahme an AFM beim Zusatz von Biokohle (Varianten 5 und

10%), danach aber eine Abnahme (bei 15% Biokohle) gibt. Dies ist möglicherweise mit dem Nährstoffabsorption durch Biokohle zu erklären.

Unterschiedliche Versuche zur Wirkung von Biokohle in Kombination mit Mykorrhiza auf Baumwachstum wurden seit Mitte der 80er Jahre von Ogawa durchgeführt. Dabei wurde Biokohle mit einem geringen Zusatz an Dünger und Mykorrhiza in den Wurzelraum der Bäume eingebracht. Diese Methode zeigte positive Wirkung sowohl auf Wachstum und Vitalität der jungen Bäume als auch auf besonders alte Bäume deren Vitalität wiederhergestellt werden konnte. Leider sind diese Versuche nicht genügend dokumentiert (nur vereinzelt Berichte in japanischer Sprache), so dass hier kein Bezug auf diese Arbeiten gemacht werden kann. Die zusammenfassenden qualitativen Aussagen zu den Versuchen sind in der Arbeit von Ogawa und Okimori (1998) enthalten.

Beim Köhlerboden (Studien der Gruppe 2) handelt es sich um ein sehr stark kohlehaltiges Material, das über mehrere Jahrzehnte bzw. Jahrhunderte entstand und bereits einen ausgeprägten anthropogenen Boden bildet. Mikan und Abrams (1996) haben Topfversuche mit Köhlerboden aus den Köhlerstandorten, die sie in einer vorangegangenen Studie (Mikan und Abrams 1995) untersucht haben, durchgeführt. Bei der ersten Studie von Mikan und Abrams (1995) wurden umfangreiche Vegetationsaufnahmen auf einer großen Anzahl von Köhlerstandorten in Pennsylvania gemacht. Sie haben deutliche Unterschiede in der Vegetation auf Testflächen innerhalb und außerhalb der Köhlerstandorte festgestellt. Die Dichte der Bäume war, sowohl gesamt betrachtet als auch nach Altersklassen unterteilt, außerhalb höher als innerhalb der Köhlerstandorte. Auch die Fläche der Baumkronen und die Anzahl der Sträucher waren außerhalb der Köhlerstandorte höher. Dagegen war die Anzahl der Baumsämlinge und der Bodenvegetation auf den Köhlerflächen höher. Die Diversität (Shannon Index) war für Bäume und Sträucher außerhalb der Köhlerflächen höher und für die Baumsämlinge etwa gleich.

Die Ergebnisse einer solchen Vegetationsaufnahme sind aber nur mit Vorsicht zu interpretieren, da die Wachstumsverhältnisse der Bäume auf Köhlerstandorten durch die Köhlerei maßgeblich geprägt wurden.

Im anschließenden Topfversuch (Mikan und Abrams 1996) konnte man sowohl ein besseres Längenwachstum als auch größere Blattflächen bei den Bäumen auf Kontrollböden als auf Köhlerböden messen. Bei einem höheren Köhlerbodenanteil im Bodengemisch nahmen auch Längenwachstum und Anzahl der Blätter sowie

Blattfläche ab. Das Verhältnis von Wurzeln zu den Oberflächenteilen der Pflanze (Root-Shoot-Ratio) nahm erst ab (25, 50% - Köhlerboden) und dann wieder zu (bei 75, 100% Köhlerboden).

Im Versuch von Chidumayo (1994) wurden die Bäume innerhalb und außerhalb der stark kohleangereicherten, anthropogen geprägten Standorten gepflanzt. Die Anzahl der Sämlinge war bei allen Sämlingsarten auf dem Köhlerboden deutlich höher (auf dem natürlichen Boden kamen in vielen Fällen gar keine Sämlinge auf). Die zwei, auf Wachstum untersuchte Baumarten, zeigten gegensätzliche Tendenzen bezüglich Biokohle Wirkung (vgl. Tab. 1).

In der Studie von Budi und Setyaningsih (2013) (Studien der Gruppe 3) wurde eine signifikante Wachstumssteigerung bei reiner Biokohle Zugabe nur bei 15% Biokohle-Gehalt erzielt (Tab.1). Während die reine Mykorrhiza Zugabe nur im Falle einer der beiden ECM Gruppen zu einer Wachstumssteigerung bei den Bäumen führt, ist bereits bei Kombination von ECM und 5% Biokohle eine signifikante und starke Wachstumssteigerung in beiden ECM Varianten zu beobachten. Bei 15% Biokohle-Gehalt war aber die Wachstumssteigerung der Bäume bei beiden ECM Gruppen aber wieder geringer, dies korreliert mit einer Abnahme der arbuskularen Mykorrhiza. Damit war insgesamt der Biokohleanteil von 10 Vol.-% optimal.

Die Zugabe von Biokohle resultierte in der Studie von Siregar (2007) in einer deutlichen Steigerung des Längen- und Dickenwachstums der beiden untersuchten Baumarten (vgl. Tab 1.). Allerdings, während die Zunahme des Biokohleanteils von 5 hin zu 20% bei der Magnolie sich in der kontinuierlichen Wachstumssteigerung auswirkte, blieb die Wachstumssteigerung bei der Akazie bei allen Biokohleanteilen etwa gleich. Die Wachstumssteigerung konnte durch die Zunahme der pflanzenverfügbaren Nährstoffe durch die Biokohle Zugabe erklärt werden.

In der Arbeit von Heiskanen et al. (2013) konnte man keine wachstumssteigernde aber auch keine wachstumshemmende Wirkung von Biokohle feststellen, obwohl man hier auch Varianten mit bis zu 60 Vol.-% eingesetzt hat. Dem möglichen Entzug vom Stickstoff durch Biokohle, könnte hier die verbesserte Nitrifikation infolge der oben beschriebenen Prozesse (Wardle et al. 1998) entgegenwirken.

Die Studie von Scharenbroch et al. (2013) untersuchte eine ganze Reihe von Materialien, die als Dünger bzw. Bodenverbesserer im Hinblick auf die Pflanzung von Stadtbäumen verwendet werden können. Neben Biokohle wurden hier Holzschnitzel, Kompost, Mineraldünger und, in fester Form vorliegender, Produkt aus Klärschlamm

getestet. Interessanterweise, konnte hier die Biokohle zu einer stärkeren Wachstumssteigerung als Mineraldünger und Kompost führen und wurde nur von Klärschlamm übertroffen (siehe Tab. 1). Die in der Studie durchgeführte Korrelationsanalyse zeigt, dass die Stickstoffverfügbarkeit und mikrobielle Aktivität entscheidende Faktoren für Baumwachstum waren. In der Variante mit Biokohle war der Faktor Stickstoffverfügbarkeit allerdings nicht entscheidend, der Mechanismus der zum besseren Baumwachstum führte, muss hier also ein anderer sein.

Auch in der Arbeit von Fagbenro et al. (2013) (Studien der Gruppe 4) konnte man eine positive Wirkung von Biokohle feststellen, die mit der Anwendung der üblichen Menge an Mineraldüngern vergleichbar ist (vgl. Tab. 1). In dieser Studie wurde auch die Kombination von Biokohle und Mineraldünger untersucht. Dabei wurden sämtliche Biokohlevarianten (5, 10 und 20 t/ha) mit sämtlichen Mineraldüngervarianten (0; 22,5; 45 und 90 kg/ha) kombiniert. Im Ergebnis zeigte sich, dass die wachstumssteigernden Wirkungen von Biokohle und Mineraldünger einander verstärken. So nimmt beispielsweise die Biomasse bei einer Anwendung von 90 kg/ha NPK-Dünger bei der Biokohlemenge von 20 t/ha um 43% gegenüber der Variante mit 10 t/ha Biokohle und um 52% gegenüber der Variante mit 5 t/ha Biokohle zu.

Der Vergleich zwischen Biokohle und Mineraldünger Anwendung wurde im Feldversuch von Sovu et al. (2012) durchgeführt. In dieser Studie wurde eine große Anzahl an tropischen Baumarten in entsprechenden Varianten getestet. Die Angaben in Tabelle 1 beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte für einzelne Varianten über die Gesamtheit der untersuchten Arten. Auch hier bewirkt die Biokohle vergleichbares oder sogar stärkeres Wachstum als NPK-Dünger (vgl. Tab 1).

In der Arbeit von Headlee et al. (2014) wurde ein möglicher Einsatz von Biokohle als Torfersatz und als Ersatz für Vermiculite, die bei Pflanzenzucht in Gewächshäusern eingesetzt werden, getestet. Dabei wurde die Wirkung von Biokohle ohne und mit zusätzlicher Mineraldüngung untersucht. Vermiculite und Biokohle wurden in gleichen Mengen (siehe Tab. 1) dem Torf beigemischt. Die Ergebnisse zeigten, dass es keine größeren Unterschiede zwischen den Varianten gab. Die Vermiculite und Biokohle Variante zeigten eine leicht höhere Biomasse als reiner Torf, allerdings erst nach der Mineraldünger Anwendung.

McElligott (2011) konnte in ihrer Studie keine signifikante Veränderung der Biomasse von Pappeln bei Biokohle Anwendung gegenüber der Kontrolle feststellen. Allerdings fiel der Stickstoffgehalt in den Blättern der Biokohle-Varianten signifikant (um 19 bzw.

24%), was auf Stickstoff-Immobilisierung hindeutet. Die Kombination von Biokohle und Mineraldünger führte aber bei einer der untersuchten Ausgangsböden (es wurden Varianten mit zwei unterschiedlichen Waldböden verwendet) zu einer signifikanten Steigerung der Gesamtbiomasse (vgl. Tab 1).

In der Arbeit von Robertson et al (2012) wurde eine wachstumsfördernde Wirkung sowohl von Biokohle allein, als auch in Kombination mit Mineraldünger, festgestellt (vgl. Tab 1). Dabei bewirkte der Mineraldünger alleine, keine signifikante Veränderung. Es wurde keine Veränderung bei der Großteil der ECM-Gruppen in verschiedenen Varianten beobachtet. Die ECM Gruppen, die tatsächlich signifikante Veränderung erfahren haben, könnten die Wachstumssteigerung in einzelnen Varianten bewirken, dies kann aber nur vermutet werden.

Die Arbeit von Reverchon et al. (2014) befasste sich mit einem potentiellen Einsatz von Biokohle auf den durch Bergbau devastierten Flächen. Neben Varianten mit reiner Biokohle wurden auch Varianten mit Biokohle, die in einer nährstoffreichen Lösung gesättigt wurde, eingesetzt. Diese Varianten mit „aufgeladener“ Biokohle zeigten dann auch höheres Längenwachstum und vermehrte Blattmasse-Zuwächse als Varianten mit reiner Biokohle (siehe Tab. 1).

Die Kombination von Biokohle und Mineraldünger wurde auch in dem Feldversuch von Hoshi (2001) durchgeführt. Der Einsatz von Biokohle zeigte eine positive Wirkung auf das Baumwachstum (siehe Tab. 1). Zwischen den einzelnen Biokohle- Varianten gab es keine größeren Unterschiede. Etwas höhere Zuwächse konnte man mit dem Einsatz von organischem Dünger, dessen Zusammensetzung nicht genauer erläutert ist, erreichen.

Die bisher genannten Studien beschäftigten sich mit der Kombination von Biokohle und mineralischen Düngern. Das Zusammenspiel mit organischen Dünger (Studien der Gruppe 5) wurde bis jetzt nur selten untersucht.

Eine solche Studie ist die von Ghosh et al. (2014). Die in der Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse, beziehen sich auf den Regenbaum (*Samanea saman*), da der insgesamt deutlich größeren Längen- und Volumenzuwachs von den beiden untersuchten Baumarten aufwies. Sowohl die Zugabe von Biokohle als auch von Kompost bewirkten eine Wachstumssteigerung bei den Bäumen (vgl. Tab 1.), allerdings auf unterschiedliche Weise: während bei der Zugabe von Biokohle keine Steigerung des Längenwachstums und dafür stärkerer Volumenzuwachs einsetzte, konnte bei der Kompost-Zugabe die Wachstumssteigerung in beide Richtungen mit einem besser

ausgeprägten Längenwachstum beobachtet werden. Bei gleichzeitiger Zugabe von Kompost und Biokohle konnte ein deutlich niedrigeres Längenwachstum als bei reiner Kompost-Variante und ein mit reiner Kompost-Variante vergleichbarer Volumenzuwachs bei Bäumen erzielt werden.

Ghosh et al. (2014) haben auch den Nährstoffgehalt in den Blättern erfasst. Bei *Samanea saman* betrug der Anstieg des Stickstoffgehaltes in den Blättern 166% bei der Biokohle Variante; 131% bei der Kompost Variante und 100% bei der Biokohle + Kompost Variante gegenüber der Kontrollvariante.

Die Kombination von Biokohle und Kompost wurde auch in der Arbeit von Eyles et al. (2013) untersucht. Hier zeigt sich, dass diese Kombination vorteilhaft für die Entwicklung der Apfelfruchte sein kann, obwohl die Unterschiede geringfügig sind (vgl. Tab. 1).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass nur sieben Studien für die Standorte in den gemäßigten Breiten vorliegen. Davon wurde in nur einer Studie (von Santalla et al. 2011) ein längerfristiger Feldversuch durchgeführt. In dieser Studie wurde allerdings nicht reine Biokohle sondern kohlehaltige Holzasche verwendet. Von den anderen sechs Studien gingen vier in Topfversuchen nicht über fünf Monate hinaus. Die beiden anderen Topfversuche von Scharenbroch et al. (2013) und Eyles et al. (2013) dauerten eineinhalb- bzw. drei Jahre. Die Studie von Eyles et al. (2013) hat sich auf die Beobachtung der Fruchtentwicklung bei Obstbäumen beschränkt.

In der Arbeit von Scharenbroch et al. (2013) wurde auch die Nährstoffverfügbarkeit und Auswaschung erfasst, damit ist dies die einzige Langzeitstudie, die solche Daten liefert.

Wenn man die Studien für boreale Standorte, bei denen Wachstum von Kiefer und Fichte erfasst wurde (insgesamt vier Studien), hinzunimmt, stellt man fest, dass keine von diesen Topfversuchen über 4 Monate hinausging.

Nur zwei Studien befassten sich mit der Wirkung von Biokohle-Kompost-Gemischen (Eyles et al. 201) und Ghosh et al. 2014). Wobei die Studie von Eyles et al. (2013) sich nur auf Fruchtentwicklung bezieht und die Studie von Ghosh et al. (2014) sich mit tropischen Baumarten beschäftigt.

Bis jetzt existieren keine Studien sowohl für die Windwurfflächen in Mitteleuropa als auch für die Weihnachtsbaumkulturen.

3. Versuchsbeschreibung

3.1. Biokohlesubstrate

Im Rahmen des zu Grunde liegenden Forschungsvorhabens wurden zwei Biokohlesubstrate: BKS15 und BKS30 eingesetzt. Tabelle 2 zeigt die stoffliche Zusammensetzung dieser BKS (Angaben: Areal GmbH (2011)).

Tabelle 2: Mischungsverhältnisse Biokohlesubstrate.

Die Prozentangaben beziehen sich bei Grünschnitt und Biokohle auf die Festsubstanz, bei der Gärreste dagegen auf das Gesamtsubstrat

	Fest				Flüssig		Zusatzstoff
	Grünschnitt		Biokohle		Gärreste		Gestein
	Liter	%	Liter	%	Liter	%	g
BKS15	25,5	85	4,5	15	9	30	450
BKS30	21	70	9	30	9	30	450

Die Substrate durchliefen folgende Produktionsphasen (Angaben: Areal GmbH (2011)):

1. Aufbereitung und Vermischung der Inputstoffe:
 - Sieben von Grünschnitt auf < 40 mm Ø
 - Sieben von Gärresten auf < 3 mm Ø
 - Vermischung Grundsubstrat (Grünschnitt/Biokohle) und Gärreste
2. Intensivrotte
3. Fermentation: Applikation eines Mikrobencocktails (Effektive Mikroorganismen)
4. Trocknung und finale Aufbereitung (Sieben auf < 15 mm Ø)

Die Charakteristiken von BKS bezüglich der Nährstoffwerte sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Charakteristiken der Böden von Versuchsstandorten und von Biokohlesubstraten

	<i>pH</i>	<i>C-org</i>	<i>N-ges</i>	<i>Pcal</i>	<i>Kcal</i>	<i>KAK</i>
		%	%	mg/kg	mg/kg	mmol/kg
<i>Waldboden</i>	3,7	7,8	4,3	9,5	60	24
<i>W-kulturen</i>	5,6	2,7	2,8	70	189	49
<i>BKS15</i>	7,1	26,4	1,32	725	1925	319
<i>BKS30</i>	7,1	34,8	1,14	662	1192	345

Man sieht, dass die BKS sich in ihren Eigenschaften deutlich von dem Waldboden unterscheiden. Aber auch der Boden der Freilandversuchsfläche Weihnachtsbaumkulturen unterscheidet sich erheblich von dem ursprünglichen Waldboden. Dies ist durch einen langjährigen Kulturanbau auf dem Standort zu erklären.

3.2. Freilandversuche

In den Freilandversuchen wurden im Untersuchungszeitraum (2011-2015) das Wachstum und Vitalität von Bäumen erfasst. Die Erfassung erfolgte jährlich immer Anfang September. Auf der Versuchsfläche von Weihnachtsbaumkulturen wurden zusätzlich Bodenproben entnommen und die Untersuchungen von Bodenparametern und Nährstoffen (vgl. Kap. 3.3.2) im halbjährlichen Abstand von sechs Monaten, jeweils Anfang April und Anfang September vorgenommen.

3.2.1. Versuchsanlage

Es wurde eine ausgedehnte Windwurffläche in der Nähe des Dorfes Schanze und des „Kyrill-Pfades“, wo der Naturverjüngung zu Beobachtungszwecken Freiraum gelassen wurde (Abb. 2), ausgewählt.



Abbildung 2: Windwurffläche. Naturverjüngung. In unmittelbarer Nähe der Versuchsfläche

Im Gegensatz zu den meisten Windwurfflächen im Hochsauerlandkreis, die sich an z.T. sehr steilen Hängen befinden, liegt diese Fläche auf einem Plateau. Dies war wichtig um die Versuchspartellen möglichst gleichmäßig einzurichten. Die Fläche wurde im Vorfeld von den Förstern maschinell geräumt, so dass die Holzreste zerhackt und in dieser Form auf der Fläche liegengelassen wurden (Abb. 2 links). In Absprache mit den Förstern kristallisierte sich heraus, dass eine punktuelle Ausbringung des Substrats im Pflanzlochverfahren die einzige durchführbare Variante darstellt, da die Unebenheiten, sogar bei einer relativ günstigen Plateau-Fläche, die gleichmäßige

flächenhafte Ausbringung stark erschweren. Dabei werden die Pflanzlöcher maschinell gebohrt und mit dem Substrat gefüllt (siehe Abb. 2 links).

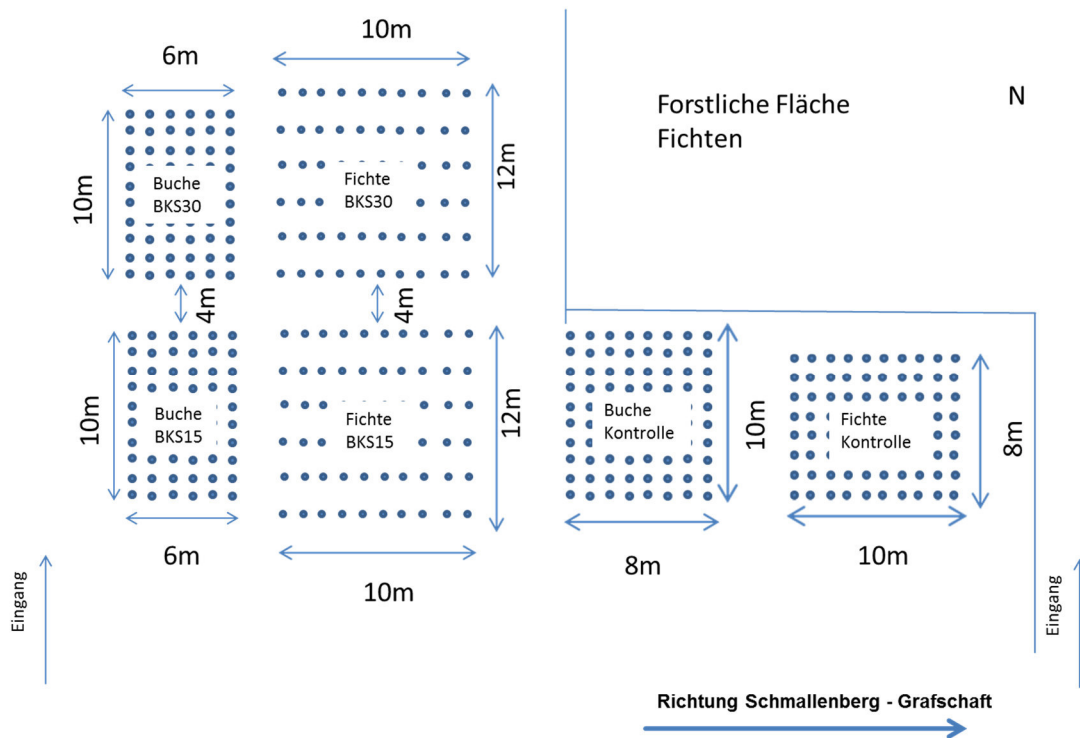


Abbildung 3: Versuchsaufbau Windwurffläche. Pflanzungsschema.

Eine flächenhafte Ausbringung von Biokohlesubstraten auf einer Waldfläche stellt grundsätzlich ein Problem dar, da sie mit einer mechanischen Zerstörung der Bodenaggregate im Oberboden verbunden ist. Eine Alternative ist die oberflächliche Ausbringung von Biokohlesubstraten ohne Einarbeitung des Materials. Diese ist jedoch nicht effektiv, da das Material nicht in den Wurzelbereich gelangt (vgl. Kap 2) und durch viele Unebenheiten keine regelmäßige Verteilung des Materials gewährleistet ist.

Für den Freilandversuch auf Windwurffläche wurden die Baumarten *Picea abies* (Gemeine Fichte) und *Fagus sylvatica* (Rotbuche) ausgewählt. Dies entspricht dem Ziel, Mischbestände in staatlichen Forsten aufzubauen (vgl. Kapitel 1). Dabei betrachtet die NRW Forstverwaltung die Rotbuche als wichtigste heimische Mischbaumart zum Umbau von Fichten-Reinbeständen (vgl. Landesbetrieb Wald und Forst NRW 2007).

Die Menge des ausgebrachten Substrats entspricht einer Menge von 30 Tonnen pro Hektar bei einer flächenhaften Ausbringung. Dies entspricht einem gesetzlich erlaubten Grenzwert nach der Bioabfallverordnung (BioAbfV §6).



Abbildung 4: Freilandversuchsflächen. Links: Pflanzlochverfahren auf Windwurffläche Schanze. Rechts: Maschinelle Ausbringung auf Weihnachtsbaumanbaufläche

Es wurden Parzellen mit BKS15 und BKS30 sowie Kontrollparzellen eingerichtet. Auf den beiden Kontrollparzellen wurden 80 und auf den weiteren Parzellen jeweils 60 Bäume gepflanzt (Abb. 3). Die Größe und Form der Parzellen hat sich an das Pflanzschema des Forstamtes orientiert.

Im Vorfeld wurden eine Probenahme und Analyse des Bodens auf der Fläche zur Prüfung der Homogenität durchgeführt. Die Beprobung erfolgte an insgesamt 24 Punkten regelmäßig über die gesamte Fläche verteilt. Insgesamt wurde eine hohe Variabilität der Werte beobachtet.

Der Waldboden unterscheidet sich durch relativ geringe Gehalte an Mineralnährstoffen deutlich von den nährstoffreichen BKS Substraten (siehe Tab. 3).

Für die Einrichtung der Versuchspartellen Weihnachtsbaumkulturen wurde eine aktuell von einem Forstbetrieb genutzte Weihnachtsbaumanbaufläche ausgewählt. Das Material wurde hier flächig in der Menge von 30 Tonnen pro Hektar ausgebracht und maschinell eingearbeitet (siehe Abb. 4 rechts).

Auch hier wurden neben der Kontrollvariante, Varianten mit BKS15 und BKS30 eingerichtet (Abb. 5).

Die Flächen wurden mit *Abies nordmanniana* (Nordmantanne) bepflanzt. Diese Baumart stellt heutzutage etwa 90% der in Deutschland produzierten Weihnachtsbäume.

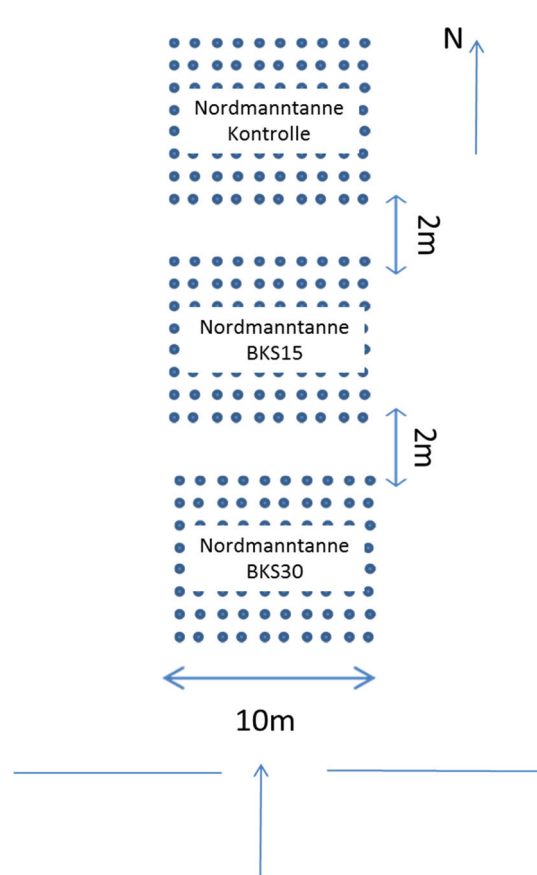


Abbildung 5: Versuchsaufbau Weihnachtsbaumkulturen. Pflanzungsschema

Die Bodenkennwerte auf Weihnachtsbaumanbauflächen unterscheiden sich infolge einer kontinuierlichen Kalkung und ständigen Nährstoffzufuhr deutlich von den Waldböden. Auch hier wurde im Vorfeld eine Beprobung und Analyse des Bodens durchgeführt (Tab. 3).

Die Probenahmen wurden im halbjährlichen Abstand durchgeführt. Aus Oberboden-Einzelproben (0-15 cm) wurden Mischproben gebildet und auf gleiche Parameter wie im Lysimeterversuch analysiert (Kapitel 3.3.2).

3.2.2. Erfassung von Wachstum und Vitalität

Naturgemäß brauchen Bäume eine bestimmte Zeit damit ihre Wurzeln sich nach der Pflanzung in einer neuen Umgebung adaptieren und festsetzen können. Erst nachdem dieser Prozess abgeschlossen ist, setzt ein merkbares Wachstum der Bäume ein. Dazu kommt, dass die Bäume in einem Feldversuch natürlichen Faktoren wie Trocken-

und Froststress sowie Konkurrenz mit aufkommender Bodenvegetation ausgesetzt sind. Dies ist aus der Sicht der Versuchsdurchführung schwierig, so mussten mehrere ausgefallene Bäume (vor allem Buchen) nach Frostschäden in Anfangsphasen des Versuchs ausgetauscht werden, außerdem ist die Beseitigung der stark aufkommenden Bodenvegetation nur begrenzt möglich (nur manuell, da die Bäume sonst beschädigt oder komplett abgeschnitten werden können). Mit einer z.T. bedeutenden Anzahl an Ausfällen ist unter diesen Umständen zu rechnen. Andererseits erlauben die Feldversuche eine möglichst realitätsnahe Betrachtung, da die Bäume all den oben genannten Faktoren in einer möglichen praktischen Anwendung ausgesetzt sind, was für dieses Projekt ausschlaggebend ist.

Bei den Weihnachtsbaumkulturen ist der Faktor Konkurrenz mit der Bodenvegetation nicht so bedeutend, da die aufkommende Vegetation chemisch bekämpft wird. Die Adaption der Wurzel erfolgt auch schneller, da die Bäume maschinell gesetzt werden. Dem Trocken- und Froststress sind die Bäume dagegen verstärkt ausgesetzt, da die schützende Bodenvegetation nur in geringer Masse vorhanden ist. Dies führte dazu, dass die Terminaltriebe der Nordmantannen im ersten Untersuchungsjahr infolge von Frostschäden z.T. deutliche Schäden zeigten. Sie konnten sich aber im weiteren Verlauf revitalisieren. Als Folge bildeten mehrere Bäume Doppelspitzen bzw. keinen Terminaltrieb, die Ausfälle blieben weitgehend aus.

In Abbildung 6 ist die Zahl der auf der Aufforstungsfläche ausgefallenen Bäume im % zu Gesamtanzahl dargestellt. Zunächst sieht man, dass die Ausfälle z.T. deutlich (bis 35%) sind. Bei der Rotbuche betragen die Verluste 35% in der Kontrollvariante und in der BKS15-Variante, hier waren am Ende noch 52 Bäume bei der Kontrollvariante und 39 Bäume bei BKS15-Variante erfassbar. Bei BKS30-Variante betragen die Verluste 13% somit waren noch 52 Bäume vorhanden.

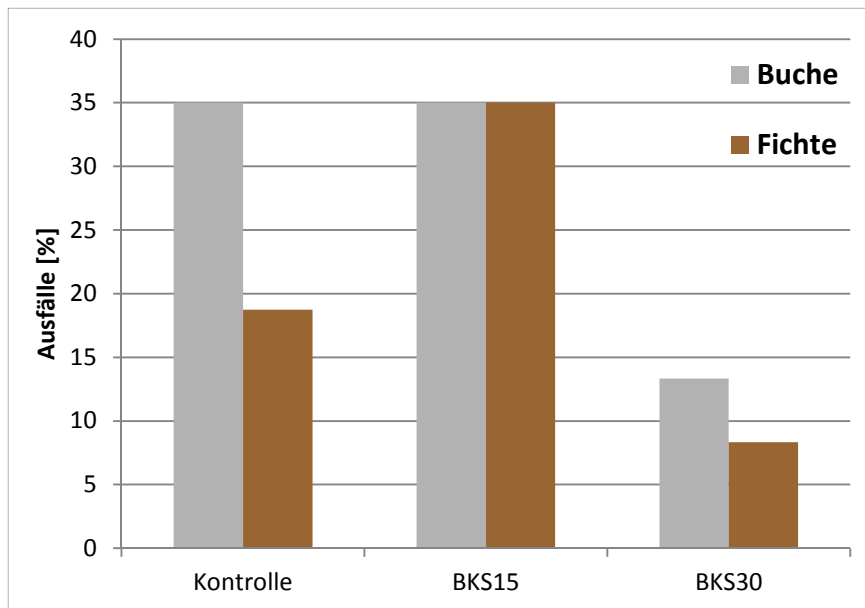


Abbildung 6: Ausfälle an Bäumen in verschiedenen Parzellen auf der Versuchsfäche. Windwurffläche

Bei der Gemeinen Fichte betragen die Verluste 19% in der Kontrollvariante, 35% in der BKS15-Variante sowie 8% in der BKS30-Variante. Somit waren noch 65 Bäume der Kontrollvariante, 39 Bäume in der BKS15-Variante und 55 Bäume in der BKS30-Variante erfassbar.

Für die statistische Auswertung konnten allerdings nur Bäume mit ausreichender Anzahl an Blättern (>20) bzw. einem nennenswerten Zuwachs des Terminaltriebs verwendet werden. Bei der Rotbuche waren es 36 Bäume in der Kontrollvariante, 29 Bäume in der BKS15-Variante und 41 Bäume in der BKS30-Variante.

Bei der Gemeinen Fichte waren es 58 Bäume bei der Kontrollvariante, 32 Bäume in der BKS15-Variante und 47 Bäume in der BKS30-Variante.

Somit liegt der Anteil der vorhandenen Bäume, die durch ein zu geringes Wachstum nicht erfasst werden konnten, bei der Rotbuche bei 31% in der Kontrollvariante, bei 26% in der BKS15-Variante und bei 21% in der BKS30-Variante.

Bei der Gemeinen Fichte ist der entsprechende Anteil wie folgt: 11% in der Kontrollvariante, 18% in der BKS15-Variante und 14% in der BKS30-Variante.

Bei den Nordmantannen auf der Weihnachtsbaumanbaufläche wurden pro Variante jeweils 80 Bäume erfasst.

Bei der Gemeinen Fichte sowie bei der Nordmantanne wurde der Zuwachs des Terminaltriebs jeweils am Ende der Vegetationsperiode im Herbst erfasst.

Als weitere Parameter kamen die Zuwächse der Seitentriebe sowie das Nadelgewicht in Betracht. Wegen der noch insgesamt kleinen Größe der Bäume war der Parameter 1000-Nadelgewicht (vgl. Handbuch Forstliche Analytik. Teil B) aber zum einen nicht repräsentativ und konnte zum anderen bei seiner Erfassung zu negativen Folgen für die Baumentwicklung führen. Aus diesem Grunde wurde dieser Parameter nur einmal, zur Abschlussphase der Untersuchung (Jahr 2015) erfasst. Dazu wurden in jeder Parzelle mit Nadelbäumen (Windwurffläche und Weihnachtsbaumkultur) von jeweils 30 Bäumen je ein Seitentrieb entnommen, die Nadeln entfernt und aus den Nadeln aller Seitentriebe eine Mischprobe gebildet. Aus diesen Mischproben wurden in dreifacher Wiederholung je 50 Nadeln entnommen, getrocknet, das Trockengewicht bestimmt und auf ein 1000-Nadelgewicht hochgerechnet.

Der Parameter Zuwachs der Seitentriebe wurde in Form der mittleren Länge der Seitentriebe 1. Ordnung (jüngste vom Terminaltrieb ausgehende Seitentriebe) erfasst. Dieser stimmte allerdings in allen Fällen mit dem Parameter Zuwachs des Terminaltriebs im Hinblick auf die Wachstumstendenz überein und wird hier im Weiteren nicht dargestellt. Die ersten messbaren Zuwächse konnten 2013 erfasst werden.

Bei der Rotbuche war die Erfassung des Längenwachstums durch die, zu diesem Zeitpunkt noch geringen Zuwächse und das Fehlen einer ausgeprägten Wachstumsachse (z.B. keine Terminaltriebe) nicht sinnvoll. Stattdessen konnte die Vitalität in Form des Kronenzustandes erfasst werden. Dies konnte aber erst 2014 mit dem Einsetzen einer verstärkten Kronenentwicklung eindeutig erfasst werden.

Dafür wurden Stichproben von 10 – 20 Blättern von einem Baum jeweils zum Herbsttermin, im September entnommen. Für diese Stichproben wurden Parameter mittlere Blattmasse, mittlere Blattfläche und mittlerer Chlorophyllgehalt gemessen. Außerdem wurde für jeden Baum die Anzahl der Blätter bestimmt. Durch das Multiplizieren von mittlerer Blattmasse und Anzahl der Blätter wurde der Parameter projizierte Blattmasse pro Baum abgeleitet. Das Multiplizieren von mittlerer Blattfläche und mittlerem Chlorophyllgehalt ergab den Parameter projizierter Chlorophyllgehalt pro Baum.

Die Messung des Chlorophyllgehaltes erfolgte mit dem optischen Messgerät Chlorophyll Content Meter (CCM)-300 der Firma Optiscience. Im Gegensatz zu den üblichen Messgeräten, die auf Absorptionsprinzip basieren, nutzt das CCM-300 das

Verhältnis der reflektierten Wellen um den Chlorophyllgehalt zu bestimmen (siehe Abb. 7).

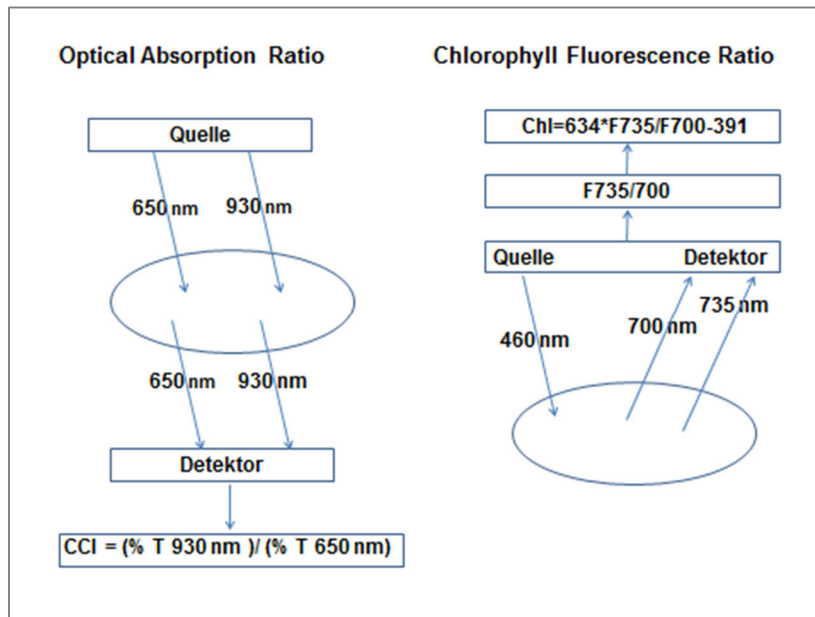


Abbildung 7: Messprinzip von CCM–300 im Vergleich zum klassischen Absorptionsmessgerät.
Quelle: Eigener Entwurf nach Gittelson (1999)

Das Prinzip der Messung beruht auf der Arbeit von Gitelson et al. (1999). Hierbei verwendet man das Verhältnis von Intensität der emittierten Wellen in 735 nm und 700 nm Wellenlänge. Diese Ratio steht im linearen Verhältnis zu den Chlorophyllgehalten von 41 bis 675 mg/m² (bei Absorptionsmessgerät liegt die Obergrenze bei etwa 300 mg/m²). Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,95.

Dieses Prinzip hat den Vorteil, dass beliebig kleine und löchrige Blattflächen gemessen werden können. Bei der Absorptionsmethode muss dagegen die Blattfläche den gesamten Sensorbereich lückenlos bedecken.

3.2.3 Statistische Auswertung

Grundsätzlich werden hier die Quantile bzw. der Median als Zentralwert verwendet, da dieser Robustheit gegenüber Ausreißern zeigt.

Die Daten werden zusätzlich in Form von Box-Plots dargestellt, um die Streuungsverhältnisse einer Messwertreihe graphisch zu verdeutlichen. In den Tabellen werden auch die 5% und 95% Quantile aufgenommen.

Da die Datensätze nicht normalverteilt sind, wurde zur Signifikanzprüfung der parameterfreie Mann-Whitney-U-Test (auch Wilcoxon-Rangsummentest genannt) anstelle des T-Tests für den paarweisen Vergleich angewendet. Bei diesem Test

werden die Messwerte zunächst aufsteigend sortiert und anschließend den Messwerten die Rangzahlen zugeordnet. Im nächsten Schritt werden die Rangsummen (Summe einzelner Rangzahlen) für die beiden Messreihen gebildet.

Daraus werden die Prüfgroßen U für die beiden Messreihen nachfolgender Formel berechnet:

$$U_{1,2} = n_1 \cdot n_2 + (n_{1,2} \cdot (n_{1,2} + 1) / 2) - R_{1,2} \quad (1)$$

wobei n – die Anzahl der Messwerte und R – die Rangsumme ist.

Als Prüfgroße wird der kleinere U-Wert mit dem kritischen U-Wert einer theoretischen Verteilung verglichen und daraus der P-Wert bestimmt.

Für das 1000-Nadelgewicht wurde der T-test (vgl. Kapitel 3.3.3) angewendet, weil die Datensätze normalverteilt sind.

Alle statistischen Berechnungen wurden mit Hilfe des WinStat Plugins für MS Excel der Firma Robert Fitch durchgeführt.

3.3. Lysimeterversuch

3.3.1 Versuchsanlage

Für den Lysimeterversuch wurden bereits vorhandene Kastenlysimeter des Fraunhofer Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie, mit einer Fläche von 1 m² und einer Tiefe von 70 cm eingesetzt. Die Lysimeter wurden im Vorfeld mit 10 cm Schotterschicht und anschließend mit 20 cm Sand gefüllt. Diese Schichten aus Sand und Schotter bilden zusammen die Drainageschicht für das Sickerwasser.

Die übrigen 40 cm entsprechen der Bodenmächtigkeit auf der Freilandversuchsfläche im Wald (Windwurffläche). Der Boden für die Lysimeter stammt aus der unmittelbaren Nähe der Versuchsfläche auf der Windwurffläche. Der Boden wurde schichtweise entnommen und entsprechend der Lagerung am Standort in die Lysimeter gefüllt, d.h. 15 cm mächtiger humoser Oberboden und 25 cm toniger Unterbodenhorizont.

Die Lysimeteranlage liegt direkt am Institutsgelände auf einem Berghang am Rande der Stadt, somit ist die Vergleichbarkeit mit der Windwurffläche gegeben. In jedem Lysimeter wurden jeweils vier Bäume (Gemeine Fichte) gepflanzt.

In den Lysimetern wurden die doppelten Mengen BKS (60 Tonnen/Hektar) für Untersuchungszwecke ausgebracht. Diese Aufwandmengen waren auf den Freilandversuchsflächen auf Grund gesetzlicher vorgeschriebener

Maximalausbringungsmengen nach Bioabfallverordnung (BioAbfV &6) nicht einsetzbar.

Die Probenahmen erfolgten halbjährlich jeweils Anfang April und Anfang September im Untersuchungszeitraum von 2011 bis 2015.

Die Probenahmetiefe betrug 15 cm. Dabei wurde aus mehreren Einzelproben eine Mischprobe gebildet, auf < 2mm gesiebt und analysiert.

Aus dem anfallenden Sickerwasser wurde im monatlichen Abstand oder nach Starkregenereignissen eine Mischprobe gebildet, mikrofiltriert und analysiert.

3.3.2 Untersuchte Parameter

Neben den grundlegenden Bodenparametern pH-Wert und Kationenaustauschkapazität (KAK) wurden die wichtigsten pflanzenverfügbaren Nährstoffe - Stickstoff (N_{min}), Phosphor (CAL), Kalium (CAL) und Mg ($CaCl_2$) - erfasst. Sie wurden entsprechend ihrer Bedeutung für das Pflanzen- bzw. Baumwachstum ausgewählt. Darüber hinaus wurde die biologische Aktivität in Form von Nitrifizierung (Potentielle Ammoniumoxidation), Basal- und substratinduzierter Atmung erfasst.

Die Analysen erfolgten in Anlehnung an folgende Normen:

pH-Wert:	DIN ISO 10390: 2005
KAK:	DIN ISO 11260: 1997
N_{min} :	DIN 19746: 2005
Phosphor und Kalium:	CAL-Extrakt nach VDLUFA
Magnesium:	$CaCl_2$ -Extrakt nach VDLUFA
Potentielle Ammoniumoxidation:	DIN ISO 15685: 2004
Mikrobielle Bodenatmung:	DIN EN ISO 16072: 2011

Die Messung des pflanzenverfügbaren Stickstoffs, Kaliums und der KAK erfolgte mittels Ionenchromatographie. Die Messung von Phosphor erfolgte mittels Photometer.

Auch die Analyse von Sickerwasser erfolgte mit Hilfe der Ionenchromatographie (IC System der Firma Metrohm).

Die einzelnen Extraktions- und Analysenmethoden werden im Kapitel 3.4 detailliert beschrieben.

3.3.3. Statistische Auswertung

Die Signifikanzen wurden mit Hilfe eines unabhängigen T-Tests, der die Werte im Falle einer Normalverteilung paarweise vergleicht, bestimmt.

Bei einem T-Test wird zunächst mit Hilfe eines Vortests (F-Test) bestimmt, ob die Varianzen zweier Stichproben sich signifikant unterscheiden. Falls diese sich nicht signifikant unterscheiden wird die Variante eines homogenen T-Tests durchgeführt.

Andernfalls wird ein heterogener T-Test durchgeführt.

Homogener T-Test:

Der empirische T-Wert wird nachfolgender Formel berechnet:

$$T_{\text{emp}} = (M_1 - M_2) / \sqrt{((S_1^2 + S_2^2) / n)} \quad (2)$$

Die Freiheitsgrade werden wie folgt berechnet:

$$FG = 2n - 2 \quad (3)$$

wobei M_1 und M_2 - die Mittelwerte, S_1 und S_2 – die Varianzen und n – der Anzahl der Messwerte sind.

T_{emp} wird anschließend mit dem, dem berechneten Freiheitsgrad entsprechenden theoretischen T-Wert verglichen und daraus der P-Wert bestimmt.

Beim heterogenen T-Test werden die Freiheitsgrade folgend berechnet:

$$FG = n - 1 + ((2n - 2) / (S_1^2 / S_2^2 + S_2^2 / S_1^2)) \quad (4)$$

Die übrigen Schritte erfolgen wie beim homogenen T-Test.

Auch hier wurden alle Berechnungen mit dem WinStat Programm der Firma Robert Fitch durchgeführt.

3.4 Labormethoden

3.4.1 Pflanzenverfügbare Phosphor und Kalium in CAL - Extraktion

Die Extraktion vom pflanzenverfügbaren Phosphor und Kalium erfolgt in einer CAL-Lösung. Die CAL-Stammlösung hat folgende Zusammensetzung:

- 1) 335 g Calciumlactat ($C_6H_{10}CaO_6 \cdot 5H_2O$) in 2L heißem Wasser gelöst
- 2) 197,5 g Calciumacetat ($Ca(CH_3COO)_2$) in 2L heißem Wasser gelöst

Diese Lösungen werden vereinigt 450 ml konzentrierter Essigsäure dazugegeben und auf 5L mit Wasser aufgefüllt.

Für die Extraktion wird 1L CAL-Stammlösung auf 5L aufgefüllt („Gebrauchslösung“).

Die Lösung enthält je 0,05 mol/l Calciumacetat und Calciumlactat sowie 0,3 mol/l Essigsäure.

Bei der Extraktion werden etwa 2,5 g Boden eingewogen und 50 ml CAL – Gebrauchslösung zugegeben. Die Proben werden anschließend etwa 2 Stunden geschüttelt und über Faltenfilter filtriert.

Für die Phosphor Bestimmung wird die photometrische Methode nach John (1970) angewendet. Dabei wird dem CAL-Extrakt eine Indikatorlösung („John-Lösung“) mit Ascorbinsäure zugesetzt, diese bewirkt eine Blaufärbung der Substanz. Die Intensität der Färbung entspricht dem Phosphor-Gehalt in der Probe.

Die „John-Lösung“ hat folgende Zusammensetzung:

- 1) 20 g Ammoniumheptamolybdat ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) in 300 ml Wasser gelöst
- 2) 125 ml konzentrierter Schwefelsäure (H_2SO_4) + 325ml Wasser
- 3) 0,274 g Kalium-Antimon (III)-Oxidtartrat ($\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) in 100 ml Wasser gelöst

Diese Lösungen werden vereinigt und auf 1 l Wasser aufgefüllt.

Die Lösung wird unter Dunkelheit im Kühlschrank gelagert.

Vor der Analyse werden 100 ml John-Lösung mit 1,5 g Ascorbinsäure versetzt.

Als Eichstandard dient eine Lösung von 4,3937 KH_2PO_4 in 1000ml Wasser gelöst (P-Stammlösung – 1000mg Phosphor/l). Zur Herstellung von Eichstandards wird 1ml dieser Stammlösung auf 100ml verdünnt (P1-Lösung – 10 mg Phosphor/l).

5 bis 25 ml Aliquot der Extraktionslösung werden in Kolben überführt, anschließend 2,5 ml John-Lösung dazugegeben und auf 50 ml aufgefüllt. Nach etwa 1 Stunde werden diese dann am Photometer gegen Eichstandards gemessen. Folgende Eichstandards werden hier angewendet:

0 - 0,05 – 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5 – 0,6 mg Phosphor pro Liter, dies entspricht:

0 - 0,25 - 0,5 – 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 – 3 ml P1 – Lösung auf 50 ml Kolben.

Die Kalium – Bestimmung erfolgte mittels Ionenchromatographie mit entsprechender Bestimmungsgrenze (vgl. Kap. 3.4.5). Dafür wurden die Proben 1:5 verdünnt.

3.4.2. Pflanzenverfügbare Stickstoff (N_{min}) und Magnesium in CaCl_2 – Lösung

Die Proben für N_{\min} (bestehend aus Ammonium, Nitrit und Nitrat) müssen nach der Probenahme eingefroren werden. Die Extraktion erfolgt mit leicht aufgetauten Proben (so dass die Proben eingewogen werden können).

Etwa 2,5 g bzw. 5 g Boden (Trockengewicht) werden eingewogen und 25 ml bzw. 50 ml 0,0125 mol CaCl_2 – Lösung zugegeben. Die Proben müssen etwa 2 Stunden geschüttelt werden. Anschließend werden die Extrakte am IC gemessen (vgl. Kap. 3.4.5). Die Proben werden, wegen eines hohen Chlorid - Peaks 1:5 verdünnt.

3.4.3. pH-Wert

10 g Boden werden eingewogen und mit 25 ml 0,01 mol CaCl_2 (1,4702g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – Lösung versetzt. Die Proben werden 2 Stunden bei Raumtemperatur stehen gelassen und in regelmäßigen Abständen kräftig geschüttelt. Nach dem letzten schütteln wird der pH-Wert im Überstand, während sich das Material absetzt, am pH-Meter gemessen.

Die Bestimmungsgrenze liegt bei 0,01 Einheiten.

3.4.4. Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})

2,5 g Boden werden eingewogen und das Gewicht der Flaschen mit Verschluss und Boden notiert. Anschließend werden 30 ml 0,1 mol/l BaCl_2 Lösung zugesetzt und 1 Stunde geschüttelt. Danach werden die Flaschen 10min 3000 g zentrifugiert und die überstehende Flüssigkeit dekantiert. Dem verbleibenden Bodenmaterial werden 30 ml 0,0025 mol/l BaCl_2 Lösung zugegeben und über Nacht geschüttelt. Anschließend wieder 10 min bei 3000g zentrifugieren und die überstehende Flüssigkeit dekantieren. Dem Boden wird danach 30 ml MgSO_4 Lösung zugesetzt und über Nacht geschüttelt. Anschließend wieder 10 min bei 3000 Umdrehungen pro Minute zentrifugiert und in die PE-Flasche dekantiert. Diese Lösung wird zur Bestimmung des Magnesiumüberschusses verwendet.

Die Analytik erfolgte anschließend mittels Ionenchromatographie (vgl. Kap. 3.4.5).

3.4.5. Ionenchromatographie

Das Prinzip der Ionenchromatographie beruht auf einem Trennverfahren, bei dem unterschiedliche ionische Komponente einer Probe durch unterschiedlich starke elektrostatische Wechselwirkung eine unterschiedlich lange Zeit am Ionenaustauscher in der Trennsäule aufgehalten werden. Folglich werden die ionischen Komponenten

die Trennsäule auch zu unterschiedlichen Zeiten eluiert (Retentionszeit) und dann zeitversetzt detektiert.

Die Trennung wird sowohl durch das Material der Trennsäule als auch durch die Zusammensetzung des Eluenten bestimmt.

Als Grundmaterial für die Trennsäule werden heutzutage in den meisten Fällen organische Materialien auf der Basis polymerer Kunststoffe verwendet. Den Ionenaustauscher erhält man dann, wenn man diese Grundmaterialien sulfoniert (Kationenaustauscher) bzw. aminiert (Anionenaustauscher).

Optimale Ergebnisse können mit einer geeigneten Kombination von Grundmaterial und Ionenaustauschgruppen erzielt werden.

Auch die Zusammensetzung des Eluenten beeinflusst die Retentionszeit. Grundsätzlich werden aber die kleinen Ionen vor den größeren und einfach geladene vor den zweifach und dreifach geladenen eluiert.

Die Reihenfolge bei Anionen: Fluorid, Chlorid, Nitrit, Bromid, Nitrat, Phosphat, Sulfat
Bei den Kationen: Natrium, Ammonium, Kalium, Calcium, Magnesium

Bei Kationen kann aber die Zumischung von Liganden zum Eluenten zur Retentionszeitenverschiebung führen.

Zur Detektion der Ionen wird hier der Leitfähigkeitsdetektor verwendet. Dabei wird der Leitwert der Elektrolytenlösung zwischen zwei Elektroden gemessen. Je höher die Konzentration der Ionen in der Lösung, desto höher die Leitfähigkeit.

Bei der Bestimmung von Kationen wird direkte Ionenchromatographie, d.h. ohne chemische Suppression verwendet. Bei den Anionen wird dagegen in vielen Fällen chemische Suppression eingesetzt. Dies ist nötig, um die Hintergrundleitfähigkeit, die durch die Zusammensetzung des Eluenten entsteht, abzusenken und damit die Empfindlichkeit des Detektionssystems zum Messsignal entscheidend zu verbessern. Als Kalibriermethode wird die Kalibrierung mit externen Standards verwendet. Dabei vergleicht man die Signalgröße in einer unbekannt Probe mit einer Standardlösung. Die Konzentrationen in der Kalibrierreihe entsprechen dem erwarteten Konzentrationsbereich in den Proben.

Die Bestimmungsgrenze liegt bei 0,01 mg/l. Der systematische Fehler bei 0,1 mg/l und die Wiederfindungsrate bei 95%.

3.4.6. Biologische Parameter

3.4.6.1. Potenzielle Ammoniumoxidation

Das Prinzip besteht darin, dass die Geschwindigkeit der Nitritbildung in einer Bodenprobe, bei gleichzeitiger Unterdrückung der Weiteroxidation zu Nitrat, erfasst wird.

Als Prüfmedium dient eine Mischung aus:

1. Stammlösung 1 (Kaliumhydrogenphosphat 28 ml; Dikaliumhydrogenphosphat 72 ml; Deionisiertes Wasser 100ml)
2. Natriumchlorat etwa 11 ml
3. Diammoniumsulfat 0,198 g
4. Mit deion. Wasser auf 1000 ml aufgefüllt

Als Farbreagenzien dienen folgende Lösungen:

Lösung 1: 1,016 g NH_4Cl in 90 ml deion. Wasser gelöst. Mit Ammoniak pH von 8,5 einstellen und auf 100 ml auffüllen.

Lösung 2: 1 g Sulfanilamid und 0,05 g N-Naptyl-ethylen-diamindihydrochlorid in 75 ml deion. Wasser gelöst. 10 ml Phosphorsäure hinzufügen und auf 100ml mit Wasser auffüllen (die Lösung muss farblos sein).

Als Eichstandard dient eine Lösung von 4,9257 g NaNO_2 in 1000 ml Wasser gelöst (Natriumnitrit – Stammlösung 1000 $\mu\text{g/ml}$).

Zur Herstellung von Eichstandards werden 10 ml dieser Stammlösung auf 1000 ml deion. Wasser aufgefüllt (10 $\mu\text{g/ml}$). Davon werden die entsprechenden ml der Eichlösung mit 25 ml KCl versetzt und mit deion. Wasser auf 50 ml aufgefüllt.

Ein Erlenmeyerkolben wird mit 25 g Boden (Trockengewicht) gefüllt und 100 ml Prüfmedium zugesetzt. Anschließend erfolgt die Inkubation in einem Schüttelbrutschrank (25°C). Die Probeentnahme aus der Suspension erfolgt nach 2 und 6 Stunden. Es werden 5 bzw. 10 ml Suspension entnommen und filtriert.

Das Filtrat wird unter Zugabe der Farbreagenzien am Photometer gegen Eichstandards gemessen. Folgende Eichstandards werden hier angewendet:

0 – 0,01 – 0,02 – 0,1 – 0,2 – 0,4 – 0,8 – 1,0 $\mu\text{g N}$ pro ml, dies entspricht:

0 – 0,05 – 0,1 – 0,5 – 1,0 – 2,0 – 4,0 – 6,0 ml Eichlösung

Die Rate der Ammoniumoxidation wird aus der Differenz der Nitrit Konzentrationen nach 6 und 2 Stunden berechnet.

3.4.6.2. Bodenatmung

Die Bodenatmung wird in Form der Basalatmung und substanzinduzierter Atmung bestimmt. In einem geschlossenen System wird dabei die Atmungsaktivität als O_2 – Aufnahme erfasst. 100 bis 300 g Boden (Trockengewicht) werden in 500 ml Gefäße eingewogen. Die Gefäße werden ins Wasserbad (20°C) gestellt und anschließend mit Sauerstofferezeuger und Schaltmanometer gasdicht verbunden. Die Atmungsraten sollten bis zum Auftreten konstanter Raten gemessen werden. Die Inkubation bei Basalatmung betrug 180 Stunden (2012: 168 Stunden)

Für die substratinduzierte Atmung wird ein Substrat aus 80 g Glucose, 13 g Di-Ammoniumsulfat und 2g Kaliumhydrogenphosphat (alles gemahlen) präpariert.

Dieses Substrat wird denn Bodenproben nach der Erfassung von Basalatmung im Verhältnis 0,2 g Substrat auf 1 g organische Bestandteile des Bodens (1 g Corg entspricht etwa 1,7 g organischer Bestandteile) zugegeben und homogen in die Probe gemischt. Die Messung sollte bis zum Abklingen der Atmungsraten durchgeführt werden. In unserem Versuch betrug die Inkubationszeit 10 Stunden (2012: 13 Stunden).

Für die Umrechnung von mg/l O_2 auf mg O_2 / Bodeneinwaage wird ein gerätespezifischer Faktor von 0,25 verwendet.

Die Bestimmungsgrenze bei den biologischen Parametern liegt bei 0,1 ng/g/h, mit einem systematischen Fehler von 0,5 ng/g/h und einer Wiederfindungsrate von 90%.

4. Ergebnisse der Lysimeter- und Freilanduntersuchungen

4.1. Physikalische, physikalisch-chemische, chemische und mikrobiologische Bodenparameter

4.1.1. Lysimeterversuch

Die Mittelwerte für pH, KAK, pflanzenverfügbare Mineralnährstoffe aus dem Lysimeterversuch über die gesamte Untersuchungsperiode 21011 bis 2015 sind Tabelle 4 zu entnehmen. Die entsprechenden Standardabweichungen sowie die zeitliche Entwicklung sind im Anhang 8.1 aufgeführt. Den Tabellen A1 bis A8 im Anhang 8.1 kann man entnehmen, dass nur kleinere Schwankungen im zeitlichen Verlauf vorhanden sind. Außerdem kann man keine zeitliche Tendenz bei diesen Schwankungen feststellen, somit handelt es sich um ein gewisses Hintergrundrauschen. Insgesamt bleiben die Nährstoffgehalte in Böden stabil.

Die Ergebnisse des Signifikanztests sind in den Tabellen A31 – A35 im Anhang 8.4 dargestellt.

Tabelle 4: Mittelwerte von Bodenparametern, berechnet aus den Ergebnissen einzelner Probenahmen über die gesamte Untersuchungsperiode (2011-2015) in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30) und 30- bzw. 60 Tonnen (30T und 60T) Ausbringungsmenge im Lysimeterversuch

	pH	KAK _{eff}	Pflanzenverfügbare Nährstoffe		
			Phosphor	Kalium	Magnesium
		mmol/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Kontrolle	3,90	24	4,5	60,6	18,8
BKS15 30T	4,25	27	6,9	75,6	54,1
BKS30 30T	4,02	25	7,4	101,5	52,4
BKS15 60T	4,40	33	13,1	132,4	100,5
BKS30 60T	4,39	37	11,9	124,3	95,9

Die Steigerung des **pH-Wertes** bei BKS15 beträgt 0,35 Punkte gegenüber der Kontrolle und 0,23 Punkte gegenüber BKS30. Bei den BKS Varianten mit 60 Tonnen pro Hektar Ausbringungsmenge gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen BKS15 und BKS30. Die Steigerung gegenüber der Kontrollvariante beträgt 0,5 Punkte.

Hinsichtlich der **effektiven Kationenaustauschkapazität** gibt es keine signifikanten Unterschiede bei den Varianten mit BKS-Zugabe mit 30 Tonnen pro Hektar Ausbringungsmenge. Es gibt einen signifikanten Unterschied zwischen BKS30 Variante mit 60 Tonnen/ha Ausbringungsmenge und der Kontrollvariante. Die Steigerung des Wertes gegenüber der Kontrollvariante beträgt 54%.

Beim **pflanzenverfügbaren Phosphor** gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten mit BKS15 und BKS30 sowohl bei der 30 Tonnen/ha als auch bei der 60 Tonnen/ha Ausbringungsmenge. Die Steigerung der Werte gegenüber der Kontrollvariante beträgt 53-64% bei den BKS Varianten mit 30 Tonnen/ha und zwischen 164 und 191% bei den BKS Varianten mit 60 Tonnen/ha Ausbringungsmenge.

Beim **pflanzenverfügbaren Kalium** sind die Unterschiede bei den BKS Varianten mit der Ausbringungsmenge von 30 Tonnen/ha signifikant. Bei der Ausbringungsmenge von 60 Tonnen/ha gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen BKS15 und BKS30. Die Steigerung der Werte gegenüber der Kontrollvariante beträgt bei den Varianten mit 30 Tonnen/ha Ausbringungsmenge 25% bei BKS15 und 67% bei BKS30. Bei der Ausbringungsmenge von 60 Tonnen/ha beträgt die Steigerung der Werte gegenüber der Kontrollvariante: 118% bei BKS15 und 105% bei BKS30.

Beim **pflanzenverfügbaren Magnesium** sind die Unterschiede zwischen BKS15 und BKS30 sowohl bei der Ausbringungsmenge von 30 Tonnen/ha als auch bei 60 Tonnen/ha nicht signifikant. Die Steigerung der Werte gegenüber der Kontrollvariante beträgt bei 30 Tonnen/ha Ausbringungsmenge 179-188% und bei der Ausbringungsmenge von 60 Tonnen/ha zwischen 410 und 435%.

Die **N_{min}** Werte im Lysimeterversuch waren insgesamt niedrig. So lag der N_{min} Anteil an Gesamtstickstoff beim ersten Probenahmetermin (Herbst 2011) zwischen 0,9 % bei der Kontrolle (Minimalwert) und 1,2% bei der BKS15 60 Tonnen Variante (Maximalwert).

Beim zweiten Probenahmetermin im Frühling 2012 steigen die Werte in allen Varianten und bei 60 Tonnen Varianten deutlich (siehe Abb. 8). Bereits im Herbst 2012 fällt aber der N_{min}-Gehalt bei allen Varianten auf extrem niedrige, nicht mehr erfassbare Werte. Diese Entwicklung korreliert mit einem rapiden Anstieg und anschließenden schnellen Abfall der Nitratauswaschung (siehe Kapitel 4.2).

Erst im Frühling 2014 konnten erneut messbare N_{min}-Werte erfasst werden. Die Werte bei der Kontrolle sind vergleichbar mit den Werten aus den frühen Terminen. Die

Messwerte aller Varianten liegen zu diesem Zeitpunkt nah beieinander, die anfänglichen Unterschiede sind zu diesem Zeitpunkt also nivelliert. Anschließend gehen die Messwerte im Herbst 2014 bei allen Varianten wieder leicht zurück.

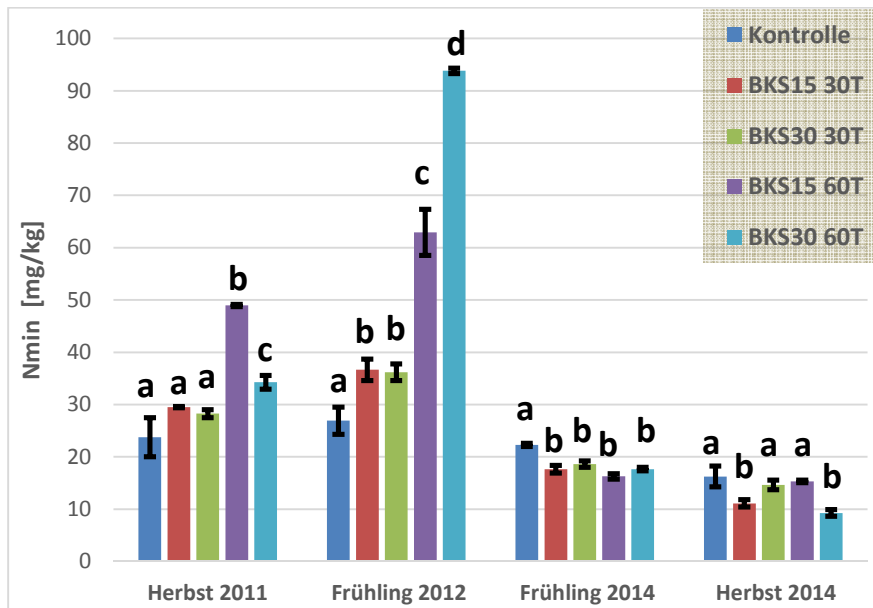


Abbildung 8: Zeitliche Veränderung des Gehaltes am pflanzenverfügbaren Stickstoff (N_{min}) im Oberboden in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30) und 30- bzw. 60 Tonnen (30T und 60T) Ausbringungsmenge im Lysimeterversuch. Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanzen. Bei unterschiedlichen Buchstaben gibt es einen signifikanten Unterschied

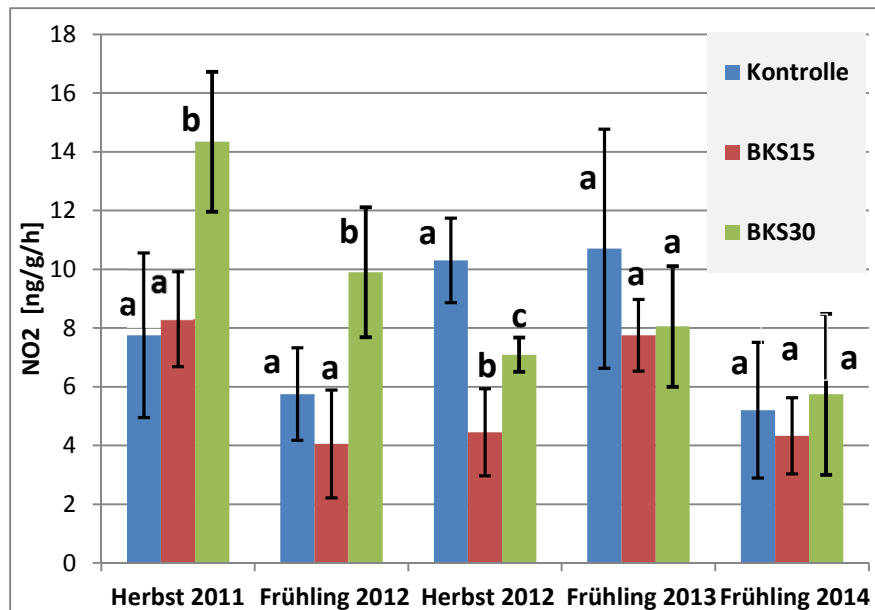


Abbildung 9: Nitrifikation (Potentielle Ammoniumoxidation (PAO)) im Oberboden. Zeitliche Entwicklung in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30) und 30- bzw. 60 Tonnen (30T und 60T) Ausbringungsmenge im Lysimeterversuch. Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanzen. Bei unterschiedlichen Buchstaben gibt es einen signifikanten Unterschied

Der Anteil von Nitrat an N_{\min} lag bei den ersten beiden Probenahmen von Oberboden zwischen 71 und 94%. Im Frühling 2014 lag der Nitrat Anteil zwischen 53 und 64%. Im Herbst wurde ein Anteil von 77-89% gemessen. Diese Werte deuten möglicherweise darauf hin, dass nach einer Phase mit hohen Nitrifizierungsraten am Anfang und anschließender rapider Bindung vom pflanzenverfügbaren Stickstoff zunächst ein Ammoniumpool aufgebaut wird und danach die Nitrifizierung erneut verstärkt einsetzt. Die Potentielle Ammoniumoxidation (PAO) ist insgesamt bedingt durch einen sehr niedrigen pH-Wert sehr gering. Bei den ersten beiden Probenahmen (2011 und Frühjahr 2012) ist sie bei BKS30 noch signifikant höher als bei der Kontrolle und BKS15 (siehe Abb. 9), zeigt aber insgesamt keine nachhaltige Wirkung.

Bei der ersten Probenahme im Herbst 2011 ist der Unterschied von BKS30 zur Kontrolle und BKS15 mit $P=0,01$ signifikant. Bei der zweiten Probenahme (Frühjahr 2012) ist der entsprechende Unterschied mit $P=0,02$ signifikant. Bei der dritten Probenahme (Herbst 2012) ist die PAO bei der Kontrolle bereits mit $P=0,01$ signifikant höher. Die BKS30 liegt aber noch mit $P=0,02$ signifikant höher zu BKS15. Bei den weiteren Probenahmen sind die Unterschiede nivelliert.

Bei der Basal- und Substratinduzierter Atmung (Tabelle 5) sieht man, dass die BKS Varianten insgesamt eine etwas höhere biologische Aktivität aufweisen, wobei ein

leichter Unterschied von BKS30 zu BKS15 nur bei der substratinduzierten Atmung festzustellen ist. Allerdings sind alle Unterschiede nicht signifikant.

Die Ergebnisse zu den einzelnen Probenahmen sind in den Tabellen A10 und A11 im Anhang 8.1 dargestellt.

Tabelle 5: Baslatmung (BAT) und Substratinduzierte Atmung (SIR) in mg/100g/h. Mittelwert, berechnet aus den Ergebnissen einzelner Probenahmen über die gesamte Untersuchungsperiode (2011-2015) in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30) im Lysimeterversuch.

	BAT	Stdabw	SIR	Stdabw
Kontrolle	0,115	0,035	0,989	0,271
BKS15	0,145	0,047	1,070	0,193
BKS30	0,151	0,039	1,228	0,182

4.1.2. Freilandversuch Weihnachtsbaumkulturen

Die Mittelwerte der Bodenparameter für die Weihnachtsbaumanbaufläche über die gesamte Untersuchungsperiode sind in der Tabelle 6 dargestellt. Wie im Falle des Lysimeterversuchs wurde auch hier eine solche Darstellungsweise ausgewählt, weil keine zeitlich bedingte Tendenz festzustellen ist und es sich bei den Messwertschwankungen um eine gewisse Variabilität der Hintergrundwerte handelt (vgl. dazu Tabellen A1, A2, A4, A6, A8 und A9 im Anhang 8.1). Die Ergebnisse des Signifikanztests sind in den Tabellen A36 – A38 im Anhang 8.4 aufgeführt.

Tabelle 6: Mittelwerte von Bodenparametern, berechnet aus den Ergebnissen der einzelnen Probenahmen über die gesamte Untersuchungsperiode (2011-2015) in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30) im Freilandversuch

	pH	KAK	Pcal	Kcal	Mg(cacl)	N_{min}
		mmol/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Kontrolle	6,14	56	106,6	308,2	158,3	138,5
BKS15	6,20	55	110,4	368,1	163,1	134,8
BKS30	6,13	49	113,7	344,2	156,0	123,8

Hier gibt es keine signifikanten Unterschiede bei pH und KAK.

Bei den pflanzenverfügbaren Nährstoffen gibt es nur einen signifikanten Unterschied beim Kalium zwischen BKS15 und der Kontrolle. Die Steigerung beträgt 19%.

Bei der N_{\min} gibt es zwar eine hohe zeitliche Variabilität der Messwerte über die gesamte Untersuchungsfläche (in allen Parzellen) (vgl. Tabelle A9 im Anhang 8.1) im Untersuchungszeitraum, allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten.

4.1.3. Zusammenfassung

Sowohl beim pH-Wert als auch bei den pflanzenverfügbaren Nährstoffen kann man bei den einzelnen Varianten keine wiederkehrenden Tendenzen beobachten.

Dabei sind die zum Teil signifikant hohen Steigerungen gegenüber der Kontrolle mit sehr niedrigen Ausgangswerten des Waldbodens verbunden. Diese Steigerungen korrelieren in den meisten Fällen mit der Ausbringungsmenge und nicht mit dem Biokohle-Anteil.

Bei den Weihnachtsbaumkulturen konnten keine Effekte durch die Zugabe von BKS beobachtet werden. Da die Ausgangswerte bezüglich pH und Nährstoffen hier schon hoch lagen, kann man davon ausgehen, dass eine gewisse Inhomogenität in der Fläche, die durch die Bewirtschaftungsgeschichte, wie Streifenapplikation, entstand, eine potentielle Wirkung überlagert.

4.2. Auswaschung von Nährstoffen im Lysimeterversuch

Wie im Kapitel 4.1 beschrieben, gab es einen Anstieg der N_{\min} -Werte im Boden vom ersten Probenahme (Herbst 2011) hin zu der zweiten Probenahme (Frühling 2012) bevor es bis Herbst 2012 anschließend einen rapiden Abfall des N_{\min} -Gehalts gab. In Abbildung 10 erkennt man, dass dieser Abfall mit einem hohen Anstieg der Gehalte im Sickerwasser zusammenfällt.

Weil es hierbei um die Messung einer Mischprobe von Sickerwasser handelt, wurden hier keine Standardabweichungen bzw. Signifikanzen ermittelt. Die wiederholten Messungen einer Mischprobe ergaben keine nennenswerten Abweichungen.

Beim ausgewaschenen Stickstoff handelt es sich ausschließlich um Nitrat, Ammonium war bei den meisten Messungen unter der Bestimmungsgrenze.

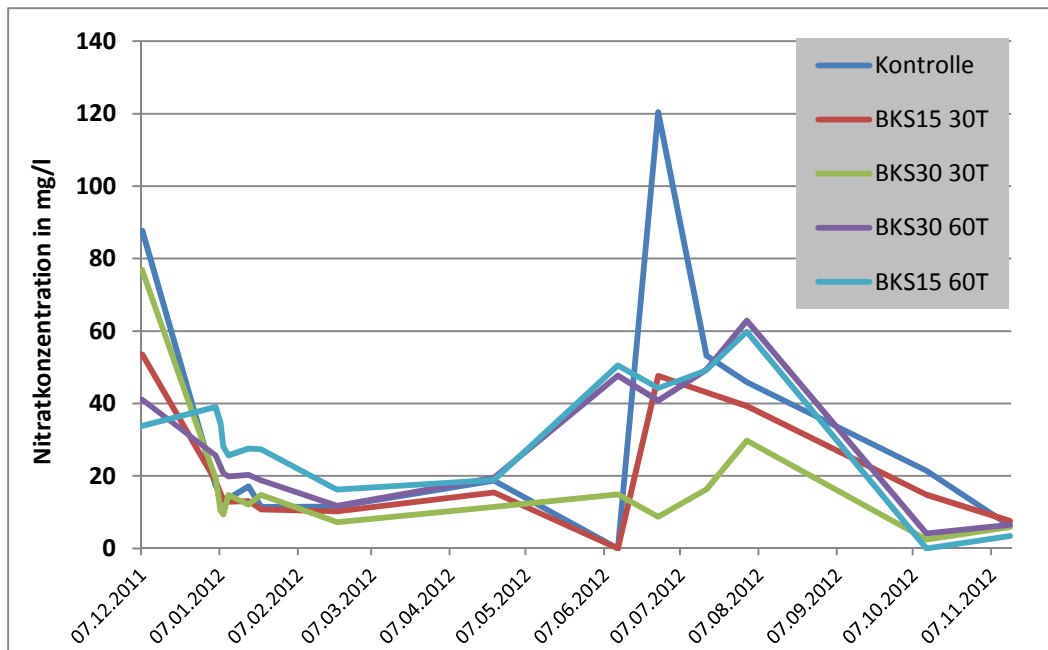


Abbildung 10: Nitratkonzentration des Sickerwassers in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30) und 30- bzw. 60 Tonnen (30T und 60T) Ausbringungsmenge im Lysimeterversuch

Die Konzentrationen steigen bei der Kontrolle von 12-19 mg/l im Frühjahr 2012 auf 46 bis 120 mg/l im Sommer 2012 und fallen anschließend auf 6-20 mg/l im Herbst 2012 ab. Bei den Varianten mit der Ausbringungsmenge von 30 Tonnen/ha steigen die Messwerte bei BKS15 von 10-15 mg/l im Frühjahr auf 39-48 mg/l im Sommer und fallen dann auf 8-15 mg/l im Herbst. Bei BKS30 liegen die Messwerte im Frühjahr bei 7-11 mg/l und im Sommer bei den Werten zwischen 9 und 30 mg/l. Im Herbst liegen die Werte dann bei 2-6 mg/l.

Bei den Varianten mit der Ausbringungsmenge von 60 Tonnen/ha liegen die Werte bei BKS15 im Frühling bei 16-19 mg/l steigen anschließend im Sommer auf 44-60 mg/l und fallen im Herbst auf 0-3 mg/l. Bei BKS30 steigen die Messwerte von 12-19 mg/l im Frühjahr auf 41-63 mg/l im Sommer und fallen dann auf 4-6 mg/l im Herbst ab.

Die kumulierte Auswaschungsmenge über die gesamte Periode bis Ende Herbst 2012 (siehe Abb. 11) beträgt bei der Kontrolle 8830 mg, bei den 30 Varianten mit 30 Tonnen/ha Ausbringungsmenge: 7838 mg bei BKS15 und 4861 mg bei BKS30, bei Varianten mit der Ausbringungsmenge von 60 Tonnen/ha: 10769 mg bei BKS15 und 9897 bei BKS30.

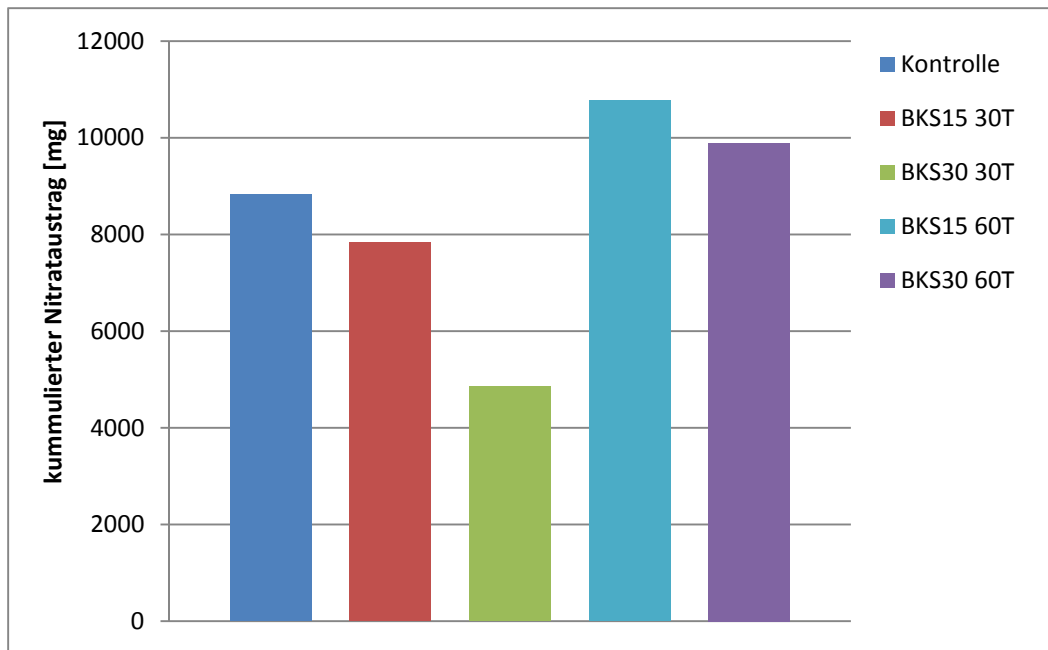


Abbildung 11: Kumulierter Nitrataustrag mit Sickerwasser in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30) und 30- bzw. 60 Tonnen (30T und 60T) Ausbringungsmenge im Lysimeterversuch

Die in der entscheidenden Periode Sommer 2012 in der die größte Nitratauswaschung stattfand, betrug die ausgewaschene Nitratmenge entsprechend: 6248 mg bei der Kontrolle, 5366 mg bei BKS15 mit 30 Tonnen/ha, 2645 mg bei BKS30 mit 30 Tonnen/ha, 6306 mg bei BKS15 mit 60 Tonnen/ha und 6385 mg bei BKS30 mit 60 Tonnen/ha. Bezogen auf die Kontrollvariante wird die Auswaschung bei BKS15 mit 30 Tonnen/ha um 14% und bei BKS30 mit 30 Tonnen/ha um 58% verringert.

Der Anstieg der N_{\min} -Gehalte fällt mit der Zeit einer verstärkten Stickstoff Auswaschung zusammen. Die Ergebnisse zeigen, dass das BKS30 zu einer deutlichen Verringerung der Nitratauswaschung führt. Auch die Variante BKS15 30 Tonnen liegt unter der Kontrolle. Dagegen liegen die 60 Tonnen Varianten bereits über der Kontrolle, wobei BKS30 auch hier etwas geringere Werte (nicht signifikant) gegenüber BKS15, aufweist. Die Tatsache, dass die 60 Tonnen Varianten über der Kontrolle liegen ist durch deutlich höhere N_{\min} -Gehalte zu diesem Zeitpunkt zu erklären. Weil, die N_{\min} Werte zu diesem Zeitpunkt bei 60 Tonnen BKS30 noch deutlich über den von BKS15 liegen, die BKS30-Variante gegenüber BKS15 aber noch eine geringere Nitratmenge im Sickerwasser aufweist, kann man darauf schließen, dass der höhere Biokohleanteil auch bei den Varianten mit Zugabe von 60 Tonnen BKS eine höhere Retention bewirkt.

Bei der Menge des ausgewaschenen Kaliums zeigt die Variante von BKS30 mit 30 Tonnen/ha Ausbringungsmenge deutlich höhere Werte, alle anderen Varianten liegen sehr nah beieinander. Die Konzentrationen im Sickerwasser liegen bei 3-13 mg/l bei BKS30 mit 30 Tonnen/ha Ausbringungsmenge und bei 3-6 mg/l bei anderen Varianten. Die kumulierte Auswaschungsmenge (vgl. Tabelle A13 im Anhang 8.2) liegt bei BKS30 mit der Ausbringungsmenge von 30 Tonnen/ha bei 3901 mg, bei anderen Varianten zwischen 1199 und 1443 mg. Im Gegensatz zu Nitrat bleibt aber die Auswaschung von Kalium konstant und auch auf konstant hohem Niveau bei BKS30 30 Tonnen/ha. Bei der Auswaschung von Magnesium liegen alle Varianten sehr nah beieinander. Die Konzentrationen im Sickerwasser liegen bei 1-3 mg/l (vgl. Tabelle A14 im Anhang 8.2). Beim Phosphor lagen alle Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,01 mg/l. Hier ist die Auswaschung unbedeutend.

4.3. Baumwachstum

4.3.1. Freilandversuch Windwurffläche

Abbildung 4 zeigt, dass die BKS30 Variante deutlich geringere Ausfälle gegenüber der Kontrolle und BKS15 sowohl bei Buchen als auch bei Fichten aufweist. Kontrolle und BKS15 haben prozentual die gleichen Ausfälle bei Buchen, bei den Fichten ist die Anzahl der Ausfälle bei der Kontrolle aber deutlich geringer als bei BKS15.

Insgesamt kann man in diesem Zeitraum, angesichts der Langwierigkeit der ablaufenden Prozesse, nur begrenzt Aussagen über den Baumwachstum vornehmen, trotzdem können bestimmte Tendenzen bereits festgestellt werden, da nach zwei

Jahren die Wurzelassimilation erfolgte und darauf folgend im 3. Untersuchungsjahr deutliche Zuwächse bei Fichten bzw. verstärkte Laubentwicklung

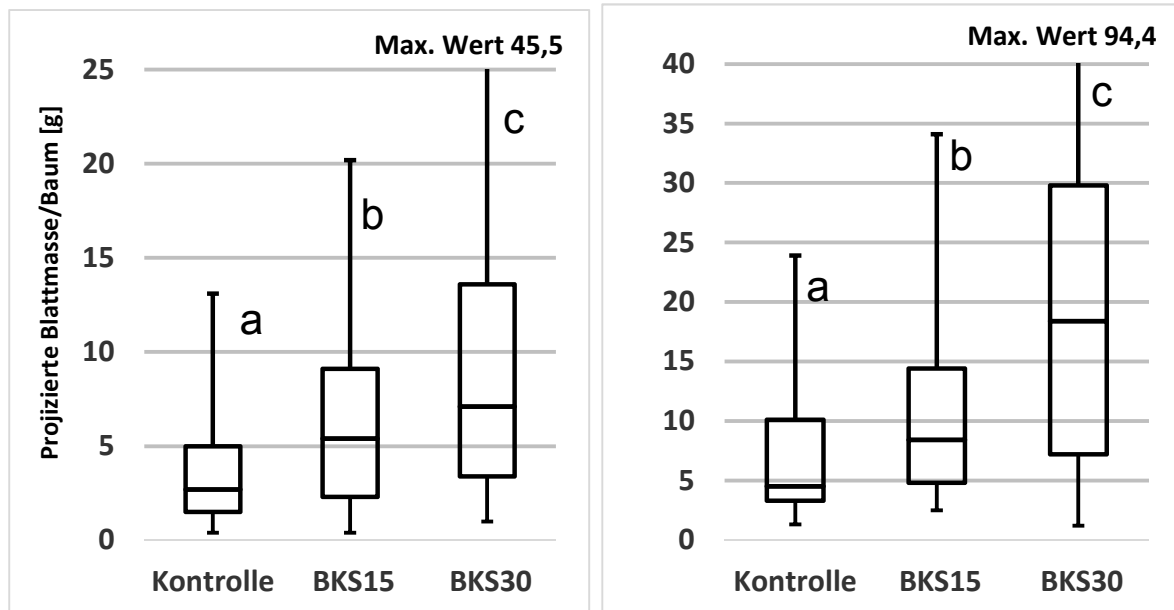


Abbildung 12: Projizierte Blattmasse pro Baum in g. Buche. Freilandversuch Windwurffläche: 2014 (links) und 2015 (rechts) in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30). Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanzen. Bei unterschiedlichen Buchstaben gibt es einen signifikanten Unterschied. Stichprobe $n_{\text{kontrolle}}=36$, $n_{\text{BKS15}}=29$, $n_{\text{BKS30}}=41$

bei Buchen zu beobachten waren.

Die Ergebnisse aus der Erfassung der Kronenentwicklung der Buchen sind in den Abbildungen 12 und 13 dargestellt.

Die ausführlichen Daten zu den statistischen Lagemaßen (Median und Quantile) sowie Spannweiten für die einzelnen erfassten Parameter des Kronenzustands der Rotbuchen sowie projizierter Chlorophyllgehalt (siehe Kapitel 3) sind im Anhang 8.3 (Tabellen A16 bis A21) zusammengefasst. Die entsprechenden Signifikanztests in Form von P-Werten sind im Anhang 8.3. in Form von Kreuztabellen A24 bis A29 aufgeführt.

Bei der mittleren Blattmasse ist der Unterschied von BKS30 zu BKS15 signifikant ($P < 0,05$) und von BKS30 zur Kontrolle höchst signifikant ($P < 0,001$). Die Steigerung von BKS30 beträgt 65% (2014) bzw. 48% (2015) im Vergleich zur Kontrolle und 39% (2014) bzw. 29% (2015) gegenüber BKS15.

Bei der mittleren Blattanzahl ist nur der Unterschied von BKS30 zur Kontrolle signifikant. Die Steigerung gegenüber der Kontrolle beträgt 46% (2014) bzw. 129% (2015).

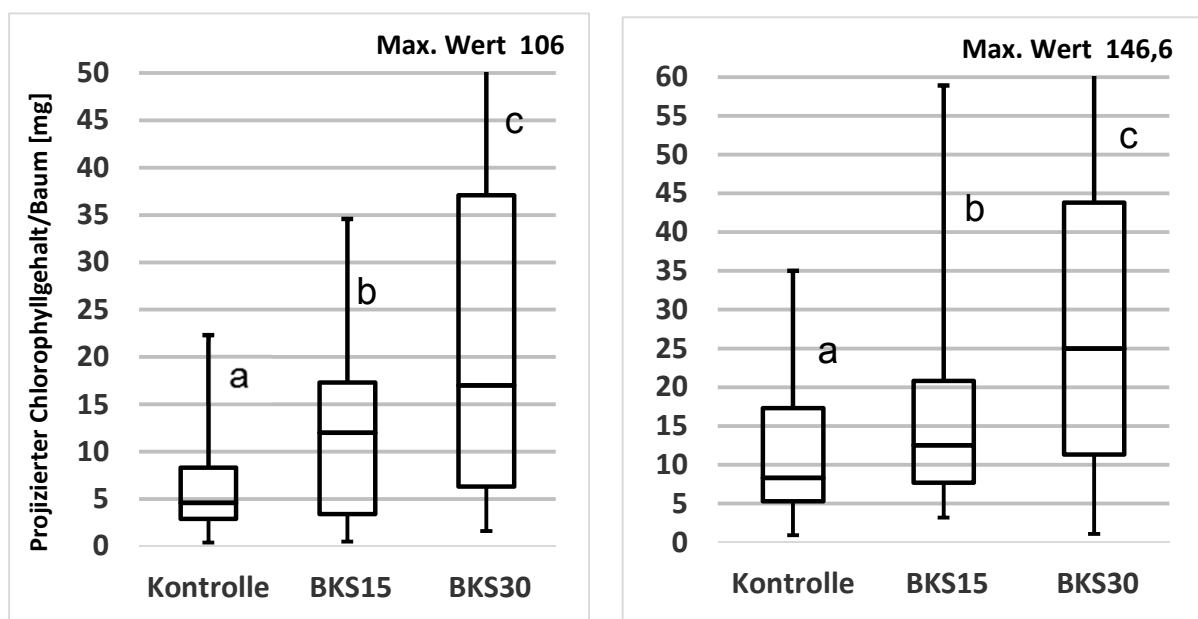


Abbildung 13: Projizierter Chlorophyllgehalt pro Baum in g. Buche. Windwurffläche: 2014 (links) und 2015 (rechts) in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30). Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanzen. Bei unterschiedlichen Buchstaben gibt es einen signifikanten Unterschied. Stichprobe $n_{\text{kontrolle}}=36$, $n_{\text{BKS15}}=29$, $n_{\text{BKS30}}=41$

Bei der daraus abgeleiteten Blattmasse pro Baum sind alle Unterschiede signifikant und der Unterschied von BKS30 zur Kontrolle höchst signifikant. Die Steigerung von BKS15 zur Kontrolle beträgt 100% (2014) bzw. 87% (2015) und von BKS30 zu BKS15 31% (2014) bzw. 119% (2015). Die Steigerung von BKS30 zur Kontrolle beträgt 163% (2014) bzw. 309% (2015).

Bei der mittleren Blattfläche sind ebenfalls alle Unterschiede signifikant. Die Steigerung von BKS15 zur Kontrolle beträgt 39% (2014) bzw. 19% (2015) und von BKS30 zu BKS15 32% (2014) bzw. 17% (2015). Die Steigerung von BKS30 zur Kontrolle beträgt 84% (2014) bzw. 40% (2015).

Hinsichtlich des mittleren Chlorophyllgehalts traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten auf.

Beim abgeleiteten Chlorophyllgehalt pro Baum ist der Unterschied von BKS15 zur Kontrolle 2014 signifikant und 2015 nicht signifikant, die anderen Unterschiede sind durchgehend signifikant bzw. von BKS30 zur Kontrolle höchst signifikant. Die Steigerung von BKS15 zur Kontrolle beträgt 161% (2014) und von BKS30 zu BKS15 42% (2014) bzw. 100% (2015). Die Steigerung von BKS30 zur Kontrolle beträgt 270% (2014) bzw. 201% (2015).

Die Box-Plots in Abbildungen 12 und 13 zeigen, dass die BKS30 Variante eine hohe Variabilität der Werte aufweist. In dieser Variante sind auch mehrere Individuen mit deutlich höheren Werten (innerhalb der 75% Perzentil) der Blattmasse bzw. Chlorophyllgehalts pro Baum vorhanden. Auch einige Ausreißer sind hier zu beobachten (vgl. auch die Tabellen im Anhang 8.3 mit Angaben von 95% Perzentil). Beim Parameter Blattmasse pro Baum verstärkt sich dieses Bild im Jahre 2015 gegenüber dem Jahr 2014 noch deutlicher (siehe Abb. 12).

Bei BKS30 zeigt sich also insgesamt eine nicht unerhebliche Anzahl von Individuen mit überdurchschnittlich starken Kronenentwicklung.

Die Ergebnisse für den Zuwachs des Terminaltriebs der Fichten für die Jahre 2014 und 2015 sind in Abbildung 14 dargestellt.

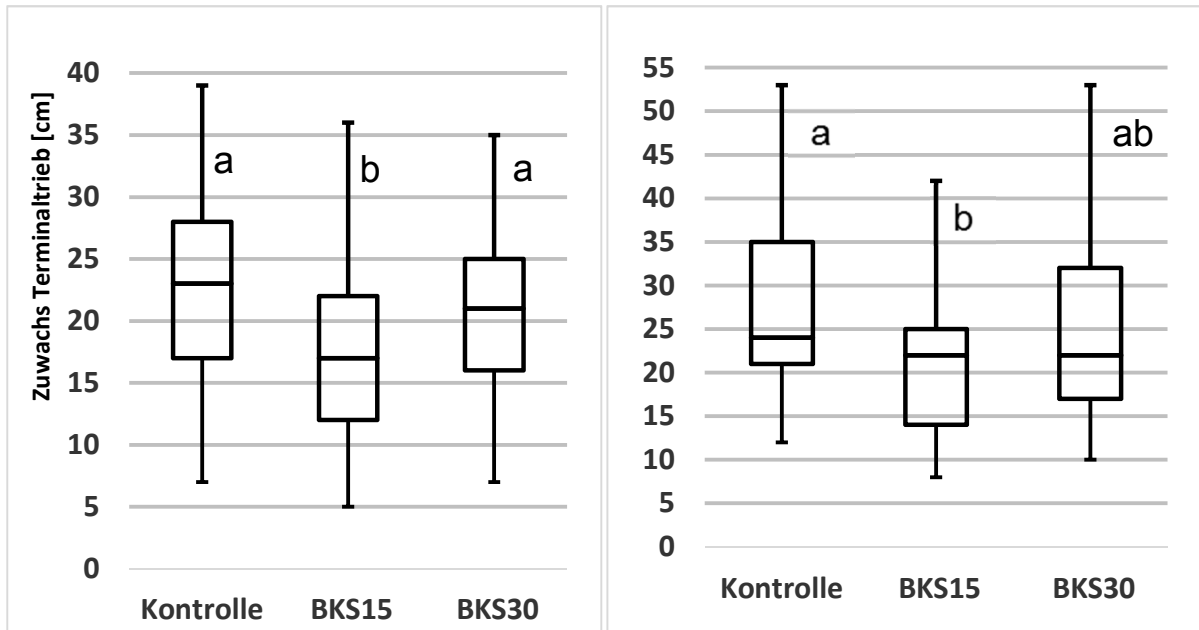


Abbildung 14: Zuwachs Terminaltrieb in cm. Fichte. Windwurffläche: 2014 (links) und 2015 (rechts) in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30). Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanzen. Bei unterschiedlichen Buchstaben gibt es einen signifikanten Unterschied. Stichprobe $n_{\text{kontrolle}}=58$, $n_{\text{BKS15}}=32$, $n_{\text{BKS30}}=47$

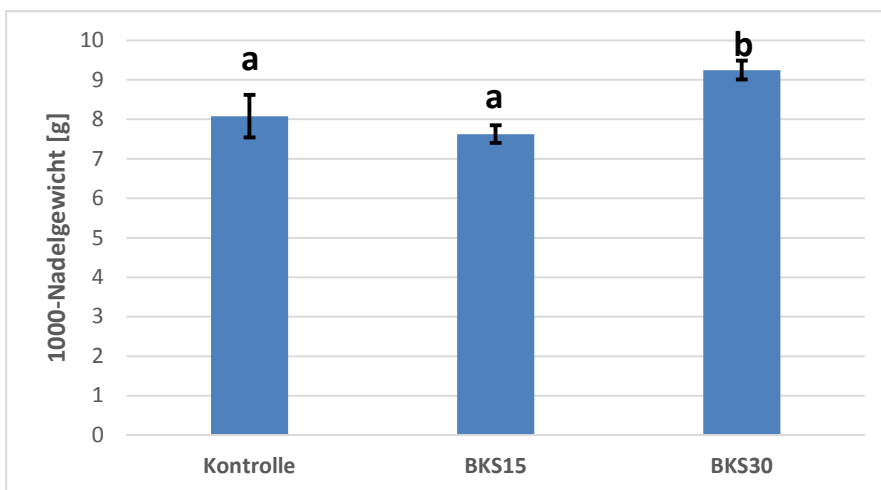


Abbildung 15: 1000-Nadelgewicht der Fichten auf Windwurffläche in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30). Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanzen. Bei unterschiedlichen Buchstaben gibt es einen signifikanten Unterschied Stichprobe $n_{\text{kontrolle}}=58$, $n_{\text{BKS15}}=32$, $n_{\text{BKS30}}=47$

Detaillierte Ergebnisse in Tabellenform ist im Anhang 8.3. in der Tabelle A15 dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse des Signifikanztests sind in den Tabellen A23 im Anhang 8.4 aufgeführt.

Hier sind für das Jahr 2013 die Unterschiede bei allen Varianten signifikant bzw. beim Vergleich von Kontrolle zu BKS15 und Kontrolle zu BKS30 höchst signifikant. 2014 ist der Unterschied von Kontrolle zu BKS30 nicht signifikant, die anderen Unterschiede sind signifikant oder höchst signifikant. 2015 ist der Unterschied von der Kontrolle zu BKS15 signifikant, die anderen Unterschiede sind nicht signifikant.

2014 beträgt die Steigerung bei der Kontrolle gegenüber BKS15 35%. Die Steigerung bei BKS30 gegenüber BKS15 beträgt 23%. 2015 beträgt die Steigerung von Kontrolle gegenüber BKS15 - 9%.

Beim 1000-Nadelgewicht zeigte die Variante BKS30 auf der Windwurffläche einen signifikant höheren Wert gegenüber der Kontrolle, während sich BKS15 nicht signifikant von der Kontrollvariante unterschied (Abb. 15). Die Steigerung von BKS30 beträgt 14,5% gegenüber Kontrolle und 21% gegenüber BKS15

4.3.2. Freilandversuch Weihnachtsbaumkulturen

Ergebnisse des Zuwachses des Terminaltriebs für die Nordmantannen auf Weihnachtsbaumanbaufläche sind in Abbildung 13 dargestellt (Detaillierte Ergebnisse in den Tabellen A22 und A30 im Anhang).

Der Unterschied von BKS15 zu BKS30 im Jahre 2014 ist signifikant. Die Steigerung von BKS30 gegenüber BKS15 beträgt 9%. Alle anderen Unterschiede sind nicht signifikant.

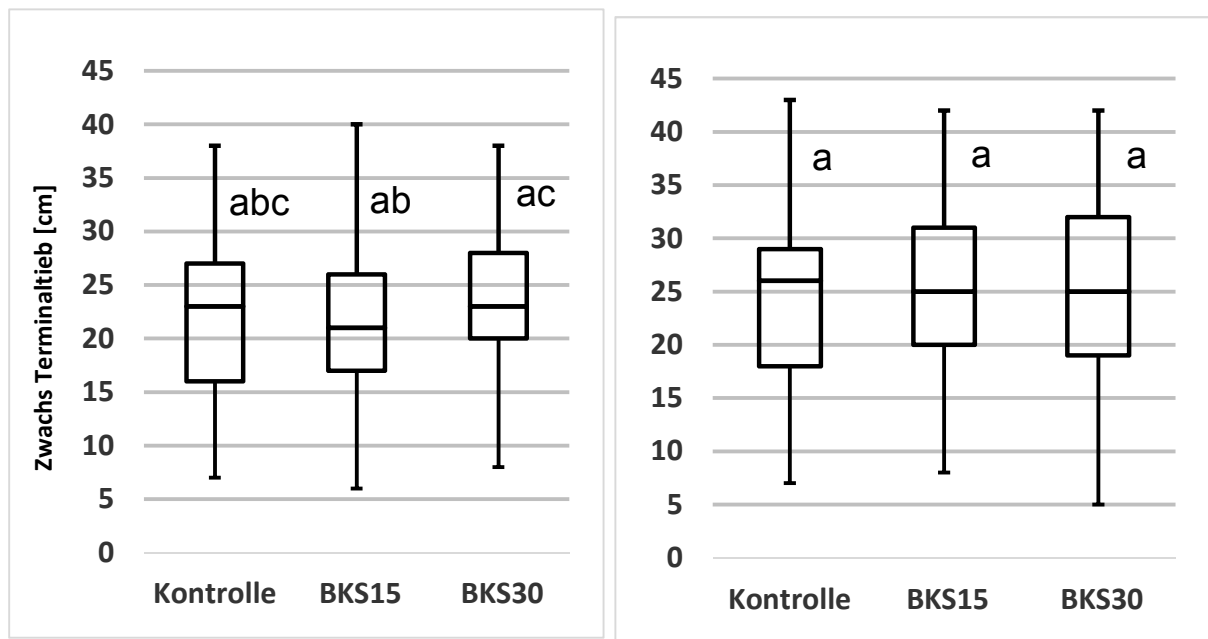


Abbildung 16: Zuwachs Terminaltrieb in cm. Nordmantannen (Weihnachtsbaumkulturen): 2014 (links) und 2015 (rechts) in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30). Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanzen. Bei unterschiedlichen Buchstaben gibt es einen signifikanten Unterschied Stichprobe n=80

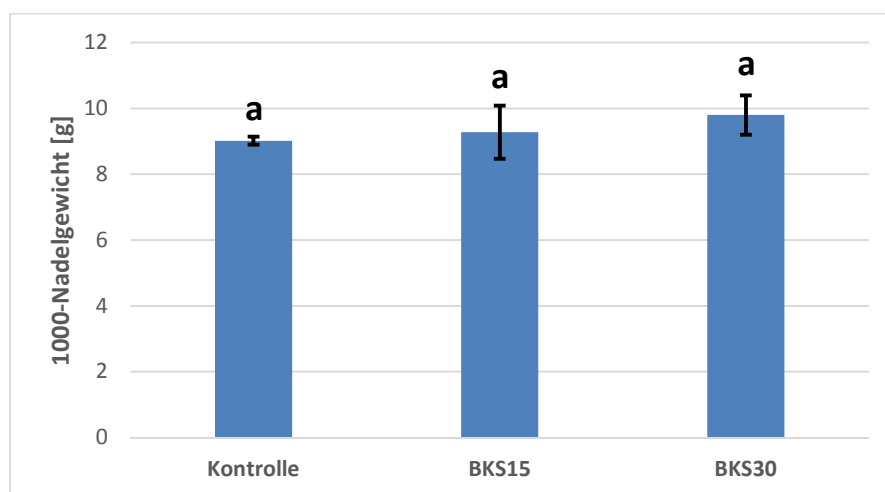


Abbildung 17: 1000-Nadelgewicht der Nordmantannen (Weihnachtsbaumkulturen) in den Varianten mit Biokohlesubstraten mit 15- (BKS15) und 30%-Biokohleanteil (BKS30). Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanzen. Bei unterschiedlichen Buchstaben gibt es einen signifikanten Unterschied. Stichprobe n=80

Bei den Nordmantannen auf der Weihnachtsbaumanbaufläche konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kontroll- und den BKS-Varianten festgestellt werden (Abb. 17).

5. Diskussion

Die Ergebnisse der Bodenanalysen aus Lysimeter- und Freilandversuchen zeigen keine deutliche Wirkung von Biokohle als Komponente der Biokohlesubstrate im Bezug auf mineralische Nährstoffe.

Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu einigen, in der Literatur beobachteten, potentiellen Wirkungen von Biokohle auf komplexe physiochemische Reaktionen. Solche beobachtete Wirkungen wie pH Anhebung bei Haas et al. (2012) und Van Zwieten et al. (2010) oder die Verringerung der Phosphorbindung wie bei Cui et al. (2011) und Wardle et al. (1998) sind aber vermutlich ein Ergebnis von sehr spezifischen Prozessen und gelten nur in Verbindung mit ganz konkreten Bodenbedingungen. Diese Ergebnisse aus der Literatur lassen somit keine pauschale Aussage über die Wirkung von Biokohle zu. Es gibt keine Studien die solche Mechanismen explizit bei Waldböden untersuchten.

Auch bei N_{\min} Werten gibt es im Lysimeterversuch keine deutlichen Unterschiede zwischen BKS15 und BKS30 bei Zugabe von 30 Tonnen. Bei der 60 Tonnen Variante ist der N_{\min} -Gehalt zum Höhepunkt der Entwicklung im Frühling 2012 bei BKS30 deutlich höher als bei BKS15, was ein möglicher Hinweis auf eine stärkere Nitrifizierung ist. Die Tatsache, dass die im Herbst 2011 und Frühling 2012 gemessenen Werte der potentiellen Ammoniumoxidation bei BKS30 signifikant höher waren, kann diese Vermutung stützen.

Diese höhere biologische Aktivität ist allerdings nicht nachhaltig, wie die Betrachtung über die gesamte Untersuchungsperiode zeigt.

Diese Tatsache (vgl. Kap. 4.2) kann durch diverse Ergebnisse aus Literatur bestätigt werden (vgl. Clough et al. 2013 und Laird, Rogovska 2015), die gleichfalls eine signifikante Reduktion der Nitratauswaschung infolge von Biokohlezugabe feststellten. Die Arbeiten von Yao et al. (2012), Kameyama et al. (2013), Dempster et al. (2013) sowie Dünisch et al. (2007), die sich mit der Stickstoffretention durch Biokohle aus nährstoffreichen Lösungen befassen, konnten gleichfalls eine signifikante Retention von Stickstoff durch Biokohle feststellen. Bei den Säulenversuchen mit Boden wurde bei Yao et al. (2012) eine Verringerung der Nitratauswaschung um 34% bei Zusatz von 2 Gew.-% Biokohle erzielt.

Der Säulenversuch von Laird et al. (2010a) zeigte eine Verringerung der Auswaschung von 60 auf 40% des N-Düngungsinputs durch Biokohle. Allerdings erfolgte eine solche Wirkung erst 10 Wochen nach dem Dünger-Eintrag. Daraus schließen die Autoren,

dass nicht die direkte NO_3 Adsorption sondern andere Mechanismen wie Mineralisierung und Nitrifikation hier eine entscheidende Rolle spielen. Bei den Varianten ohne Dünger führte ein höherer Biokohlezusatz (20 g/kg) zu einer signifikant höheren NO_3 Auswaschung. Dies weist evtl. auf eine höhere Mineralisierungsrate durch Biokohlezugabe hin. Eine höhere Mineralisierungsrate konnte auch in den dieser Arbeit zu Grunde liegenden Untersuchungen am Anfang bei den 60 Tonnen-BKS-Varianten festgestellt werden. Dies führte auch zu einer deutlich höheren Auswaschung gegenüber den 30 Tonnen-BKS-Varianten (vgl. Kap. 4.2).

Im Säulenversuch von McElligott (2011) konnte keine Wirkung von Biokohle auf die Auswaschung von Nitrat aus dem Waldboden festgestellt werden. Dies lag jedoch an insgesamt sehr niedrigen Nitratgehalten im Waldboden. Bei dem landwirtschaftlichen Boden konnte McElligott (2011) dagegen eine deutliche Verringerung der Nitrat Auswaschung durch Biokohlezusatz beobachten. Dabei lagen die Nitratwerte der Variante mit eingearbeiteter Biokohle nochmal deutlich unter denen von an der Oberfläche eingetragener Biokohle.

Ippolito et al. (2012) konnten in einem Topfversuch eine Verringerung der Auswaschung durch Biokohlezusatz feststellen. Im Topfversuch von Borchard et al. (2012) gab es gegensätzliche Wirkungen von Biokohle auf unterschiedliche Bodenarten (+41% Nitrat Auswaschung beim Sandboden und – 17% beim Schluffboden). Die aktivierte Biokohle zeigte eine noch deutlichere Verringerung der NO_3^- -Auswaschung im Schluffboden.

Bei direktem Vergleich der durchgeführten Lysimeteruntersuchungen mit Lysimeterdaten aus der Literatur, kann man feststellen, dass die gewonnenen Ergebnisse gleiche Tendenzen zeigen. So wurde bei Yao et al. (2012) bei einer Anwendung von 25 t/ha in Lysimetern eine Verringerung der Nitrat Auswaschung von 25% erreicht. Die Lysimeterstudie von Ventura et al. (2013) zeigte keine Veränderung der Nitrat Auswaschung in der Anfangsperiode, allerdings eine signifikante Verringerung von 75% im zweiten Untersuchungsjahr. Der Lysimeterversuch von Major et al. (2012) zeigte eine erhebliche Verringerung der Nitrat Auswaschung nach einer einmaligen Applikation von 20 t/ha Biokohle. In einem weiteren Lysimeterversuch von Guarena et al. (2013) konnte eine signifikante Verringerung der Nitrat Auswaschung durch die Ausbringung von 12 t/ha Biokohle und 100% Düngung entsprechend geltender Düngerempfehlung beobachtet werden. Allerdings gab es keine Wirkung bei der Ausbringung der Hälfte von der üblichen Düngungsmenge.

Insgesamt ist festzustellen, dass Biokohle zu einer Verringerung der Nitratauswaschung führt, allerdings kann durch eine induzierte verstärkte Mineralisierungsrate auch ein Anstieg des Nitratgehaltes und damit wiederum eine Erhöhung der Auswaschung stattfinden. Es müssen weitere Auswaschungsversuche, in erster Linie Lysimeterversuche erfolgen, da diese tendenziell höheren Retentionsmengen aufweisen, die möglichst verschiedene Variationen des Ausgangsbodens, der Menge der Biokohlezumischung sowie unterschiedliche Proportionen in der Kombination von Biokohle und Dünger beinhalten.

Die Ergebnisse zu dem Baumwachstum zeigen, dass der Einsatz von Biokohlesubstraten bei der Gemeinen Fichte nicht zu einer nennenswerten Verbesserung der Anwuchssicherheit gegenüber der Kontrolle führt. Bei der Rotbuche dagegen kann eine signifikante Steigerung der Vitalität in den ersten Jahren erreicht werden. Diese Feststellung steht im Einklang mit dem Ergebnis der Metastudie von Thomas und Gale (2015), die eine deutliche positive Wirkung von Biokohle auf Laubbäume und eine nur geringfügige positive Wirkung auf Nadelbäume zeigt. Thomas und Gale (2015) zeigen aber auch, dass eine hohe Variabilität in der Wirkung auf einzelne Baumarten besteht. Diese Variabilität ist bei den Laubbäumen deutlich höher.

Eine mögliche Erklärung für eine deutlich positivere Reaktion der Laubbäume gegenüber den Nadelbäumen liegt in den unterschiedlichen ökologischen Anforderungen dieser Artengruppen. Im Gegensatz zu den Laubbäumen sind die Nadelbäume an nährstoffarme Standorte angepasst und reagieren auch nur beschränkt und mit Verzögerung auf die Veränderung der Nährstoffversorgung (vgl. Bond 1989, Coomes et al. 2005 und Lusk 2011).

So haben Coomes et al. (2005) die Verteilung von Angiospermen und Koniferen entlang einer Bodenchronosequenz (siehe Glossar) im Süden Neuseelands untersucht. An verschiedenen repräsentativen Standorten dieser Bodenchronosequenz wurde eine große Anzahl an kleineren und größeren Parzellen eingerichtet. Auf diesen Parzellen wurde eine umfangreiche Vegetationsaufnahme durchgeführt. Anschließend wurde Höhe und Stammdurchmesser sowie Gehalte an Nährstoffen in den Blättern der Bäume erfasst. Gleichzeitig wurden chemische und physikalische Bodenparameter sowie Strahlungsparameter gemessen.

Die Ergebnisse zeigten, dass mit der Zunahme der Koniferen im Verhältnis zu Angiospermen entlang der Bodenchronosequenz mit einer Abnahme des nutzbaren

Wasserhaltekapazitäts und der Gehalte an Nährstoffen in Böden korreliert. Während die Angiospermen die Koniferen auf nährstoffreichen Standorten blockieren, können sie sich auf den nährstoffarmen Standorten nicht ausbreiten, die Koniferen kommen dagegen mit geringeren Nährstoffmengen zurecht. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass sie mehrjährige Blätter besitzen und dadurch eine effektivere Nährstoffspeicherung erreichen.

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur gestaltet sich schwierig, da von den im Kapitel 2.2 genannten Arbeiten, sich nur zwei mit der Wirkung von Biokohle-Kompost-Gemischen befassen (Eyles et al. 2013 und Ghosh et al. 2015). Dabei beschäftigt sich die Arbeit von Eyles et al. (2013) ausschließlich mit der Fruchtentwicklung. Ein direkter Vergleich kann somit nur mit der Arbeit von Ghosh et al. (2014) gezogen werden. Hier wurden bei einem Regenbaum (*Samanea saman*) deutliche Längenzuwächse durch Komposteinmischung erzielt. Die Biokohlezumischung spielte keine Rolle beim Längenwachstum (siehe Tabelle 2). Auch das Kompost-Biokohle-Gemisch blieb durch den insgesamt kleineren Kompostgehalt hinter der reinen Kompostvariante. Allerdings hatte die Biokohle eine deutliche positive Wirkung auf das Dickenwachstum (siehe Tabelle 2) und hatte in Kombination mit Kompost eine mit der reinen Kompost Variante vergleichbare Wirkung. Die Kompostzumischung zeigt also eine eindeutig positive Wirkung, was den Ergebnissen der vorliegenden Studie entspricht. Die Wirkung von Biokohle zeigt keine eindeutige Tendenz, allerdings deutet ein größeres Dickenwachstum bei Biokohlezusatz auf eine Steigerung der Baumvitalität.

Bei der Verwendung von Kompost-Biokohle-Gemischen muss man auch bedenken, dass die nicht aufgeladene Biokohle zu einer Verringerung der Nährstoffverfügbarkeit durch Nährstoffanlagerung an Biokohlepartikeln führen kann (vgl. Terytze und Wagner 2016). Dies kann, unter Umständen, die Wachstumsverhältnisse deutlich beeinflussen.

Beim Stickstoffgehalt in den Blättern zeigte die Biokohle in der Arbeit von Ghosh et al. (2014) eine deutliche Wirkung (vgl. Kapitel 2.2). Die reine Biokohle-Variante übertraf hier sogar sowohl die Kompost-Biokohle-Gemisch als auch die reine Biokohle-Variante. Dies steht allerdings im Gegensatz zu den Ergebnissen von McElligott (2011) wo eine Verringerung des Stickstoffgehalts in den Blättern von Pappeln bei Biokohlezumischung beobachtet wurde. Die Biokohle scheint also die Aufnahme von Stickstoff bedeutend zu beeinflussen, obwohl die Art und Richtung dieses Einflusses

unklar ist. Diese Tatsache steht im Einklang mit den Ergebnissen dieser Studie (vgl. Kapitel 4.1).

Thomas und Gale (2015) stellen in ihrer Metastudie eine deutlich stärkere Wirkung bei Laubbäumen im Vergleich zu Nadelbäumen fest. Allerdings wurde ein direkter Vergleich zwischen der Wirkung auf Laub- und Nadelbäumen in nur 3 Studien durchgeführt. Hierbei handelt es sich um die Arbeiten von Wardle et al. (1998), Robertson et al. (2012) und Pluchon et al. (2014) (vgl. Kapitel 2.2).

Bei Wardle et al. (1998) zeigt die Biokohle ihre Wirkung nur bei Birke, hier wird aber ein spezieller Mechanismus von Phenoladsorption und dadurch entstehende bessere Stickstoff- und Phosphorversorgung als entscheidender Prozess vermutet. Diese These wird durch die Arbeit von DeLuca et al. (2002) unterstützt.

In der Arbeit von Pluchon et al. (2014) konnte zum einen eine allgemein höhere Wirkung auf Laubbäume im Vergleich zu Nadelbäumen festgestellt werden. Zum anderen konnte eine größere Wirkung der aus Laubholz stammender Biokohle gezeigt werden. Dies ist auf höhere Stickstoff- und Phosphorgehalte zurückzuführen.

Bei Robertson et al. (2012) zeigt reine Biokohle Mischung Wirkung bei Erle und keine Wirkung bei Küsten Kiefer, während die Kombination von Biokohle und Dünger bei beiden zu signifikant höheren Wachstum führt (vgl. Kapitel 2.2).

Die Biokohle als Komponente des BKS zeigt einen positiven Einfluss auf das Baumwachstum sowohl bei Buchen als auch bei Fichten (Vergleich von BKS30 zu BKS15 im Kapitel 4.3). Dies steht im Einklang mit dem Großteil der Studien, die sich mit Biokolezumischung sowie mit der Kombination von Biokohle und mineralischen Düngern beschäftigen (siehe Kapitel 2.2). Interessant ist auch, dass ein Großteil dieser Arbeiten eine positive Wirkung von Biokohle-Dünger-Kombinationen zeigt (vgl. Kap. 2.2). Dazu gehören die Arbeiten von Hoshi (2001), Reverchon et al. (2014), Robertson et al. (2012), McElligott (2011), Fagbenro et al. (2013).

Auch die alleinige Mischung von Biokohle zeigt in mehreren Studien eine positive Wirkung, die in vielen Fällen die Varianten mit mineralischen Düngern übertrifft (siehe Kap. 2.2). Dazu gehören die Arbeiten von Robertson et al. (2012), Fagbenro et al. (2013), Scharenbroch et al. (2013), Siregar (2007), Wardle (1998), Pluchon et al. (2014) und Makoto et al. (2014).

In vielen dieser Studien ist die positive Wirkung mit einem zusätzlichen Input an mit Biokohle verbundenen Nährstoffen zu erklären (vgl. Kapitel 2.1). Da in dieser Studie aber zwei BKS mit ähnlichen Nährstoffausgangswerten (siehe Kap. 3) verwendet

wurden und die Ergebnisse des Lysimeterversuchs keine nennenswerte zeitliche Wirkung auf die Nährstoffbilanz zeigen (vgl. Kapitel 4.1), kann man davon ausgehen, dass dieser Faktor hier keine Rolle gespielt hat.

Eine Ausnahme bildet die Dynamik beim Stickstoff, die allerdings zeitlich begrenzt ist (vgl. Kapitel 4.1). Eine solche Dynamik kann auch angesichts der bereits erwähnten Literaturergebnisse als potentieller Wirkungsmechanismus gelten.

Die Dynamik ist eng mit der biologischen Aktivität verbunden, auch diese zeigt eine gewisse zeitlich begrenzte Beeinflussung durch Biokohle (vgl. Kapitel 4.1).

Die Ergebnisse aus der Literatur wie z.B. von Makoto et al. (2010) zeigen, dass Biokohle eine positive Wirkung auf Mykorrhiza Entwicklung und dadurch auch auf Baumwachstum haben kann (vgl. Kapitel 2.2). Eine wachsende Anzahl von Studien zeigt eine positive Synergie Wirkung von Mykorrhiza und Biokohle (vgl. dazu Ortas (2016)). Dafür sind weitere umfangreiche Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen und mit zusätzlicher Betrachtung der Mykorrhizaentwicklung notwendig.

6. Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerung

6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ziel dieser Dissertation bestand darin, das grundsätzliche Potential eines Einsatzes von Biokohlesubstraten im forstlichen Bereich zu erkunden. Dabei wurden zwei unterschiedliche, für die Modellregion Hochsauerlandkreis relevante, Anwendungsgebiete: Windwurfflächen und Weihnachtsbaumkulturen untersucht.

Bei der Untersuchung einer möglichen Wiederbepflanzung auf Windwurfflächen stand die Vorgabe der staatlichen Forste, eine naturnahe Mischbewaldung zu etablieren, im Hintergrund.

Obwohl die Untersuchungen eine kurze Phase der Entwicklung der Jungbäume (2011-2014) erfasst haben, konnten zum Teil signifikante Tendenzen festgestellt werden. Die wichtigsten Erkenntnisse sind folgende:

Die Zugabe von BKS hat einen geringfügigen Mehrertrag bei der Bepflanzung von Fichten auf Windwurfflächen und Nordmantannen auf Flächen der Weihnachtsbaumkulturen erbracht. Obwohl die Böden auf der Windwurffläche extrem nährstoffarm sind, zeigten die Fichten auf der Kontrollparzelle stärkere Zuwächse als bei Zugabe von BKS15. Durch Zugabe von BKS wurde ein deutlich verbesserter Wuchs bei der Bepflanzung von Buchen auf Windwurfflächen erzielt.

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Ergebnissen aus der Literatur, die zeigen, dass Laubbäume grundsätzlich deutlich stärker als Nadelbäume auf die Verbesserung der Nährstoffversorgung reagieren. Nadelbäume können sich dagegen einer schlechten Nährstoffversorgung sehr gut anpassen.

Auf der Windwurffläche konnte darüber hinaus keine Veränderung der Bodenkennwerte durch BKS-Zugabe festgestellt werden, weil die Ausgangswerte für pH und Nährstoffe bereits optimal waren und eine gewisse Inhomogenität in der Fläche zu Schwankungen in den Hintergrundwerten führte.

Die Biokohle als Komponente von BKS hatte eine positive Wirkung auf das Wachstum sowohl von Buchen als auch von Fichten auf der Windwurffläche. Diese Wirkung war wiederum bei Buchen deutlich ausgeprägter.

Ein Einfluss der Zugabe von Biokohle konnte nur in Bezug auf die Stickstoffdynamik und die biologische Aktivität festgestellt werden. Dieser Einfluss war allerdings zeitlich auf die Anfangsphase der Untersuchung begrenzt. Es kann hier keine eindeutige Aussage über die potentiellen Mechanismen, die zur verbesserten Vitalität der Bäume führen gemacht werden. In der Literatur wird auch vielfach über die positive Wirkung von Biokohle auf Mykorrhiza, die für Wurzelentwicklung der Bäume extrem wichtig ist, berichtet. Diese Wirkung wurde im Rahmen der Dissertation jedoch nicht untersucht.

Im Rahmen des Lysimeterversuchs konnte eine deutliche Reduzierung der Nitratauswaschung durch Biokohle um bis zu 58% festgestellt werden. Dieses Reduktionspotential wird auch von zahlreichen Ergebnissen aus der Literatur bestätigt. Allerdings zeigt sich auch, dass die Ausbringungsmenge von BKS von entscheidender Bedeutung ist, da durch Zugabe von 60 Tonnen bereits eine deutlich höhere Nitratauswaschung als bei den Varianten mit 30 Tonnen BKS beobachtet wurde. Dies ist auch mit der Stickstoffdynamik und der biologischen Aktivität verbunden. Biokohle kann sowohl in Richtung Stickstoffspeicherung als auch verstärkter Nitrifizierung wirken.

Diese Ergebnisse zeigen, dass Biokohle und BKS immer auf konkrete Ausgangsbedingungen und Zusammensetzung von Komponenten (BKS) geprüft bzw. angepasst werden sollen. Dies bezieht sich sowohl auf das Erreichen der optimalen Wirkung hinsichtlich der Baumvitalität als auch auf Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung.

In Bezug auf Windwurfflächen zeigt der Kompost (als BKS Komponente) deutlich höhere Nitratwerte als der Ausgangsboden. Eine potentielle Anwendung von

komposthaltigen Substraten in diesen, vielfach als Trinkwasserschutzgebieten fungierenden Waldflächen kann somit problematisch werden. Die Retentionsfähigkeit von Biokohle kann eine solche Zusatzbelastung verhindern.

Diese Wirkung kann auch auf stark gedüngten Flächen wie den Weihnachtsbaumkulturen von Bedeutung sein. Allerdings wurden diese Böden in dieser Studie in Bezug auf die Nitratauswaschung nicht untersucht.

6.2. Fazit

Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass Biokohlesubstrate eine wichtige Rolle bei der Wiederbewaldung mit heimischen Buchen und allgemein Laubbäumen spielen können und somit für den Einsatz bei einer Wiederherstellung von Mischwäldern empfohlen werden können. Eine zusätzliche Nitratbelastung auf den Flächen kann durch eine angepasste Ausbringungsmenge und ein entsprechendes Biokohle-Kompost-Verhältnis verhindert werden. Eine solche optimierte Zusammensetzung muss im Rahmen weiterer Untersuchungen bestimmt werden.

Somit könne folgende wichtige Punkte für zukünftige Untersuchungen formuliert werden:

- Langzeituntersuchungen sind notwendig. Obwohl die vorliegende Dissertation die Prozesse bereits über einen längeren Zeitraum untersucht hat, konnte sie nur ein frühes Entwicklungsstadium der Bäume erfassen. Sehr lange Zeitreihen sind im Bereich der forstlichen Anwendung unabdingbar
- Die Ergebnisse dieser Dissertation weisen darauf hin, dass Biokohle einen bedeutenden Einfluss auf die Stickstoffdynamik und biologische Aktivität haben kann. Dieser Zusammenhang soll in detaillierteren Versuchen aufgeklärt werden.
- Aus der Betrachtung der relevanten Literatur wird deutlich, dass Mykorrhiza eine bedeutende Rolle für die Entwicklung der Bäume spielt. Die Ergebnisse aus der Literatur deuten auch auf eine positive Wirkung von Biokohle auf die Mykorrhiza Entwicklung. Dieser Zusammenhang wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation nicht untersucht, muss aber bei zukünftigen Studien unbedingt berücksichtigt werden.
- Die Ergebnisse dieser Studie sowie die Ergebnisse aus der Literatur zeigen, dass Biokohle bzw. Biokohlesubstrate unterschiedliche Wirkungen auf verschiedene Baumarten haben. In Zukunft müssen die Biokohlesubstrate in

Abhängigkeit von den zu untersuchenden Baumarten in umfangreichen Vorversuchen angepasst werden

7. Literaturverzeichnis

- Amonette J.E., Joseph S. (2009) Characteristics of Biochar: Microchemical Properties. In: Biochar for Environmental Management (Hrsg. Lehmann J, Joseph S), S. 33–52. Earthscan, London.
- Baumgarten A., Fürst A., Mutsch F., Raith F., Schuster K. (2008) Empfehlungen für die sachgerechte Düngung von Christbaumkulturen. BMULW. Wien
Internet: http://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/nebennutzung/christbaeume/bfw_duengung_christbaum/bfw_duengung_christbaumkultur_2008_2.pdf
- Berglund, L.M. DeLuca T.H. und Zackrisson O. (2004) Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests. *Soil Biology & Biochemistry* 36: 2067-2073.
- Biederman LA, Harpole WS (2013) Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy* 5:202–214
- Bioabfallverordnung (BioAbfV) (1998) Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz
- Bird MI, Ascough PL, Young IM, Wood CV, Scott AC (2008) X-ray microtomographic imaging of charcoal. *Journal of Archaeological Science*, 35: 2698–2706.
- Bond, W. J. 1989. The Tortoise and Hare: Ecology of Angiosperm Dominance and Gymnosperm Persistence. *Biol. J. Linn. Soc.* 36: 227–249.
- Borchard N, Wolf A, Laabs W, Aeckersberg R, Scherer H.W, Moeller A, Amelung W (2012) Physical activation of biochar and its meaning for soil fertility and nutrient leaching – a greenhouse experiment. *Soil Use and Management* 28: 177-184
- Bruckman V.J., Varol E.A., Uzun B.B., Liu J. (2016): Biochar: A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation. Cambridge University Press
- Budi SW, Setyaningsih L (2013) Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improved early growth of Neem (*Melia azedarach* Linn.) seedling under Greenhouse conditions. *Journal Manajemen Hutan Tropika* 19:103–110
- Cheng C-H, Lehmann J, Engelhard MH (2008) Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 1598–1610.
- Chidumayo EN (1994) Effects of wood carbonization on soil and initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. *For Ecol Manage* 70:353–357
- Clough T.J., Condon L.M., Kammann C. und Müller C. (2013) A Review of Biochar and Soil Nitrogen Dynamics. *Agronomy* 3: 275-293

Coomes DA, Allen RB, Bentley WA, Burrows LE, Canham CD, Fagan L, Forsyth DM, Gaxiola-Alcantar A, Parfitt RL, Ruscoe WA, Wardle DA, Wilson DJ, Wright EF (2005) The hare, the tortoise and the crocodile: the ecology of angiosperm dominance, conifer persistence and fern filtering. *J Ecol* 93:918–935

Crane-Droesch A, Abiven S, Jeffery S, Torn MS (2013) Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environ Res Lett* 8:044049

Cui H-J, Wang MK, Fu M-K, Ci E (2011) Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. *Journal Soils Sediments*, 11: 1135–114

DeLuca T.H. Nilsson M.-C. Zackrisson O. (2002) Nitrogen mineralization and phenol accumulation along a fire chronosequence in northern Sweden *Oecologia* 133:206-214

DeLuca T.H. MacKenzie M.D., Gundale M.J. (2009) Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations. In: *Biochar for Environmental Management* (Hrsg. Lehmann J, Joseph S), S. 251–270. Earthscan, London.

Dempster, D.N.; Jones, D.L.; Murphy, D.M. (2012) Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. *Soil Res.* 50: 216–221.

DIN ISO 10390 (2005) Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes. Deutsches Institut für Normung. Berlin

DIN ISO 11260 (1997) Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität und der Basensättigung unter Verwendung von Bariumchloridlösung. Deutsches Institut für Normung. Berlin

DIN ISO 15685 (2004) Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der potentiellen Nitrifizierung und Hemmung der Nitrifizierung - Schnellverfahren mittels Ammoniumoxidation. Deutsches Institut für Normung. Berlin

DIN EN ISO 16072 (2011) Bodenbeschaffenheit - Laborverfahren zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung. Deutsches Institut für Normung. Berlin

DIN 19746 (2005) Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von mineralischem Stickstoff (Nitrat und Ammonium) in Bodenprofilen (Nmin-Laborverfahren). Deutsches Institut für Normung. Berlin

Downie A, Crosky A, Munroe P (2009) Physical properties of biochar. In: *Biochar for Environmental Management* (Hrsg. Lehmann J, Joseph S), S. 13–29. Earthscan, London.

Dünisch O, Lima V.C, Seehan G, Donath J, Montoia V.R, Schwarz T (2007) Retention properties of wood residues and their potential for soil amelioration. *Wood Science and Technology* 41: 169-189

Eyles A, Bound S, Oliver G, Paterson S, Direen J, Corkrey R, Hardie M, Green S, Clothier B, Close D (2013) Does biochar improve apple productivity? Aust Fruitgrower 2013:32–34

Fagbenro JA, Oshunsanya SO, Onawumi OA (2013) Effect of saw dust biochar and NPK 15:15:15 inorganic fertilizer on Moringa oleifera seedlings grown in an oxisol. Agrosearch 13:57–68

Gardiner B., Schuck A., Schelhaas M-J., Orazio C., Blennow K., Nicoll B. (Hrsg.) (2013) Living with Storm. Damage to Forest. European Forest Institute

Genesio L, Miglietta F, Lugato E, Baronti S, Pieri M, Vaccari FP (2012) Surface albedo following biochar application in durum wheat. Environmental Resource Letters 7

Ghosh S, Ow LF, Wilson B (2015) Influence of biochar and compost on soil properties and tree growth in a tropical urban environment. Int J Environ Sci Technol 12:1303–1310

Gitelson A. A., Buschmann C., Lichtenthaler H. K. (1999) “The Chlorophyll Fluorescence Ratio F735/F700 as an Accurate Measure of Chlorophyll Content in Plants” Remote Sens. Environ. 69:296-302

Glaser, B. 2007 Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century Phil. Trans. R. Soc. B 362: 187-196

Guerena D, Lehmann J, Hanley K, Enders A, Hyland C, Riha S (2013) Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize based production system. Plant and Soil 365: 239-254

Handbuch Forstliche Analytik (2005) Teil B: Pflanzenuntersuchungen. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Hass A, Gonzalez JM, Lima IM, Godwin HW, Halvorson JJ, Boyer DG (2012) Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid Appalachian soil. Journal of Environmental Quality 41: 1096–1106

Headlee WL, Brewer CE, Hall RB (2014) Biochar as a substitute for vermiculite in potting mix for hybrid poplar. Bioenergy Res 7:120–131

Hegg C., Jeisy M., Waldner P. (2004) Wald und Trinkwasser. Eine Literaturstudie. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. Birmensdorf

Heiskanen J, Tammeorg P, Dumroese RK (2013) Growth of Norway spruce seedlings after transplanting into silty soil amended with biochar: a bioassay in a growth chamber—short communication. J For Sci 59:125–129

Hoshi, T. (2001) Growth promotion of tea trees by putting bamboo charcoal in soil, In Proceedings of 2001 International Conference on O-cha (Tea) Culture and Science, Tokyo, Japan, pp 147-150.

Ippolito J.A, Novak J.M, Busscher W.J, Ahmedna B.M, Rehrah D, Watts D.W (2012) Switchgrass biochar affects two aridisols. *Journal of Environmental Quality* 41: 1123-1130

Jeffery S, Verheijen FGA, Van Der Velde M, Bastos AC (2011) A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric Ecosys Environ* 144:175–187

Kameyama, K.; Miyamoto, T.; Shiono, T.; Shinogi, Y. (2012) Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil. *J. Environ. Qual.* 41: 1131–1137.

Laird DA, Fleming P, Davis DD, Horton R, Wang B, Karlen DL (2010a) Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158: 436–442

Laird DA, Fleming P, Davis DD, Horton R, Wang B, Karlen DL (2010b) Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158: 443–449

Laird DA, Rogovska N (2015) Biochar effects on nutrient leaching In: *Biochar for environmental management*. 2 Edition. Earthscan. London

Landesbetrieb Wald und Holz NRW (2007) Empfehlungen für die Wiederbewaldung von Orkanflächen.

Internet: <http://www.sdwnrw.de/infos/Wiederbewaldungskonzept.pdf>

Lehmann J, Joseph S (Hrsg.) (2009) *Biochar for environmental management*. 1 Edition. Earthscan, London

Lehmann J, Joseph S (Hrsg.) (2015) *Biochar for environmental management*. 2 Edition. Earthscan, London

Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D (2011) Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 1912–1836.

Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O’Neill B, Skjemstad J.O, Thies J, Luizao F.J, Petersen J., Neves E.G (2006) Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1719-1730

Liu X, Zhang A, Ji C, Joseph S, Bian R, Li L, Pan G, Paz-Ferreiro J (2013) Biochar’s effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. *Plant Soil* 373:583–594

Lusk CH (2011) Conifer-angiosperm interactions: physiological ecology and life history. In: Turner BL, Cernusak LA (eds) *Ecology of tropical podocarps*. Smithsonian Institution Press, Smithsonian Contributions to Botany, Washington, DC, pp 157–164

Makoto K, Makoto K, Tamai Y, Kim YS, Koike T (2010) Buried charcoal layer and ectomycorrhizae cooperatively promote the growth of *Larix gmelinii* seedlings. *Plant Soil* 327:143–152

Major J., Steiner C., Downie A., Lehmann J. (2009) Biochar Effects on Nutrient Leaching. In: *Biochar for Environmental Management* (Hrsg. Lehmann J, Joseph S), S. 271–287. Earthscan, London.

Major J. Rondon M, Molina D, Riha S.J, Lehmann J (2012) Nutrient leaching in a Colombian savanna Oxisol amended with biochar. *Journal of Environmental Quality* 41: 1076-1086

McElligott KM (2011) Biochar amendments to forest soils: effects on soil properties and tree growth. MSc Thesis, University of Idaho. p. 94

Mikan, C. J., Abrams M. D. (1995) Altered forest composition and soil properties of historic charcoal hearths in southeastern Pennsylvania *Canadian Journal of Forest Research-Revue* 25:687-696.

Mikan, C. J., Abrams M. D. (1996) Mechanisms inhibiting the forest development of historic charcoal hearths in southeastern Pennsylvania *Canadian Journal of Forest Research-Revue* 26:1893-1898.

Novak JM, Lima I, Xing B et al. (2009b) Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3: 195–206.

Ogawa, M., Okimori, Y. (2010) Pioneering works in biochar research, Japan *Australian Journal of Soil Research*, 48: 489–500

Ortas I. (2016): The Role of Mycorrhizae and Biochar in Plant Growth and Soil Quality In: *Biochar: A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation* (Hrsg. Bruckman V.J. et al.) S. 315-335. Cambridge University Press

Page-Dumrose D.S., Coleman M.D., Thomas S.C. (2016): Opportunities and Uses of Biochar on Forest Sites in North America. In: *Biochar: A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation* (Hrsg. Bruckman V.J. et al.) S. 315-335. Cambridge University Press

Pluchon N, Gundale MJ, Nilsson M-C, Kardol P, Wardle DA (2014) Stimulation of boreal tree seedling growth by wood-derived charcoal: effects of charcoal properties, seedling species and soil fertility. *Func Ecol* 28:766–775

Pluchon N (2015) Functional Role of Fire-derived Charcoal in Boreal Forest Ecosystem Processes. Doktorarbeit. Swedish University of Agricultural Sciences Umeå 2015

Reverchon F, Yang H, Ho TY, Yan G, Wang J, Xu Z, Chen C, Zhang D (2014) A preliminary assessment of the potential of using an acacia-biochar system for spent mine site rehabilitation. *Environ Sci Pollut Res* 22:2138–2144

Robertson S J., Rutherford M., Lopez-Gutierrez J. C., Massicotte H.B. (2012) Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of subboreal forest soils. *Can J Soil Sci* 92:329–340

Rondon MA, Lehmann J, Ramirez J, Hurtado M (2007) Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils*, 43: 699–708.

Santalla M., Omil B., Rodríguez-Soalleiro R., Merino A. 2011 Effectiveness of wood ash containing charcoal as a fertilizer for a forest plantation in a temperate region. *Plant Soil*. 346: 63-78.

Scharenbroch BC, Meza EN, Catania M, Fite K (2013) Biochar and biosolids increase tree growth and improve soil quality for urban landscapes. *J Env Qual* 42:1372–1385

Siregar CA (2007) Effect of charcoal application in the early growth stage of *Acacia mangium* and *Michelia montana*. *J For Res* 4:119–130

Sovu MT, Savadogo P, Oden PC (2012) Facilitation of forest landscape restoration on abandoned swidden fallows in Laos using mixed-species planting and biochar application. *Silva Fenn* 46:39–51

Spokas, K.A.; Novak, J.M.; Venterea, R.T. (2012) Biochar's role as an alternative N-fertilizer: Ammonia capture. *Plant Soil* 350: 35–42.

Taghizadeh-Toosi A., Clough T.J., Sherlock R.R., Condon L.M. (2012) A wood based low-temperature biochar captures NH₃-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability. *Plant Soil* 353: 73-84

Terytze K., Wagner R. (Hrsg.) (2016) Handlungsanleitung – Verwertung von organischen Reststoffen zur Erzeugung fruchtbarer Pflanzenkohlesubstrate und deren Nutzung im Gartenbau. Shaker Verlag. Aachen

Thomas S.C., Gale N. (2015) Biochar and forest restoration: a review and metaanalysis of tree growth responses *New Forests* 46: 931-946

Thies J.E., Rillig M.C. (2009) Characteristics of Biochar: Biological Properties. In: *Biochar for Environmental Management* (Hrsg. Lehmann J, Joseph S), S. 85–105. Earthscan, London.

Van Zwieten L, Kimber S, Morris S et al. (2010) Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327: 235-246

Ventura, M.; Sorrentib, G.; Panzacchib, P.; Georgea, E.; Tonona, G. (2013) Biochar reduces short-term nitrate leaching from a horizon in an apple orchard. *J. Environ. Qual.* 42: 76–82.

VDLUFA (Hrsg.) (1991) *Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden.* VDLUFA-Verlag, Darmstadt

VDLUFA (Hrsg.) (2004) Methodenbuch Band 1 b: Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Wardle DA, Zackrisson O, Nilsson MC (1998) The charcoal effect in boreal forests: mechanisms and ecological consequences. *Oecologia* 115:419–426

Warnock DD, Lehmann J, Kuyper TW, Rilling MC (2007) Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300: 9–20.

Wilson K. (2010) Justus von Liebig and the Birth of Modern Biochar. *Journal für Terroirwein und Biodiversität*. Internet: www.ithakajournal.net/english-justus-von-liebig-and-the-birth-of-modern-biochar

Wolf B., Riek W. (1996) Deutscher Waldbodenbericht. Band I und II. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bonn.

Woods W.I., Teixeira W.G., Lehmann J., Steiner C., Winkler-Prins A., Rebellato L. (Hrsg.) (2009): *Amazonian Dark Earth: Wim Sombroek's Vision*. Springer. Niederlande

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. *Chemosphere* 89: 1467–1471.

Zackrisson O., Nilsson MC., Wardle DA (1996) Key ecological function of charcoal from wildfire in the boreal forest. *Oikos* 77: 10-19

Nicht publizierte Quellen

Daum A., Böttcher J. (2011) Quartalsbericht LaTerra. Areal GmbH

Witteler M. (2011) Säulenversuche zur Untersuchung der Nährstoffauswaschung bei unterschiedlichen Terra preta Substraten und Böden ehemaliger Köhlerstandorte im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens La Terra. Bachelorarbeit

8. Anhang

Abkürzungen: H – Herbst, F - Frühling

8.1. Bodenanalysen. Ergebnisse

Tabelle A1: pH-Wert

Lysimeter	H 2011	F 2012	H 2012	F 2013	H 2013	F 2014	H 2014	F 2015	MITTEL	Stdabw
Kontrolle	3,85	3,78	3,98	3,96	3,82	3,85	3,98	3,97	3,90	0,08
BKS15 30t	4,77	4,23	4,36	4,06	4,09	4,11	4,14	4,28	4,25	0,23
BKS15 60t	4,33	4,46	4,32	4,69	4,33	4,28	4,30	4,52	4,40	0,14
BKS30 30t	4,14	4,18	4,02	4,04	3,89	3,87	3,99	4,07	4,02	0,11
BKS30 60t	4,62	4,60	4,53	4,47	4,22	4,30	4,13	4,27	4,39	0,19
Oberkirchen										
Kontrolle	6,34	5,98	6,32	6,18	6,33	5,88	5,85	6,27	6,14	0,21
BKS15	6,37	6,20	6,38	6,51	6,17	6,03	5,85	6,07	6,20	0,22
BKS30	6,13	6,22	6,13	6,35	6,10	5,99	6,04	6,10	6,13	0,11

Tabelle A2: KAKeff in mmol/kg

Lysimeter	2011	Stda	2012	Stda	2013	Stda	2014	Stda	2015	Stda	MITTEL	Stda
Kontrolle	25	2	24	4	21	4	24	6	26	9	24	2
BKS15 30t	25	1	28	10	21	7	33	2	26	2	27	5
BKS15 60t	45	2	25	7	23	6	37	3	36	2	33	9
BKS30 30t	22	4	22	4	31	5	24	3	26	5	25	4
BKS30 60t	48	2	39	5	30	5	39	2	30	3	37	7
Oberkirchen												
Kontrolle	56	5	51	4	61	6	57	10	55	3	56	4
BKS15	58	2	50	6	53	4	61	6	52	2	55	4
BKS30	54	4	47	6	41	8	57	6	45	1	49	7

Tabelle A3: Pflanzenverfügbare Phosphor. P-cal in mg/kg. Lysimeterversuch

Lysimeter	H 2011	Stda	F 2012	Stda	H 2012	Stda	F 2013	Stda	H 2013	Stda	F 2014	Stda
Kontrolle	1,8	0,4	5,3	0,6	5,1	0,5	3,9	0,3	6,0	1,0	5,0	1,0
BKS15 30t	9,0	1,2	11,3	0,6	7,1	0,1	3,7	0,1	6,5	0,7	5,4	0,3
BKS15 60t	21,9	0,6	17,3	1,2	12,7	0,4	13,9	0,6	9,1	0,4	8,0	0,6
BKS30 30t	8,2	0,6	11,2	0,2	6,2	2,0	6,7	2,3	7,2	0,8	5,4	0,4
Lysimeter	F 2015	Stda	MITTEL	Stda								
Kontrolle	3,9	0,2	4,5	1,3								
BKS15 30t	7,5	4,2	6,9	2,4								
BKS15 60t	14,5	2,4	13,1	5,0								
BKS30 30t	8,7	3,5	7,4	2,0								
BKS30 60t	10,6	1,7	11,9	5,3								

Tabelle A4: Pflanzenverfügbare Phosphor. P-cal in mg/kg. Weihnachtsbaumkulturen

Oberkirchen	H 2011	Stda	F 2012	Stda	H 2012	Stda	F 2013	Stda	H 2013	Stda	F 2014	Stda	H 2014	Stda
Kontrolle	99,3	1,4	94,1	0,9	98,9	3,0	116,7	3,3	105,4	4,5	106,1	6,3	99,9	3,1
BKS15	116,4	1,3	120,6	2,8	96,4	3,4	108,7	1,1	94,0	7,7	109,7	8,9	99,2	6,1
BKS30	113,3	3,8	116,7	0,4	119,3	10,4	100,8	2,5	123,5	5,2	92,5	6,4	106,3	2,8
Oberkirchen	F 2015	Stda	MITTEL	Stda										
Kontrolle	132,4	11,2	106,6	12,4										
BKS15	137,7	10,9	110,4	14,5										
BKS30	137,2	34,9	113,7	13,9										

Tabelle A5: Pflanzenverfügbare Kalium. K-cal in mg/kg. Lysimeterversuch

Lysimeter	H 2011	Stda	F 2012	Stda	H 2012	Stda	F 2013	Stda	H 2013	Stda	F 2014	Stda
Kontrolle	58,6	1,6	61,5	3,8	64,7	4,6	57,9	2,6	62,0	1,4	56,0	7,8
BKS15 30t	76,1	2,9	77,1	3,7	75,5	1,7	72,4	2,5	67,3	7,1	84,1	1,3
BKS15 60t	149,6	5,9	145,7	3,5	159,7	5,7	134,0	1,7	114,2	5,3	91,7	3,6
BKS30 30t	107,7	2,7	105,9	2,7	114,5	7,4	97,9	3,3	84,9	4,5	87,4	4,4
BKS30 60t	124,6	1,8	127,5	3,0	131,9	1,5	185,0	1,4	93,3	4,5	106,6	0,9
Lysimeter	H 2014	Stda	F 2015	Stda	MITTEL	Stda						
Kontrolle	67,1	4,5	56,7	16,7	60,6	3,9						
BKS15 30t	79,4	4,6	73,2	3,6	75,6	5,0						
BKS15 60t	121,2	12,5	143,2	1,8	132,4	22,2						
BKS30 30t	109,1	19,0	104,7	1,4	101,5	10,6						
BKS30 60t	102,7	5,1	123,0	1,4	124,3	28,0						

Tabelle A6: Pflanzenverfügbare Kalium. K-cal in mg/kg. Weihnachtsbaumkulturen

Oberkirchen	H 2011	Stda	F 2012	Stda	H 2012	Stda	F 2013	Stda	H 2013	Stda	F 2014	Stda	H 2014	Stda
Kontrolle	283,5	15,2	386,0	11,6	290,4	8,3	384,1	12,1	344,3	9,5	250,1	4,2	231,2	3,8
BKS15	379,8	3,0	361,3	24,4	377,3	23,7	326,7	3,6	467,9	20,1	342,2	5,1	295,8	19,4
BKS30	347,7	15,4	337,1	18,6	370,1	19,2	312,7	7,1	440,4	13,1	307,6	7,2	272,8	10,7
Oberkirchen	F 2015	Stda	MITTEL	Stda										
Kontrolle	295,9	16,5	308,2	57,9										
BKS15	393,8	18,0	368,1	51,4										
BKS30	365,5	26,1	344,2	50,5										

Tabelle A7: Pflanzenverfügbare Magnesium. Mg-CaCl in mg/kg. Lysimeterversuch

Lysimeter	H 2011	Stda	F 2012	Stda	H 2012	Stda	F 2013	Stda	H 2013	Stda	F 2014	Stda
Kontrolle	16,6	1,0	12,8	0,5	12,5	0,4	36,1	2,2	11,0	0,3	11,2	1,1
BKS15 30t	71,5	0,3	74,6	3,0	51,9	0,4	34,0	0,0	44,9	0,4	45,8	5,9
BKS15 60t	122,6	3,1	131,1	8,2	80,3	0,8	117,8	3,3	86,3	1,6	76,4	1,7
BKS30 30t	64,2	0,1	59,5	0,8	41,0	0,0	33,5	1,5	46,8	1,0	54,5	2,8
BKS30 60t	139,7	0,4	119,8	0,7	81,3	57,8	97,4	3,0	64,3	1,3	77,4	1,7
Lysimeter	H 2014	Stda	F 2015	Stda	MITTEL	Stda						
Kontrolle	25,0	1,1	25,5	0,4	18,8	9,1						
BKS15 30t	56,2	11,6	53,5	1,9	54,1	13,6						
BKS15 60t	102,3	2,2	87,2	2,0	100,5	21,0						
BKS30 30t	63,4	5,3	56,2	1,2	52,4	11,0						
BKS30 60t	98,9	3,6	88,6	2,2	95,9	24,2						

Tabelle A8: Pflanzenverfügbare Magnesium. Mg-CaCl in mg/kg. Weihnachtsbaumkulturen

Oberkirchen	H 2011	Stda	F 2012	Stda	H 2012	Stda	F 2013	Stda	H 2013	Stda	F 2014	Stda
Kontrolle	154,5	2,5	146,1	1,2	135,1	2,5	156,2	0,2	132,7	1,9	171,4	0,9
BKS15	170,8	3,3	162,9	2,8	144,9	1,9	143,2	7,6	135,4	0,3	159,3	10,5
BKS30	163,3	1,9	150,0	0,2	143,3	1,4	137,2	1,7	130,3	1,4	145,2	3,6
Oberkirchen	H 2014	Stda	MITTEL	Stda								
Kontrolle	211,8	8,1	158,3	27,1								
BKS15	225,3	8,8	163,1	30,1								
BKS30	223,1	11,1	156,0	31,3								

Tabelle A9: Pflanzenverfügbare Stickstoff. N_{min} in mg/kg. Weihnachtsbaumkulturen

Oberkirchen	H 2011	Stda	F 2012	Stda	H 2012	Stda	F 2013	Stda	H 2013	Stda	F 2014	Stda
Kontrolle	84,2	2,5	96,8	0,0	143,8	3,4	196,5	5,1	43,1	4,7	255,4	2,2
BKS15	113,6	3,3	108,8	0,4	151,9	1,5	136,9	10,0	43,7	4,4	241,9	2,8
BKS30	114,3	5,7	94,4	0,5	154,3	1,1	48,0	2,4	51,9	10,8	248,8	18,5
Oberkirchen	H 2014	Stda	MITTEL	Stda								
Kontrolle	149,7	4,2	138,5	66,5								
BKS15	146,8	2,9	134,8	55,2								
BKS30	154,8	10,1	123,8	64,8								

Tabelle A10: Basalatmung. Lysimeterversuch

Lysimeter	2011	Stda	2012	Stda	2013	Stda	2014	Stda	MITTEL	Stda
Kontrolle	0,098	0,017	0,080	0,001	0,120	0,004	0,161	0,027	0,115	0,035
BKS15	0,124	0,001	0,093	0,001	0,160	0,005	0,204	0,034	0,145	0,047
BKS30	0,145	0,001	0,107	0,005	0,150	0,007	0,203	0,025	0,151	0,039

Tabelle A11: Substratinduzierte Atmung. Lysimeterversuch

Lysimeter	2011	Stda	2012	Stda	2013	Stda	2014	Stda	MITTEL	Stda
Kontrolle	0,798	0,017	0,716	0,026	1,255	0,019	1,188	0,071	0,989	0,271
BKS15	0,879	0,142	0,946	0,026	1,300	0,033	1,154	0,037	1,070	0,193
BKS30	1,162	0,016	1,007	0,016	1,421	0,019	1,321	0,020	1,228	0,182

8.2. Nährstoffauswaschung

8.2.1. Nitratauswaschung

Tabelle A12: Kumulierter Nitrataustrag in mg in Sickerwasser

	08.01.2012	10.01.2012	18.01.2012	23.01.2012	22.02.2012	24.04.2012	12.06.2012	
Kontrolle	859,9	1038,5	1254,6	1675,6	1764,7	2582,2	2582,2	
BKS15 30t	966,4	1127,1	1283,4	1737,0	1860,2	2645,7	2645,7	
BKS15 60t	1728,2	2049,9	2380,2	3528	3690,8	4654,9	4957,9	
BKS30 30t	696,4	880,4	1025,6	1643,5	1758,9	2343,1	2402,8	
BKS30 60t	1221,8	1470,2	1713,7	2504,8	2691,9	3685,9	3781,2	
	28.06.2012	17.07.2012	02.08.2012	12.10.2012	14.11.2012	05.12.2012	20.12.2012	08.01.2013
Kontrolle	3333,4	7427,7	8253,0	8403,3	8830,521	8.830,5	8.830,5	8.830,5
BKS15 30t	3502,8	6815,0	7522,7	7626,5	7838,3	7838,3	7838,3	7903,5
BKS15 60t	5666,4	9456,1	10532,7	10532,7	10769	10769	10769	10826,4
BKS30 30t	2559,5	3820,1	4415,9	4452,9	4861,3	4861,3	4861,3	4961,5
BKS30 60t	4353	8157	9414,4	9447,2	9897,6	9897,6	9897,6	9971,1
	30.01.2013	28.02.2013	02.04.2013	25.06.2013	02.08.2013	21.10.2013	02.12.2013	25.12.2013
Kontrolle	8.830,5	8.830,5	8.830,5	8.830,5	8.830,5	8.830,5	8.830,5	8.830,5
BKS15 30t	7929,3	7934,1	7934,1	7934,1	7934,1	7934,1	7934,1	7934,1
BKS15 60t	10854,5	10854,5	10854,5	10854,5	10854,5	10854,5	10854,5	10854,5
BKS30 30t	4994,5	4994,5	4998,2	4998,2	4998,2	4998,2	4998,2	4998,2
BKS30 60t	9971,1	9971,1	9977,9	9977,9	9977,9	9977,9	9977,9	9977,9

8.2.2. Kaliumauswaschung

Tabelle A13: Kumulierter Kaliumaustrag in mg in Sickerwasser

	07.01.2012	08.01.2012	10.01.2012	18.01.2012	23.01.2012	22.02.2012	24.04.2012	12.06.2012
Kontrolle	231,2	264,7	290,4	323,6	410,6	430,2	591,8	591,8
BKS15 30t	254,8	294,4	321,9	349,9	427,9	457,3	613,3	613,3
BKS15 60t	179	211,2	235,4	261,7	347,3	373,3	547,6	568,6
BKS30 30t	470,2	511,4	575,8	683	957,2	1147,7	1479,8	1498,5
BKS30 60t	277,9	314,3	339,4	365,2	457,7	558,6	712,8	721,5
	28.06.2012	17.07.2012	02.08.2012	12.10.2012	14.11.2012	05.12.2012	20.12.2012	08.01.2013
Kontrolle	617,3	1020,2	1078,5	1093,1	1199,5	1243	1596,2	1789,1
BKS15 30t	700,3	1148,1	1210,6	1224,9	1278,8	1316	1708,5	1913,7
BKS15 60t	628,1	1081,8	1141,4	1141,4	1248,8	1286,2	1675,4	1865,4
BKS30 30t	1582,5	2218	2335,7	2596	3900,9	4039,2	4596,3	5204,9
BKS30 60t	777,4	1111,6	1202,9	1294,3	1443	1484,8	1777,7	1983
	30.01.2013	28.02.2013	02.04.2013	25.06.2013	02.08.2013	21.10.2013	02.12.2013	25.12.2013
Kontrolle	1855,3	1956,3	1984,9	2027,6	2060,7	2153,2	2210,4	2257,9
BKS15 30t	1973,1	2050,2	2087,3	2127,5	2157,2	2227,8	2302,1	2346,7
BKS15 60t	1911,1	1970,4	2019,1	2069,5	2092,3	2146,6	2243,9	2299,9
BKS30 30t	5413,9	5677,5	5797,2	5925,8	6030,2	6271,7	6511,1	6653,9
BKS30 60t	2053,4	2144,8	2188,9	2229,4	2264,7	2348,4	2436,4	2481,5

8.2.3. Magnesiumauswaschung

Tabelle A14: Kumulierter Magnesiumaustrag in mg Sickerwasser

	07.01.2012	08.01.2012	10.01.2012	18.01.2012	23.01.2012	22.02.2012	24.04.2012	12.06.2012
Kontrolle	184,5	202,5	217,1	235,5	284,9	296,0	402,7	402,7
BKS15 30t	189,8	210,6	226,1	243,8	296,4	313,5	443,9	443,9
BKS15 60t	168,1	190,3	206,7	224,5	291,4	308,3	432	449,3
BKS30 30t	225,8	238,1	253,6	270,9	327,9	349,8	451,8	462,1
BKS30 60t	167,6	189,2	203,8	218,4	275,4	293,5	397,8	402,5
	28.06.2012	17.07.2012	02.08.2012	12.10.2012	14.11.2012	05.12.2012	20.12.2012	08.01.2013
Kontrolle	413,5	745,7	863,3	1150,2	1347,6	1389,7	1608,3	1603,2
BKS15 30t	489	717,3	1058,7	943,5	1191,3	1463,5	1590,1	2011,2
BKS15 60t	500,1	780,6	1033,3	1105,7	1083,6	1323,5	1684,4	1984,2
BKS30 30t	515,2	808,1	1103,3	1121	1218,4	1177,6	1555,3	2156,7
BKS30 60t	502,2	817,5	1133,7	1161,8	1340,2	1449,2	1393,4	1982
	30.01.2013	28.02.2013	02.04.2013	25.06.2013	02.08.2013	21.10.2013	02.12.2013	25.12.2013
Kontrolle	2054,0	2555,0	2550,3	2678,9	2333,0	2624,8	3036,2	3146,3
BKS15 30t	1915,2	2278,1	2729,2	2649,8	2761,2	2483,7	2778,8	3177,7
BKS15 60t	2307,1	2095,1	2444,3	2802,5	2733,8	2850,3	2629,5	2913,9
BKS30 30t	2299,6	2477	2235,6	2513,5	2845,7	2884,5	2994,2	2775,3
BKS30 60t	2461,6	2505,3	2638,4	2308,4	2573,7	2918,3	3087,4	3093

8.3. Baumwachstum. Lagemaße und Streuung

Tabelle A15: Zuwachs Terminaltrieb in cm. Fichte

	2015													
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max							
Kontrolle	12	14	21	24	35	49	53							
BKS15	8	10	14	22	25	35	42							
BKS30	10	10	17	22	32	42	53							
	2014							2013						
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max
Kontrolle	4	4	10	13	17	24	25	7	9	17	23	28	36	39
BKS15	2	2	3	5	8	21	22	5	7	12	17	22	31	36
BKS30	2	2	5	8	13	21	32	7	8	16	21	25	32	35

Tabelle A16: Mittlere Blattmasse in mg. Buche

	2014							2015						
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max
Kontrolle	14	17	35	58	70	93	101	43	57	88	114	142	190	191
BKS15	11	13	48	69	87	125	132	35	42	100	131	160	193	194
BKS30	30	40	56	96	134	191	221	44	77	142	169	213	280	312

Tabelle A17: Mittlerer Blattanzahl. Buche

	2014							2015						
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max
Kontrolle	23	25	35	50	90	141	205	24	25	30	48	79	147	154
BKS15	32	32	51	64	103	173	189	25	25	46	67	103	185	192
BKS30	32	35	54	73	122	247	276	25	26	42	110	155	272	302

Tabelle A18: Projizierte Blattmasse pro Baum in g. Buche

	2014							2015						
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max
Kontrolle	0,4	0,7	1,5	2,7	5,0	11,8	13,1	1,3	1,8	3,3	4,5	10,1	21,3	23,9
BKS15	0,4	0,4	2,3	5,4	9,1	18,4	20,2	2,5	2,6	4,8	8,4	14,4	31,9	34,1
BKS30	1,0	2,1	3,4	7,1	13,6	38,4	45,5	1,2	2,2	7,2	18,4	29,8	71,0	94,4

Tabelle A19: Mittlere Blattfläche. Buchenblätter

	2014							2015						
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max
Kontrolle	1,4	1,4	2,7	4,3	5,5	8,5	8,8	4,1	5,0	7,7	8,7	10,1	14,3	14,6
BKS15	1,4	1,4	4,8	6,0	7,5	10,9	11,3	3,4	3,6	9,2	10,4	11,8	14,1	14,1
BKS30	3,6	3,9	5,7	7,9	11,3	17,9	19,0	3,5	6,5	10,2	12,2	14,5	17,8	19,3

Tabelle A20: Mittlerer Chlorophyllgehalt Buchenblätter

	2014							2015						
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max
Kontrolle	75	92	163	223	267	336	375	73	128	190	214	249	279	283
BKS15	87	96	170	217	276	368	402	138	138	169	205	224	249	250
BKS30	86	110	202	259	299	442	464	112	118	162	197	243	295	316

Tabelle A21: Chlorophyllgehalt pro Baum. Buche

	2014							2015						
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max
Kontrolle	0,4	0,6	2,9	4,6	8,3	21,6	22,3	0,9	2,3	5,3	8,3	17,3	33,9	35,0
BKS15	0,5	0,6	3,4	12,0	17,3	30,1	34,6	3,2	3,4	7,7	12,5	20,8	53,9	58,9
BKS30	1,6	2,6	6,3	17,0	37,1	91,1	106,0	1,1	2,6	11,3	25,0	43,8	115,1	146,6

Tabelle A22: Zuwachs Terminaltrieb in cm. Nordmantanne

	2013							2014						
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max
Kontrolle	6	5	9	11	15	20	24	7	9	16	23	27	35	38
BKS15	5	7	9	12	14	18	21	6	8	17	21	26	32	40
BKS30	5	6	10	12	15	20	22	8	12	20	23	28	36	38
	2015													
	Min	5%	25%	Median	75%	95%	Max							
Kontrolle	7	11	18	26	29	40	43							
BKS15	8	13	20	25	31	39	42							
BKS30	5	10	19	25	32	40	42							

8.4. Signifikanzen

Tabelle A23: P-Wert. Zuwachs Terminaltrieb. Fichte

	2013			2014			2015		
	Kontr	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontr	x	< 0,001	< 0,001	x	< 0,001	0,224	x	0,003	0,097
BKS15	< 0,001	x	0,034	< 0,001	x	0,012	0,003	x	0,214
BKS30	< 0,001	0,034	x	0,224	0,012	x	0,097	0,214	x

Tabelle A24: P-Wert. Mittlere Blattmasse

	2014			2015		
	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,063	< 0,001	x	0,100	< 0,001
BKS15	0,063	x	0,008	0,100	x	0,001
BKS30	< 0,001	0,008	x	< 0,001	0,001	x

Tabelle A25: P-Wert. Mittlerer Blattanzahl. Buche

	2014			2015		
	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,091	0,004	x	0,069	0,001
BKS15	0,091	x	0,397	0,069	x	0,166
BKS30	0,004	0,397	x	0,001	0,166	x

Tabelle A26: P-Wert. Projizierte Blattmasse pro Baum. Buche

	2014			2015		
	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,029	< 0,001	x	0,045	< 0,001
BKS15	0,029	x	0,040	0,045	x	0,015
BKS30	< 0,001	0,040	x	< 0,001	0,015	x

Tabelle A27: P-Wert. Mittlerer Blattfläche. Buche

	2014			2015		
	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,008	< 0,001	x	0,022	< 0,001
BKS15	0,008	x	0,003	0,022	x	0,007
BKS30	< 0,001	0,003	x	< 0,001	0,007	x

Tabelle A28: P-Wert. Mittlerer Chlorophyllgehalt pro Blatt

	2014			2015		
	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,885	0,076	x	0,088	0,201
BKS15	0,885	x	0,131	0,088	x	0,590
BKS30	0,076	0,131	x	0,201	0,590	x

Tabelle A29: P-Wert. Projizierter Chlorophyllgehalt pro Baum. Buche

	2014			2015		
	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,010	< 0,001	x	0,122	< 0,001
BKS15	0,010	x	0,026	0,122	x	0,023
BKS30	< 0,001	0,026	x	< 0,001	0,023	x

Tabelle A30: P-Wert. Zuwachs Terminaltrieb. Nordmantanne

	2013			2014			2015		
	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,739	0,104	x	0,597	0,209	x	0,496	0,526
BKS15	0,739	x	0,202	0,597	x	0,040	0,496	x	0,905
BKS30	0,104	0,202	x	0,209	0,040	x	0,526	0,905	x

Tabelle A31: P-Wert. pH-Wert. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	pH-Wert						
	Kontrolle	BKS15 30t	BKS30 30t		Kontrolle	BKS15 60t	BKS30 60t
Kontrolle	x	0,003	0,021	Kontrolle	x	< 0,001	< 0,001
BKS15 30t	0,003	x	0,024	BKS15 60t	< 0,001	x	0,855
BKS30 30t	0,021	0,024	x	BKS30 60t	< 0,001	0,855	x

Tabelle A32: P-Wert. KAK. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	KAK						
	Kontrolle	BKS15 30t	BKS30 30t		Kontrolle	BKS15 60t	BKS30 60t
Kontrolle	x	0,272	0,600	Kontrolle	x	0,090	0,015
BKS15 30t	0,272	x	0,553	BKS15 60t	0,090	x	0,459
BKS30 30t	0,600	0,553	x	BKS30 60t	0,015	0,459	x

Tabelle A33: P-Wert. P-CAL. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	Pflanzenverfügbare Phosphor						
	Kontrolle	BKS15 30t	BKS30 30t		Kontrolle	BKS15 60t	BKS30 60t
Kontrolle	x	0,025	0,004	Kontrolle	x	0,002	0,005
BKS15 30t	0,025	x	0,693	BKS15 60t	0,002	x	0,660
BKS30 30t	0,004	0,693	x	BKS30 60t	0,005	0,660	x

Tabelle A34: P-Wert. K-CAL. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	Pflanzenverfügbare Kalium						
	Kontrolle	BKS15 30t	BKS30 30t		Kontrolle	BKS15 60t	BKS30 60t
Kontrolle	x	< 0,001	< 0,001	Kontrolle	x	< 0,001	< 0,001
BKS15 30t	< 0,001	x	< 0,001	BKS15 60t	< 0,001	x	0,532
BKS30 30t	< 0,001	< 0,001	x	BKS30 60t	< 0,001	0,532	x

Tabelle A35: P-Wert. Mg-CaCl. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	Pflanzenverfügbares Magnesium						
	Kontrolle	BKS15 30t	BKS30 30t		Kontrolle	BKS15 60t	BKS30 60t
Kontrolle	x	< 0,001	< 0,001	Kontrolle	x	< 0,001	< 0,001
BKS15 30t	< 0,001	x	0,789	BKS15 60t	< 0,001	x	0,692
BKS30 30t	< 0,001	0,789	x	BKS30 60t	< 0,001	0,692	x

Tabelle A36: P-Wert. pH und KAK. Oberkirchen. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	pH			KAK			
	Kontrolle	BKS15	BKS30		Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,293	0,899	Kontrolle	x	0,616	0,066
BKS15	0,293	x	0,464	BKS15	0,616	x	0,136
BKS30	0,899	0,464	x	BKS30	0,066	0,136	x

Tabelle A37: P-Wert. P-cal und K-cal. Oberkirchen. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	Pflanzenverfügbare Phosphor			Pflanzenverfügbare Kalium			
	Kontrolle	BKS15	BKS30		Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,587	0,299	Kontrolle	x	0,046	0,206
BKS15	0,587	x	0,644	BKS15	0,046	x	0,365
BKS30	0,299	0,644	x	BKS30	0,206	0,365	x

Tabelle A38: P-Wert. Mg-cacl und N_{min}. Oberkirchen. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	Mg-Cacl			N _{min}			
	Kontrolle	BKS15	BKS30		Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,757	0,890	Kontrolle	x	0,918	0,705
BKS15	0,757	x	0,675	BKS15	0,918	x	0,757
BKS30	0,890	0,675	x	BKS30	0,705	0,757	x

Tabelle A39: P-Wert. Biologische Aktivität. Lysimeterversuch. Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsperiode

	Nitrifizierungsrate (PAO)			Basalatmung		
	Kontrolle	BKS15	BKS30	Kontrolle	BKS15	BKS30
Kontrolle	x	0,177	0,578	x	0,338	0,216
BKS15	0,177	x	0,101	0,338	x	0,859
BKS30	0,578	0,101	x	0,216	0,859	x
	Substratinduzierte Atmung (SIR)					
	Kontrolle	BKS15	BKS30			
Kontrolle	x	0,646	0,194			
BKS15	0,646	x	0,279			
BKS30	0,194	0,279	x			

Curriculum vitae

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Veröffentlichungen/Vorträge/Poster

Drabkin D.; Weinfurtner K. (2012): Wirkung von Terra Preta Substraten auf Windwurfflächen und unter Weihnachtsbaumkulturen. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Band 24.

Weiß U., Drabkin D., Rademacher A., Weinfurtner K., Haubold-Rossar, M. (2013): LaTerra: Anwendung von Biokohle-Substraten auf ertragsschwachen Standorten (Lausitz) und im Waldmanagement (Hochsauerlandkreis). Poster. BMBF Statuskonferenz Nachhaltiges Landmanagement. Berlin

Weinfurtner K. Drabkin D. (2014) Biokohle im Forst. Vortrag. Workshop des LaTerra-Projektes „Biochar goes practice“. Berlin

Drabkin D. Weinfurtner K. (2014): Effect of Biochar substrates on tree growth and soil on Windthrow areas and Christmas tree cultures. Poster. ELS Conference. Bari.