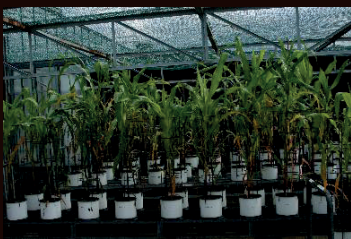




**Konstantin Terytze**

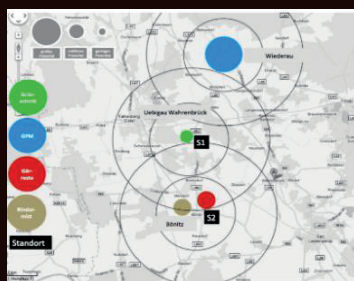
**Ines Vogel**

*Herausgeber*



# Biokohle und Biokohlesubstrate zur nachhaltigen und klimafreundlichen Sanierung sowie Inwertsetzung militärischer Konversionsflächen und ertragsschwacher Standorte

*Handlungsanleitung zur Wertschöpfung organischer Reststoffe*



Berichte aus der Umweltwissenschaft

**Konstantin Terytze,  
Ines Vogel (Hrsg.)**

**Biokohle und Biokohlesubstrate zur  
nachhaltigen und klimafreundlichen Sanierung und  
Inwertsetzung militärischer Konversionsflächen  
und ertragsschwacher Standorte**

Handlungsanleitung zur  
Wertschöpfung organischer Reststoffe

Shaker Verlag  
Aachen 2019

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6482-7

ISSN 0946-7173

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

**Biokohle und  
Biokohlesubstrate zur  
nachhaltigen und  
klimafreundlichen  
Sanierung und  
Inwertsetzung  
militärischer  
Konversionsflächen und  
ertragsschwacher  
Standorte**

*Handlungsanleitung zur  
Wertschöpfung organischer  
Reststoffe*

---

## **Handlungsanleitung**

# **Wertschöpfung organischer Reststoffe durch Herstellung von Biokohle und Biokohlesubstraten zur nachhaltigen und klimafreundlichen Aufwertung militärischer Konversionsflächen und ertragsschwacher Standorte**

Herausgeber: Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze<sup>1</sup> und  
Dr. Ines Vogel<sup>1</sup>

Verfasser: Dipl.-Ing. agr. Jörg Böhmer<sup>8</sup>, Joachim Böttcher<sup>9</sup>, Dr. Dmitri Drabkin<sup>5</sup>, Dr. Stefan Lukas<sup>2</sup>, Dr. Michael Haubold-Rosar<sup>2</sup>, Dr. Anne Rademacher<sup>3</sup>, Dipl.-Ing. Jörg Rüdiger<sup>7</sup>, Dipl.-Geogr. René Schatten<sup>1</sup>, M.Sc. Felix Flesch<sup>8</sup>, Dr. Ines Vogel<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. agr. Frank Wagener<sup>8</sup>, Dr. Robert Wagner<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. agr. Karlheinz Weinfurtnner<sup>4</sup>, Dr. Ursula Weiß<sup>3</sup>, M. Sc. Viktoria Witte<sup>6</sup> und Prof. Dr. Stefan Zundel<sup>6</sup>

Redaktionelle Bearbeitung und Gestaltung: Dr. Ines Vogel, Dr. Robert Wagner

- 
- <sup>1</sup> Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, AG  
Geoökologie, Malteserstr. 74-100, Haus G, 12249 Berlin
- <sup>2</sup> Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB),  
Brauhausweg 2, 03238 Finsterwalde
- <sup>3</sup> Bis 2015 Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V.  
(FIB)
- <sup>4</sup> Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte  
Oekologie (IME), Auf dem Aberg 1, 57392 Schmallenberg
- <sup>5</sup> Bis 2015 Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte  
Oekologie (IME), Auf dem Aberg 1, 57392 Schmallenberg
- <sup>6</sup> Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg  
Großenhainer Straße 57, 01968 Senftenberg
- <sup>7</sup> Technische Universität Berlin, Campus *El Gouna*, Department of  
Energy Engineering, Mohamed Ibrahim Kamel Street  
84513 El Gouna, Red Sea
- <sup>8</sup> Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS), Hochschule  
Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld Campusallee Gebäude 9926  
55768 Hoppstädten-Weiersbach
- <sup>9</sup> areal GmbH, Hofstraße 5, 67822 Hengstbacherhof

---

## Gefördert im Rahmen des Forschungsprojektes "LaTerra"

### **„Nachhaltige Landnutzung durch regionales Energie- und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie auf militärischen Konversionsflächen und ertragsschwachen Standorten“**

Für die Finanzierung des Forschungsvorhabens LaTerra danken wir dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). LaTerra wurde im Rahmen des Förderschwerpunktes „Forschung für Nachhaltige Entwicklung - FONA“, im Programm „Nachhaltiges Landmanagement“ (Modul B) unter dem Förderkennzeichen 033L021A-D gefördert.

Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr. Reiner Enders für die Unterstützung des Projektes und die stets gute Zusammenarbeit von Seiten des Projektträgers Jülich.



---

## **Danksagung Projektbeteiligte**

Ein großer Dank geht an den Projektbeirat LaTerra unter Vorsitz von Herrn Prof. Dr. Roland Kubiak sowie unter Mitwirkung von Prof. Dr. Heinz Flessa, Dr. Kurt Seibert, Herrn Berndt Schütze, Frau Cornelia Wobar, Dr. Joachim Woiwode, Frau Ulrike Seifert und Frau Johanna Busch für die stets vorhandene Hilfs- und Diskussionsbereitschaft.

Wir bedanken uns bei den Mitarbeitern des Julius-Kühn-Instituts: Herrn Bergs, Herrn Dr. Felgentreu, Herrn Dr. Strumpf sowie Frau Dr. Helmich für die große Unterstützung der Versuchsdurchführung sowie der analytischen Arbeiten.

Darüber hinaus bedanken wir uns bei den Mitarbeitern der Prof. Dr. Macholz Umweltprojekte GmbH insbesondere Herrn Prof. Dr. Reiner Macholz und Frau Manja Liese sowie der von Ihnen geleiteten Arbeitsgruppe Liegenschaften.

Ganz besonderer Dank gebührt den Praxispartnern der Feld- und Pilotversuche, die Ihre Flächen bereitgestellt und die Durchführung des Projektes tatkräftig unterstützt haben: die Landwirtschaftsbetriebe Agrargenossenschaft Großräschen e.G., Ressen – Lindchen GmbH, Zinnitz-Groß Jehser GmbH & Co. Vermögens KG, die Vattenfall Europe Mining AG (jetzt LEAG) und die Bauer Umwelt GmbH.

Ebenfalls bedanken wir uns bei Christian Krüger, Hendrik Block, Bojtscho Rangelov, Katja Pfeiffer, Lea Siebert, Kai Dommaschk, Frank Donath, Anja Klug, Steffen Krollig, Linda Pfützner und Mathias Richter für die Mitarbeit im Rahmen von Abschlussarbeiten im Projekt LaTerra sowie bei Margareta Kocikowski, Sebastian Möller und Stefan Albrecht für die Mitarbeit als studentische Hilfskraft.



## **Vorwort**

### ***Biokohlesubstrate als Chance für Schadstoffabbau und Bodenverbesserung***

Die hohe Fruchtbarkeit und Stabilität der im Amazonasgebiet auftretenden sogenannten Terra Preta do Indio mit ihrem hohen Anteil an pyrogenem Kohlenstoff, dient als Vorbild bei der Herstellung Terra Preta ähnlicher Erden (Biokohlesubstrate). Als Terra Preta do Indio wird eine anthropogen beeinflusste Schwarzerde in Zentral-Amazonien bezeichnet, die sich durch Ihre Eigenschaften von den, aufgrund des feuchttropischen Klimas, in der Regel tiefgründig verwitterten und sehr nährstoffarmen Böden wesentlich unterscheidet.

Holzkohle, auch als Biokohle beschrieben, wurde als zentrale Komponente der Terra Preta do Indio benannt. Dies führte zu einem wachsenden wissenschaftlichen Interesse an der Verwendung von Biokohle (auch als Pflanzenkohle bezeichnet, engl. Biochar) zur Verbesserung von landwirtschaftlichen Böden.

Biokohlen, die in Pyrolyseprozessen bei Temperaturen > 500°C hergestellt wird, weisen in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur und den Ausgangsmaterialien, meist hohe, umsetzungsstabile Kohlenstoffgehalte auf. Sie werden im deutschen Sprachgebrauch häufig auch als Pflanzenkohle bezeichnet. Ein weiteres Charakteristikum von Pflanzenkohle ist ihre poröse Struktur mit einer großen spezifischen Oberfläche, die mit einem hohen Speicherpotenzial für Nährstoffe und Wasser einhergeht.

Zusammen mit organischen Reststoffen kompostiert, kann die Biokohle die Nährstoffeffizienz der kompostierten organischen Reststoffe deutlich verbessern. Sie wird darüber hinaus während des Kompostierungsprozesses biologisch aktiviert, mit Nährstoffen aufgeladen und deren Kationenaustauschkapazität, durch Oxidation der Oberfläche der BK, auf Grund der hohen Temperaturen während der Kompostierung, gesteigert.

Die dieser Handlungsanleitung zu Grunde liegenden Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „LaTerra“

„Nachhaltige Landnutzung durch regionales Energie- und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie auf militärischen Konversionsflächen und ertragsschwachen Standorten“ erhoben. Das Vorhaben wurde im Rahmen der 2010 initiierten Fördermaßnahme „Nachhaltiges Landmanagement (Modul B)“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Das Verbundforschungsprojekt LaTerra untersuchte Lösungswege und Perspektiven für die Entschärfung der Flächenverknappung durch Ertragssteigerung bzw. durch ökonomische und ökologische Aufwertung und Wiederaufnahme von Brachflächen in landwirtschaftliche Produktionszyklen. Grundlage war die Optimierung regionaler Stoffkreisläufe und die Anwendung von Biokohle bzw. Biokohlesubstraten als eine innovative Systemkomponente, die über einen Zeitraum von vier Vegetationsperioden beobachtet wurde. Die aus lokalen biogenen Reststoffen hergestellten Biokohlesubstrate besitzen eine hohe Abbaustabilität sowie eine nachhaltige Wirkung auf die Verbesserung von Bodenfunktionen bei gleichzeitiger CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in Böden. Sie wirken damit auch dem Klimawandel im Sinne der von der UN 2015 verabschiedeten globalen Nachhaltigkeitsziele entgegen. Darüber hinaus kann durch eine Verbesserung der bodenbiologischen Leistungen der Abbau von organischen Schadstoffen in Böden gefördert werden.

Zum Verbundforschungsvorhaben LaTerra gehörten drei Regionalprojekte, die durch ein Querschnittsprojekt zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Anwendungen begleitet wurden. In den drei Regionalprojekten war die Anwendung der Biokohlesubstrate (BKS) vor allem auf die Lösung jeweils einer spezifischen Problematik ausgerichtet:

Prof. Dr. Roland Kubiak  
Vorsitzender des Projektbeirats LaTerra  
RLP AgroScience GmbH  
Institut für Agrarökologie

Berlin, 20.04.2018

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	15
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	20
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	23
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	26
	1.1 Terra Preta do indio und Holzkohle	26
	1.2 Das Verbundforschungsprojekt LaTerra	27
<b>Teil I</b>	<b><i>Potentiale der Anwendung von Biokohle und Biokohlesubstraten</i></b>	
<b>2</b>	<b>Biokohle und Biokohlesubstrate – Eigenschaften, Potentiale und Grenzen der Anwendung</b>	30
	2.1 Herstellung und Eigenschaften von Biokohle für den Einsatz in Böden	30
	2.2 Zur Wirkung von Biokohlen in Böden	38
	2.3 Vorteile der Herstellung von Biokohlesubstraten	46
<b>3</b>	<b>Stabilität und Klimawirkung von Biokohle</b>	59
	3.1 Kohlenstoff und Karbonisierung	59
	3.2 Klimawirkungen des Einsatzes von Biokohle in Landwirtschaft und Gartenbau	62
	3.2.1 Biokohle und Kompostierung	62
	3.2.2 Wirkung von Biokohle in Böden	65
	3.2.3 Biokohle und Torfsubstitution	66
<b>4</b>	<b>Rechtliche Belange, Güte- und Qualitätssicherung</b>	73
	4.1 Derzeitige rechtliche Rahmenbedingungen des Einsatzes von Biokohle in Deutschland	73

4.2	Qualitätsvorschläge für Biokohlen nach Europäischem Pflanzenkohlezertifikat als mögliche Basis für eine Weiterentwicklung der Rechtsgrundlagen in der Bundesrepublik Deutschland	75
4.3	Güte- und Qualitätssicherung von Komposten	78
<b>Teil II Von pflanzlichen/biogenen Reststoffen zu hochwertigen Biokohlen und Biokohlesubstraten</b>		
<b>5</b>	<b>Technologie zur Herstellung von Biokohle</b>	<b>81</b>
5.1	Pyrolyse	81
5.2	Festbettvergaser (FBV)	84
5.3	Wirbelschichtvergaser (WBSV)	86
5.4	Technologievergleich im Rahmen spezifizierter Nutzungsszenarien	88
5.5	Installation und Inbetriebnahme einer Karbonisierungsanlage am Beispiel des Botanischen Gartens Berlin	93
<b>6</b>	<b>Einsatz von Biokohle in der Kompostierung zur Herstellung von Biokohlesubstraten</b>	<b>98</b>
6.1	Biokohle als Umweltentlastungstool bei der Kompostierung	98
6.2	Grundlagen der Kompostierung	99
6.3	Verwendung von Biokohle bei der Kompostierung	103
6.4	Pflege der Kompostmiete	103
6.5	Herstellung der Biokohlesubstrate für das Verbundforschungsvorhaben	105

<b>Teil III</b>	<b><i>Einsatz von BK und BKS zur der Förderung der Bodenqualität – Fallbeispiele und Einsatzempfehlungen</i></b>	
<b>7</b>	<b>Abbau von organischen Schadstoffen auf militärischen Altlasten/ehemals militärisch genutzten Flächen im Landkreis Teltow-Fläming</b>	<b>110</b>
7.1	Ausgangssituation und Ziele der Altlastensanierung	110
7.2	Potenzial von BK und BKS im Hinblick auf Abbau und Reduktion der Freisetzung von MKW und PAK	111
7.3	Untersuchungen zur Wirkung von Biokohlesubstraten auf mit MKW und PAK kontaminierte Flächen	112
7.4	Empfehlungen zur Anwendung von Biokohlesubstraten für die Bodensanierung	131
<b>8</b>	<b>Humusaufbau und Bodenverbesserung auf Rekultivierungsflächen aus dem Braunkohletagebau in der Lausitz</b>	<b>139</b>
8.1	Ausgangssituation und Ziele der landwirtschaftlichen Rekultivierung	139
8.2	Rekultivierungsverfahren	140
8.3	Untersuchungen zur Wirkung von Biokohlesubstraten	143
8.4	Empfehlungen zur Anwendung von Biokohlesubstraten	153
<b>9</b>	<b>Förderung der Wiederbepflanzung von Windbruchflächen im Sauerland</b>	<b>169</b>
9.1	Ausgangssituation und Aufgabenstellung	169
9.2	Versuchsaufbau	170
9.3	Ergebnisse	173
9.4	Hinweise für eine potenzielle Anwendung	179

<b>Teil IV</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen - Planung und Umsetzung von regionalen Biokohleprojekten</b>	
<b>10</b>	<b>Erhebung von Potenzialen an biogenen Reststoffen und Wege zur Wertschöpfung am Beispiel der Region Uebigau-Wahrenbrück</b>	<b>181</b>
	10.1 Stoffstromanalyse	181
	10.2 Stoffstromszenarien	188
	10.3 Ökologische Bewertung	194
	10.3.1 Carbon Footprint der BKS-Produktion	195
	10.3.2 Kohlenstoff-Sequestrierungspotenzial der BKS- Anwendung in Böden	199
<b>11</b>	<b>Wirtschaftlichkeit - Planung und Umsetzung, Instrumente zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit und ihre Anwendbarkeit</b>	<b>208</b>
	11.1 Geschäftsfeldanalyse	208
	11.1.1 Nutzung in der konventionelle Landwirtschaft	210
	11.1.2 Rekultivierung von Tagebaufolgelandschaften	212
	11.1.3 Sanierung kontaminierter Böden auf Konversionsflächen	213
	11.1.4 Verkauf von Biokohle und Biokohlesubstrat an private Endverbraucher	214
	11.2 Hinweise zur Businessplanerstellung	215
	11.2.1 Markt- und Wettbewerbssituation	216
	11.2.2 Marketing	220
	11.2.3 Finanzplan	222
<b>Teil V</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>229</b>
<b>Anhang</b>	<b>Anhang A zu Kap. 11.2.3 Finanzplan - Systemvergleich der betrachteten Technologien zur kombinierten Erzeugung von Biokohle und Strom / Wärme</b>	<b>236</b>

Anhang B zu Kap. 11.2.3 Finanzplan Marktübersicht BK- Herstellungsverfahren	238
--	-----

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Unterschiede in den prinzipiellen Reaktionsmechanismen von Pyrolyse und hydrothermalen Carbonisierung (Libra et al., 2011, <a href="http://www.tandfonline.com">www.tandfonline.com</a> )	31
Abbildung 2.2:	REM – Bilder von Pyrolysekohle aus Holz (links) und Hühnermist (rechts) (langsame Pyrolyse; Downie et al., 2009)	33
Abbildung 2.3:	Van Krevelen-Diagramm der O/C- und H/C-Verhältnisse verschiedener Biokohlen im Vergleich zu fossilen Kohlen (Braun-, Fett-, Steinkohle) und Pflanzenstoffen (Zellulose, Lignin) (nach Schimmelpfennig und Glaser, 2010) (Das Rechteck markiert den wünschenswerten Bereich ausreichend stabiler Biokohlen zur Anwendung in Böden)	36
Abbildung 2.4:	Beeinflussung der Bodenbiologie durch physikalische und chemische Bodenveränderungen nach Zugabe von Biokohle am Beispiel von Mykorrhiza, Bakterien und Regenwürmern (S. Germer in: Haubold-Rosar et al., 2016)	44
Abbildung 2.5:	Beeinflussung der Ertragsfähigkeit nach Zugabe von Biokohle im Vergleich zu Kontrollböden (nach Jeffery et al., 2011)	45
Abbildung 3.1:	Van-Krevelen-Diagramm der im BG hergestellten und zugekauften Biokohlen	60
Abbildung 3.2:	Schematischer Ablauf der Karbonisierung von Holzhackschnitzel zu Biokohle im Botanischen Garten Berlin inkl. Wärmeauskopplung	61
Abbildung 3.3:	Abbauraten des organischen Kohlenstoffes in den durchgeführten Kompostversuchen (Mittelwert)	63



	und Standardabweichung von vier Großversuchen)	
Abbildung 3.4:	Basalatmung (nach DIN EN ISO 14240-1, 2010-12) des Komposts und Biokohlekomposts zu bestimmten Zeiten während der Kompostierung und Lagerung	64
Abbildung 5.1:	Technologiebeispiel Pyrolyse, Typ Pyreg (Quelle: Webseite Fa. Pyreg)	82
Abbildung 5.2:	Messung des Schallpegels am Tage (links) und nachts am Zaun in Richtung Wohnhäuser (rechts)	83
Abbildung 5.3:	Technologiebeispiel Festbettvergaser (FBV), hier: einstufiger Gleichstrom- Festbettvergaser („Downdraft“)	85
Abbildung 5.4:	Einbindung eines einzeln stehenden atmosphärischen WBSV, Typ Winklervergaser, in ein Gesamtkonzept zur Herstellung von Biokohlesubstraten	87
Abbildung 5.5:	Graphische Darstellung eines Szenarienvergleichs für spezifizierte Verkaufspreise von Biokohle (BK) und Biokohlesubstrat (BKS)	91
Abbildung 6.1:	Lageplan der Terra-Preta-Anlage Hengstbacherhof	107
Abbildung 7.1:	Entwicklung der organischen Substanz von Versuchsbeginn 2012 bis Versuchsende 2015 – Böden mit MKW-Kontamination mit Zugabe von Biokohle und Biokohlesubstraten sowie Substraten ohne Biokohlezusatz	115
Abbildung 7.2:	Maximale Wasserhaltekapazität in Abhängigkeit der Zugabe von BKS - Ergebnisse nach 4 Vegetationsperioden	116
Abbildung 7.3:	Transferfaktor Boden - Pflanzenwurzel (Mais) aus den Lysimeterversuchen	117

Abbildung 7.4:	PAK Bodengehalte in unterschiedlichen Bodenschichten	118
Abbildung 7.5:	Mineralisierungsraten von $^{14}\text{C}$ -Pyren zu $^{14}\text{C}$ - $\text{CO}_2$	119
Abbildung 7.6:	Freisetzung der 16 EPA-PAK im Schütteleluat in Abhängigkeit von verschiedenen Probennahmezeitpunkten	122
Abbildung 7.7:	Freisetzung von MKW C10-C40 im Schütteleluat in Abhängigkeit von verschiedenen Probennahmezeitpunkten	122
Abbildung 7.8:	Wirkung der Biokohlesubstratzugabe auf die mikrobielle Biomasse (links) und die Nitrifikationsaktivität (rechts) eines MKW-kontaminierten Bodens	125
Abbildung 7.9:	Ergebnisse Biomasse Mais in der ersten Vegetationsperiode nach Inkubation mit 10 Vol.-% Biokohlesubstraten	127
Abbildung 7.10:	Ergebnisse Biomasse Senf (Zwischenfrucht nach der vierten Vegetationsperiode) nach Inkubation mit 50 Vol.-% Biokohlesubstraten sowie 15 Vol.-% nicht aktivierter Biokohle	128
Abbildung 7.11:	Einfluss von Kompost, BKS und BK auf das Wachstum von <i>Dactylis glomerata</i> – Boden mit MKW-Kontamination	129
Abbildung 8.1:	Verkipfung und Rekultivierung	139
Abbildung 8.2:	Feldversuchsanlage und Gefäßversuche	143
Abbildung 8.3:	Wirkung unterschiedlicher BKS-Gaben auf die organischen Kohlenstoffgehalte (Corg) sowie die heißwasserlöslichen Kohlenstoff- (Chwl) und Stickstoffgehalte (Nhwl) des Kipprohbodens im Feldversuch	146
Abbildung 8.4:	Wirkung unterschiedlicher BKS-Gaben auf die verfügbaren Phosphorgehalte des Kipprohbodens im Feldversuch und Gefäßversuch	149
Abbildung 8.5:	Wirkung unterschiedlicher BKS-Gaben auf die	151

	nutzbare Feldkapazität und Totwasser des Kipprohbodens im Feldversuch und die nutzbare Feldkapazität im Laborversuch	
Abbildung 8.6:	Wirkung unterschiedlicher BKS-Gaben auf die Erträge des Kipprohbodens im Feldversuch in Relation zur üblichen Mineraldüngung und im Gefäßversuch	152
Abbildung 8.7:	Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von BKS bei der Rekultivierung	155
Abbildung 9.1:	Pflanzlochverfahren auf Windwurffläche „Schanze“	172
Abbildung 9.2:	Maschinelle Ausbringung auf Weihnachtsbaumanbaufläche	172
Abbildung 9.3:	Zuwachs von Terminaltrieb Nordmantannen. Weihnachtsbaumkulturen 2014 (links) und 2015 (rechts). Varianten ohne konventionelle Düngung	174
Abbildung 9.4:	Zuwachs von Terminaltrieb Nordmantannen. Weihnachtsbaumkulturen 2015	174
Abbildung 9.5:	Windwurffläche: Zuwachs Terminaltrieb Fichten: 2014 (links) und 2015 (rechts)	175
Abbildung 9.6:	Windwurffläche Blattmasse Buchen: 2014 (links) und 2015 (rechts)	176
Abbildung 9.7:	Pflanzenverfügbare Phosphor Kulturboden (a) und pH Waldboden Lysimeterversuch (b). In beiden Fällen handelt es sich um den Mittelwert über den gesamten Untersuchungszeitraum	177
Abbildung 9.8:	Nitratgehalte im Sickerwasser zum Zeitpunkt einer verstärkten Nitratauswaschung: Nitratkonzentration (links) und akkumulierte Nitratmenge (rechts)	178
Abbildung 10.1:	Stoffpotenziale Uebigau-Wahrenbrück	186
Abbildung 10.2:	Soll-Szenario Uebigau-Wahrenbrück	189
Abbildung 10.3:	Lokalisierung der Stoffe und Anlagenorte in Uebigau-Wahrenbrück	193

Abbildung 10.4: Prozessbezogener Carbon Footprint für vier exemplarische Anlagenkonzepte	198
Abbildung 10.5: Rekalzitranz von Biomasse und Holzkohle im direkten Vergleich	200
Abbildung 10.6: Kohlenstoffkapazität über 500 Jahre	201

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Überblick über die Biomasse-Reststoffpotenziale in Deutschland (Haubold-Rosar et al., 2016)	32
Tabelle 2.2	Oberfläche und Volumen verschiedener Porengrößenklassen von Pyrolysekohlen (Laine et al., 1991)	34
Tabelle 2.3:	Gesamt-N-, -P- und -K-Gehalte von Biokohlen (Haubold-Rosar et al., 2016)	35
Tabelle 3:1	Ausgewählte Parameter der im Botanischen Garten Berlin Dahlem (BG) hergestellter Biokohle-Chargen (BioMaCon-Verfahren) sowie der zugekauften Biokohle (Carbon Terra) und Biokohle weiterer Hersteller	59
Tabelle 3.2:	Gesamtemissionen bei der Kompostierung mit und ohne Biokohle; mBK: mit Biokohle, oBK: ohne Biokohle, mU: mit Urin, M: Miete	65
Tabelle 4.1:	Vergleich der Schwermetallanforderungen des Europäischen Pflanzenkohlezertifikats mit den derzeit geltenden Vorgaben der DüMV, BioAbfV und BBodSchV	76
Tabelle 4.2:	Vergleich der Anforderungen an organische Schadstoffe zwischen Europäischem Pflanzenkohlezertifikats und den derzeit geltenden Vorgaben der DüMV, BioAbfV und BBodSchV	77
Tabelle 4.3:	Anforderungen der BGK an die Qualität von Substratkomposten	79
Tabelle 5.1	Beispiel für einen ökonomischen Szenarienvergleich auf der Basis der betrachteten Technologien zur kombinierten Erzeugung von Biokohle und Strom / Wärme für Biomasse-Transportwege von ca. 2 km	90

Tabelle 5.2:	Beispiel für einen ökonomischen Szenarienvergleich* auf der Basis der betrachteten Technologien	92
Tabelle 5.3:	Emissionswerte der Karbonisierungsanlage im Botanischen Garten Berlin-Dahlem	95
Tabelle 6.1:	Übersicht über C/N- Verhältnisse von diversen organischen Abfällen	100
Tabelle 7.1:	Übersicht über die ursprüngliche Nutzung der einbezogenen Böden	113
Tabelle 7.2:	Übersicht über ausgewählte chemisch-physikalische Parameter der Versuchsböden	114
Tabelle 7.3:	Einfluss von Biokohlesubstrat-Gaben auf Eigenschaften und Funktionen von Böden mit MKW- und/oder PAK-Kontamination	133
Tabelle 8.1:	Behandlungseinheiten (Bhe) und bodenkundliche Richtwerte der landwirtschaftlichen Rekultivierung	141
Tabelle 8.2:	Rekultivierungsspezifischer zusätzlicher jährlicher Mineraldünger Aufwand in den ersten 8 Rekultivierungsjahren	142
Tabelle 8.3:	Eigenschaften der hergestellten Substrate	145
Tabelle 8.4:	Nmin-Gehalte und Netto-N-Mineralisation der im Laborversuch eingesetzten Biokohlen	147
Tabelle 8.5:	Wirkung von BKS-Gaben im Vergleich zu herkömmlicher Mineraldüngung auf Sickerwassermengen und N-Austräge eines Kipprohdbodens im Lysimeterversuch	148
Tabelle 8.6:	Einfluss von Biokohlesubstrat-Gaben auf Eigenschaften und Funktionen von Kipprohdböden für eine landwirtschaftliche Rekultivierung	153
Tabelle 8.7:	Orientierungswerte zur Wirkung hoher BKS-Gaben auf die Schadstoffgehalte in Kipprohdböden für eine landwirtschaftliche Rekultivierung	160

Tabelle 8.8:	Phosphor- und Kaliumfrachten von BKS-Gaben in Abhängigkeit der Anwendungsmenge und Nährstoffgehalte der BKS im Vergleich zu den Vorgaben der Vollzugshilfe zu § 12 BBodSchV	161
Tabelle 10.1:	Stofferhebung Uebigau-Wahrenbrück	187
Tabelle 10.2:	Einnahmen und Ausgaben der Stoffströme Uebigau-Wahrenbrück	187
Tabelle 10.3:	Berechnung Transportradien	191
Tabelle 10.4:	Berechnung Transportkosten Uebigau-Wahrenbrück	194
Tabelle 10.5:	Grundannahmen zur Kalkulation des Sequestrierungspotenzials	202
Tabelle 10.6:	Berechnung der Anteile im Substrat nach Mischungsverhältnis der Palaterra GmbH am Beispiel des Stoffstromszenarios Uebigau-Wahrenbrück	203
Tabelle 10.7:	Kalkulationsschema Kohlenstoff-Sequestrierungspotenzial am Beispiel des Stoffstromszenarios Uebigau-Wahrenbrück	204
Tabelle 10.8:	Kalkulation der produktionsbedingten Emissionen, des kurzfristigen Kohlenstoff-Sequestrierungspotenzials und Differenz zum Status Quo im Szenario Uebigau-Wahrenbrück	206
Tabelle 11.1:	Vergleich der Kosten der Sanierungsverfahren	213
Tabelle 11.2:	Übersicht der Angebote von zertifizierter Pflanzenkohle, Stand: März 2015	217
Tabelle 11.3:	Übersicht der Angebote von zertifizierter Pflanzenkohle, Stand März 2015	217
Tabelle 11.4:	Preisvergleich verschiedener BKS-Produkte, Stand: März 2015	218
Tabelle 11.5:	Investitionen für eine BK-/BKS-Produktion	224

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
aBK	aktivierte Biokohle
ANOVA	Varianzanalyse, engl. „analysis of variance“
AK	Adsorptionskapazität
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BG	Botanischer Garten Berlin
BGK e.V.	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BK	Biokohle
BKS	Biokohlesubstrat
C/N	Kohlenstoff-/Stickstoffverhältnis
Cmik.	mikrobiellen Kohlenstoffs
CO <sub>2eq</sub>	Kohlenstoffäquivalente
Corg	organischer Kohlenstoff
dest.	destilliert
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOC	löslicher Kohlenstoff (Dissolved organic carbon)
DüMV	Düngemittelverordnung
EBC	European Biochar Certificate
EC	Elektrische Leitfähigkeit
EM	Effektive Mikroorganismen
EPA	United States Environmental Protection Agency
EU	Europäische Union
Fisher's LSD	Post-hoc-Test „Least Significant Difference“ nach Fisher (1935)
FNU	Formazine Nephelometric Units (Trübungseinheit)
FS	Frischsubstanz
GA	Großansatz (Kompostherstellung im Botanischen Garten Berlin)
GBZ	Gesamtbakterienanzahl



GC-FID	Gaschromatographie mit Flammenionisationsdetektor
GS	Grünschnitt
GV	Glühverlust
H/C-Verhältnis	Wasserstoff/Kohlenstoff-Atom-Verhältnis
ICP-OES	Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (deutsch: optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas
IR	Intensiv Rotte
ISO	International Standard Organisation
JKI	Julius Kühn-Institut
KAK <sub>eff</sub>	Kationenaustauschkapazität
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LF	Leitfähigkeit
LME	Lineares mixed-effects Modell
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MLR	Multiple lineare Regression
NER	nicht extrahierbare Rückstände
N <sub>min</sub>	mineralischer Stickstoff
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OS	Organische Substanz
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane
PTFE	Polytetrafluorethylen
r	Korrelationskoeffizient
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RD	Rohdichte
SA	Salzgehalt
SC	Schüttelversuch
SE	Standardfehler, engl. „Standard error“
SIR	Substratinduzierte Atmung

ST	Standtest
SV	Säulenversuch
SWOT	engl. Akronym für Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Bedrohungen))
Tab.	Tabelle
TC	Gesamtkohlenstoff (Total carbon)
TD	Trockendichte
THG	Treibhausgase
TM	Trockenmasse
TOC	organischer Kohlenstoff (Total organic carbon)
TS	Trockensubstanz
TS	Trockensubstanz
unk. Bo.	unkontaminierter Boden
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
W/F	Wasser/Feststoff-Verhältnis
WG	Wassergehalt
WHK	Wasserhaltekapazität
WHK <sub>max</sub>	maximale Wasserhaltekapazität