



LAND
BRANDENBURG

Ministerium für Umwelt, Gesundheit
und Verbraucherschutz

Bodenschutz



Fachbeiträge des LUGV

Heft Nr. 137

Stabilität und Wirkung von Kohlen-C (Pflanzen- bzw. Biokohle) auf Böden

Abschlussbericht

**Landesamt für
Umwelt,
Gesundheit und
Verbraucherschutz**

Stabilität und Wirkung von Kohlen-C (Pflanzen- bzw. Biokohle) auf Böden (Abschlussbericht)

Herausgeber:

Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV)
Seeburger Chaussee 2
14476 Potsdam
OT Groß Glienicke
Tel.: 033201-442-171
Fax: 033201-43678

Bestelladresse: info@lugv.brandenburg.de

Download: <http://www.lugv.brandenburg.de/info/lugvpublikationen>

Potsdam, Mai 2014

Dieser Fachbericht basiert auf dem vom LUGV geförderten Projekt (Az. 16811/2-48) zu Thema „Stabilität und Wirkung von Kohlen-C (Pflanzen- bzw. Biokohle) auf Böden“ – Abschlussbericht 11/2013

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Schultz-Sternberg (Projektleitung)
M. Sc., Dipl.-Geogr. Robert Bartsch
Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH) (HNE Eberswalde FH),
Friedrich-Ebert-Straße 28, 16225 Eberswalde

Dr. Michael Haubold-Rosar
Dr. Thomas Heinkele
Dr. Christian Lange
Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB Finsterwalde)
Brauhausweg 2, 03238 Finsterwalde

Redaktion:

LUGV, Abt. Technischer Umweltschutz
Referat Altlasten, Bodenschutz (T6)
Dr. Jürgen Ritschel
Tel.: 033201-442-356
E-Mail: juergen.ritschel@lugv.brandenburg.de

Diese Veröffentlichung erfolgt im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Der Bericht einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	10
1.1	Problemstellung	10
1.2	Zielstellung	10
1.3	Bodenfunktionen und Zuordnung der Bodenparameter	10
2.	Untersuchungsgebiete	13
2.1	Auswahl der Untersuchungsflächen	13
2.2	Kohlelagerfläche bei Britz	13
2.3	Köhlereifläche bei Jänschwalde	14
2.4	Forstliche Rekultivierungsflächen	16
2.5	Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen	17
3.	Methodik	19
3.1	Bodenkundliche Untersuchungen	19
3.1.1	Geländeuntersuchungen	19
3.1.2	Laboruntersuchungen	20
3.1.3	Statistische Auswertung der Laborergebnisse	20
3.2	Vegetationskundliche Untersuchungen	21
3.2.1	Vegetationsaufnahme	21
3.2.2	Zeigerwerte nach Ellenberg	22
4.	Ergebnisse	23
4.1	Bodenkundliche Untersuchungen	23
4.1.1	Profilsprache	23
4.1.1.1	Kohlelagerfläche bei Britz	23
4.1.1.2	Köhlereifläche bei Jänschwalde	24
4.1.1.3	Forstliche Rekultivierungsflächen	25
4.1.1.4	Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen	26
4.1.2	Laboruntersuchungen	26
4.1.2.1	Kohlelagerfläche bei Britz	27
4.1.2.2	Köhlereifläche im Forst bei Jänschwalde	30
4.1.2.3	Forstliche Rekultivierungsflächen	33
4.1.2.4	Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen	36
4.2	Vegetationskundliche Untersuchungen	39
4.2.1	Vegetationsaufnahme / Biotopkartierung	39
4.2.1.1	Kohlelagerfläche bei Britz	39

4.2.1.2	Köhlereifläche bei Jänschwalde	40
4.2.1.3	Forstliche Rekultivierungsflächen	41
4.2.1.4	Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen	42
4.2.2	Zeigerwerte nach Ellenberg	43
4.2.2.1	Kohlelagerfläche bei Britz	43
4.2.2.2	Köhlereifläche bei Jänschwalde	45
4.2.2.3	Forstliche Rekultivierungsflächen	47
4.2.2.4	Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen	48
5.	Synoptische Betrachtung und Diskussion	51
5.1	Bodenkundliche Untersuchungen	51
5.2	Vegetationskundliche Untersuchungen	57
6.	Zusammenfassung	59
7.	Literatur	62
8.	Anhang	66

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1 Aufnahme der Kohlefläche bei Britz (links oben: Aufnahme des Gesamteindrucks der Untersuchungsfläche, rechts oben -sowie links und rechts unten: Aufnahmen des Bodens der Kohlelagerfläche und Kohlenreste).....	14
Abb. 2-2 Aufnahme der Kohlen- und der Referenzfläche im Vorfeld des Tagebau Jänschwalde, links oben: Gesamteindruck Kohlenfläche, oben rechts: <i>Calluna vulgaris</i> und <i>Vaccinium vitis-idaea</i> auf der Kohlenfläche, links unten: Referenzfläche, rechts unten: Kohlenmeiler freigelegt (alles eigene Aufnahmen, außer rechts unten: Nicolay, in Raab et al., 2011)	15
Abb. 2-3 Untersuchungsflächen der forstlichen Rekultivierung, linke Seite (oben und unten): kohlehaltiger Standort Tröbitz; rechte Seite (oben und unten): kohlefreier Standort Schipkau	16
Abb. 2-4 Untersuchungsflächen der landwirtschaftlichen Rekultivierung, linke Seite (oben und unten): kohlehaltiger Standort Grünewalde; rechte Seite (oben und unten): kohlefreier Standort Plessa.....	18
Abb. 3-1 Schema der Flächeneinteilung zur Probenahme am Beispiel der Kohlelagerfläche bei Britz	19
Abb. 4-1 Bodenprofil der Kohlelagerfläche bei Britz (v. Chamier Glisczinski, 2013)	23
Abb. 4-2 Bodenprofil der Referenzfläche bei Britz (v. Chamier Glisczinski, 2013)	24
Abb. 4-3 Bodenprofil der Köhlereifläche bei Jänschwalde	24
Abb. 4-4 Bodenprofil der Referenzfläche bei Jänschwalde	25
Abb. 4-5 Bodenprofil der Referenzfläche bei Schipkau	25
Abb. 4-6 Bodenprofil des kohlehaltigen Standortes Grünewalde	26
Abb. 4-7 Bodenprofil der Referenzfläche bei Plessa	26
Abb. 4-8 Vergleich des Eindrucks der Vegetationsbedeckung von Kohlefläche (linke Seite) und Referenzfläche (rechte Seite) im Juni 2013 (oben) und September 2013 (unten)	39
Abb. 4-9 Kohlefläche mit <i>Calamagrostis epigejos</i> und Rohbodenanteilen	40
Abb. 4-10 Referenzstandort mit <i>Calamagrostis epigejos</i> , <i>Senecio erucifolius</i> und <i>Chenopodium album</i>	41
Abb. 4-11 Kohlestandort Domsdorf/Tröbitz mit <i>Quercus rubra</i> und <i>Tilia cordata</i>	41
Abb. 4-12 Referenzstandort Schipkau mit <i>Quercus petraea</i>	42
Abb. 4-13 Gesamteindruck der Untersuchungsfläche Grünewalde (kohlehaltig) bei Vegetationsaufnahme im September 2013	42
Abb. 4-14 Luftbild des Standortes Plessa im Frühjahr mit Kennzeichnung der Untersuchungsfläche.....	43
Abb. 4-15 Median, Maximum und Minimum der Zeigerwerte für alle Indikatoren auf Kohle- und Referenzfläche für den Standort Britz.....	44

Abb. 4-16 Verteilung der Zeigerwerte der Feuchtezahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Britz	44
Abb. 4-17 Verteilung der Zeigerwerte der Reaktionszahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Britz	45
Abb. 4-18 Verteilung der Zeigerwerte der Stickstoffzahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Britz.....	45
Abb. 4-19 Median, Maximum und Minimum der Zeigerwerte für alle Indikatoren auf Kohle- und Referenzfläche für den Standort Jänschwalde	46
Abb. 4-20 Verteilung der Zeigerwerte der Feuchtezahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Jänschwalde	46
Abb. 4-21 Verteilung der Zeigerwerte der Reaktionszahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Jänschwalde	47
Abb. 4-22 Verteilung der Zeigerwerte der Stickstoffzahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Jänschwalde	47
Abb. 4-23 Verteilung der Zeigerwerte der Feuchtezahl auf der Kohlefläche am Standort Tröbitz und der Referenzfläche am Standort Schipkau	48
Abb. 4-24 Verteilung der Zeigerwerte der Reaktionszahl auf der Kohlefläche am Standort Tröbitz und der Referenzfläche am Standort Schipkau	48
Abb. 4-25 Verteilung der Zeigerwerte der Stickstoffzahl auf der Kohlefläche am Standort Tröbitz und der Referenzfläche am Standort Schipkau	48
Abb. 4-26 Median, Maximum und Minimum der Zeigerwerte für alle Indikatoren auf Kohle- und Referenzfläche für die landwirtschaftlich genutzten Standorte Grünewalde und Plessa.....	49
Abb. 4-27 Verteilung der Zeigerwerte der Feuchtezahl auf der Kohlefläche am Standort Grünewalde und der Referenzfläche am Standort Plessa	49
Abb. 4-28 Verteilung der Zeigerwerte der Reaktionszahl auf der Kohlefläche am Standort Grünewalde und der Referenzfläche am Standort Plessa	50
Abb. 4-29 Verteilung der Zeigerwerte der Stickstoffzahl auf der Kohlefläche am Standort Grünewalde und der Referenzfläche am Standort Plessa	50
Abb. 5-1 Gesamtkohlenstoffgehalt der einzelnen Flächen im Vergleich, Mittelwert (schwarze Linie), Standardabweichung (+/-, Box) sowie Minimum (Zeiger nach unten) und Maximum (Zeiger nach oben)	51
Abb. 5-2 Gesamtstickstoffgehalt der einzelnen Flächen im Vergleich, Mittelwert (schwarze Linie), Standardabweichung (+/-, Box) sowie Minimum (Zeiger nach unten) und Maximum (Zeiger nach oben)	52

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1 Bodenfunktionen und Bodenteilfunktionen nach BBodSchG	11
Tab. 1-2 Zuordnung der Bodenparameter zu Bodenfunktionen und –teilmfunktionen (nach Feldwisch & Swaton, 2003, Hochfeld et al., 2003, Scheffer & Schachtschabel, 2010, Klik, 2001).....	12
Tab. 3-1 Größe und Einteilung der Untersuchungsflächen zur Probenahme (Analog in Größe und Anzahl der Teilflächen sind die Referenzflächen eingeteilt worden.)	20
Tab. 3-2 Durchgeführte Laboruntersuchungen einschließlich Angabe des Verfahrens	20
Tab. 3-3 Minimumsareal und geeignete Aufnahme­flächengröße (Auswahl, Dierßen, 1990)	21
Tab. 4-1 Bodenphysikalische Eigenschaften des Kohlelagerstandortes und der Referenzfläche bei Britz (Textur und Dichte)	27
Tab. 4-2 Bodenchemische Eigenschaften des Kohlelagerstandortes und der Referenzfläche bei Britz (C _{org} , N _{ges} , pH-Wert, EC, KAK und BS).....	28
Tab. 4-3 Wasserlösliche Stoffgehalte des Kohlelagerstandortes und der Referenzfläche bei Britz (Anionen und Kationen)	29
Tab. 4-4 Nährstoffgehalte des Kohlelagerstandortes und der Referenzfläche bei Britz (N _{min} , Phosphor, austauschbares Kalium und Magnesium).....	30
Tab. 4-5 Bodenphysikalische Eigenschaften des Köhlereistandortes und der Referenzfläche bei Jänschwalde (Textur und Dichte)	31
Tab. 4-6 Bodenchemische Eigenschaften des Köhlereistandortes und der Referenzfläche bei Jänschwalde (C _{org} , N _{ges} , pH-Wert, EC, KAK und BS).....	31
Tab. 4-7 Wasserlösliche Stoffgehalte des Köhlereistandortes und der Referenzfläche bei Jänschwalde (Anionen und Kationen)	32
Tab. 4-8 Nährstoffgehalte des Köhlereistandortes und der Referenzfläche bei Jänschwalde (N _{min} , Phosphor, austauschbares Kalium und Magnesium)	33
Tab. 4-9 Bodenphysikalische Eigenschaften der forstlichen Rekultivierungsstandorte Domsdorf/Tröbitz (KF) und Schipkau (RF) (Textur und Dichte)	33
Tab. 4-10 Bodenchemische Eigenschaften der forstlichen Rekultivierungsstandorte Domsdorf/Tröbitz (KF) und Schipkau (RF) (C _{org} , N _{ges} , pH-Wert, EC, KAK und BS).....	34
Tab. 4-11 Wasserlösliche Stoffgehalte der an den forstlichen Rekultivierungsstandorte Domsdorf/Tröbitz (KF) und Schipkau (Anionen und Kationen)	35
Tab. 4-12 Nährstoffgehalte der forstlichen Rekultivierungsstandorten Domsdorf/Tröbitz (KF) und Schipkau (N _{min} , Phosphor, austauschbares Kalium und Magnesium).....	36

Tab. 4-13 Bodenphysikalische Eigenschaften der landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorte Grünwalde (KF) und Plessa (RF) (Textur und Dichte).....	36
Tab. 4-14 Bodenchemische Eigenschaften der landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorte Grünwalde (KF) und Plessa (RF) (C_{org} , N_{ges} , pH-Wert, EC, KAK und BS).....	37
Tab. 4-15 Wasserlösliche Stoffgehalte der landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorte Grünwalde (KF) und Plessa (Anionen und Kationen)	38
Tab. 4-16 Nährstoffgehalte der an den landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorten Grünwalde (KF) und Plessa (Nährstoffe)	38
Tab. 5-1 Unterschiede, Richtung des Unterschiedes und Signifikanz des Parametervergleichs zwischen Kohle- und Referenzfläche	54
Tab. 5-2 Wirkung von Kohle auf Bodeneigenschaften und daraus resultierende positive oder negative Beeinflussung der Bodenfunktionen	56
Tab. 5-3 Median der Zeigerwerte aller Kohle- und Referenzflächen	57

Abkürzungsverzeichnis

C	- Kohlenstoff (chemisches Element)	LGB	- Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg
C _{org}	- organischer Kohlenstoff	LGRB	- Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg
DOC	- dissolved organic carbon	LUGV	- Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz in Brandenburg
org.	- organisch	MUGV	- Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg
BBodSchG	- Bundesbodenschutzgesetz	N _{ges}	- Gesamtstickstoff im Boden
BMELV	- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz	N _{min}	- mineralisierter Stickstoff
BVM	- Bodenverbesserungsmittel	RF	- Referenzfläche (Untersuchungsstandort)
EC	- elektrische Leitfähigkeit	UG	- Untersuchungsgebiet / Untersuchungsgebietes
FIB e.V.	- Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V.	WGT	- Westgruppe der sowjetischen Truppen
HNEE	- Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH)	VDLUFA	- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
IABG	- Industrieanlagen- Betriebsgesellschaft mbH		
KAK _{eff}	- effektive Kationenaustauschkapazität		
KF	- Kohlefläche (Untersuchungsstandort)		
LBGR	- Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg		

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Böden stellen die Grundlage der Land- und Forstwirtschaft sowie Nahrungsmittelproduktion dar. Ihr Schutz und ihre nachhaltige Verbesserung für die Produktion ist ein wichtiges und aktuelles Thema. Aus diesem Grund wird derzeit die Verbringung von technisch erzeugter Pflanzen- bzw. Biokohle zur Bodenverbesserung diskutiert und untersucht. Ein wichtiges Kriterium für die nachhaltige Verbesserung des Bodens durch Kohle ist die Stabilität des zugeführten Kohlenstoffs. Er darf nur minimalem mikrobiellen Abbau unterliegen.

Beispiele für eine nachhaltige Versorgung des Bodens mit organischem Kohlenstoff sind die „Terra Preta“ Böden in Südamerika. Sie weisen deutliche anthropogen verursachte Anreicherungen von organischer Substanz, höhere Nährstoffkapazitäten und bessere Wasserhaltekapazitäten noch nach mehreren hundert Jahren gegenüber den standortüblichen Bodenprofilen auf (Glaser et al., 2001). Derzeit werden in zahlreichen Vorhaben die Anwendbarkeit und die Auswirkungen der Verbringung von technisch erzeugter Pflanzenkohle auch unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen untersucht. Ausgewählte Beispiele hierfür sind das LaTerra-Projekt (mit einem Regionalprojekt in Brandenburg), ClimaCarbo und Biochar Europe (Schultz-Sternberg et al., 2012).

Die Langfristigkeit und Stabilität der Wirkungen von Kohlen-C auf Böden sind aber derzeit noch nicht ausreichend geklärt. Aus diesem Grund initiierte das Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg das Projekt: „Stabilität und Wirkung von Kohlen-C (Pflanzen- bzw. Biokohle) auf Böden“.

Im Rahmen des Projektes soll die Fragestellung der Wirksamkeit von Kohle als Bodenverbesserungsmittel und deren langfristiger Wirkung untersucht werden.

1.2 Zielstellung

Während die positive Wirkung von Huminstoff-C auf die Bodenfunktionen weitgehend unbestritten ist, besteht hinsichtlich der Wirkung von reiner Kohle derzeit noch weiterer Klärungsbedarf. Aus diesem Grund ist das Ziel der Untersuchungen mögliche

Wirkungen von Kohlen-C auf die Bodeneigenschaften herauszuarbeiten.

Zu diesem Zweck wurden vier Standorte in Brandenburg mit Kohlebeeinflussung und vergleichbare kohlefreie Standorte auf grundwasserunbeeinflussten Böden ausgewählt. Diese sollen hinsichtlich der Unterschiede ausgewählter physikalischer und chemischer Bodenparameter beprobt und analysiert werden. Um Aussagen zur Stabilität und Langzeitwirkung von Kohlen-C treffen zu können, wurden Standorte mit unterschiedlichen Zeitpunkten des Eintrages ausgewählt.

Darüber hinaus soll untersucht werden, welche Auswirkungen Kohlen-C auf die Vegetation hat. Aus diesem Grund wird eine detaillierte Vegetationsaufnahme auf den jeweiligen Kohleflächen sowie den dazugehörigen Referenzstandorten vorgenommen und auf die Zusammensetzung und Zeigerwerte der Pflanzen hin untersucht.

Folgende Punkte wurden als Ziele definiert:

1. Aussagen zur Wirkung von Kohlen-C auf Bodenfunktionen
2. Aussagen zur Stabilität und Langzeitwirkung von Kohlen-C im Boden
3. Aussagen zur Wirkungen von Kohlen-C auf die Vegetation

1.3 Bodenfunktionen und Zuordnung der Bodenparameter

Der Boden übt verschiedene Funktionen aus, welche im § 2 des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG) genannt werden (Tab. 1-1). Diese sind nach dem §1 BBodSchG zu schützen und Gefährdungen beim Einwirken auf den Boden zu vermeiden (BBodSchG, 1998). Um bewerten zu können, wie sich Kohle im Boden auf die Funktionen auswirkt, werden die gemessenen Bodenparameter den Funktionen zugeordnet (Tab. 1-2). Es findet dabei keine Wertung, hinsichtlich des Maßes und der Richtung ihrer Wirkung statt. Eine Ausweisung der positiven oder negativen Beeinflussung wird im Kapitel 5 vorgenommen.

Tab. 1-1 Bodenfunktionen und Bodenteilfunktionen nach BBodSchG

Bodenfunktion nach BBodSchG	Teilfunktion
§ 2 Abs. 2 Nr. 1a: Lebensraumfunktion	<ul style="list-style-type: none"> • Standort für natürliche Vegetation (Biotopentwicklungspotenzial) • Lebensraum für Bodenflora und –fauna
§ 2 Abs. 2 Nr. 1b: Bestandteil von Wasser und Nährstoffkreisläufen	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserhaushalt • Nährstoffhaushalt
§ 2 Abs. 2 Nr. 1c: Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung, Pufferung anorganischer und organischer Schadstoffe • Säurepufferung • Mechanisches Filtervermögen
§ 2 Abs. 2 Nr. 2: Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte	
§ 2 Abs. 2 Nr. 3 a: Nutzungsfunktionen als Rohstofflagerstätte	
§ 2 Abs. 2 Nr. 3 b: Fläche für Siedlung und Erholung (Grünbereich)	
§ 2 Abs. 2 Nr. 3 c: Standort für land- und forstwirtschaftliche Nutzung	<ul style="list-style-type: none"> • Ertragsfunktion
§ 2 Abs. 2 Nr. 3 d: Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung	

Für die Funktionen:

- Archiv der Natur- und Kulturgeschichte,
- Rohstofflagerstätte,
- Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung
- Fläche für Siedlung und Erholung

konnten keine der gemessenen Parameter direkt zugeordnet werden. Daraus ist aber nicht abzuleiten, dass sie nicht durch die gemessenen Parameter beeinflusst werden. Der Einfluss ist nur nicht direkt ableitbar, sondern möglicherweise indirekt über andere Parameter feststellbar.

Die Funktionen nach §2 Abs.2 Nr.1b und 1c werden unter Regler/Speicherfunktion zusammengefasst. Tabelle 1-2 zeigt die gemessenen Parameter, welche eine Bedeutung für Prozesse im Boden und für die Landnutzung besitzen und ordnet ihnen die entsprechenden Funktionen zu.

Die ausgewählten Parameter beeinflussen die Funktionen nicht einseitig, so hat z.B. eine Erhöhung von Kalium an den Austauschern nur bis zu einem bestimmten Grad positive Auswirkungen auf die Ertragsfunktion. Bei 100 %er Belegung durch Kaliumionen würden andere Makronährstoffe, vor allem Magnesium, zum Mangel für die Pflanzen werden (Stahr et al., 2008). Deshalb muss immer versucht werden, ein Optimum für den entsprechenden Boden zu erreichen. Da dies in seiner Komplexität nicht vollständig in die vorliegende Arbeit eingehen kann, soll hier von vereinfachten Annahmen ausgegangen werden. Es wird erwartet, dass die Richtung der Beeinflussung weitestgehend einseitig ist, z.B. bewirkt eine Erhöhung des Gesamtkohlenstoffs die Anlagerungsmöglichkeiten von Nährstoffen oder auch Schadstoffen und erhöht somit die Ertragsfunktion (bei Anlagerung von Nährstoffen) bzw. die Filter- und Pufferwirkung.

Tab. 1-2 Zuordnung der Bodenparameter zu Bodenfunktionen und –teilkfunktionen (nach Feldwisch & Swaton, 2003, Hochfeld et al., 2003, Scheffer & Schachtschabel, 2010, Klik, 2001)

Physikalische Parameter	Bedeutung	Beeinflusste Bodenfunktion / -teilkfunktion
Trockenrohdichte / effektive Lagerungsdichte	<ul style="list-style-type: none"> Beeinflusst das Bodengefüge und die Versickerungseigenschaften Beeinflusst Wurzelwachstum 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion Regler-/ Speicherfunktion Lebensraum für Bodenflora und –fauna
Elektrische Leitfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> Maß für die Salzkonzentration im Boden 	<ul style="list-style-type: none"> Lebensraum für Bodenflora und –fauna
Chemische Parameter		
Chemische Parameter	Bedeutung	Beeinflusste Bodenfunktion / -teilkfunktion
pH-Wert	<ul style="list-style-type: none"> Parameter zur pflanzenbaulichen Bewertung Kennwert für Verfügbarkeit von Nähr- und Schadstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion Regler-/ Speicherfunktion
Effektive Kationenaustauschkapazität	<ul style="list-style-type: none"> Kennwert für Verfügbarkeit von Nähr- und Schadstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> Regler-/ Speicherfunktion
N _{ges}	<ul style="list-style-type: none"> Parameter zur pflanzenbaulichen Bewertung 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion Lebensraum für Bodenflora und –fauna Regler-/ Speicherfunktion
N _{min}	<ul style="list-style-type: none"> Parameter zur pflanzenbaulichen Bewertung 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion Lebensraum für Bodenflora und –fauna Regler-/ Speicherfunktion
C _{ges}	<ul style="list-style-type: none"> Förderung der KAK Speicherung von Nährstoffen in Ton-Humuskomplexen Erhöht Schadstoffbindung und -verlagerung 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion Lebensraum für Bodenflora und –fauna Regler-/ Speicherfunktion
Carbonatgehalt	<ul style="list-style-type: none"> Fördert die Pufferung von Schadstoffen, stabilisiert den pH-Wert Erhöht die Filterleistung des Bodens Reduziert Aziditätsschäden Fördert die biologische Bodenaktivität (Sekundärwirkung) Erhöht den Abbau organischer Schadstoffe (Sekundärwirkung) 	<ul style="list-style-type: none"> Lebensraum für Bodenflora und –fauna Regler-/ Speicherfunktion
Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na	<ul style="list-style-type: none"> Nährstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion
Cl ⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	<ul style="list-style-type: none"> Makronährstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion
DOC	<ul style="list-style-type: none"> Erhöht Schadstoffbindung und -verlagerung 	<ul style="list-style-type: none"> Regler-/ Speicherfunktion
Orthophosphat	<ul style="list-style-type: none"> Makronährstoff 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion
Austauschbares Mg und K	<ul style="list-style-type: none"> Makronährstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> Ertragsfunktion

2. Untersuchungsgebiete

2.1 Auswahl der Untersuchungsflächen

Im Rahmen des ersten Projektteiles wurden bereits potentielle Untersuchungsflächen in Brandenburg ausgewiesen. Die Grundlage hierzu bildeten Datensammlungen verschiedener Landesämter. Wichtige Ausweisungsmerkmale waren dabei (Schultz-Sternberg et al., 2012):

- anthropogener Eintrag von Kohlen-C
- Zeitraum bzw. Zeitpunkt des Kohleeintrages auf den Flächen unterschiedlich
- Vegetationsbedeckung
- möglichst kein Vorkommen weiterer Kontaminationen (z.B. Pyrit).

Anschließend wurden diese Flächen hinsichtlich ihrer Kohleeintragspfade kategorisiert.

- Waldbrandflächen
- Lagerflächen für Kohle
- Köhlereiflächen
- Rekultivierungsflächen Braunkohletagebau
- Versuchsflächen (Land- und Forstwirtschaft)

Die Untersuchungsflächen wurden in Form von Steckbriefen mit Informationen zur Lage, zum Eintragspfad und Art der Kohle, zur ehemaligen und aktuellen Nutzung sowie zu Boden- und Klimainformationen zusammengestellt. Aus dem Pool wurden vier Untersuchungsflächenpaare (jeweils bestehend aus einer kohlehaltigen Fläche und einer Referenzfläche) ausgewählt, welche in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden. Um bei der Analyse verschiedene Eintragspfade miteinander vergleichen zu können, handelt es sich um Standorte aus verschiedenen Kategorien. Gewählt wurden zwei Rekultivierungsflächenpaare, die derzeit unterschiedlich genutzt werden (Kap. 2.4 und 2.5), weiterhin eine ehemalige Kohlelagerfläche (Kap. 2.2) und eine ehemalige Köhlereifläche (Kap.2.3). Es wurden keine Versuchsflächen der Land- und Forstwirtschaft einbezogen, da hier Daten beim jeweiligen Flächeneigner zu erwarten sind. Ebenso keine Waldbrandflächen, da hier nur von einem minimalen Kohleeintrag an der Bodenoberfläche auszugehen ist.

2.2 Kohlelagerfläche bei Britz

Durch die Untersuchungen von v. Chamier Glisczinski (2013) wurde die Kohlelagerfläche bei Britz bereits eingehend erkundet. Daher wurde die Fläche erneut einbezogen, um auf den bestehenden Untersuchungsergebnissen aufbauend weitere Bodenuntersuchungen durchführen zu können und sie insbesondere für die Vegetationskartierung zu nutzen.

Das Untersuchungsgebiet (UG) liegt etwa 70 km nordöstlich von Berlin im Landkreis Barnim innerhalb einer ehemaligen Kaserne der Westgruppe der sowjetischen Streitkräfte (WGT). Die zu untersuchende Kohlelagerfläche ist etwa 36 m² groß und befindet sich im nördlichen Teil des Geländes. Als Referenzfläche (RF) kann ebenfalls die von Frau von Chamier Glisczinski (2013) ausgewiesene Fläche in 80 m Entfernung zur Kohlefläche dienen.

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich im Jungmoränengebiet des nordostdeutschen Tieflandes auf einem Sander der Angermünder Staffel in unmittelbarer Nähe zur Grundmoräne der Britzer Hochfläche. Das Ausgangssubstrat bilden glazifluviale und fluviatile Sande mit teilweise Grundwassereinfluss. Dadurch sind vergleyte-podsolige Braunerden bis podsolige Gley-Braunerden auf zumeist fein- und mittelsandigem Substrat zu erwarten. Aufgrund der bisherigen Nutzung variiert die Mächtigkeit des Bodens auf der Fläche. Im Oberboden sind etwa 2 % Humusgehalt zu erwarten.

Klimatisch befindet sich das Gebiet im Übergang zwischen atlantisch und kontinental geprägtem Klima. Die mittleren Jahrestemperaturen werden für die nächstliegende Station Angermünde für den Zeitraum 1981-2010 mit 8,9°C angegeben. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Winter und Sommer beträgt 18,5 K. Die mittlere Jahresniederschlagssumme für diesen Zeitraum beträgt 521 mm (DWD, 2013).

Nach Recherchen von v. Chamier Glisczinski (2013) befand sich das Untersuchungsgebiet bis Anfang des 20. Jahrhunderts am Rand zwischen Wald- und Ackernutzung. Nicht zu klären war, ob bis 1945 von einer reinen Waldnutzung auszugehen ist. Ab 1945 wurde die Fläche von den sowjetischen Streitkräften genutzt und für Schießübungen verwendet, weshalb östlich an das Untersuchungsgebiet grenzend ein Wall aufgeschoben wurde. Aufgrabungen und Aufschüttungen führten zu einer kleinräumig starken

Reliefierung des Geländes und möglicherweise zu oberflächigen Beeinträchtigungen des gewachsenen Bodens. Auch der Bau einer Schweinemastanlage

und die damit verbundene Absenkung des Grundwasserspiegels ab 1975 wirkten sich aus (v. Chamier Glisczinski, 2013).



Abb. 2-1 Aufnahme der Kohlefläche bei Britz (links oben: Aufnahme des Gesamteindrucks der Untersuchungsfläche, rechts oben -sowie links und rechts unten: Aufnahmen des Bodens der Kohlelagerfläche und Kohlenreste)

Nach dem Abzug der sowjetische Streitkräfte Anfang der 1990er Jahre wurde das Untersuchungsgebiet privatisiert. Seitdem wird dort außer der Jagd keine aktive Nutzung betrieben. Die Veränderung der Fläche zeigt sich auch in Luftbildaufnahmen, welche eine deutliche Zunahme der Verbuschung dokumentieren.

Überall auf dem Kasernengelände sind Altmetalle, Reifen und Gebäudereste zu finden, welche auf die Kasernennutzung, aber auch nachträglich illegal verbrachtes Material zurückzuführen sind. Die durch das Bodenschutzamt Barnim vorgenommenen Untersuchungen auf Altlasten ergaben an den direkten Untersuchungsflächen aber keine Belastungen durch Abfall, so dass von einem unbedenklichen Standort auszugehen ist (v. Chamier Glisczinski, 2013).

Nach Angaben des Bodenschutzamtes Barnim ist der Kohleneintrag auf der Fläche älter als 1990 und fällt damit in die Zeit der Kasernennutzung. Die Größe der Fläche ist lokal begrenzt und beträgt etwa 6 x 6 m. Bei der Geländeaufnahme konnten noch

Brikettreste auf der Fläche gefunden werden (Abb. 2-1).

2.3 Köhlereifläche bei Jänschwalde

Das Untersuchungsgebiet der ehemaligen Köhlereifläche liegt im Südosten Brandenburgs, etwa 15 km nordöstlich von Cottbus im unmittelbaren Vorfeld des Tagebaus Jänschwalde. Eine vergleichbare Referenzfläche wurde in unmittelbarer Umgebung etwa 500 m östlich in Richtung der Horno-Grießener Hochfläche gefunden. Die aufgenommenen Profile und die Probennahmeflächen (sowohl die Köhlereifläche als auch die Referenzfläche) liegen im für 2013/14 vorgesehenen Abbauareal. Die Fläche ist bereits seit 2010/11 gerodet (Rösler, mdl. Mitteilung, 2013).

Nach Meynen & Schmithüsen (1961) ist die Fläche mit ihren natürlich vorherrschenden Kiefern bzw. Kiefern-Eichenmischwäldern naturräumlich dem Ostbrandenburgischen Heide- und Seengebiet

zuzuordnen. Die Maßnahmen im Zuge der Vorfeldberäumung des Tagebaus haben das Untersuchungsgebiet aber deutlich anthropogen verändert.

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf der Fläche des Taubendorfer Sanders, welcher weichselzeitlich entstanden ist. In der Nähe der Ortslage Grieben schließt sich östlich an den Sander die saalezeitliche Grundmoränenablagerung der Horno-Grießener Hochfläche an (Raab et al., 2011). Die beiden Untersuchungsflächen liegen vollständig auf der Sanderfläche. Auf den Sanderflächen sind

als typische Böden Podsol-Braunerden sowie podsolige-Braunerden auf glazifluvialen Sanden zu finden (Raab et al., 2011).

Klimatisch befindet sich das Gebiet im thermisch kontinentalen Bereich des nordostdeutschen Tieflandes (Großer, 1998). Die mittlere Temperatur für den Zeitraum 1981-2010 liegt bei 9,6°C an der Station Cottbus. Die Temperaturdifferenz beträgt 18,2 K zwischen Winter und Sommer. Die mittlere Niederschlagssumme für diese Station im Zeitraum 1981-2010 beträgt 568 mm (DWD, 2013).



Abb. 2-2 Aufnahme der Kohlen- und der Referenzfläche im Vorfeld des Tagebau Jänschalde, links oben: Gesamteindruck Kohlenfläche, oben rechts: *Calluna vulgaris* und *Vaccinium vitis-idaea* auf der Kohlenfläche, links unten: Referenzfläche, rechts unten: Kohlenmeiler freigelegt (alles eigene Aufnahmen, außer rechts unten: Nicolay, in Raab et al., 2011)

Die historische Nutzung des Untersuchungsgebietes war in der nächsten Vergangenheit rein forstlich. Für verschiedene Flächen kann während des Mittelalters Ackerbau nachgewiesen werden (Raab et al., 2010). Die noch nicht abgeholzten Bestände sind reine Kiefernbestockung. Innerhalb dieser Forsten wurde spätestens seit dem 18.Jh. Holzkohle hergestellt, sowohl zur Belieferung des benachbarten Hüttenwerkes Peitz, als auch zum häuslichen Gebrauch. Nicht auszuschließen ist, dass bereits im Mittelalter Holzkohlenmeiler angelegt wurden (Raab et al., 2010). Schätzungen gehen von insgesamt 600

Meilerstellen im Gebiet des Tagebaus Jänschalde aus (Raab et al., 2010).

Die Holzkohlenmeiler haben verschiedene Größen. Für den etwas südlicher angrenzenden Bereich des „Preußenwaldes“ wurden sie nach ihrem Durchmesser in drei Größenklassen eingeteilt, 5-8 m, 8-14 m und 14-20 m. Dies ist auch auf das Untersuchungsgebiet übertragbar (Rösler, 2006). Erkennbar sind sie rezente durch einen Ring mit Holzkohleresten (Abb. 2-2). Dieser Ring entstand um den Meiler, da der Boden zum Abdecken des Meilers genutzt wurde und anschließend beim Auseinanderziehen des Meilers sich dort vermehrt

Kohlereste abgelagerten (Rösler, 2006). Der im Rahmen des Projektes beprobte Meiler (BK2013:J/6) ordnet sich in die Klasse 8-14 m ein.

2.4 Forstliche Rekultivierungsflächen

Der kohlehaltige, forstlich rekultivierte Standort befindet sich im Süden Brandenburgs, etwa 140 km südlich von Berlin bei Doberlug-Kirchhain, auf dem Areal des ehemaligen Tagebaugesbietes Tröbitz/Domsdorf. Hier wurde von 1847 bis 1958 in verschiedenen Gruben Braunkohle abgebaut (LMBV, 2007). Die Untersuchungsfläche erstreckt sich auf einem Kippengelände der Grube „Wildgrube II“, in

der zwischen 1931 und 1952 Braunkohle im Tagebau gewonnen wurde (LMBV, 2007). Die Verkippung auf dem untersuchten Bereich fand etwa 1946 statt. Das Material wurde mittels einer ca. 100 m langen Brücke hinter dem Bagger verkippt. Dabei entstanden typische Schüttkegel. Das stark kohlehaltige Substrat wird als Kipp-Kohlelehmsand (lehmgiger Sand, SI2-SI3) angesprochen.

In den ersten Jahren nach der Verkippung wurde die Fläche nicht genutzt. Sie blieb als Rohkippe zunächst vegetationsfrei und unterlag der natürlichen Sukzession. Im Jahr 1961/62 wurde mit *Quercus rubra* (Roteiche) sowie *Tilia cordata* (Winterlinde) aufgeforstet (Katzur et al., 1999) (Abb. 2-3).



Abb. 2-3 Untersuchungsflächen der forstlichen Rekultivierung, linke Seite (oben und unten): kohlehaltiger Standort Tröbitz; rechte Seite (oben und unten): kohlefreier Standort Schipkau

Etwa 50 km östlich von dem kohlehaltigen Standort befindet sich die Referenzfläche auf dem Kippengelände des ehemaligen Tagebaus Anna-Süd. Die nächstgelegenen Ortschaften sind Schipkau (östlich) und Lauchhammer (westlich). Mit der Auskohlung des Tagebaus zwischen 1938 und 1947 wurde das Gebiet ungenutzt als Rohkippe hinterlassen und erst 1959 mit *Quercus petraea* (Traubeneichen) aufgeforstet (BKA, 1996) (Abb. 2-3).

Klimatisch ist der Untersuchungsraum dem thermisch kontinentaleren Bereich des Nordostdeutschen Tieflandes zuzuordnen. Die mittleren Temperaturen der nächstgelegenen Wetterstation Doberlug-Kirchhain betragen für den Zeitraum 1981-2010 etwa 9,2°C, bei einer Temperaturdifferenz von 18,6 K zwischen Winter und Sommer (DWD, 2013). Der jährliche Niederschlag wird mit 580 mm angegeben.

2.5 Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen

Der kohlehaltige, landwirtschaftlich genutzte Rekultivierungsstandort befindet sich in Grünewalde im Süden Brandenburgs, etwa 140 km südlich von Berlin und wird vom Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB e.V.) als Versuchsfläche genutzt. Er ist Teil des Kippengeländes des ehemaligen Tagebaugesbietes Grünewalde / Koyné, wo zwischen 1919 und 1954 (Koyné) bzw. 1962 (Grünewalde) Kohle abgebaut wurde (LMBV, 2013). Die Verkipfung auf der Untersuchungsfläche fand etwa 1958 statt. Danach erfolgte die landwirtschaftliche Rekultivierung. Auf der Fläche wurde ein mittel bis stark kohlehaltiges Substrat verkippt, welches als Kipp-Kohlelehmsand (lehmiger Sand, Sl2-Sl3) angesprochen werden kann.

Die Nutzung dieser Untersuchungsfläche änderte sich in den letzten Jahren oftmals. Bis 2008 wurde die Fläche extensiv als Grünland genutzt. Im Jahr 2009 wurden unterschiedliche Sorghum- bzw. Maissorten angebaut. Hierzu erfolgte im Frühjahr 2009 eine Düngung mit 120 kg N / 80 kg P / 150 kg K sowie 50 dt CaO. Des Weiteren wurde einmalig ein Herbizid (Gardo Gold) angewendet. Im Jahr 2010 bestellte man die Fläche mit Gelbsenf und 2011 erneut mit unterschiedlichen Sorghum- und

Maissorten. Diesmal erfolgte einmalig eine Düngergabe von 120 kg N / 45 kg P / 230 kg K sowie wiederum der einmalige Einsatz von Gardo Gold. Seit 2012 wird die Fläche als Grünland mit einer Mischung aus Weidelgras und Knaulgras extensiv genutzt (Abb. 2-4). In unmittelbarer Nähe befinden sich mit schnellwachsenden Baumarten sowie unterschiedlichen Sorghum- und Maissorten bestellte Versuchspartellen.



Abb. 2-4 Untersuchungsflächen der landwirtschaftlichen Rekultivierung, linke Seite (oben und unten): kohlehaltiger Standort Grünewalde; rechte Seite (oben und unten): kohlefreier Standort Plessa

Die Referenzfläche befindet sich etwa 10 km westlich vom kohlehaltigen Standort in unmittelbarer Nähe zum Seengebiet Grünewalder Lauch und der Ortschaft Plessa. Hier wurde im Tagebau Plessa-Lauch von 1956 bis 1968 Braunkohle abgebaut (LMBV, 2013). Bei dem Substrat handelt es sich um Kipp-Lehmsand (lehmiger Sand, SI2-SI3). Nach Angaben des bewirtschaftenden Betriebes wurde in den letzten vier Jahren durchgängig Luzerne angebaut (Abb. 2-4).

Diese wurde lediglich im Frühjahr 2012 mit 60 kg / ha Stickstoff gedüngt. Vor dem Luzerneanbau war die Fläche im Jahr 2009 mit Sudangras bestellt, das mit 10 m³ / ha Gärrest gedüngt wurde.

Klimatisch sind beide Standorte dem thermisch kontinentaleren Bereich des Nordostdeutschen Tieflandes zuzuordnen. Die mittleren Temperaturen der nächstgelegenen Wetterstation Doberlug-Kirchhain betragen für den Zeitraum 1981-2010 etwa 9,2°C, bei einer Temperaturdifferenz von 18,6 K zwischen Winter und Sommer (DWD, 2013). Der jährliche Niederschlag wird mit 580 mm angegeben.

3. Methodik

3.1 Bodenkundliche Untersuchungen

3.1.1 Geländeuntersuchungen

Die Geländeuntersuchungen der einzelnen Standorte umfassten die Aufnahme eines Bodenprofils und die Probenahme für die Laboruntersuchung sowohl für den Kohlenstandort als auch die dazugehörige Referenzfläche. Die Referenzfläche wurde nach den vorherrschenden standörtlichen Gegebenheiten und Nutzung der Kohlefläche gewählt.

Nach der Begehung der Fläche wurde ein repräsentativer Standort für das Bodenprofil gewählt. Es stellt sicher, dass die Kohlen- und Referenzstandorte hinsichtlich ihres Bodens vergleichbar sind. Gleichzeitig werden damit Informationen zum vorhandenen Bodentyp und Ausgangssubstrat sowie zu vorherrschenden Bodenbildungsprozessen ermittelt, welche entscheidend die Eigenschaften beeinflussen. Dafür wurde eine Schurfgrube von etwa 1 x 1 x 1,2 m (Länge x Breite x Tiefe) ausgehoben. Die Aufnahme des Bodens erfolgte in Anlehnung an die KA5 (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005).

Anschließend wurde die Probenahme durchgeführt. Dafür wurde die zu beprobende Fläche in 6 Teilflächen aufgeteilt, beispielhaft ist dies in Abbildung 3-1 für die Kohlelagerfläche in Britz dargestellt.

Die Größe der Teilflächen richtete sich nach den Ausmaßen der Kohleeintragsfläche (siehe Tab. 3-1). Die Proben wurden mit 100 cm³ Stechzylindern aus einem Tiefenbereich von 0-30 cm entnommen. Es wurde darauf geachtet, nur den mineralischen Oberboden zu beproben.

Eine Stechzylinderprobe pro Teilfläche ist separat verpackt worden, um die Trockenrohichte (TRD) zu bestimmen und eine Korngrößenanalyse durchzuführen. Weitere Stechzylinder wurden verteilt innerhalb der Teilflächen entnommen und zusammen als Mischprobe verpackt. Die Menge der Mischprobe betrug etwa 750-1000 g.

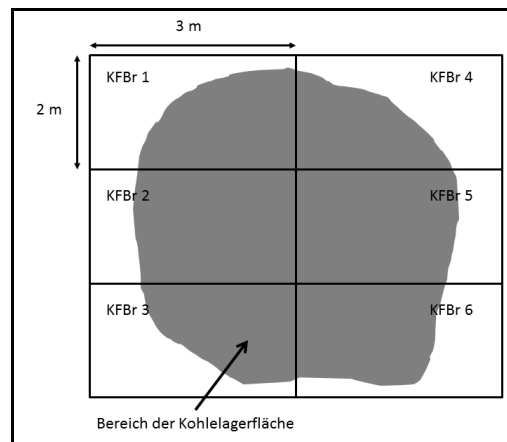


Abb. 3-1 Schema der Flächeneinteilung zur Probenahme am Beispiel der Kohlelagerfläche bei Britz

Abweichend von dieser Herangehensweise, aber vergleichbar, wurde auf den vier Rekultivierungsstandorten jeweils im Zentrum der sechs Teilparzellen ein Spatenprofil mit Planum (Tiefe zwischen 12 und 17 cm) angelegt und aus der Tiefenstufe 0...30 cm mittels Stechring (100 cm³) Kippsubstratmaterial entnommen. Parallel wurden mit dem N_{min}-Bohrer (Einstichtiefe 30 cm) jeweils sechs Einstiche pro Teilfläche vorgenommen und das Bodenmaterial zu einer Mischprobe vereinigt. Insgesamt war die Anzahl der Mischproben für alle Untersuchungsstandorte auf jeweils 6 Proben für den Kohlestandort und 6 Proben für den Referenzstandort beschränkt. Daraus ergab sich eine Gesamtzahl von 48 zu analysierenden Mischproben, wovon jeweils 24 die Kohlestandorte sowie 24 die Referenzstandorte repräsentieren.

Die Proben wurden in Plastiktüten verpackt und gekühlt in das Labor des FIB e.V. gebracht, wo die Probenaufbereitung und ein Teil der Analysen vorgenommen wurden. Die Kühlung der Proben war notwendig, da im Labor die Bestimmung des N_{min}-Gehaltes erfolgte.

Tab. 3-1 Größe und Einteilung der Untersuchungsflächen zur Probenahme (Analog in Größe und Anzahl der Teilflächen sind die Referenzflächen eingeteilt worden.)

Untersuchungsfläche	Gesamtgröße	Anzahl der Teilflächen	Teilflächengröße
	[m ²]		[m ²]
Ehemalige Kohlelagerfläche	36	6	6
Ehemalige Köhlereiffläche	144	6	24
Rekultivierungsfläche (Forst)	300	6	50
Rekultivierungsfläche (Acker)	300	6	50

3.1.2 Laboruntersuchungen

Die Laboranalysen der 48 Proben sind in den zertifizierten Laboren des FIB e.V., Finsterwalde und dem Zentralen Ökologischen Labor der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde vorgenommen worden. Eine detaillierte Aufstellung über die Aufteilung und die angewendeten Analyseverfahren enthält Tabelle 3-2.

Nach Verbringung der Proben in das Labor des FIB e.V., wurden dort die Proben nach DIN-ISO 10381-2 und DIN-ISO 11464 aufbereitet. Die separat verpackte Stechzylinderprobe wurde auf

Trockenrohddichte nach DIN-ISO 11272 und Korngrößenzusammensetzung nach DIN-ISO 11277 untersucht. Die Mischprobe wurde getrocknet und gesiebt. Ein Teil der Probe wurde anschließend für weitere Analysen gemörsert. Für die Analyse der Anionen und Kationen ist außerdem eine Wasserextraktion nach dem Handbuch für Bodenuntersuchung (Abschnitt 11.7) vorgenommen worden.

Tab. 3-2 Durchgeführte Laboruntersuchungen einschließlich Angabe des Verfahrens

Bodeneigenschaften	Verfahren
Probenvorbereitung	DIN-ISO 10381-2 und DIN-ISO 11464
Trockenrohddichte	DIN-ISO 11272
Korngrößenzusammensetzung	DIN-ISO 11277
pH-Wert	DIN-ISO 10390
Elektrische Leitfähigkeit	DIN-ISO 11265
Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK _{eff})	HBu 11.8a
Potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK _{pot})	DIN-ISO 13536
N _{ges}	DIN-ISO 13878
N _{min}	VDLUFA Methodenbuch Band I
C _{ges}	DIN-ISO 10694
Carbonatgehalt	DIN-ISO 10693
Wasserextraktion	HBu 11.7a
Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na	HFA Teil D
Cl ⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	HFA Teil D
DOC	DIN EN 1484
pH-Wert	DIN-ISO 10390
Orthophosphat	HFA A3.2.3.3
Austauschbares Mg und K	Extraktion mit Ammoniumlaktat-Essigsäure-Lösung, ICP-AES (K) Extraktion mit CaCl ₂ -Lösung, ICP-AES (Mg)

3.1.3 Statistische Auswertung der Laborergebnisse

Die Laborergebnisse sollen auf Unterschiede zwischen den jeweiligen Vergleichsstandorten hin

untersucht werden. Da die Stichprobenzahl je Fläche relativ gering ist und nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, wird an dieser Stelle der parameterfreie U-Test nach Mann und Whitney angewandt. Bedingungen für die

Anwendung des Tests sind, dass die Daten mindestens ordinalskaliert, die Stichproben unabhängig voneinander sind und die Verteilungen ähnlich sind in ihrer Form (Köhler et al., 2007). Bei diesem Test werden die Merkmalsausprägungen der beiden Stichproben in eine gemeinsame Rangfolge gebracht und anschließend die Summe der Rangplätze für jede Stichprobe ermittelt. Aus diesen wird mit den Gleichungen (1) und (2) die U-Zahl der Stichproben berechnet.

$$U_1 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_1 \cdot (n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (1)$$

$$U_2 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_2 \cdot (n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (2)$$

Hier bedeuten n_1 und n_2 jeweils die Anzahl der Merkmalsausprägungen sowie R_1 und R_2 die Summe der Ränge der jeweiligen Stichprobe.

Der kleinere der beiden U-Werte wird mit den Schwellenwerten der kritischen U-Werte auf dem angestrebten Signifikanzniveau, hier $\alpha = 0,05$, verglichen (Köhler et al., 2007).

Wenn gilt:

$$U_{berechnet} \geq U_{Tabelle}$$

wird die Nullhypothese (hier "die Mediane sind gleich") angenommen. Bei:

$$U_{berechnet} < U_{Tabelle}$$

wird die Nullhypothese abgelehnt und die Alternativhypothese (hier: „die Mediane sind verschieden“) angenommen.

Es kommt eine dreistufige Skala für die Auswertung zur Anwendung, so dass neben dem Abgrenzungskriterium Signifikanz noch ein weiteres benötigt wird. Hierzu kommt ein einfaches Vergleichsverfahren zum Einsatz, um entweder einen Unterschied oder die relative Gleichheit der Werte auszuweisen. Dabei werden die Mittelwerte der Stichproben mit dem Wertebereich (Mittelwert +/- Standardabweichung) der jeweiligen anderen Stichprobe verglichen. Liegen beide Mittelwerte im jeweiligen Wertebereich der anderen Stichprobe gelten sie als gleich.

3.2 Vegetationskundliche Untersuchungen

3.2.1 Vegetationsaufnahme

Im Rahmen des Projektes fand im September 2013 eine Vegetationsaufnahme auf den Standorten der Bodenprobenahme statt. Auf der Kohlelagerfläche bei Britz wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit an der HNEE bereits im Frühjahr 2013 eine Vegetationskartierung von v. Chamier Glisczinski durchgeführt. Diese Daten sind für das Projekt genutzt worden. Bei der Kartierung wurde in Anlehnung an das Verfahren von Braun-Blanquet vorgegangen. Die aufgenommenen Flächengrößen orientierten sich an den Minimalanforderungen für repräsentative Vegetationsaufnahmen (siehe Tabelle 3-3) sowie dem tatsächlichen Areal des Kohlevorkommens.

Die Probennahmeflächen der Waldstandorte und die Ruderalgesellschaft wurden im Tagebau Jänschwalde vollständig aufgenommen. Auf den Ackerstandorten und dem Standort der Kohlelagerfläche wurden jeweils repräsentative Teile der Flächen ausgewählt. Darüber hinaus sind auf der Ackerfläche am Kohlestandort Plessa die dominierenden Pflanzen am Ackerrand sowie des benachbarten Vorgewendes untersucht worden.

Für die Kartierung wurden die Pflanzen in drei Schichten eingeteilt, Baumschicht (>5 m), Strauchschicht (0,5 m < x < 5 m) und Krautschicht (<0,5 m). Für die Kartierung am Standort Britz ist eine abweichende Einteilung vorgenommen worden. In Schicht 1 wurden Pflanzen bis 5 cm Höhe, in Schicht 2 Pflanzen bis zu einer Höhe von 25 cm und in Schicht 3 Pflanzen bis zu einer Höhe von 100 cm aufgenommen (v. Chamier Glisczinski, 2013).

Tab. 3-3 Minimumsareal und geeignete Aufnahmeflächengröße (Auswahl, Dierßen, 1990)

Pflanzengesellschaften / Nutzung	Minimumsareal / Aufnahmeflächengröße
Wälder der gemäßigten Klimate einschließlich Baumschicht	100 – 500 m ²
Krautschicht in Wäldern	50 – 200 m ²
Schlaggesellschaften	50 – 75 m ²
Acker-Wildkrautgesellschaften	30 – 50 m ²
Ruderalgesellschaften	10 – 30 m ²

Zum besseren Verständnis der kleinräumigen Vegetationsaufnahmen der Untersuchungsflächen

wurde die Umgebung mit in die Betrachtungen einbezogen und einem Biotoptyp zugeordnet. Dies erfolgte nach der Anleitung zur Biotopkartierung des Landes Brandenburg (Zimmermann, 2007a und 2007b).

3.2.2 Zeigerwerte nach Ellenberg

Die Vegetationsaufnahmen der Standorte wurden hinsichtlich der ökologischen Zeigerwerte der Pflanzen ausgewertet. Ziel war es, den Standort anhand dieser ökologischen Zeiger zu charakterisieren und Unterschiede zwischen Kohle- und Referenzfläche zu beschreiben. Die Zeigerwerte sind dabei rein „qualitativ“ analysiert worden. Nach Ellenberg et al. (2001) ist diese Methode meist die bessere, da hier nur die Präsenz der Pflanze, nicht aber ihr Deckungsgrad betrachtet werden, und somit jede Pflanze mit dem gleichen Anteil in eine Mittelwertsberechnung einfließt. Damit werden

mögliche spezifische Wuchsweisen, die den Deckungsgrad beeinflussen, gemindert (Ellenberg et al., 2001). Allerdings ist anzumerken, dass die Differenz zwischen beiden Berechnungsweisen bei artenarmen Standorten am größten ist (Böcker et al., 1983 und Ellenberg et al., 2001).

Da die Skalen der Indikatoren (synonym für Zeiger genutzt) nicht metrisch sind, wird der Median als Mittelwert der Indikatoren genommen (vgl. Bahrenberg et al., 1999). Das heißt, dass die einzelnen Werte nicht durch einheitliche Intervalle zueinander charakterisiert sind, z.B. gibt der Wert 8 der Stickstoffzahl nicht eine doppelt so hohe Stickstoffversorgung wieder wie der Wert 4. Nach Bahrenberg et al. (1999) ist für dieses Skalenniveau der Median der bessere Lageparameter.

Um einen weiteren Maßstab zur Beurteilung der ökologischen Eigenschaften der Fläche zu bekommen, wird die Verteilung der Werte visuell betrachtet und fließt bei der Interpretation der Mittelwerte ein.

4. Ergebnisse

4.1 Bodenkundliche Untersuchungen

4.1.1 Profilsprache

In den folgenden Abschnitten werden die Bodenprofile der Standorte beschrieben. Es wird besonders auf den Bodentyp und das Ausgangssubstrat eingegangen. Besonderheiten im Profil werden analysiert und hinsichtlich ihrer Kopplung an den Kohleeintrag diskutiert.

4.1.1.1 Kohlelagerfläche bei Britz

Die Schurfgrube wurde an einem leicht geneigten Hang angelegt. Die Profilwand zeigt zur Mitte der Kohlelagerfläche. Das Profil wurde als leicht podsoliges Kolluvium über gekappter Braunerde angesprochen (v. Chamier Glisczinski, 2013). Substrat ist durchgängig Reinsand (Ss) im Profil, wie aufgrund der Lage auf dem Sander zu erwarten war.



Abb. 4-1 Bodenprofil der Kohlelagerfläche bei Britz (v. Chamier Glisczinski, 2013)

Der mit Kohle durchmischte Oberbodenhorizont wies einen Anteil von mehr als 30 % organischen Kohlenstoff auf. Damit konnte das Horizontsymbol A (mineralischer Oberbodenhorizont) nach KA5 nicht

mehr vergeben werden. Der Horizont wurde stattdessen als O für einen organischen Horizont ausgewiesen (v. Chamier Glisczinski, 2013). Dieser spezielle Fall ist in der KA5 nicht näher definiert. Die KA5 sieht keine weiteren Zusatzsymbole für diesen Horizonttyp vor (außer f – fossil), deshalb wird an dieser Stelle zur Verdeutlichung des anthropogenen Eintrages von kohlehaltigem Material das Zusatzsymbol j für natürliches Material aus anthropogener Aufschüttung verwendet. Unterhalb dieses Horizontes befindet sich ein in der Mächtigkeit variierender Ahe-Horizont. Der anschließende M-Horizont (Mineralbodenhorizont, durch Auflagerung pedogen veränderten Materials entstanden) ist wahrscheinlich auf die ehemalige Nutzung und die damit verbundenen Umlagerungen zurückzuführen (Abb. 4-1). In 40 cm Tiefe liegt das Ausgangssubstrat vor. Dieses zeigt im oberen Bereich Verbraunungserscheinungen auf, die pedogenetisch vor der Überdeckung durch den M-Horizont entstanden sind (v. Chamier Glisczinski, 2013). Es kann vermutet werden, dass vor der Umlagerung eine Entwicklung zur Braunerde stattgefunden hat. Ab 52 cm ist das pedogenetisch unveränderte Substrat anstehend. Somit ergibt sich folgende Horizontabfolge jO-Ahe-M-ICv-IC (Abb. 4-1).

Als Besonderheit kann der im Profil angetroffene hohe Gehalt an organischem Kohlenstoff im Oberboden herausgestellt werden. Dieser ist wie beschrieben auf den Eintrag von Kohle zurückzuführen und beschränkt sich auf die obersten 20 cm.

Das Bodenprofil der Referenzfläche wurde auf ebenem Gelände angelegt. Die Profilwand liegt ebenfalls in nördlicher Richtung. Das Profil wird von v. Chamier Glisczinski (2013) als podsolierte Braunerde angesprochen (Abb. 4-2). Substrat ist, wie auf der Kohlefläche, reiner Sand im gesamten Profil. Der flache Oberbodenhorizont weist deutliche Podsolierungserscheinungen auf und wird deshalb als Ahe ausgewiesen. Insgesamt ist nur ein geringmächtiger Oberbodenhorizont vorhanden. Unterhalb schließt ein humoser Unterbodenhorizont an, der von v. Chamier Glisczinski (2013) als Bh(s)-Horizont angesprochen wurde. Dieser geht in einen etwa 30 cm mächtigen Bv-Horizont über. In einer Tiefe von etwa 50 cm schließt sich der IC Horizont

an. Besonderheiten sind an diesem Profil nicht zu finden.



Abb. 4-2 Bodenprofil der Referenzfläche bei Britz (v. Chamier Glisczinski, 2013)

4.1.1.2 Köhlereifläche bei Jänschwalde

Das Profil der Köhlereifläche liegt auf ebenem Gelände. Eine mögliche anthropogene Veränderung im Oberboden ist durch die vorgenommenen Rodungs-, Abschiebungs- und Aufschüttungsmaßnahmen nicht auszuschließen. Es wurde versucht, das Profil entfernt von künstlichen Aufschüttungen und offensichtlichen Veränderungen anzulegen. Der Ring des Meilers ging durch das Profil. Dadurch zeigt sich ein deutlich dunkler Oberbodenhorizont. Über die gesamte Profiltiefe hinweg wurde aus Schmelzwassersand hervorgegangener Reinsand (Ss) als Feinbodenart angesprochen. Dieser weist aber Unterschiede in seiner Zusammensetzung auf, wodurch sich verschiedene Schichten ergeben. Als Gefüge ist für das gesamte Profil ein Einzelkorngefüge festgestellt worden. Als Bodentyp wurde eine leicht podsolierte Braunerde angesprochen (Abb. 4-3).

In den obersten 20 cm wurden zwei humose Oberbodenhorizonte ausgewiesen, bis 10 cm ein Ah Horizont, darunter ein Ah(e) Horizont mit

Podsolierungsmerkmalen. Von 20 bis 29 cm ist ein Übergangshorizont zu finden mit gemischten Merkmalen des Ah(e) und des Bv. Dieser Horizont ist am stärksten durchwurzelt. Darunter befindet sich bis 59 cm ein Bv-Horizont. Dieser ist nur schwach durchwurzelt und geht bei etwa 86 cm in den IC-Horizont über. Bis einschließlich des IC-Horizontes bestehen alle Horizonte aus einem feinsandigen Mittelsand. In etwa 86 cm Tiefe wurde ein Substratwechsel festgestellt, unterhalb von 86 cm befindet sich ein deutlich grobsandiges Substrat bis 99 cm mit einem ebenso deutlichen Farbwechsel. Diese Schicht wird als IIC-Horizont angesprochen. Darunter schließt sich wieder ein feinsandiger Mittelsand an.



Abb. 4-3 Bodenprofil der Köhlereifläche bei Jänschwalde

Auf der Referenzfläche wurde das Profil ebenfalls auf ebenem Gelände angelegt. Die Gesamtsituation ist gleich der auf der Köhlereifläche. Eine anthropogene Beeinflussung des Oberbodens durch Abtrag ist auch hier nicht auszuschließen. Das Substrat ist an diesem Profil ebenfalls durchgängig Reinsand aus Schmelzwassersand. An diesem Profil wurde bis 120 cm kein Substratwechsel festgestellt, vom Gefüge her liegt durchgängig ein Einzelkorngefüge vor. Es wurde als Bodentyp

ebenfalls eine leicht podsolige Braunerde angesprochen (Abb. 4-4).

Die oberen 32 cm werden durch einen Ah(e) bis 19 cm bzw. einen Ah(e)-B(h)v gebildet. Diese beiden Horizonte sind am stärksten durchwurzelt.

Unterhalb von 32 cm befindet sich ein im Mittel 24 cm mächtiger Bv-Horizont mit einer unscharfen Untergrenze. Bis 83 cm ist ein Übergangshorizont Bv-Cv zu finden, der sich farblich deutlich vom darunterliegenden IC abhebt. Der IC-rGo-Horizont unterhalb von 83 cm ist deutlich zweigeteilt (Abb. 4-4). Auf der rechten Profilstseite sind großflächige Rostflecken zu finden, welche auf der linken Profilstseite und Seitenwand fehlen. Die Herkunft ist nicht ganz zu klären. Rezent ist kein Grund- oder Stauwasser bis zu dieser Tiefe vorhanden, so dass dem Go ein r für reliktsch vorangestellt wurde. In Untersuchungen an einem Sondagegraben auf dem Tagebauvorfeld fanden Raab et al. (2011) ebenfalls im Untergrund einen Horizont mit Rostflecken, den sie als rGo kennzeichneten. Daher ist zu vermuten, dass dieser rGo-Horizont in diesem Gebiet eine gewisse Verbreitung besitzt.



Abb. 4-4 Bodenprofil der Referenzfläche bei Jänschwalde

Als Besonderheit am Profil ist ein Band mit Steinen bei etwa 40 cm Tiefe zu nennen. Nach Rücksprache mit den kartierenden Archäologen ist ein ähnliches

Vorkommen auch bei anderen Profilen in diesem Gebiet zu finden. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang zwischen dem hier vorgefundenen Band und der Grobsandschicht im Profil der Köhlereifläche.

4.1.1.3 Forstliche Rekultivierungsflächen

Als kohlehaltiger Standort wurde eine forstliche Rekultivierungsfläche nahe den Ortschaften Domsdorf und Tröbitz festgelegt. Die bodenkundlichen Untersuchungen an diesem Standort ergaben einen Kohlegehalt von 3-5 % im Oberboden. In dem in der Nähe angelegten Referenzprofil wurden hinsichtlich der Bodenart vorrangig Lehmsande (SI2, SI3) vorgefunden. Der angetroffene Ah-Horizont (Tiefenstufe 0-5 cm) weist etwa 5-10 % Humus auf (h4). Darunter befindet sich ein jIC-Horizont von etwa 7 cm Mächtigkeit und ab einer Tiefe von 12 cm schließt sich ein weiterer jIC-Horizont an. Als Bodenform wurde hier ein Normregosol [RQn] aus Kipp-Kohlelehmsand [oj-xls(pq)] ausgeschieden (Abb. 4-5). Der Referenzstandort Schipkau weist nur einen sehr gering mächtigen Ah-Horizont auf (Tiefenstufe 0-3 cm).



Abb. 4-5 Bodenprofil der Referenzfläche bei Schipkau

Anhand des Bodenprofils war ab einer Tiefe von 3 cm bereits ein jIC-Horizont zu erkennen, der sich durchgängig bis zur Profilsohle in etwa 14 dm erstreckte.

Als Besonderheit traten vereinzelt Ton- und Lehmbrocken in unterschiedlicher Größe auf. Hier liegt ebenfalls ein Normregosol [RQn] aus Kipp-Lehmsand [oj-cls(pq)] vor.

4.1.1.4 Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen

Wie bereits oben beschrieben, wurde die Untersuchungsfläche Grünewalde als kohlehaltiger Standort identifiziert. Feldbodenkundliche Untersuchungen an diesem Standort ergaben, dass die Textur des Feinbodens im Oberboden (Tiefenstufe 0-30 cm) einem SI4 (stark lehmiger Sand) entspricht, wobei z.T. auch St2 (schwach toniger Sand) vorkommt. Das entsprechende Referenzprofil weist einen 35 cm starken jIAp-Horizont auf. Darunter, im Tiefenbereich 35-60 cm, wurde ein jIC1-Horizont vorgefunden.



Abb. 4-6 Bodenprofil des kohlehaltigen Standortes Grünewalde

Als Bodenform liegt ein Norm-Regosol [RQn] aus Kipp-Kohlelehmsand [oj-xls(pq)] vor. Der

landwirtschaftlich genutzte Ackerboden wurde als schwach kohlehaltig (k2) sowie carbonatfrei angesprochen (Abb. 4-6).

Demgegenüber erwies sich der untersuchte Kippboden am Standort Plessa als kohlefrei und dient deswegen als Referenzstandort. Von der Textur her wurde hier im Oberboden ein Ls4 (stark sandiger Lehm) vorgefunden, wobei die Textur in Abhängigkeit des Verlaufes der Kipprippen kleinstandörtlich wechseln kann und auch Lehmsande (SI3 und SI4) vorkommen. Im Bodenprofil wurde ein 30 cm mächtiger jIAp vorgefunden, darunter befindet sich ein jIC-Horizont. Als Bodenform wurde hier eine Norm-Pararendzina aus Kipp-Kalklehmsand [oj-cls(pq)] kartiert. Der landwirtschaftlich genutzte Ackerboden wurde als kohlefrei (k0) sowie mittel carbonathaltig angesprochen (Abb. 4-7).



Abb. 4-7 Bodenprofil der Referenzfläche bei Plessa

4.1.2 Laboruntersuchungen

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Laboranalysen ausgewertet. Dies geschieht standortbezogen im Vergleich mit dem jeweiligen Referenzstandort. Eine Zusammenführung und Auswertung der einzelnen Standortergebnisse erfolgt in Kapitel 5.

Bei der Auswertung wird vor allem auf die Unterschiede zwischen Kohle- und Referenzfläche eingegangen.

4.1.2.1 Kohlelagerfläche bei Britz

Das Substrat des Kohlelagerstandortes ist nach Auswertung der Laborergebnisse als reiner Sand mit etwa 90 % Sandanteil anzusprechen. Die Sandfraktion unterteilt sich im Mittel auf der Kohlefläche in etwa 50-60 % Feinsand, ca. 30 %

Mittelsand und 0-10 % Grobsand (v. Chamier Glisczinski, 2013). Die Referenzfläche ist ebenfalls als Reinsand anzusprechen mit etwa 90 % Gesamtsandanteil. Die Sandfraktion unterteilt sich ähnlich wie auf der Kohlefläche mit ca. 55 % Feinsand, 33 % Mittelsand und 2 % Grobsand. Damit haben die Standorte hinsichtlich ihres Substrates vergleichbare Rahmenbedingungen. Die effektive Lagerungsdichte ist auf der Kohlefläche sehr gering im Oberbodenbereich (Tab. 4-1). Die Referenzfläche weist etwas höhere Werte auf, liegt aber noch im geringen Bereich (KA5).

Tab. 4-1 Bodenphysikalische Eigenschaften des Kohlelagerstandortes und der Referenzfläche bei Britz (Textur und Dichte)

Kohlelagerstandort – Britz						
	Textur		TRD		LD _{eff.}	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	Ss (fSms)	Ss (fSms)	[g/cm ³]			
Mittelwert			0,90	1,32	1,09	1,35
Median			0,80*	1,30*	1,08*	1,34*
Var.koeff. [%]			27,13	7,10	18,73	7,04

* Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).

Wie bei der Profilsprache schon beschrieben, war der Oberboden mit Kohle durchmischt. Dies spiegelt sich in dem Gehalt des organischen Kohlenstoffs wieder (Tab. 4-2). Dieser liegt im Mittel über die 6 Teilflächen bei 24,8 %. Die Kohlelagerfläche weist damit einen statistisch signifikant höheren Wert auf als die Referenzfläche mit 1,5 %. Die Variation auf der Fläche ist bei beiden Standorten in einem ähnlichen Bereich. Der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) ist auf der Kohlenfläche ebenfalls signifikant höher als auf der Referenzfläche (Tab. 4-3). Hier ist der Unterschied mit etwa 2:1 (KF:RF) nicht so groß wie beim organischen Kohlenstoff mit etwa 16:1. Der Variationskoeffizient ist auf der Referenzfläche mit 23,3 % deutlich erhöht gegenüber der Kohlefläche mit 7,2 %. Das DOC zeigt damit eine relative Homogenität auf der Kohlefläche (Tab. 4-3). Der pH-Wert (CaCl₂) beider Flächen liegt mit 4,1 auf der Kohlefläche und 3,9 auf der Referenzfläche in einem stark sauren bis sehr stark sauren Bereich. Beide Flächen sind im Aluminium-Pufferbereich anzusiedeln. Es ist in der Analyse entsprechend eine hohe Konzentration von Al⁺-Kationen innerhalb der

effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) nachgewiesen worden (Anhang, S.13/14). Die elektrische Leitfähigkeit (EC) weist ebenso einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Flächen auf. Der Mittelwert auf der Kohlefläche ist mit 63,6 µS/cm etwa 3 mal größer als auf der Referenzfläche. Es ist daher eine höhere Salzkonzentration in der Bodenlösung zu erwarten. Der Variationskoeffizient ist auf der Kohlefläche etwa 3,5 mal so hoch, wie auf der Referenzfläche. Der Wert von 88,9 % zeigt einen kleinräumigen starken Wechsel der Eigenschaft an. Im Vergleich dazu ist der Variationskoeffizient der Referenzfläche relativ gering mit 24,5 %. Die Kationenaustauschkapazitäten, sowohl KAK_{eff} als auch KAK_{pot}, besitzen ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen Kohle- und Referenzfläche. Der auf der Kohlefläche erreichte KAK_{pot}-Wert ist nach KA5 als sehr hoch anzusprechen. Der Wert der Referenzfläche ist dagegen nach KA5 als sehr gering einzustufen. Die Werte beider Flächen liegen aber nach KA5 in den Bereichen, welche durch die organische Substanz abgeleitet werden können. Im Boden der Kohlefläche wurde eine hohe effektive Kationenaustauschkapazität nachgewiesen, wobei

der Wert denjenigen der potentiellen Kationenaustauschkapazität noch übersteigt. Dies ist bei den gegebenen pH-Werten nicht eindeutig erklärbar. Eine mögliche Ursache ist in den sehr hohen Werten der Ca-Kationen und zu Teilen der Mg-Kationen (Anhang, S.13) zu suchen. Anzunehmen ist, dass eine externe Quelle für das Kalzium besteht, die im Rahmen der Arbeit nicht näher verortet werden kann. Die Basensättigung zeigt signifikante Unterschiede zwischen beiden Standorten. Die Werte der Kohlefläche sind etwa 25 mal höher. Dieser Unterschied ist aber sehr wahrscheinlich nicht auf die Kohle zurückzuführen, sondern wahrscheinlich auf eine andere Kalziumquelle.

Der Gesamtstickstoffgehalt (N_{ges}) zeigt Parallelen zum Kohlenstoffgehalt (C_{org}). Der Mittelwert auf der Kohlefläche ist mit 0,4 % etwa 4 mal so hoch wie auf der Referenzfläche (Tab. 4-2). Der

Variationskoeffizient auf der Kohlefläche ist, ebenfalls wie beim Kohlenstoff, geringer als auf der Referenzfläche. Dies könnte darauf hinweisen, dass der Kohlenstoff den Stickstoff besser fixiert und somit eine Auswaschung in das Grundwasser verhindert wird.

Das jeweilige C/N-Verhältnis von Kohlefläche und Referenzfläche weist ebenfalls deutliche Unterschiede auf. Während die Bodenverhältnisse der Referenzfläche mit Werten von 18 einen relativ ungestörten Zugang der Pflanzen zu Stickstoff ermöglichen, weist die Kohlefläche mit einem Median von 69 ein sehr ungünstiges C/N-Verhältnis auf. Dieses entspricht etwa dem Verhältnis von Maispflanzen oder Getreidestroh. Bei einem C/N-Verhältnis von 67, wie auf der Kohlefläche ermittelt, ist die mikrobielle Aktivität gehemmt und den Pflanzen die Stickstoffzufuhr erschwert.

Tab. 4-2 Bodenchemische Eigenschaften des Kohlelagerstandortes und der Referenzfläche bei Britz (C_{org} , N_{ges} , pH-Wert, EC, KAK und BS)

Kohlelagerfläche – Britz								
	C_{org}		N_{ges}		C/N		pH (CaCl ₂)	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	[%]	[%]	[%]	[%]				
Mittelwert	24,8	1,5	0,4	0,09	67	18	4,1	3,9
Median	24,8*	1,5*	0,4*	0,08*	69	18	4,1*	3,9*
Var.koeff. [%]	21,1	25,7	14,3	34,8	9,4	7,2	1,8	3,4
	EC		KAK _{eff}		KAK _{pot}		BS	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	[µS/cm]	[µS/cm]	[mmol _e /kg]	[mmol _e /kg]	[mmol _e /kg]	[mmol _e /kg]	[%]	[%]
Mittelwert	63,6	18,2	325,1	18,8	221,2	64,8	66,6	2,6
Median	41,5*	16,4*	339,3*	18,1*	222,7*	63,7*	65,5*	2,3*
Var.koeff. [%]	88,9	24,5	17,6	21,6	6,5	21,8	23,7	46,7

*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, $p < 0,05$).

Des weiteren soll untersucht werden, ob ein Plus an vorhandenem Stickstoff auch mit einer erhöhten Pflanzenverfügbarkeit einhergeht. Zu diesem Zweck ist der mineralisierte Stickstoff (N_{min}) mit den Anteilen von Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) ermittelt worden (Tab. 4-4).

Die N_{min} -Gehalte weisen im Mittel einen geringen Unterschied von 0,57 mg/kg TS auf, wobei dieser nicht signifikant ist. Die jeweiligen mittleren Anteile

von Nitrat und Ammonium sind ebenfalls auf den beiden Flächen ähnlich. Es ist eine große Variation von Ammonium sowohl auf der Kohlefläche als auch auf der Referenzfläche zu erkennen. Von den Proben der Teilflächen waren an beiden Standorten Proben unterhalb der Bestimmungsgrenze ($< 0,02$ mg/100g TS) vorhanden, so dass sich die Spannweite deutlich erhöhte.

Nach Durchführung der Wasserextraktion wurde die Lösung hinsichtlich der Gehalte an Kationen bzw. Anionen untersucht. Kalzium und Magnesium weisen dabei auf der Kohlenfläche deutlich höhere Werte auf als auf der Referenzfläche. Wie oben bereits beschrieben, ist dafür eine zusätzliche Quelle im Boden verantwortlich, die hier nicht genauer benannt werden kann. Die übrigen Kationen verhalten sich unterschiedlich, Aluminium und Mangan sind auf der Referenzfläche höher, während Kalium, Eisen und Natrium im Boden der Kohlefläche auf höherem Niveau vorliegen. Die Unterschiede sind nur zum Teil signifikant. Erkennbar ist, dass Kalzium-, Kalium- und Natriumwerte auf der Referenzfläche sehr niedrig sind.

Bei der Untersuchung der Anionen Chlorid (Cl⁻) und Sulfat (SO₄²⁻) sind signifikant höhere Werte auf der Kohlenfläche festgestellt worden. Der Variationskoeffizient des Chlorid liegt auf beiden Standorten in einem ähnlichen Bereich (Tab. 4-3). Der deutlich höhere Mittelwert und Variationskoeffizient des Sulfat auf der Kohlefläche ist auf eine Teilflächenprobe zurückzuführen. Der dort ermittelte Wert lag etwa 10 mal höher als der nächsthöhere Wert. Unter Ausschluss dieses Extremwertes ergibt sich ein Mittelwert von 29,2 mg/kg. Dieser Wert ist dennoch deutlich höher als der Wert des Referenzstandortes.

Tab. 4-3 Wasserlösliche Stoffgehalte des Kohlelagerstandortes und der Referenzfläche bei Britz (Anionen und Kationen)

Kohlelagerfläche - Britz												
	Al ³⁺		Ca ²⁺		Fe ³⁺		K ⁺		Mg ²⁺		Mn ²⁺	
	[mg/kg]											
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	0,8	1,5	36,7	3,8	1,8	0,9	2,5	1,7	10,1	0,6	0,4	0,7
Median	0,8	1,4	24,0*	3,1*	1,8*	0,9*	1,9	1,7	6,3*	0,5*	0,3	0,8
Var.koeff. [%]	27,2	37,2	88,2	38,7	20,2	47,7	72,3	40,9	90,8	25,2	73,3	24,0
	Na ⁺		NH ₄ -N		NO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		DOC	
	[mg/kg]											
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	3,3	1,6	0,7	1,9	0,7	1,6	3,5	2,5	82,7	5,8	174	81,7
Median	2,1	1,6	0,7*	2,2*	0,5	1,5	3,7*	2,4*	33,0*	5,4*	172*	84,3*
Var.koeff. [%]	89,4	17,8	19,3	44,5	122	37,1	19,6	20,7	159	42,3	7,2	23,3
*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).												

Nitrat und Ammonium im Wasserextrakt weisen im Vergleich zu den Messungen in der Trockensubstanz ein anderes Verhältnis zwischen den Vergleichsstandorten auf. Die Kohlefläche hat höhere Gehalte sowohl bei Nitrat als auch bei Ammonium. Die Unterschiede sind allerdings nur beim Ammonium statistisch signifikant. Der Variationskoeffizient für Nitrat auf der Kohlefläche ist deutlich höher als auf der Referenzfläche. Dies liegt daran, dass auf drei Teilflächen die gemessenen Werte jeweils unter der Bestimmungsgrenze lagen. Die absoluten Spannweiten (Differenz Minimum und Maximum) der Werte betragen 2,2 mg/kg auf der Kohlefläche und

1,5 mg/kg auf der Referenzfläche. Der Variationskoeffizient für Ammonium ist ebenfalls deutlich unterschiedlich zwischen den beiden Standorten. Der Unterschied ist dabei nicht so ausgeprägt wie beim Nitrat. Die Spannweiten liegen bei 0,4 mg/kg auf der Kohlefläche und 2,2 mg/kg auf der Referenzfläche. Die Werte beider Parameter liegen in einem Bereich, der nach Scheffer & Schachtschabel (2010) sowohl für Waldstandorte als auch Ackerstandorte nicht ungewöhnlich ist. Einziger Wert für Nitrat auf der Kohlefläche liegt unterhalb des dort angegebenen Bereiches. Phosphat weist ebenso wie Nitrat und Ammonium in der Bodenlösung für die Kohlefläche geringere

Werte auf als auf der Referenzfläche (Tab. 4-4). Dieser Unterschied ist statistisch signifikant. Die Werte der Teilflächen sind ebenfalls ohne Ausreißer, so dass dieser große Unterschied auch dadurch nicht erklärt werden kann. Inwieweit der höhere Phosphorgehalt durch Düngung oder anthropogene Einträge verursacht wird, kann hier nicht eindeutig geklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen. Die beiden austauschbaren Elementgehalte von Kalium und Magnesium sind jeweils auf der Kohlefläche erhöht (Tab. 4-4), wobei das Magnesium

mit einem sehr hohen Wert um etwa den Faktor 70 größer ist als auf der Referenzfläche, welche sehr geringe Werte aufweist. Die Betrachtung des Medians und der Einzelwerte zeigt, dass dieser Unterschied nicht durch Ausreißerwerte erklärt werden kann. Der Wert von Kalium auf der Kohlefläche ist nur etwa doppelt so hoch wie auf der Referenzfläche. Die Variationskoeffizienten für Magnesium und Kalium sind etwa im Bereich zwischen 20 und 30 %.

Tab. 4-4 Nährstoffgehalte des Kohlelagerstandortes und der Referenzfläche bei Britz (N_{min}, Phosphor, austauschbares Kalium und Magnesium)

Kohlelagerfläche - Britz								
	N _{min}		PO ₄ ³⁻		austausch K		austausch Mg	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
Mittelwert	1,7	1,2	51,5	128,3	32,0	16,0	261,9	3,8
Median	1,7	1,1	50,9*	107,7*	31,4*	15,0*	254,9*	3,8*
Var.koeff. [%]	36,7	23,2	14,1	42,0	30,7	20,6	20,3	31,7
*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).								

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die beiden Standorte hinsichtlich der Parameter Bodenart und pH-Wert sehr gut vergleichbar sind. Es wurden neben der erwarteten höheren Kohlenstoffgehalte auch einzelne höhere Elementgehalte auf der Kohlefläche festgestellt. Die Kationenaustauschkapazitäten sind auf der Kohlefläche deutlich höher. Allerdings ist die Höhe der effektiven KAK und die Basensättigung nicht allein durch die Kohle erklärbar. Die verursachenden hohen Kalziumwerte müssen über eine Ca-Quelle im Boden erklärt werden.

Der Gesamtstickstoff, sowie Nitrat und Ammonium, austauschbares Kalium und Magnesium sowie Chlorid und Sulfat sind auf der Kohlefläche höher als auf der Referenzfläche. Ein gegenläufiges Verhalten zeigen Phosphat sowie Nitrat und Ammonium in der Bodenlösung. Die Unterschiede zwischen beiden Flächen sind dabei in den überwiegenden Fällen statistisch signifikant.

Die Unterschiede der Kationen im Wasserextrakt sind verschieden gerichtet. So wurden auf der Kohlefläche geringere Al- und Mn-Gehalte und dem gegenüber höhere Ca-, K-, Mg-, Fe- und Na-Konzentrationen im Vergleich zur Referenzfläche nachgewiesen. Inwieweit sich die Ergebnisse für Kohlestandorte allgemein übertragen lassen und

diese Unterschiede die Bodenfunktionen beeinflussen, wird in Kapitel 5 erläutert.

4.1.2.2 Köhlereifläche im Forst bei Jänschwalde

Die beiden Standorte bei Jänschwalde sind hinsichtlich ihrer Textur sehr ähnlich. Beide Standorte sind, wie in der Profilsprache bereits erläutert, reine Sandstandorte mit Sandanteilen von etwa 90 %. Innerhalb der Sandfraktion gibt es geringe Unterschiede. Die Unterschiede sind nur in der Grobsand- und Feinsandfraktion feststellbar. Der Mittelsandanteil beträgt auf beiden Standorten zwischen 52 % und 55 %. Der Grobsandanteil liegt bei 24 % auf der Kohle- und bei 12 % auf der Referenzfläche. Im Mittel ist der Feinsandanteil auf der Kohlefläche bei 9,5 % und auf der Referenzfläche bei 24 %. Somit sind die beiden Standorte sehr gut vergleichbar hinsichtlich ihrer Substrate und verfügen über gleiche Ausgangsbedingungen.

Die Trockenrohdichte beider Standorte lag im Mittel unter bzw. genau bei 1,0 g/cm³ (Tab. 4-5). Die daraus abgeleiteten Lagerungsdichten betragen

0,84 g/cm³ auf der Kohlefläche und 1,01 g/cm³ auf der Referenzfläche. Die ermittelten effektiven

Lagerungsdichten sind nach KA5 (2005) für beide Standorte als „sehr gering“ einzustufen.

Tab. 4-5 Bodenphysikalische Eigenschaften des Köhlereistandes und der Referenzfläche bei Jänschwalde (Textur und Dichte)

Köhlereifläche - Jänschwalde						
	Textur		TRD		LD _{eff.}	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	Ss (fSms)	Ss (fSms)	[g/cm ³]			
Mittelwert			0,8	1,0	0,84	1,01
Median			0,8*	1,0*	0,84*	1,07*
Var.koeff. [%]			50,5	39,5	39,7	38,4

*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).

Der organische Kohlenstoffgehalt der beiden Flächen ist signifikant unterschiedlich. Die Kohlefläche weist deutlich höhere Werte als der Referenzstandort auf (Tab. 4-6). Es ist festzustellen, dass aber auch der Referenzstandort durch höhere Kohlenstoffgehalte gekennzeichnet ist, als sie für

Kiefernwaldstandorte auf Sandersanden in Brandenburg typisch sind (Riek & Stähr, 2004). Eine Ursache hierfür ist die oben bereits besprochene Rodung im Rahmen der Vorfeldberäumung des Tagebaus. Hierbei ist zusätzlich organische Substanz in den Boden gelangt.

Tab. 4-6 Bodenchemische Eigenschaften des Köhlereistandes und der Referenzfläche bei Jänschwalde (C_{org}, N_{ges}, pH-Wert, EC, KAK und BS)

Kohlelagerfläche – Jänschwalde								
	C _{org}		N _{ges}		C/N		pH (CaCl ₂)	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	[%]	[%]	[%]	[%]				
Mittelwert	8,1	3,3	0,3	0,1	35	28	3,3	3,5
Median	7,9*	3,2*	0,3*	0,1*	32	28	3,3*	3,5*
Var.koeff. [%]	32,5	28,7	40,8	30,3	28,0	5,8	2,5	1,8
	EC		KAK _{eff}		KAK _{pot}		BS	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	[µS/cm]	[µS/cm]	[mmol _e /kg]	[mmol _e /kg]	[mmol _e /kg]	[mmol _e /kg]	[%]	[%]
Mittelwert	88,2	63,2	71,9	41,8	172,3	119,5	5,2	4,7
Median	94,3	64,1	69,8*	41,2*	176,4*	121,4*	4,8	4,3
Var.koeff. [%]	33,6	19,1	21,3	24,24	13,9	21,9	22,7	22,1

*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).

Der pH-Wert, sowohl in CaCl₂ als auch im Wasserextrakt, weist auf beiden Flächen auf ein sehr stark saures bzw. stark saures Milieu hin, wobei der pH-Wert der Kohlefläche signifikant verschieden vom Wert der Referenzfläche ist. Beide Mittelwerte sind für Kiefernwälder in Brandenburg nicht unüblich (Riek & Stähr, 2004).

Die elektrische Leitfähigkeit zeigt ebenfalls einen leicht höheren Wert auf dem Kohlestandort, wobei dieser nicht signifikant verschieden von der Referenzfläche ist.

Die Kationenaustauschkapazitäten sind jeweils auf der Kohlefläche signifikant höher. Die Basensättigung ist als sehr gering anzusehen. Es ist

ein hoher Gehalt an Aluminium und Wasserstoffionen feststellbar (Anhang, S.15/16), was hinsichtlich der pH-Werte zu erwarten war. Die Basensättigung zeigt kaum Unterschiede zwischen beiden Flächen.

Der Gesamtstickstoffgehalt ist auf der Kohlefläche im Mittel doppelt so hoch wie auf der Referenzfläche. Dieser Unterschied ist statistisch signifikant. Die C/N Verhältnisse sind auf beiden Flächen als ungünstig anzusehen, da hier kein ungehinderter Zugang der Pflanzen zum Stickstoff gegeben ist.

Der mineralisierte Stickstoff (N_{min} , siehe Tabelle 4.8) weist einen deutlichen, aber statistisch nicht signifikanten Unterschied zwischen beiden Flächen

auf. Die Kohlefläche hat dabei einen um 4,8 mg/kg TS höheren Wert. Dies ist eine Parallele zum Gesamtstickstoff und Gesamtkohlenstoff. Beide Untersuchungsflächen besitzen relativ große Spannbreiten hinsichtlich der N_{min} -Gehalte der einzelnen Teilflächen. Die Kohlefläche variiert zwischen 3,4 mg/kg TS und 24,1 mg/kg TS. Die Referenzfläche hat ein Minimum von 5,0 mg/kg TS und ein Maximum von 16 mg/kg TS. Die relativ hohen N_{min} -Gehalte und Spannbreiten sind wahrscheinlich auf den Kahlschlag zurückzuführen, wodurch eine erhöhte mikrobielle Aktivität induziert wird.

Tab. 4-7 Wasserlösliche Stoffgehalte des Köhlereistandes und der Referenzfläche bei Jänschwalde (Anionen und Kationen)

Köhlerfläche – Jänschwalde												
	Al ³⁺		Ca ²⁺		Fe ³⁺		K ⁺		Mg ²⁺		Mn ²⁺	
	[mg/kg]											
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	5,5	4,1	9,5	11,0	5,9	4,7	13,4	12,6	1,9	2,2	0,6	0,8
Median	5,6	4,1	9,6	9,8	6,0	4,7	14,9	11,9	1,9	2,1	0,6	0,8
Var.koeff. [%]	21,8	14,1	20,6	39,5	26,7	16,8	40,6	30,2	26,9	31,2	30,1	37,1
	Na ⁺		NH ₄ -N		NO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		DOC	
	[mg/kg]											
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	1,7	1,5	23,2	9,5	59,2	43,3	3,8	2,9	17,5	13,8	358	252
Median	1,8	1,5	24,0	9,9	58,9	42,4	4,0	2,9	18,0	13,7	372	242
Var.koeff. [%]	16,1	15,8	57,9	45,4	51,9	39,7	26,4	16,2	37,9	27,3	33,2	16,8
*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).												

Die Anionengehalte (Tab. 4-7), ermittelt im Wasserextrakt, weisen alle keinen signifikanten Unterschied zwischen Kohlestandort und Referenzstandort auf. Die Mittelwerte der Gehalte sind auf der Kohlefläche immer etwas höher als auf dem Referenzstandort. Ebenso sind die Spannbreiten der Werte auf allen Kohlenflächen größer als auf den Referenzstandorten. Es zeigt sich damit eine größere Variation auf dem Kohlestandort, wodurch der höhere Mittelwert bedingt sein kann.

Die Kationengehalte verhalten sich ähnlich wie die Anionen. Hier sind ebenfalls kaum bzw. nicht

signifikante Unterschiede zwischen den Flächen feststellbar.

Für die Nährstoffe Phosphor, Kalium (austauschbar) und Magnesium (austauschbar) sind keine signifikanten Unterschiede zwischen Kohle- und Referenzstandort feststellbar (Tab. 4-8). Die absoluten Unterschiede in den Mittelwerten sind gering. Es zeigen sich auf der Kohlefläche etwas höhere Gehalte an Kalium und Magnesium gegenüber der Referenzfläche. Der Phosphorgehalt ist auf der Referenzfläche dagegen leicht höher als auf der Kohlefläche.

Tab. 4-8 Nährstoffgehalte des Köhlereistandes und der Referenzfläche bei Jänschwalde (N_{min}, Phosphor, austauschbares Kalium und Magnesium)

Köhlereifläche – Jänschwalde								
	N _{min}		PO ₄ ³⁻		austausch K		austausch Mg	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
Mittelwert	14,4	9,6	70,0	73,5	47,7	45,4	25,4	21,8
Median	14,6	9,5	66,1	67,0	52,0	41,1	27,5	22,6
Var.koeff. [%]	55,9	41,9	30,0	38,4	35,7	34,6	44,1	34,4
*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).								

In der Zusammenfassung sind die beiden Standorte sehr ähnlich im Substrat, den pH-Werten der Nährstoffe, Kalium, Magnesium, Phosphor und dem C/N Verhältnis. Letzteres ist für die Stickstoffversorgung der Pflanzen als nicht günstig zu bewerten. Größere, aber nicht signifikante Unterschiede zeigen sich in der elektrischen Leitfähigkeit, dem mineralisierten Stickstoff, dem DOC und den Elementgehalten im Wasserextrakt. Signifikante Unterschiede sind dagegen nur hinsichtlich ihrer Gesamtkohlenstoffgehalte, Gesamtstickstoffgehalte, der KAK_{pot} und KAK_{eff} sowie dem pH-Wert erkennbar. Die relativ großen Spannbreiten im Gesamtstickstoff und mineralisierten Stickstoff sind möglicherweise auf den Kahlschlag zurückzuführen.

4.1.2.3 Forstliche Rekultivierungsflächen

Im Folgenden sollen wesentliche Ergebnisse der laboranalytischen Untersuchungen an den

Rekultivierungsböden einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

In den Oberböden der kohlehaltigen Untersuchungsfläche Domsdorf wurde im Wesentlichen die Bodenart Ls4 (stark sandiger Lehm) vorgefunden, wobei stellenweise auch Sl4 (stark lehmiger Sand) vorkam. Auch am Referenzstandort Schipkau wurden leicht wechselnde Feinbodenarten festgestellt, wobei am häufigsten St2 (schwach toniger Sand) auftrat, siehe Tabelle 4-9. Dabei ist anzumerken, dass hinsichtlich der Bindigkeit divergierende Kippbodensubstrate als durchaus typisch für Rekultivierungsböden der Lausitz anzusehen sind.

In Bezug auf die in Tabelle 4-9 aufgeführten Trockenraumdichten wurden signifikant höhere Werte im kohlefreien Kippboden vorgefunden. Dies manifestiert sich auch in der diesbezüglichen effektiven Lagerungsdichte, die nach KA5 (2005) als mittel (RF-Standort) gegenüber gering (KF-Standort) zu bewerten ist.

Tab. 4-9 Bodenphysikalische Eigenschaften der forstlichen Rekultivierungsstandorte Domsdorf/Tröbitz (KF) und Schipkau (RF) (Textur und Dichte)

Forstwirtschaftsflächen – Domsdorf (KF) vs Schipkau (RF)						
	Textur		TRD		LD _{eff.}	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	Sl4/Ls4	St2/Sl2/Sl3	[g/ccm]			
Mittelwert			1,38	1,59	1,54	1,65
Median			1,40*	1,60*	1,56*	1,66*
Var.koeff. [%]			10,8	5,1	9,9	4,2
*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).						

In Bezug auf die laboranalytisch untersuchten bodenchemischen Eigenschaften werden

wesentliche Unterschiede zwischen der kohlehaltigen Fläche Domsdorf und der

Referenzfläche Schipkau offensichtlich (siehe Tab. 4-10). Dabei tritt zunächst der C_{org} -Gehalt als markantes Unterscheidungsmerkmal hervor. Methodenbedingt gehen in die Bestimmung des C_{org} sowohl der geogene Kohlenstoffgehalt, also die im Kippsubstrat bereits bei der Verkipfung vorliegende Braunkohle, wie auch der nach Verkipfung und Rekultivierung durch bodenbildende Prozesse entstandene Bodenhumus ein. Eine Differenzierung dieser beiden C-Quellen war nicht möglich. Allerdings war das bodenbildende Ausgangssubstrat am Referenzstandort Schipkau nach der Verkipfung kohlefrei. Der an diesem forstwirtschaftlich genutzten Standort ermittelte C_{org} -Gehalt entspricht daher dem

gebildeten Bodenhumus und kann nach KA5 (2005) als „schwach humos“ klassifiziert werden. Die Untersuchungsergebnisse am Standort Schipkau legen nahe, dass innerhalb des bisherigen Rekultivierungszeitraums ca. 1 % C_{org} pedogen im Oberboden akkumuliert worden sind. Hingegen wurde am kohlehaltigen Standort Domsdorf ein C_{org} -Gehalt von fast 7 % ermittelt. Wird auch für diesen Standort eine pedogene C-Akkumulation während des bisherigen Rekultivierungszeitraums von ca. 1 % C_{org} angesetzt, so lässt sich daraus ableiten, dass in Domsdorf ca. 6 % C_{org} als Braunkohle geogenen Ursprungs vorliegen.

Tab. 4-10 Bodenchemische Eigenschaften der forstlichen Rekultivierungsstandorte Domsdorf/Tröbitz (KF) und Schipkau (RF) (C_{org} , N_{ges} , pH-Wert, EC, KAK und BS)

Forstwirtschaftsflächen – Domsdorf (KF) vs Schipkau (RF)								
	C_{org}		N_{ges}		C/N		pH(CaCl ₂)	
	[%]		[%]					
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	6,83	0,92	0,17	0,03	40	33	5,0	4,1
Median	6,98*	0,74*	0,17*	0,02*	40	33	4,9*	4,1*
Var.koeff. [%]	15,9	43,4	17,0	49,1	5,0	7,0	6,7	6,2
	EC		KAK _{eff}		KAK _{pot}		BS	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	[μS/cm]		[mmol _c /kg]		[mmol _c /kg]		[%]	
Mittelwert	83	23	279,7	29,8	190,1	61,2	51,8	13,3
Median	74*	24*	235,0*	25,9*	200,6*	50,8*	53,5*	13,4*
Var.koeff. [%]	27,0	16,0	32,0	41,4	14,5	50,7	30,0	31,2
*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).								

Neben den erwähnten Unterschieden im C_{org} -Gehalt wurden auch signifikante Unterschiede im N_{ges} -Gehalt festgestellt. So liegt der N_{ges} -Gehalt im kohlehaltigen Kippboden fast sechsfach höher als der entsprechende N_{ges} -Gehalt im Kippboden der Referenzfläche Schipkau (siehe Tab. 4-10). Dies hat Konsequenzen für das C/N-Verhältnis. Während im Boden der Referenzfläche ein weites C/N-Verhältnis vorgefunden wurde, kann dieses in Bezug auf den kohlehaltigen Kippboden als sehr weit klassifiziert werden. Beide Standorte weisen aber gleichermaßen ungünstige Mineralisierungsbedingungen auf.

Die weiterhin in Tabelle 4-10 aufgeführten pH-Werte belegen nach KA5 (2005) für den kohlehaltigen

Standort eine „mäßig saure“ und für den Referenzstandort eine „stark saure“ Bodenreaktion. Auch die in der Bodenlösung der kohlehaltigen FN-Fläche nachgewiesene elektrische Leitfähigkeit (EC) liegt auf signifikant höherem Niveau als die im kohlefreien forstlich genutzten Kippboden.

Auffällig sind ferner die sehr viel höhere effektive und potentielle Kationenaustauschkapazität am kohlehaltigen Standort Domsdorf im Vergleich zu dem kohlefreien Standort Schipkau. Nach Neumann (1999) und Rumpel (1999) kann davon ausgegangen werden, dass die geogene Kohle in den Kippenböden der Niederlausitz eine ähnlich hohe Kationenaustauschkapazität aufweist wie pedogene organische Substanz. Daher kann die viel höhere

Kationenaustauschkapazität am Standort Domsdorf durch die geogene kohlige Substanz dieses Kippenbodens begründet werden. Die höhere Basensättigung am Standort Domsdorf ist hingegen

nicht durch den Kohlegehalt verursacht, sondern steht im Zusammenhang mit den höheren pH-Werten an diesem Standort.

Tab. 4-11 Wasserlösliche Stoffgehalte der an den forstlichen Rekultivierungsstandorte Domsdorf/Tröbitz (KF) und Schipkau (Anionen und Kationen)

Forstwirtschaftsflächen – Domsdorf (KF) vs Schipkau (RF)												
	Al ³⁺		Ca ²⁺		Fe ³⁺		K ⁺		Mg ²⁺		Mn ²⁺	
	[mg/kg]											
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	0,8	3,3	74,7	9,7	1,4	1,6	3,3	6,3	4,4	1,6	0,2	0,1
Median	0,8*	2,7*	73,0*	9,2*	1,5	1,4	3,2*	5,8*	3,9*	1,5*	0,2	0,1
Var.koeff. [%]	41,1	55,2	32,1	35,0	27,8	34,8	11,2	21,7	27,2	33,7	32,9	66,5
	Na ⁺		NH ₄ -N		NO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		DOC	
	[mg/kg]											
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	2,7	1,2	1,0	1,1	2,2	0,8	3,2	2,8	92,7	9,4	203	125
Median	2,8*	1,1*	1,0	1,1	2,1*	0,8*	3,2	2,5	79,2*	9,6*	203*	125*
Var.koeff. [%]	24,5	18,7	13,6	21,3	64,1	nbb	15,3	27,5	49,5	21,6	10,4	20,0

Bei den wasserlöslichen Stoffgehalten fällt auf, dass der kohlehaltige Kippboden signifikant höhere Konzentrationen an Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ und DOC aufweist (Tab. 4-11). Daher darf angenommen werden, dass in dem Sickerwasser aus dem Boden am Standort Domsdorf eine diesbezüglich höhere Konzentration an diesen Stoffen auftritt. Bei Al³⁺ und K⁺ wurden hingegen höhere Konzentrationen im kohlefreien Substrat ermittelt. Hinsichtlich Fe³⁺, Mn²⁺, NH₄-N und Cl⁻ wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Hinsichtlich der ermittelten Nährstoffgehalte kann konstatiert werden, dass in dem forstlich genutzten kohlehaltigen Kippboden signifikant höhere N_{min}-Gehalte, PO₄³⁻ sowie Mg-Konzentrationen vorliegen,

als in dem kohlefreien forstwirtschaftlich genutzten Rekultivierungsboden (siehe Tabelle 4-12). Auch der ermittelte K-Gehalt lag auf entsprechend höherem Niveau, allerdings waren die Unterschiede nicht signifikant. Somit kann neben der dauerhaft höheren Festlegung an Kohlen-C in kohlehaltigen Rekultivierungsböden auch von positiven Auswirkungen auf das Nährstoffreservoir und somit die pflanzliche Ernährung ausgegangen werden; dies äußert sich besonders in den – im Vergleich zu kohlefreien forstlich genutzten Rekultivierungsböden – höheren Konzentrationen an N-Komponenten.

Tab. 4-12 Nährstoffgehalte der forstlichen Rekultivierungsstandorten Domsdorf/Tröbitz (KF) und Schipkau (N_{min}, Phosphor, austauschbares Kalium und Magnesium)

Forstwirtschaftsflächen – Domsdorf (KF) vs Schipkau (RF)								
	N _{min}		PO ₄ ³⁻		austausch K		austausch Mg	
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	1,6	0,5	9,8	5,8	23,0	19,4	65,8	24,4
Median	1,4*	0,5*	9,8*	5,0*	23,5	17,8	65,6*	21,4*
Var.koeff. [%]	49,0	30,8	13,8	39,3	14,7	32,3	17,6	54,3

*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).

4.1.2.4 Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen

Die Feinbodenarten der beiden Flächen unter landwirtschaftlicher Nutzung unterscheiden sich geringfügig (siehe Tabelle 4-13). Die kohlehaltige Fläche (KF, Grünewalde) weist als Bodenart St2 auf. Die kohlefreie Referenzfläche

Plessa (RF) ist etwas bindiger, die Bodenart an den sechs untersuchten Mischproben schwankt zwischen Sl4 und Ls4. Da die Bodenarten nach der Zerstörung der organischen Substanz bestimmt wurden, sind die Texturunterschiede nicht durch unterschiedlich hohe Kohlegehalte bedingt, sondern durch die ursprüngliche Zusammensetzung des silikatischen Feinbodens an den beiden Standorten.

Tab. 4-13 Bodenphysikalische Eigenschaften der landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorte Grünewalde (KF) und Plessa (RF) (Textur und Dichte)

Landwirtschaftsflächen – Grünewalde (KF) vs Plessa (RF)						
	Textur		TRD		LD _{eff.}	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF
	St2	Sl4/Ls4				
Mittelwert			1,22	1,73	1,35	1,88
Median			1,24*	1,76*	1,36*	1,92*
Var.koeff. (%)			5,1	9,7	3,97	8,0

*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, p<0,05).

Die Trockenrohddichte (TRD) sowie die aus Trockenrohddichte und Tongehalt berechnete effektive Lagerungsdichte (LD_{eff.}) unterscheiden sich an beiden Standorten signifikant. Dabei sind TRD und LD_{eff.} auf dem kohlehaltigen Standort Grünewalde wesentlich niedriger („gering“ nach KA5, Tab. 68) als auf dem kohlefreien Referenzstandort Plessa („hoch“ nach KA5, Tab. 68). Die bodenchemischen Eigenschaften auf den beiden Flächen dieses Standortpaares unterscheiden sich sehr deutlich (siehe Tabelle 4-14). Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal tritt zunächst der C_{org}-Gehalt hervor. Wie bei den forstlichen Rekultivierungsflächen war auch bei diesen landwirtschaftlich rekultivierten Standorten

methodenbedingt eine Differenzierung der beiden C-Quellen „Humus“ (pedogen gebildet) und „Braunkohle“ (geogenen Ursprungs) nicht möglich. Da das bodenbildende Ausgangssubstrat am Referenzstandort Plessa nach der Verkipfung kohlefrei war, entspricht der an diesem Standort ermittelte C_{org}-Gehalt daher dem gebildeten Bodenhumus. Der C_{org}-Gehalt an diesem Standort ist als „schwach bis mittel humos“ (nach KA5, Tab. 15) zu klassifizieren. Die Untersuchungsergebnisse am Standort Plessa legen nahe, dass innerhalb des bisherigen Rekultivierungszeitraums ca. 1 % C_{org} pedogen im Oberboden angereichert worden sind. An dem kohlehaltigen Standort Grünewalde wurden ca. 4,6 % C_{org} gemessen. Wird auch für diesen

Standort eine pedogene C-Akkumulation während des bisherigen Rekultivierungszeitraums von ca. 1 % C_{org} angesetzt, so lässt sich daraus ableiten, dass in Grünwalde mindestens 3,5 % C_{org} als Braunkohle geogenen Ursprungs vorliegen.

Analog zu den C_{org} -Gehalten sind auch die N_{ges} -Gehalte an den beiden Standorten unterschiedlich hoch. Die höheren N-Gehalte am kohlehaltigen Standort Grünwalde dürften durch die Braunkohle bedingt sein. Aufgrund des relativ geringen N_{ges} -Gehaltes werden in dem kohlehaltigen Kippboden sehr weite C/N-Verhältnisse erreicht, die eine niedrige Mineralisierungsrate zur Folge haben. In dem Boden des Referenzstandortes werden auch noch weite C/N-Verhältnisse gemessen, die

ebenfalls eine Mineralisierungsrate auf niedrigem Niveau vermuten lassen. Die pH-Werte am Standort Grünwalde sind als mäßig sauer, am Referenzstandort Plessa hingegen als sehr schwach alkalisch (nach KA5, Tab. 92) zu klassifizieren. Diese starke Differenzierung ist nicht durch die unterschiedlich hohen Kohlegehalte an den beiden Standorten bedingt. Die höheren pH-Werte in Plessa werden durch die an diesem Standort anzutreffenden $CaCO_3$ -Gehalte von ca. 5 % (Anhang, S.20), die geogen bedingt sind, verursacht. Der Kalkgehalt an diesem Standort ist auch für die höhere elektrische Leitfähigkeit (EC) sowie die höhere Basensättigung (BS) im Vergleich zu dem Standort Grünwalde verantwortlich.

Tab. 4-14 Bodenchemische Eigenschaften der landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorte Grünwalde (KF) und Plessa (RF) (C_{org} , N_{ges} , pH-Wert, EC, KAK und BS)

Landwirtschaftsflächen – Grünwalde (KF) vs Plessa (RF)								
	C_{org}		N_{ges}		C/N		pH($CaCl_2$)	
	[%]		[%]					
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	4,62	1,09	0,13	0,07	34	23	5,0	7,4
Median	4,59*	1,09*	0,13*	0,07*	35*	24*	5,0*	7,4*
Var.koeffi.[%]	10,1	11,2	6,6	8,5	5,0	9,0	2,9	0,3
	EC		KAK _{eff}		KAK _{pot}		BS	
	[$\mu S/cm$]		[mmol _e /kg]		[mmol _e /kg]		%	
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	48	125	198,9	720,9	181,7	114,9	33,9	59,4
Median	48*	127*	197,9*	726,2*	185,9*	113,3*	33,4	56,8
Var.koeffi.[%]	11,0	6,0	9,0	7,6	15,6	11,7	13,6	11,3

* Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, $p < 0,05$).

Bei dem Standortpaar Grünwalde (KF) und Plessa (RF) differieren aktuelle und potentielle Kationenaustauschkapazität sehr auffällig. Die aktuelle Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) ist am (kohlefreien) Standort Plessa sehr viel höher als am (kohlehaltigen) Standort Grünwalde, bei der potentiellen Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) verhält es sich genau umgekehrt. Dieser scheinbare Widerspruch ist sehr wahrscheinlich methodenbedingt. Annähernd die gesamte aktuelle KAK am Standort Plessa wird aus Ca-Ionen gebildet, diese erreichen knapp 700 mmol_e/kg (siehe Analysenwerte in Tabelle im Anhang, S.20). Ein solch hoher Ca-Wert ist bei der an diesem Standort

vorliegenden Bodenart und einem C_{org} -Gehalt von ca. 1 % nicht zu erklären. Dieses Ergebnis erscheint nur dann plausibel, wenn angenommen wird, dass die Ca-Ionen zumindest teilweise aus der Lösung von $CaCO_3$ stammen. Damit ist aber die KAK_{eff} an diesem (kalkhaltigen) Standort kein aussagekräftiger Parameter. Bei der KAK_{pot} spielt die Lösung von $CaCO_3$ offensichtlich keine oder nur eine sehr untergeordnete Rolle, die Ca-Werte nach Austausch mit gepufferter $BaCl_2$ -Lösung sind an den beiden Standorten annähernd gleich groß (siehe Analysenwerte in Tabelle im Anhang, S.19/20). Die höhere KAK_{pot} am Standort Grünwalde kann daher, ähnlich wie auch an dem forstlich genutzten Standort

Domsdorf, auf die hohe KAK_{pot} der geogenen Kohle zurückgeführt werden.

Tab. 4-15 Wasserlösliche Stoffgehalte der landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorte Grünewalde (KF) und Plessa (Anionen und Kationen)

Landwirtschaftsflächen – Grünewalde (KF) vs Plessa (RF)												
	Al^{3+}		Ca^{2+}		Fe^{3+}		K^+		Mg^{2+}		Mn^{2+}	
	[mg/kg]											
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	0,9	< 0,06	28,1	79,3	0,9	0,1	4,2	18,1	10,4	3,1	<0,1	<0,1
Median	0,8	< 0,06	28,3*	79,0*	0,9*	0,1*	4,1*	18,2*	9,8*	3,1*	<0,1	<0,1
Var.koeff. [%]	19,6	nbb*	6,5	3,4	20,1	42,6	20,6	16,1	17,5	13,1	18,4	35,5
Landwirtschaftsflächen – Grünewalde (KF) vs Plessa (RF)												
	Na^+		NH_4-N		NO_3^-		Cl^-		SO_4^{2-}		DOC	
	[mg/kg]											
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	2,7	1,2	1,1	1,8	1,4	1,1	2,9	1,8	27,3	12,0	137	73
Median	2,8*	1,2*	1,0*	1,9*	1,5	1,1	2,9*	1,8*	27,0*	12,1*	141*	73*
Var.koeff. [%]	7,1	13,3	20,0	8,9	30,7	31,7	15,0	17,5	15,7	34,1	8,8	5,7

*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, $p < 0,05$).

Bei den wasserlöslichen Stoffgehalten liegen Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} und DOC bei dem kohlehaltigen Kippboden signifikant höher als bei dem kohlefreien, bei Ca^{2+} , K^+ und NH_4-N verhält es sich gegensätzlich und in Bezug auf NO_3^- und Mn^{2+} wurden keine signifikanten Unterschiede gemessen (Tab. 4-15).

Die Nährstoffgehalte an den beiden Standorten unterscheiden sich zwar (siehe Tabelle 4-16), allerdings ist nicht klar, worauf sich die Unterschiede

zurückführen lassen. So können dafür einerseits die unterschiedlich hohen Kohlegehalte, andererseits aber auch die auf diesen Standorten durchgeführten Düngungsmaßnahmen sowie unterschiedlich hohe Nährstoffentzüge mit den Kulturpflanzen verantwortlich sein. Auffällig ist, dass beide Flächen an K und P unterversorgt sind. Hingegen ist die Mg-Versorgung auf der kohlehaltigen Fläche als „sehr hoch“, auf der Referenzfläche hingegen als „niedrig“ zu bewerten.

Tab. 4-16 Nährstoffgehalte der an den landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorten Grünewalde (KF) und Plessa (Nährstoffe)

Landwirtschaftsflächen – Grünewalde (KF) vs Plessa (RF)								
	N_{min}		PO_4^{3-}		austausch K		austausch Mg	
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
	KF	RF	KF	RF	KF	RF	KF	RF
Mittelwert	1,0	2,1	103,3	72,2	30,1	88,5	232,9	40,7
Median	1,0*	2,0*	104,4	63,2	30,1*	90,1*	218,7*	41,9*
Var.koeffizient [%]	12,3	19,5	23,5	43,1	13,4	16,3	16,0	18,9

*) Die Verteilungen sind signifikant verschieden (Mann-Whitney-U-Test, $p < 0,05$).

4.2 Vegetationskundliche Untersuchungen

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Vegetationsaufnahme beschrieben und analysiert. Als erstes erfolgt unter Kapitel 4.2.1 eine Beschreibung der auf den Flächen vorhandenen Vegetation. Dabei wird versucht diese hinsichtlich ihrer Vergesellschaftung einzuordnen. Darüber hinaus werden die Untersuchungsflächen sowie die Umgebung in einem Biotoptyp zusammengefasst. In Kapitel 4.2.2 wird die Vegetation der Kohle- und Referenzstandorte hinsichtlich ihrer Zeigerwerte nach Ellenberg et al. (2001) analysiert. Dabei werden die Standorte miteinander verglichen.

4.2.1 Vegetationsaufnahme / Biotopkartierung

4.2.1.1 Kohlelagerfläche bei Britz

Die Vegetationsaufnahme fand im Juni 2013 durch Frau von Chamier Glisczinski im Rahmen ihrer Bachelorarbeit statt. Bei der Beprobung des Bodens im September 2013 wurden ergänzende Fotos zum

Gesamteindruck aufgenommen. Von Chamier Glisczinski (2013) unterteilt die Krautschicht in drei Höhenklassen: Schicht 1 (<5 cm), Schicht 2 (<25 cm) und Schicht 3 (bis 100 cm). Höhere Pflanzen, wie einzeln stehende Kiefern (*Pinus sylvestris*) im Beprobungsgebiet wurden von ihr unter Bemerkungen im Bogen mit aufgenommen.

Sowohl auf der Kohlefläche, als auch auf der Referenzfläche dominieren überwiegend krautige Pflanzen, sowie Gräser und Flechten. Es wurden auf der Kohlefläche 15 verschiedene Arten und auf der Referenzfläche 12 Arten kartiert, wobei einzelne Arten in unterschiedlichen Schichten auftraten. Vorherrschend auf der Kohlefläche ist dabei *Rumex acetosella* sowie *Cladonia spec.*. Im Bedeckungsgrad dominiert besonders die als Schicht 2 klassifizierte Höhenklasse mit 35 % Bedeckungsgrad gegenüber 25 % (Schicht 1) und 5 % (Schicht 3). Insgesamt weist die Kohlefläche mit 65 % einen deutlich höheren Bedeckungsgrad gegenüber der Referenzfläche mit 30 % auf. Dieser Eindruck zeigt sich auch im September bei der Beprobung (Abb. 4-8). Auf der Referenzfläche dominieren *Cladonia spec.* sowie *Corynephorus canescens* die drei Schichten.



Abb. 4-8 Vergleich des Eindrucks der Vegetationsbedeckung von Kohlefläche (linke Seite) und Referenzfläche (rechte Seite) im Juni 2013 (oben) und September 2013 (unten)

Insgesamt zeigen sich keine deutlichen Unterschiede in der Zusammensetzung der Vegetation auf beiden Standorten (v. Chamier Glisczinski, 2013).

Die Kartierung und Einordnung in ein Biotop nach der Kartieranleitung für Brandenburg (Zimmermann, 2007a und 2007b) erfolgte durch v. Chamier Glisczinski (2013). Dafür wurde die Umgebung der Beprobungsflächen miteinbezogen und das Biotop großflächig ausgewiesen.

Die Kohlefläche wird als Grünlandbrache artenarmer, ruderaler, trockener Brachen mit spontanem Gehölzwuchs (<30 %) mit dem Biotopschlüssel 0513322 kartiert. Dieser Biotoptyp ist nach Zimmermann (2007b) pflanzensoziologisch nicht einzuordnen, da hier Pflanzenarten verschiedener Standorttypen vertreten sein können. Die kartierte Fläche weist mit *Corynephorus canescens*, *Sedum acre* und *Helichrysum arenarium* Arten der Trockenrasengesellschaft auf, aber auch Arten der Frischwiese mit *Arrhenatherum elatius*, *Agrostis capillaris*, *Dactylis glomerata* und *Deschampsia flexuosa* (v. Chamier Glisczinski, 2013). Der Gehölzanteil ist gering und wird nur durch *Pinus sylvestris* repräsentiert.

Es wird erwartet, dass sich das Gebiet zu einem dichter werdenden Kiefernwald entwickelt, welcher zunehmend höhere Gehölzanteile aufweist.

Die Referenzfläche liegt in einem Biotop, welches silbergrasreichen Pionierfluren mit spontanem Gehölzbewuchs (<30 %), Biotoptypschlüssel 051211x1, zugeordnet werden kann. Auf der Fläche ist zu erkennen, dass nach der Nutzungsaufgabe eine schnelle Verbreitung von *Pinus sylvestris* stattgefunden hat (v. Chamier Glisczinski, 2013).

4.2.1.2 Köhlereifläche bei Jänschwalde

Der Standort des untersuchten Holzkohlenmeiler beim Tagebau Jänschwalde ist gekennzeichnet durch den starken anthropogenen Eingriff der Beräumung des Tagebauvorfeldes durch Kahlschlag im Jahr 2010 (siehe Abb. 4-9). Darüber hinaus sind großflächige Areale durch Grabungen der Archäologie sowie Aufschiebung von Wällen als Sicherheitsmaßnahme gestört. Die Umgebung des Holzkohlenmeilers weist große Flächen unbedeckten Bodens auf. Weitverbreitet ist *Calamagrostis epigejos* besonders an den Aufschiebungen sind dichte Bestände auszumachen. Dazwischen sind Inseln mit Resten der ehemaligen

Waldpflanzengesellschaften zu finden wie *Deschampsia flexuosa*, *Vaccinium vitis-idaea* sowie *Calluna vulgaris*.

Insgesamt weist die Kohlefläche eine geringe Bodenbedeckung mit etwa 30 % auf. Die wichtigsten Pflanzenarten auf dem direkten Untersuchungsareal sind *Vaccinium vitis-idaea* sowie *Calluna vulgaris*. Die vollständigen Pflanzenaufnahmen sind im Anhang zu finden. Insgesamt kann die Vergesellschaftung um das Untersuchungsgebiet als inselartige *Calamagrostis epigejos*-Gesellschaft mit Relikten einer ehemaligen Heidekraut-Kiefernforst-Gesellschaft angesprochen werden (Schubert et al., 1995, Slobodda, 1987). Die vorgefundene Vergesellschaftung von *Calamagrostis epigejos*, *Deschampsia flexuosa* sowie *Rumex acetosella* deutet auf einen mittleren bis mäßig armen Sandstandort hin (Schubert et al., 1995), dies wird im folgenden Kapitel zur Analyse der Zeigerwerte weiter vertieft.



Abb. 4-9 Kohlefläche mit *Calamagrostis epigejos* und Rohbodenanteilen

Die Umgebung der Referenzfläche ist ebenso durch den Kahlschlag gekennzeichnet (siehe Abb. 4-10). Vorwiegend ist auch hier in der Umgebung der Untersuchungsfläche *Calamagrostis epigejos* zu finden. Daneben sind auf der Untersuchungsfläche *Corynephorus canescens*, *Senecio erucifolius*, *Chenopodium album* sowie vereinzelt *Solanum nigrum* vorhanden. Wie auch auf der Kohlefläche ist der Bedeckungsgrad mit 25-30 % nur gering. Die Vergesellschaftung kann ebenso weitflächig als inselartige *Calamagrostis epigejos* Gesellschaft angesehen werden. Hier fehlen allerdings die Heidekraut-Kiefernforst-Relikte. Dafür treten mit *Solanum nigrum* und *Chenopodium album* zwei Pflanzen auf, die in Ruderalgesellschaften zu finden sind. Das Vorkommen dieser Pflanzen, die sonst vorwiegend auf nährstoffreicheren und feuchteren Standorten anzutreffen sind, kann möglicherweise

mit der Nähe zur Grießener Hochfläche und dem dort anstehenden Lehm in Verbindung gebracht werden. Die Standorte auf der Grießener Hochfläche werden zudem ackerbaulich genutzt.

Nach dem Biotopschlüssel für das Land Brandenburg kann die Umgebung um die Kohlenuntersuchungsfläche als ruderales Pionier-, Gras- und Staudenflur bzw. Landreitgrasflur eingeordnet werden (Schlüssel 032101). Wobei als Begleitbiotope vegetationsfrei und –arme Rohbodenstandorte (03110) sowie reliktsche Vorkommen von krautigen Pflanzen des Heidekraut-Kiefernwald (08222) bzw. des Drahtschmielen-Kiefernforst (08488832) vorhanden sind. Es ist davon auszugehen, dass es sich um einen angelegten und genutzten Forst handelt.

Der Referenzstandort ist ebenfalls als ruderales Pionier-, Gras- und Staudenflur bzw. Landreitgrasflur einzuordnen (Schlüssel 032101). Auch hier ist der vegetationsfreie und –arme Rohbodenstandort (03110) als Begleitbiotop zu ergänzen.



Abb. 4-10 Referenzstandort mit *Calamagrostis epigejos*, *Senecio erucifolius* und *Chenopodium album*

4.2.1.3 Forstliche Rekultivierungsflächen

Die forstlichen Rekultivierungsflächen, sowohl die Kohle- als auch die Referenzfläche, sind wie bereits beschrieben etwa 50 Jahre alt. Beide lagen erst als Rohkippe einige Jahre nach der Verkipfung brach bevor sie aufgeforstet wurden. Die Standorte weisen ein geschlossenes Kronendach auf, so dass im Vergleich zu einem Freilandstandort relativ wenig Licht auf die Bodenoberfläche einwirken kann.



Abb. 4-11 Kohlestandort Domsdorf/Tröbitz mit *Quercus rubra* und *Tilia cordata*

Die Kohlefläche in Tröbitz liegt etwas entfernt vom nächsten Forstweg und ist etwa 1961/62 mit *Quercus rubra* (40 %) und *Tilia cordata* (40 %) mit Beimischung von *Alnus glutinosa* (16 %) und *Populus spec.* (vermutlich *Populus nigra*, 4 %) aufgeforstet worden (Katzur et al., 1999). Bei der Kartierung im September 2013 sind nur noch *Quercus rubra* und *Tilia cordata* aufgenommen worden (Abb. 4-11), die beigemischten Arten fehlten im Untersuchungsgebiet. Sie wiesen auch weiterhin in der 1. Baumschicht ein ausgeglichenes Verhältnis auf. Beim Jungwuchs ist besonders *Tilia cordata* etwas stärker vertreten. Neben den beiden Hauptbaumarten ist auf der Untersuchungsfläche nur *Urtica dioica* sehr vereinzelt kartiert worden. Dies führt zu einem artenarmen Standort im direkten Untersuchungsgebiet. Es ist eine dichte Laubstreuenschicht auf dem Boden festgestellt worden. Für eine Spezifizierung sollte im Frühjahr erneut eine Aufnahme stattfinden, um eventuell weitere krautige Pflanzen aufzunehmen. Als Biotop wird ein Laubholzforst aus *Quercus rubra* und *Tilia cordata* mit dem Schlüssel 08389 (WLSM) ausgewiesen (Zimmermann, 2007b). An den Wegrändern ist eine dichtere und artenreichere Vegetation festgestellt worden.

Die Referenzfläche in der Nähe von Schipkau liegt in unmittelbarer Nähe zu zwei Forstwegen. Dadurch ergibt sich besonders an den Rändern etwas mehr Lichteinfall als im mittleren Bereich der Fläche und auch im Vergleich zur Kohlefläche. Das Gebiet wurde etwa 1959 mit *Quercus petraea* aufgeforstet (BKA, 1996). Bei der Vegetationsaufnahme im September 2013 wurde neben *Quercus petraea* auch *Quercus rubra* als Hauptbaumart kartiert (Abb. 4-12). Daneben sind im Jungwuchs (2. Baumschicht) auch *Tilia cordata*, *Carpinus betulus*, *Prunus serotina* und *Sorbus aucuparia* vorhanden. In der Krautschicht finden sich neben Sämlingen von allen

Gehölzen auch *Rubus fruticosus* und *Rubus idaeus*. Auch hier sollte eine weitere Aufnahme im Frühjahr stattfinden, um gegebenenfalls die Pflanzengesellschaft zu spezifizieren.

Zur Einordnung in einen Biotoptyp kann die Referenzfläche als Eichenforst aus *Quercus petraea* mit Mischbaumart *Quercus rubra* und Nebenbaumart *Carpinus betulus* im Unterstand bezeichnet werden mit dem Schlüssel 083189 (WLQSM) (Zimmermann, 2007b).



Abb. 4-12 Referenzstandort Schipkau mit *Quercus petraea*

Beide Flächen weisen eine dichte Laubstreu auf, wie bei Slobodda (1987) aufgeführt, ist durch die vorherrschenden Baumarten mit einer leicht sauren Streu (pH-Bereich 5,4 bis 4,8) zu rechnen.

Die Referenzfläche weist eine etwas höhere Artenzahl auf, als die Kohlefläche. Dies ist möglicherweise zu einem Teil auf die Lichtverhältnisse zurückzuführen.

4.2.1.4 Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen

Das Alter der landwirtschaftlich genutzten Rekultivierungsflächen beträgt, wie in Kapitel 2.5 beschrieben etwa 50-60 Jahre. Die Kohlefläche bei der Ortschaft Grünwalde wird vom FIB e.V. als Versuchsfläche genutzt. Seit 2012 ist die 300 m² große Untersuchungsfläche als Grünland bestellt und extensiv bewirtschaftet worden. Es wurde eine Mischung mit *Dactylis glomerata* und *Lolium perenne* gesät. Diese beiden Arten bedeckten bei der Vegetationsaufnahme 2013 die komplette Fläche (Abb. 4-13).

Hinzu kamen weit verbreitet *Trifolium repens* sowie weniger stark verbreitet *Crepis biennis*, *Trifolium pratense* und *Taraxacum sect. Ruderalia*. Gering verbreitet (<5 & bzw. <1 %) waren *Festuca ovina*,

Medicago sativa und *Silene latifolia*. Direkt neben der Untersuchungsfläche wurde Mais und Sorghum angebaut.



Abb. 4-13 Gesamteindruck der Untersuchungsfläche Grünwalde (kohlehaltig) bei Vegetationsaufnahme im September 2013

Die Untersuchungsfläche kann nach den vorkommenden Arten dem Biotoptyp Intensivgrasland mit dem Schlüssel 05152 zugeordnet werden. Die relative Artenarmut ist möglicherweise auf die vorherige Nutzung zurückzuführen. Es muss für eine langfristige Einordnung die Nutzung der folgenden Jahre beachtet werden, um eine kurzfristige Ackerbrache (Biotopschlüssel 09140) mit eingesäten Grünlandpflanzen auszuschließen, bzw. der Veränderung und Einstufung in ein artenreicheres extensives Grünland (Biotopschlüssel 05100 bzw. 05110) Rechnung zu tragen.

Die Referenzfläche bei der Ortschaft Plessa wurde nach Angaben der Pächterin (Eigentümerin) seit 5 Jahren durchgängig mit Luzerne bestellt. Diese war bei der Vegetationsaufnahme im September 2013 noch nicht geerntet. Es wurde mit Kalk-Ammonsalpeter 120 kg/ha gedüngt. Die Untersuchungsfläche war weitestgehend mit *Medicago sativa* bedeckt (>75 %). Darüber hinaus sind *Triticum repens* und *Taraxacum officinale agg.* weit verbreitet gewesen. Weniger stark verbreitet waren *Hieracium lachenalii*, *Trifolium repens* und *Tanacetum vulgare*. Bei Betrachtung des Umfeldes der Untersuchungsfläche wurde deutlich, dass der angrenzende Bereich (Vorgewende und Ackerrand) im Vergleich zur Untersuchungsfläche weniger stark bedeckt war. Hier befand sich weniger *Medicago sativa*, dafür deutlich weiter verbreitet *Tanacetum vulgare*, *Trifolium repens*, *Trifolium pratense* und *Daucus carota subsp. carota*. Dieser Unterschied ist auch im Luftbild (Abb. 4-14) im Frühjahr zu erkennen.



Abb. 4-14 Luftbild des Standortes Plessa im Frühjahr mit Kennzeichnung der Untersuchungsfläche

An den Acker grenzend (Grabenbereich und Zufahrt zum Acker) wurden verbreitet *Phragmites australis*, *Populus tremula*, *Solidago canadensis* und *Calamagrostis epigejos* vorgefunden. Die Nähe zum Birkenteichgraben und die Zusammensetzung der Feldrandvegetation deuten auf einen feuchten Standort hin. Die Feuchte nimmt möglicherweise vom Ackerrand zur Mitte ab, so dass sie nur am Rand einen Einfluss auf das Wachstum und die Verbreitung auf *Medicago sativa* ausübt.

Die Referenzfläche kann dem Biotoptyp intensiv genutzte Sandäcker (LIS, Biotopschlüssel 09134) zugeordnet werden. Ebenso ist der angrenzende Bereich dort einzuordnen, da die Nutzung und das Fehlen typischer Arten eine Einordnung bei z.B. extensiv genutzten Äckern (09120) oder Ackerbrachen 809140) nicht zulassen.

Beide Flächen sind hinsichtlich ihrer derzeitigen Nutzung (Grünland und Acker) schwierig zu vergleichen. Beide weisen aber nur eine geringe Artenzahl auf, wobei einige Arten auf beiden Standorten zu finden sind.

4.2.2 Zeigerwerte nach Ellenberg

In den folgenden Kapiteln werden die aufgenommenen Pflanzen der unterschiedlichen Standorte hinsichtlich ihrer Zeigerwerte analysiert und die jeweiligen Kohlestandorte mit den Referenzflächen verglichen. Dabei fließt nur das Vorhandensein einer Art in die Betrachtung ein. Eine Wichtung hinsichtlich der Bedeckung wird nicht vorgenommen. Dieser Vergleich findet, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, hauptsächlich über die Verteilung der Zeigerwerte statt.

Zu beachten bleibt, dass die Pflanzen nicht nur auf den durch die Zeigerwerte angezeigten

Standortfaktoren existieren, sondern breitere ökologische Nischen aufweisen können. Der Zeigerwert gibt nur das „ökologische Verhalten“ der Pflanze für diesen Faktor unter Konkurrenzsituation in der Landschaft wieder (Ellenberg et al., 2001). Das eigentliche „physiologische Verhalten“, das Optimum der einzelnen Pflanze, kann außerhalb des angegebenen Zeigerwertes liegen. Das Vorkommen wird durch die jeweilige Konkurrenzsituation auf der Fläche und andere Einflussfaktoren, wie z.B. Düngung und anthropogene Eingriffe, beeinflusst. Eine enge Korrelation zwischen mittlerer Zeigerzahl und messbaren Bodenparametern ist nicht immer gegeben (Böcker et al., 1983). Es werden hier trotzdem Vergleiche dahingehend vorgenommen. Dabei werden die mittleren Werte „qualitativ“ ermittelt, d.h. nur nach der Präsenz der Pflanze und nicht gewichtet nach ihrem Bedeckungsgrad. Dieser Weg wird von Ellenberg et al. (2001) ebenfalls bevorzugt.

Alle Diagramme der Verteilungen sind im Anhang S.1ff zu finden.

4.2.2.1 Kohlelagerfläche bei Britz

Die Auswertung der Lichtzahl aller Pflanzen ergab für die Kohlefläche, dass überwiegend Lichtpflanzen (Zeigerwert 8) vorhanden sind (Abb. 4-15). Die größte Abweichung stellt *Brachythecium rutabulum* Hedw. als Halbschattenpflanze (Zeigerwert 5) dar. Auch auf der Referenzfläche sind überwiegend Lichtpflanzen zu finden, hier stellt, neben *Brachythecium rutabulum* Hedw., *Poa nemoralis* L. die größte Abweichung vom Mittelwert dar. Diese Verteilung (Abb. 1, Anhang, S.1) auf beiden Flächen war unter den standörtlichen Gegebenheiten nicht unerwartet.

Die mittlere Temperaturzahl ist sowohl auf der Kohle- als auch auf der Referenzfläche bei einem Wert von 6 (Abb. 4-15). Dies bedeutet nach Ellenberg et al. (2001) planar bis colline Pflanzen. Zu beachten ist, dass ein Großteil der Pflanzen beider Flächen indifferent gegenüber der Temperatur ist. Die größten Abweichungen stellen auf der Kohlefläche *Achillea millefolium* L. mit einem Zeigerwert von 4 und auf der Referenzfläche *Rumex acetosella* L. s.l. mit einem Zeigerwert von 5 dar. Beide Abweichungen tendieren damit zu Mäßigwärme- und Kühlezeigern. Wie im Diagramm im Anhang S.1 zu sehen ist, ist die Verteilung

linksschief und es gibt keine Abweichungen zu höheren Zeigerwerten.

Die Verteilung der Werte der Kontinentalitätszahl liegt bei beiden Flächen auf einem ähnlichen Niveau (Abb. 4-15). Wobei die Kohlefläche eine etwas größere Spannweite mit Werten zwischen 3 und 7 bei einem mittleren Wert von 3 hat. Dies deutet auf einen Schwerpunkt der Zeigerwerte im für Mitteleuropa typischen Bereich hin (Ellenberg et al., 2001). Ein zweites Maximum ist bei dem Zeigerwert

5, welcher auf intermediär zwischen schwach subozeanisch bis schwach subkontinental hinweist. Einziger Ausreißer ist *Helichrysum arenarium* (L.) Moench mit einem Zeigerwert von 7. Auf der Referenzfläche sind Werte zwischen 2 und 5 zu finden, bei einem mittleren Wert von 4. Das Maximum ist bei einem Zeigerwert von 5 (Abb. 3, Anhang, S.2).

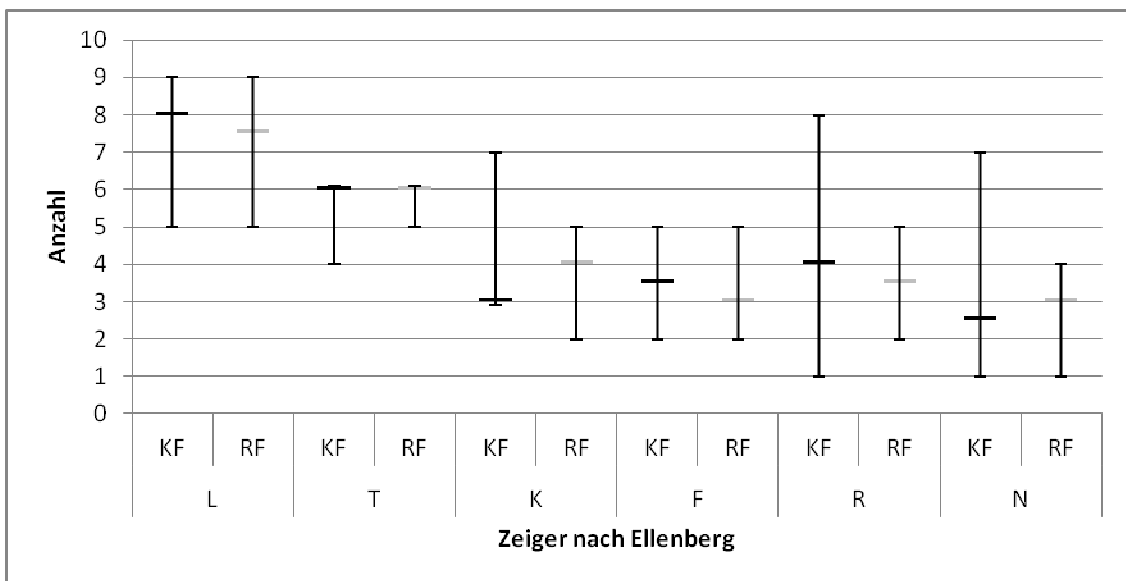


Abb. 4-15 Median, Maximum und Minimum der Zeigerwerte für alle Indikatoren auf Kohle- und Referenzfläche für den Standort Britz

Die folgenden Zeigerwerte sind enger mit dem Boden und somit den Auswirkungen von Kohle verknüpft. Die Feuchtezahl steht in Zusammenhang mit dem Bodenwasser, welches sowohl von Grund- und Stauwasser aber auch vom Haltevermögen des Bodens beeinflusst wird.

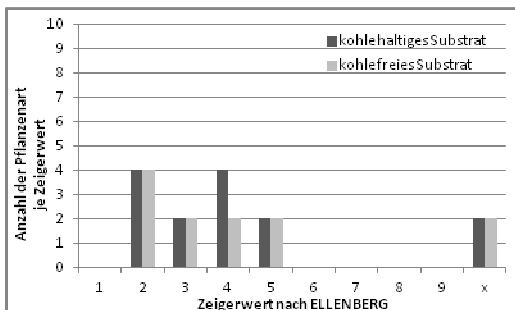


Abb. 4-16 Verteilung der Zeigerwerte der Feuchtezahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Britz

Die Spannweiten der Zeigerwerte beider Flächen sind gleich mit Werten zwischen 2 und 5 (Abb. 4-15).

Damit liegen sie im Bereich der Trockenis- bis hin zu Frischezeigern. Die Verteilung ist ebenfalls gleich. Die Unterschiede sind nur auf die verschiedene Anzahl von Pflanzen zurückzuführen (Abb. 4-16). Die Maxima beider Flächen sind im trockeneren Bereich zu finden.

Die Reaktionszahl steht nach Angaben von Ellenberg et al. (2001) in Zusammenhang mit dem pH-Wert im Boden bzw. Wasser. Für diesen Standortfaktor zeigen Abb. 4-15 und Abb. 4-17, dass auf der Kohlefläche eine deutlich größere Spannweite der Werte zu finden ist, als auf der Referenzfläche. Die Kohlefläche weist zudem eine gleichmäßige Verteilung zwischen den Werten 1 und 8 auf, ohne ein richtiges Maximum, auf. Damit zeigen die Pflanzen sowohl saure als auch basische Verhältnisse an. Dies wird durch die vergleichsweise hohe Zahl an indifferenten Pflanzen weiter untermauert. Das Vorkommen von sowohl Säurezeigern als auch Zeigern von basischem Milieu

ist möglicherweise auf kleinräumigen Wechsel innerhalb der Fläche zurückzuführen.

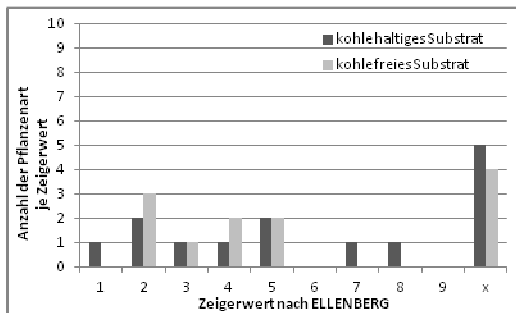


Abb. 4-17 Verteilung der Zeigerwerte der Reaktionszahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Britz

Die Werte der Referenzfläche liegen dagegen deutlicher im säureanzeigenden Bereich zwischen 2 und 5. Hier fehlen die Anzeiger von basischem Milieu. Ein großer Teil der Pflanzen der Referenzfläche ist indifferent gegenüber den Reaktionsverhältnissen.

Die Stickstoffzahl gibt die Versorgung der Pflanzen mit Mineralstickstoff (NO_3 bzw. NH_4) wieder (Ellenberg et al., 2001). Bei diesem Indikator ist, wie auch bei der Reaktionszahl, die Spannweite auf der Kohlefläche deutlich größer als auf der Referenzfläche bei allerdings ähnlichen mittleren Werten (Abb. 4-15). Auf der Kohlefläche liegen die Werte zwischen 1 und 7, d.h. von stickstoffarmen bis hin zu stickstoffreichen Standortanzeigern. Wobei Anhand der Verteilung erkennbar wird, dass der Schwerpunkt eindeutig im Stickstoffarmut anzeigenden Bereich liegt (Abb. 4-18). Ausreißer ist einzig *Arrhenatherum elatius* var. *Elatius* L. I., allerdings ist er nur sporadisch (1-5 %) auf der Fläche. Dies könnte auf punktuellen Eintrag und Akkumulation von Stickstoff hinweisen. Die Referenzfläche weist mit Werten zwischen 1 und 4 auf stickstoffarme Verhältnisse hin. Damit zeigt sie dieselben Verhältnisse wie die Kohlefläche.

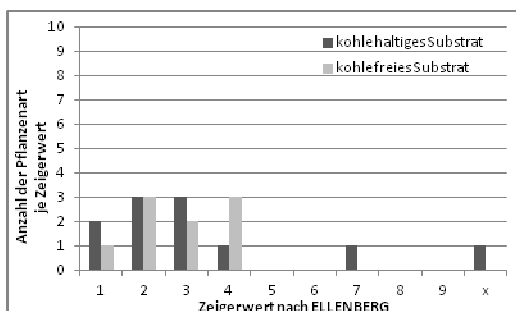


Abb. 4-18 Verteilung der Zeigerwerte der Stickstoffzahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Britz

Zusammenfassend ist für die Kohlelagerfläche und die Referenzfläche bei Britz festzustellen, dass die Zeigerwerte zwischen beiden Flächen keine eindeutigen Unterschiede aufweisen. Einzig die Spannweiten der bodenassoziierten Faktoren Reaktionszahl und Stickstoffzahl unterscheiden sich stärker. Wobei die Spannweite durch einzelne Ausreißer zustande kommt. Die Schwerpunkte der Zeiger auf der Kohlefläche sind dagegen ähnlich denen der Referenzfläche.

Die Kohlefläche ist als mäßigfeuchter bis trockener Standort mit Stickstoffarmut zu bezeichnen. Die Reaktionsverhältnisse sind mit Hilfe der Zeigerwerte der kartierten Pflanzen nicht eindeutig bestimmbar. Die Referenzfläche ist als trocken, stickstoffarm und mit saurer Bodenreaktion ausgestattet zu charakterisieren.

4.2.2.2 Köhlereifläche bei Jänschwalde

Insgesamt sind auf der Köhlereifläche und der dazugehörigen Referenzfläche relativ wenig verschiedene Pflanzen aufgenommen worden. Diese weisen auch einen geringen Bedeckungsgrad auf (Kap.4.2.1.2). Es soll trotzdem eine Analyse der Zeigerwerte vorgenommen werden.

Die Lichtzahl aller Pflanzen, sowohl auf der Kohlefläche als auch auf der Referenzfläche, liegt im Bereich zwischen 5 und 8, d.h. zwischen Halbschatten und Lichtpflanzen (Abb. 4-19). Es gibt keine ausgesprochenen Schattenpflanzen, was bei der Standortsituation nicht zu erwarten war (Kap.2.3). Deutliche Unterschiede in der Verteilung zwischen Kohle- und Referenzfläche sind nicht zu erkennen (Abb. 1, Anhang, S.4).

Die mittlere Temperaturzahl der vorkommenden Pflanzen liegt auf der Kohlefläche bei einem Wert von 5 und auf der Referenzfläche bei 6 (Abb. 4-19). Beide Flächen weisen eine geringe Spannweite auf. Dies ist auch auf die, gemessen an der geringen Gesamtpflanzenzahl, hohen Anzahl an indifferenten Pflanzen zurückzuführen (Abb. 2, Anhang, S.4).

Die mittleren Kontinentalitätszahlen liegen bei 3 für die Kohlefläche und 4 für die Referenzfläche (Abb. 4-19). Die Spannweiten sind auf beiden Flächen gleich. Die Werte liegen zwischen 3 und 7 und

zeigen damit einen subozeanischen bis subkontinentalen Bereich an.

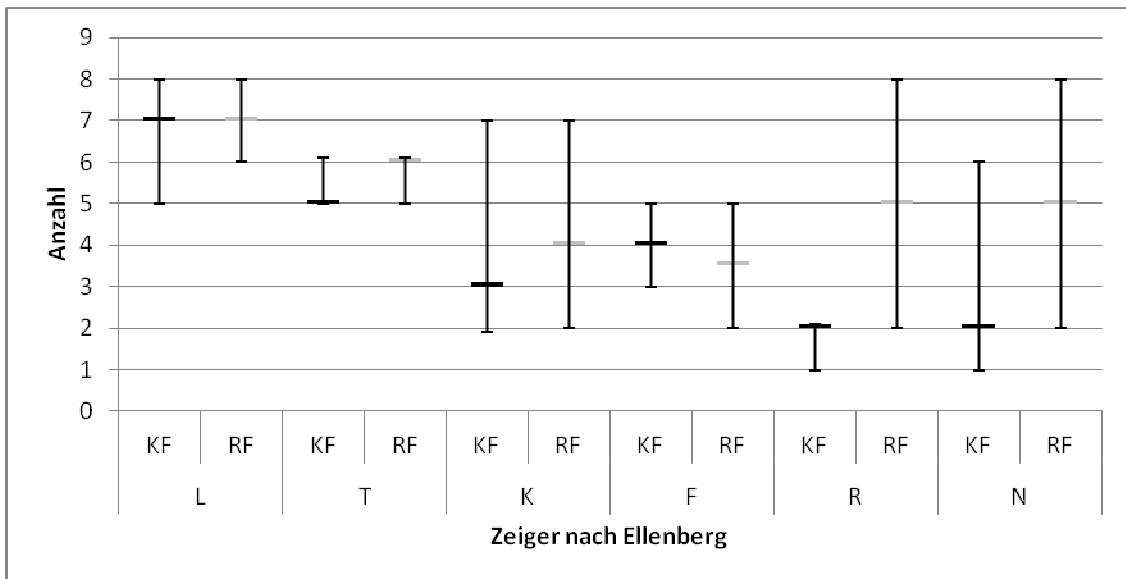


Abb. 4-19 Median, Maximum und Minimum der Zeigerwerte für alle Indikatoren auf Kohle- und Referenzfläche für den Standort Jänschwalde

Die mittlere Feuchtezahl unterscheidet sich nur gering auf beiden Flächen. Die Kohlefläche weist einen Wert von 4 auf. Die mittlere Feuchtezahl der Referenzfläche beträgt 3,5. Die Spannweite auf der Kohlefläche ist gering (Abb. 4-20) mit Werten zwischen 3 und 5, d.h. von Trockeniszeigern bis zu Frischezeigern. Die Kohlefläche kann somit nach den vorgefundenen Pflanzen als mittelfeuchter bis leicht trockener Standort angesehen werden. Die Referenzfläche weist eine etwas größere Spannweite auf (Abb. 4-20), wobei die größere Spannweite nur durch das Vorkommen von *Corynephorus canescens* zustande kommt. Eine nicht unbedeutende Anzahl an Pflanzen auf beiden Standorten verhält sich indifferent gegenüber der Bodenfeuchte.

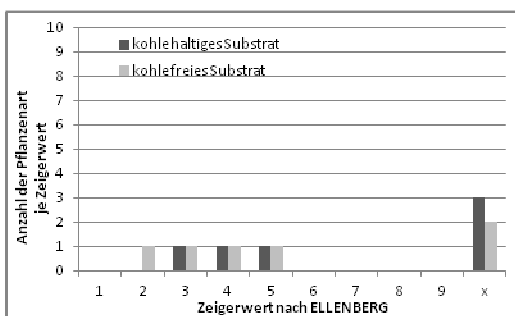


Abb. 4-20 Verteilung der Zeigerwerte der Feuchtezahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Jänschwalde

Beide Standorte haben jeweils zwei Wechselfeuchtezeiger vorzuweisen, dies könnte ein Indiz für jahreszeitlich wechselnde Feuchteverhältnisse sein.

Die Reaktionszahl weist deutliche Unterschiede zwischen beiden Flächen auf (Abb. 4-19). Die Kohlefläche hat bei einer Spannweite von 1 bis 2 einen mittleren Wert von 2. Dies deutet auf ein saures Milieu hin (Abb. 4-21). Diese Eigenschaft war aus der historischen Nutzung als Kiefernforst heraus zu erwarten. Die Referenzfläche dagegen besitzt bei einer großen Spannweite von 2 bis 8 und einem mittleren Wert von 5 sowohl säureanzeigenden Bewuchs (*Deschampsia flexuosa* und *Corynephorus canescens*) als auch basenanzeigende Pflanzen (*Chenopodium album* und *Solanum nigrum*). Diese große Spannweite ist nicht ohne weiteres erklärbar, da bei der Feldansprache im Boden kein Kalk festgestellt werden konnte. Auch ein kleinräumiger Wechsel ist bei der Standortsituation auf dem Sander als eher unwahrscheinlich anzusehen. Die Herkunft der Pflanzen ist wiederum auf die nahegelegene Gießener Hochfläche und die dortige Ackernutzung zurückzuführen. Auch die Laborergebnisse des pH-Wertes (Kapitel 4.1.2.2) geben keine Erklärung für diesen deutlichen Standortunterschied, der durch die Pflanzen dargestellt wird.

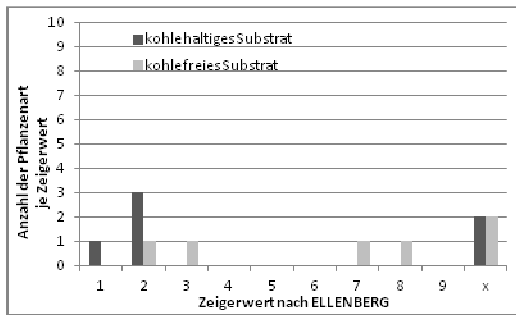


Abb. 4-21 Verteilung der Zeigerwerte der Reaktionszahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Jänschwalde

Die mittlere Stickstoffzahl ist auf beiden Standorten deutlich unterschiedlich (Abb. 4-19). Auf der Kohlfäche beträgt sie 2, was auf einen stickstoffarmen Standort hinweist. Auf der Referenzfläche liegt sie bei 5, was nach Ellenberg et al. (2001) als mäßig stickstoffreicher Standort angesehen werden kann. Aus den Verteilungen wird ersichtlich (Abb. 4-22), dass es auf der Kohlfäche einen Schwerpunkt der Werte im stickstoffarmen Bereich gibt. Auf der Referenzfläche hingegen verteilen sich die Werte gleichmäßig zwischen 2 und 8. Ebenso wie bei der Reaktionszahl ist auch bei der Stickstoffzahl diese breite Streuung nicht ohne weiteres erklärbar. Die Laborergebnisse des Bodens zeigen im mineralisierten Stickstoff (N_{min}) eine breite Streuung, die hier möglicherweise durch die Pflanzen wiedergegeben wird.

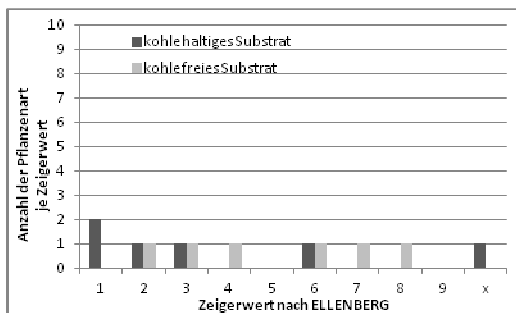


Abb. 4-22 Verteilung der Zeigerwerte der Stickstoffzahl auf der Kohle- und der Referenzfläche bei Jänschwalde

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die beiden Standorte hinsichtlich der Indikatoren Lichtzahl, Temperaturzahl, Kontinentalitätszahl und Feuchtezahl sehr ähnlich sind. Einzig bei der Reaktionszahl und der Stickstoffzahl weist die Referenzfläche deutlich unterschiedliche Werte zur Kohlfäche auf. Die geringe Artenzahl auf beiden Flächen bewirkt

zusätzlich, dass Ausreißer den Gesamteindruck des Standortes stärker beeinflussen.

Beide Standorte sind eher mäßig feucht bis trocken. Auf der Kohlfäche herrscht ein saures Milieu vor, während auf der Referenzfläche die Verhältnisse, welche durch die Laborergebnisse des Bodens auf Basis der kartierten Pflanzen nicht eindeutig wiedergegeben werden. Hinsichtlich ihrer Stickstoffversorgung ist die Kohlfäche als stickstoffarm zu bezeichnen auf der Referenzfläche ist dies nicht eindeutig.

4.2.2.3 Forstliche Rekultivierungsflächen

Die beiden Standorte der forstlichen Rekultivierung lassen sich schwer hinsichtlich der Zeigerwerte der Pflanzen vergleichen. Beide Standorte werden nur beschrieben. Der Standort Tröbitz (kohlehaltig) ist artenarm und zusätzlich existieren für *Quercus rubra* keine Zeigerwerte. Deshalb wird für diesen Standort auf eine Ermittlung der mittleren Zeigerwerte und Spannweiten verzichtet und die Werte nur verbal beschrieben. Für den Standort Schipkau (kohlefrei) werden mittlere Werte und Spannweiten angegeben. Der Indikator Lichtzahl ist auf der Kohlfäche nicht beschreibbar, da *Tilia cordata* als Baumart Licht bevorzugt, und der Zeigerwert nur für den Jungwuchs gilt. Als zweites ist *Urtica dioica* indifferent gegenüber diesem Indikator.

Die Referenzfläche in Schipkau hat einen mittleren Wert von 6, d.h. der Schwerpunkt liegt im Halbschatten-Halblichtbereich. Die Spannweite liegt zwischen den Werten 4 und 7 (Abb. 1, Anhang, S.7). Die Temperaturzahl ist für den Standort Tröbitz ebenfalls nicht aussagekräftig, da wiederum nur *Tilia cordata* einen Wert aufweist. Dieser liegt bei 5.

Die mittlere Temperaturzahl auf der Referenzfläche beträgt 6 bei einer Spannweite von 5 bis 7. Allerdings verhält sich hier die Hälfte aller Pflanzen indifferent gegenüber diesem Indikator (Abb. 2, Anhang, S.7). Insgesamt deuten die Werte auf einen mäßig warmen Standort im planaren bis collinen Bereich hin.

Die Kontinentalitätszahl für *Tilia cordata* beträgt 4. Sie ist die einzige, welche für den Standort Tröbitz angegeben werden kann. Die mittlere Kontinentalitätszahl der Referenzfläche beträgt ebenfalls 4, wobei auch hier einige Pflanzen als indifferent eingestuft werden (Abb. 3, Anhang, S.8). Die Verteilung zeigt ein eindeutiges Maximum bei dem Wert 4 mit den Ausnahmen *Quercus petraea*

(Wert 2) und *Pinus sylvestris* (Wert 7). Der Standort müsste danach als damit als subozeanisch eingestuft werden.

Die Feuchtezahl der für den Standort Tröbitz vorkommenden Pflanzen liegt bei 5 bis 6. Für den Standort Schipkau liegt die mittlere Feuchtezahl bei 5. Die Verteilung (Abb. 4-23) zeigt eine deutliche Häufung um diesen Wert. Die Spannweite liegt zwischen den Werten 4 und 6. Eine hohe Anzahl an Pflanzen ist aber nach Ellenberg et al. (2001) indifferent. Nach der vorherrschenden Vegetation ist der Standort als mittelfeucht einzustufen, da es keine eindeutigen Trockenheitszeiger noch Feuchtezeiger gibt.

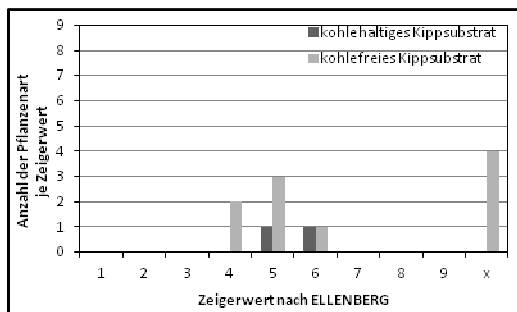


Abb. 4-23 Verteilung der Zeigerwerte der Feuchtezahl auf der Kohlefläche am Standort Tröbitz und der Referenzfläche am Standort Schipkau

Die Analyse der Zeigerwerte aller Pflanzen für die Reaktionszahl auf der Kohlefläche in Tröbitz als auch auf der Referenzfläche in Schipkau ergibt, dass keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können. Der überwiegende Teil verhält sich indifferent gegenüber diesem Indikator (Abb. 4-24).

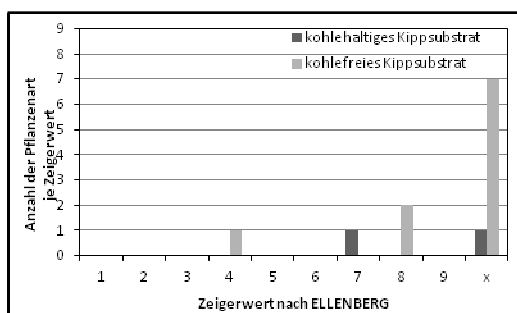


Abb. 4-24 Verteilung der Zeigerwerte der Reaktionszahl auf der Kohlefläche am Standort Tröbitz und der Referenzfläche am Standort Schipkau

Die Stickstoffzahl ist schwierig zu analysieren. Auf der Kohlefläche in Tröbitz wurde neben der mäßig

stickstoffreich anzeigenden *Tilia cordata* die übermäßig stickstoffreich anzeigende *Urtica dioica* vorgefunden. Da diese aber nur sporadisch und nicht flächendeckend vorkommt, kann dieser Zeiger als nur für kleine Flächen und punktuellen Eintrag repräsentativ gelten. Auf der Referenzfläche liegt eine breite Streuung von Stickstoffarmut anzeigenden Pflanzen bis hin zu stickstoffreich anzeigenden Pflanzen vor. Ein hoher Anteil der Pflanzen ist dazu indifferent gegenüber der Stickstoffversorgung.

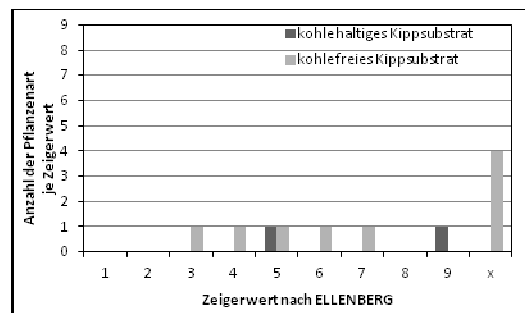


Abb. 4-25 Verteilung der Zeigerwerte der Stickstoffzahl auf der Kohlefläche am Standort Tröbitz und der Referenzfläche am Standort Schipkau

Zusammenfassend ist der Standort Tröbitz nicht hinreichend durch die Zeigerwerte einzustufen und durch die geringe Anzahl an Arten auch nicht vergleichbar mit der Referenzfläche. Die Referenzfläche lässt sich als mittelfeuchter Standort beschreiben mit einer nicht eindeutigen Stickstoffversorgung. Auch eine eindeutige Beschreibung der Reaktionsverhältnisse ist auf Basis der kartierten Pflanzen nicht vorzunehmen.

4.2.2.4 Landwirtschaftliche Rekultivierungsflächen

Die landwirtschaftlich genutzten Standorte sind hinsichtlich ihrer derzeitigen Nutzung unterschiedlich. Die kohlehaltige Fläche in Grünwalde wird als Grünland extensiv genutzt. Sie unterlag aber mehreren Nutzungswechseln in den letzten Jahren. Die kohlefreie Fläche in Plessa wurde in den letzten Jahren kontinuierlich mit Luzerne bestellt (Kap.2.5). Die mittlere Lichtzahl der Kohlefläche beträgt 7, bei einer geringen Spannweite von 7 bis 8. Die Referenzfläche hat einen ähnlichen Median mit einem Wert von 7, bei einer Spannweite von 5 bis 8 (Abb. 4-26). Die größere Spannweite der

Referenzfläche wird durch *Hieracium lachenalii* hervorgerufen. Der Schwerpunkt der Werte liegt bei 7 und 8. Die Standorte sind daher weitestgehend gleich mit Halblicht- und Lichtpflanzen bestanden. Die Standorte weisen auch für die Temperaturzahl gleiche Werte auf (Abb. 4-26). Die mittleren Werte liegen bei 6, bei einer Spannweite von 5 bis 6.

Hervorzuheben ist jedoch, dass ein Großteil der Pflanzen auf der Kohlefläche sich indifferent gegenüber diesem Indikator verhält (siehe Abb. 2, Anhang, S.10). Die Standorte sind als mäßig warm bis warm zu bezeichnen.

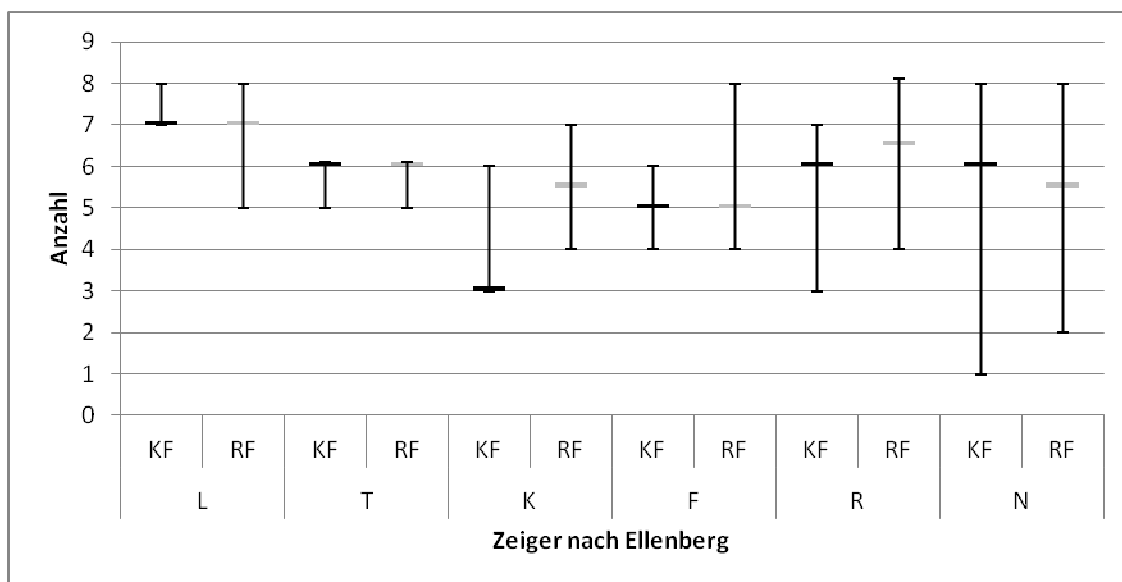


Abb. 4-26 Median, Maximum und Minimum der Zeigerwerte für alle Indikatoren auf Kohle- und Referenzfläche für die landwirtschaftlich genutzten Standorte Grünewalde und Plessa

Die Verteilung der Kontinentalitätszahlen ist auf beiden Standorten sehr unterschiedlich ausgeprägt (Abb. 4-26). Die Kohlefläche hat einen mittleren Wert von 3 und nur *Medicago sativa* weist einen Wert von 6 auf. Alle übrigen Pflanzen sind indifferent gegenüber diesem Indikator.

Die übrigen Zeigerwerte der Pflanzen verteilen sich gleichmäßig auf die Werte von 4 bis 7.

Die mittlere Feuchtezahl beider Standorte beträgt 5. Die Spannweiten sehen unterschiedlich aus, wobei die größere Spannweite der Referenzfläche einzig durch *Filipendula ulmaria* zustande kommt (Abb. 4-27). Der Schwerpunkt der Werte liegt sowohl auf der Kohle- als auch auf der Referenzfläche zwischen 4 und 6. Damit sind beide Standorte als überwiegend frisch anzusehen.

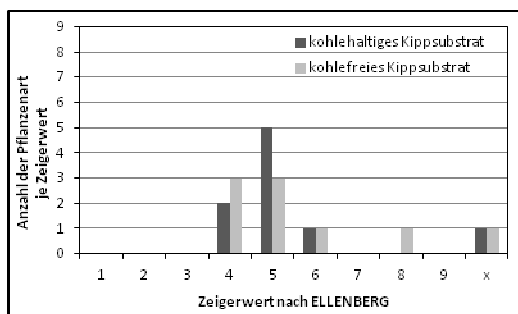


Abb. 4-27 Verteilung der Zeigerwerte der Feuchtezahl auf der Kohlefläche am Standort Grünewalde und der Referenzfläche am Standort Plessa

Die Pflanzen der Referenzfläche weisen einen mittleren Wert von 5,5 auf, wobei mehr als die Hälfte der Pflanzen indifferent gegenüber diesem Indikator

Die Bereiche der Reaktionszahlen sind geringfügig verschoben zwischen den beiden Standorten. Die Kohlefläche weist einen mittleren Wert von 6 auf, bei einer Spannweite von 3 bis 7. Die große Spannweite entsteht durch *Festuca ovina* mit einem Wert von 3. Der Schwerpunkt liegt bei 6 bis 7. Hinzu kommt eine große Anzahl an indifferenten Pflanzen (Abb. 4-28). Der Kohlestandort ist anhand der Zeigerwerte als schwach sauer einzustufen. Der mittlere Wert des Referenzstandortes beträgt 6,5 mit einer Spannweite von 4 bis 8. Es ist eine gleichmäßige Verteilung der Zeigerwerte in Abbildung 4-28 erkennbar. Auch auf dieser Fläche ist eine große Anzahl der Pflanzen

indifferent. Eine eindeutige Einordnung ist aufgrund der gleichmäßigen Verteilung nicht möglich.

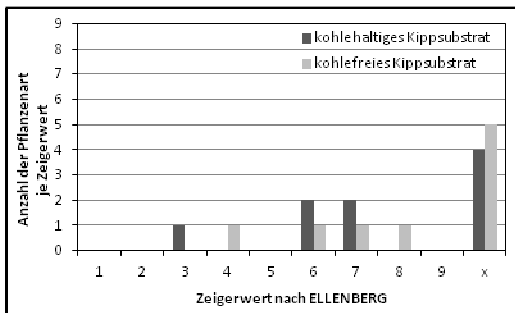


Abb. 4-28 Verteilung der Zeigerwerte der Reaktionszahl auf der Kohlefläche am Standort Grünewalde und der Referenzfläche am Standort Plessa

Die Zeigerwerte der Stickstoffzahl beider Standorte weisen große Spannweiten auf. Die Kohlefläche hat eine Spannweite von 1 bis 8 bei einem mittleren Wert von 6. Es ist in Abbildung 4-29 zu erkennen, dass der Schwerpunkt der Verteilung zwischen den Werten 5 und 8 liegt. Die Ausnahme bildet *Festuca ovina* mit einem Wert von 1. Der Standort kann aufgrund des Schwerpunktes als mäßig stickstoffreich bis stickstoffreich eingestuft werden. Der Referenzstandort weist ein uneinheitlicheres Bild in der Verteilung der Zeigerwerte auf. Die Spannweite liegt zwischen den Werten 2 und 8, bei einem mittleren Wert von 5,5. Es ist eine relativ gleichmäßige Verteilung der Zeigerwerte zwischen 4 und 8 zu erkennen (Abb. 4-29). Eine Ausnahme bildet *Hieracium lachenalii* mit einem Wert von 2. Der Standort ist aufgrund der Verteilung hinsichtlich einer Stickstoffversorgung schwer einzuordnen. Die Spannweite reicht von mäßig

stickstoffreich/stickstoffärmer bis zur Anwesenheit von ausgesprochenen Stickstoffzeigern. *Hieracium lachenalii* zeigt sogar Stickstoffarmut an.

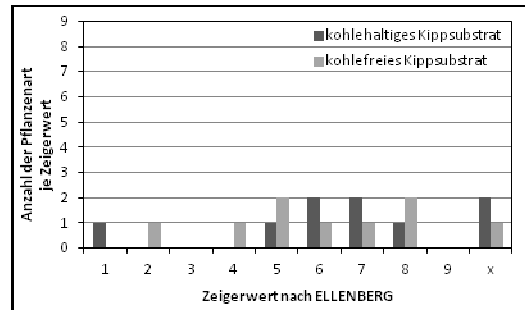


Abb. 4-29 Verteilung der Zeigerwerte der Stickstoffzahl auf der Kohlefläche am Standort Grünewalde und der Referenzfläche am Standort Plessa

Zusammenfassend sind die beiden Standorte hinsichtlich ihrer Eigenschaften aufgrund der vorgefundenen Zeigerwerte ähnlich. Die Referenzfläche weist allerdings für die Indikatoren Reaktionszahl und Stickstoffzahl sehr breite gleichmäßige Verteilungen auf, so dass sie dadurch nicht eindeutig beschrieben werden kann.

Die Kohlefläche in Grünewalde kann als frischer, schwachsaurer Standort mit mäßiger bis reicher Stickstoffversorgung angesprochen werden. Die Referenzfläche ist ebenfalls ein frischer, aber kalkhaltiger Standort mit einer basischen Bodenreaktion (Kap.4.1.2.4), welche durch die Pflanzen nicht eindeutig wiedergegeben wird. Die Pflanzen zeigen ein unsicheres Bild zur Einordnung der Stickstoffversorgung.

5. Synoptische Betrachtung und Diskussion

5.1 Bodenkundliche Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Standorte zusammengefasst und gemeinsam analysiert. Dabei wird versucht Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten und allgemeine Aussagen über die Wirkung von Kohle auf Böden und Bodenfunktionen abzuleiten. Als Übersicht dient dazu die Tabelle 5-1. Hier werden die Signifikanz und Richtung des Unterschiedes zwischen Kohle und Referenzfläche dargestellt.

Zuerst wird der organische Kohlenstoff betrachtet. Es kann festgestellt werden, dass auf allen Flächen ein signifikanter Unterschied zwischen den Kohleflächen und den Referenzflächen vorhanden ist. Die Kohleflächen weisen dabei erwartungsgemäß deutlich mehr organischen Kohlenstoff auf (Abb. 5-1). Es kann daraus, wie in den einzelnen Kapiteln bereits beschrieben, abgeleitet werden, dass die Differenz zwischen Kohle- und Referenzfläche als Kohlen-C im Boden zu deuten ist, da von einer ähnlichen Menge an Humus auf beiden Flächen ausgegangen werden kann. Abgesehen von der Kohlelagerfläche, wo eine intensive Vermischung zwischen Oberboden

und Kohle stattgefunden hat und somit deutlich mehr Kohle auf der Fläche zu finden ist, weisen alle anderen Kohlestandorte zwischen 3 und 5 % mehr organischen Kohlenstoff im Boden auf als ihre Referenzflächen. Diese Ergebnisse werden auch von Schulz & Glaser (2012), Liu et al. (2012), Weiß et al. (2013) für verschiedene Versuchsvarianten erzielt.

Es liegen keine Daten über die Menge des Eintrages vor, deshalb kann an dieser Stelle nichts über die Umwandlung und den Verlust an Kohlen-C über die Zeit geschlossen werden. Es ist jedoch feststellbar, dass auch nach etwa 150 Jahren auf der Köhlereifläche signifikant mehr Kohlenstoff im Boden akkumuliert vorliegt als auf der vergleichbaren Referenzfläche. Somit liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die im Boden akkumulierte Kohle als relativ stabil angesehen werden kann.

Für den gelösten organischen Kohlenstoff gilt zwar, dass die Kohleflächen höhere Werte aufweisen, diese Unterschiede aber nicht auf allen Flächen signifikant verschieden von den Gehalten der Referenzfläche sind.

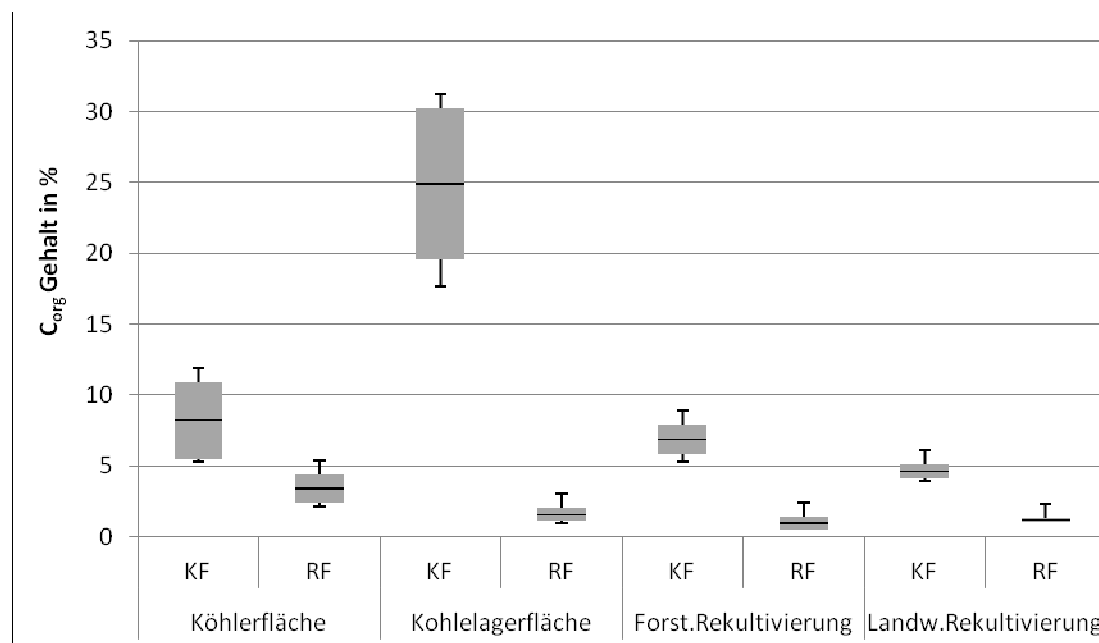


Abb. 5-1 Gesamtkohlenstoffgehalt der einzelnen Flächen im Vergleich, Mittelwert (schwarze Linie), Standardabweichung (+/-, Box) sowie Minimum (Zeiger nach unten) und Maximum (Zeiger nach oben)

Ähnlich wie der organische Kohlenstoff ist auch der Gesamtstickstoffgehalt auf allen Kohleflächen signifikant höher. Dies wird zusätzlich durch Weiß et

al. (2013) sowie Steiner et al. (2008) bei Versuchen mit kohlehaltigem Material zur Bodenverbesserung bestätigt. Schulz & Glaser (2012) konnten diesen

Zusammenhang nicht feststellen, auch Liu et al. (2012) fanden nur schwache Anstiege vom Gesamtstickstoff bei Biokohleeintrag. Unterschiede ergeben sich auf den untersuchten Standorten beim mineralisierten Stickstoff. Hier zeigen nur die beiden Rekultivierungsflächen signifikante Unterschiede, wobei die Richtung unterschiedlich ist. Dies ist möglicherweise auf die Nutzungsunterschiede zurückzuführen, da auf den landwirtschaftlichen Flächen mit unterschiedlichen Stoffeinträgen und Austrägen, je nach Fruchtart und Düngung, ausgegangen werden muss. Es ist damit keine eindeutige allgemeine Aussage zum mineralisierten Stickstoff zu treffen. Das C/N-Verhältnis wird auf allen Standorten größer, was sich auf die Mineralisation des Stickstoffs und die Pflanzenversorgung negativ auswirkt. Über solch eine Aufweitung des C/N-Verhältnisses berichten auch Katzur et al. (2003) und Steiner et al. (2008).

Die pH-Werte der Flächen sind untereinander nicht direkt vergleichbar, da sich durch die unterschiedliche Nutzungsgeschichte sehr unterschiedliche Werte eingestellt haben. Die Unterschiede zwischen Kohle- und Referenzfläche sind zwar signifikant, weisen jedoch nicht eindeutig in eine Richtung, so dass auch hier keine allgemeine Aussage formuliert werden kann. Eine eindeutige Anhebung des pH-Wertes, wie sie Alburquerque et al. (2013) bei ihren Versuchen feststellten ist hier nicht gegeben.

Die Lagerungsdichte ist auf fast allen kohlebeeinflussten Standorten geringer. Dieser Trend kann möglicherweise auf den höheren Anteil des organischen Kohlenstoffs zurückgeführt werden. Dies wird auch durch die Literatur unterstützt, z.B. Alburquerque et al. (2013).

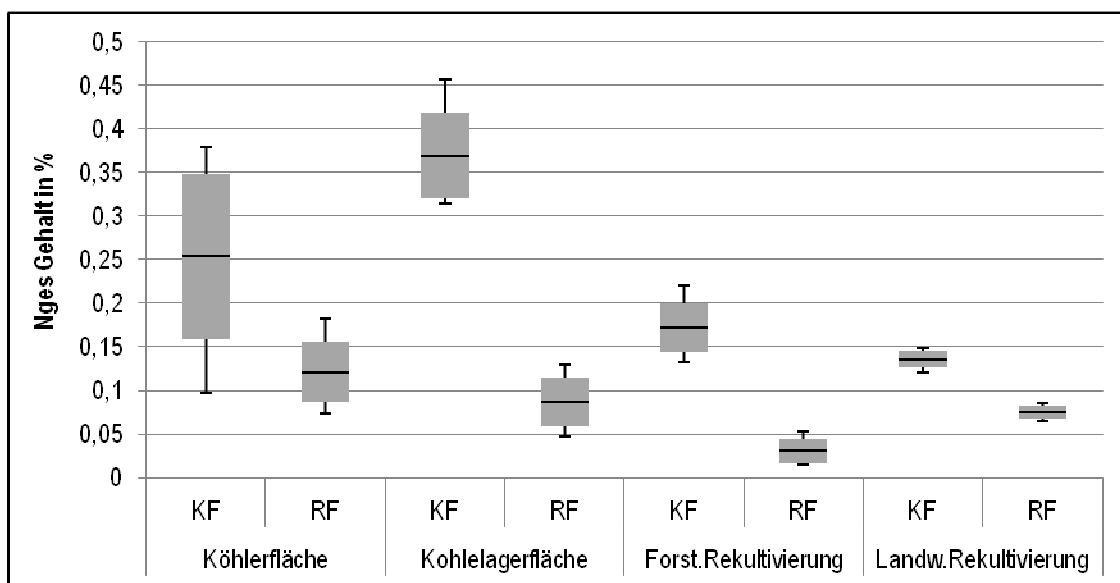


Abb. 5-2 Gesamtstickstoffgehalt der einzelnen Flächen im Vergleich, Mittelwert (schwarze Linie), Standardabweichung (+/-, Box) sowie Minimum (Zeiger nach unten) und Maximum (Zeiger nach oben)

Die Analyse der elektrischen Leitfähigkeit ergibt zwar überwiegend signifikante Unterschiede auf den Standorten. Dieser ist aber ungerichtet, so weist die landwirtschaftlich genutzte Rekultivierungsfläche höhere Werte als die kohlefreie Fläche auf. Die Ursache dafür ist auf die hohen Karbonatgehalte zurückzuführen (Kap.4.1.2.4). Alle anderen Standorte zeigen jeweils auf der Kohlefläche höhere Leitfähigkeitswerte. Für diesen Parameter ist ein Trend zu höheren Werten auf kohlehaltigen Flächen erkennbar. Dieser Aspekt wird auch in der Literatur zu potentieller Verbesserung des Bodens durch

(Bio)kohle beschrieben (DeLuca et al., 2009, Alburquerque et al., 2013). Eine gesicherte eindeutige Aussage ist aufgrund der Umkehrung des Trends auf den landwirtschaftlichen Flächen hier nicht möglich.

Die Kationenaustauschkapazitäten, sowohl effektiv (KAK_{eff}) als auch potentiell (KAK_{pot}), zeigen auf allen Flächen einen Trend zu höheren Werten auf der Kohlefläche. Diese Unterschiede sind statistisch signifikant. Einzig die landwirtschaftlichen Rekultivierungsflächen zeigen in der effektiven Austauschkapazität ein umgekehrtes Verhalten

(siehe Kap.4.1.2.4). Die Aussagefähigkeit von KAK_{eff} zu kohlebedingter Erhöhung der Austauschkapazität ist dadurch eingeschränkt. Die Basensättigung verhält sich indifferent über alle Standorte, neben den höheren Werten auf den Kohleflächen der Standorte Kohlelager und der forstlichen Rekultivierung, weist die Köhlereifläche keine erkennbaren Unterschiede im Vergleich zur Referenzfläche auf. Die Standorte der landwirtschaftlichen Rekultivierung zeigen hinsichtlich der Basensättigung, wie auch schon für die KAK_{eff} diskutiert, ein umgekehrtes Verhalten. Das Ergebnis der hier untersuchten Standorte lässt sich mit ähnlichen Ergebnissen zur KAK aus der Literatur vergleichen. Liu et al. (2012) stellten auf Versuchsflächen in Brandenburg mit Mischungen aus Biokohle und Kompost ebenso Erhöhungen der Austauschkapazitäten fest. Auch Katur & Böcker (2007) sowie Katur et al. (2003) konnten positive Auswirkungen auf die KAK beim Einsatz von N-modifizierter Weichbraunkohle als Bodenverbesserungsmittel zur Rekultivierung humusfreier Kippenböden feststellen. Schulz & Glaser (2012) hingegen konnten bei ihren Versuchen keine signifikante Erhöhung durch Biokohle nachweisen. Die Unterschiede der Anionen-Gehalte in den Wasserextrakten der jeweiligen Standorte sind sehr unterschiedlich, sowohl in ihrer Signifikanz als auch in ihrer Richtung. Überwiegend werden auf der Kohlefläche höhere Gehalte an Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} festgestellt. Der Gehalt an NH_4^+ ist dagegen meist niedriger. Für diese Parameter ist eine allgemeine Aussage nur für Schwefel eindeutig zu treffen, welcher auf allen vier Standorten höhere Werte auf der Kohlefläche aufweist. Die Kationen in der Wasserlösung zeigen ebenfalls indifferente Verhaltensweisen. Es ist für keines der untersuchten Elemente eine eindeutige Aussage über alle Standorte zu treffen. Die Unterschiede sind zum Teil nicht signifikant bzw. für die verschiedenen Untersuchungsgebiete gegenläufig. Für Magnesium, Natrium und Kalzium ist ein leichter Trend zu höheren Gehalten auf Kohleflächen erkennbar. Dieser ist aber nicht statistisch gesichert. Für die Nährstoffe Phosphor, austauschbares Kalium und Magnesium sind ebenfalls keine allgemeinen Aussagen über alle Standorte möglich, da auch hier

kein eindeutig gerichteter Unterschied über alle Standorte zu erkennen ist. Für Magnesium ist ein Trend hinsichtlich höherer Werte auf kohlehaltigen Flächen erkennbar. Dieses berichten auch Liu et al. (2012).

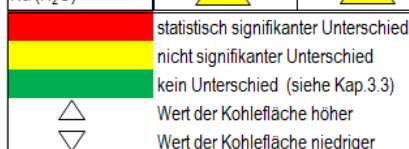
Zusammenfassend ist festzustellen, dass nicht für alle Parameter signifikante Ergebnisse über alle Standorte ermittelt werden konnten. Signifikante Ergebnisse auf allen vier untersuchten Standorten sind höhere C_{org} - und N_{ges} -Gehalte sowie höhere potentielle Kationenaustauschkapazitäten.

Gerichtete Trends lassen sich für die Lagerungsdichte, elektrische Leitfähigkeit, SO_4^{2-} , N_{min} , austauschbares Mg, DOC, C/N-Verhältnis sowie Na^+ und Mg^{2+} im Wasserextrakt erkennen. Diese und die anderen Parameter bedürfen aber weiterer Untersuchungen.

Die erzielten Ergebnisse werden zum Teil durch die Literatur bestätigt, wobei für verschiedene Parameter, z.B. elektrische Leitfähigkeit und Kationenaustauschkapazität auch in der Literatur unterschiedliche Ergebnisse berichtet werden. Dabei ist anzumerken, dass die in der Literatur beschriebenen Wirkungen zumeist auf zeitlich begrenzten Untersuchungsreihen basieren, welche einen Eintrag von kohlehaltigem Material oder Mischungen aus Biokohle und Humusstoffen oder Düngemitteln untersuchen. Die hier untersuchten Standorte sind hingegen alle durch einen einmaligen Eintrag und einen längeren Verweilzeitraum der Kohle im Boden gekennzeichnet. Trotzdem zeigen sich Parallelen zu den zitierten Untersuchungen.

Der Standort Jänschwalde, welcher den ältesten Kohleeintrag aufweist, zeigt die geringsten Unterschiede zur Vergleichsfläche. Dies ist zum einen auf den hier durchgeführten Kahlschlag und möglicherweise auf das Alter und den lokal begrenzten Kohleeintrag zurückzuführen. Die teilweise deutlich abweichenden Ergebnisse der landwirtschaftlichen Rekultivierungsflächen sind wahrscheinlich durch die Nutzungs- und Bearbeitungsunterschiede zwischen den beiden Standorten zu erklären.

Tab. 5-1 Unterschiede, Richtung des Unterschiedes und Signifikanz des Parametervergleichs zwischen Kohle- und Referenzfläche

Parameter	Köhlereifläche	Kohlelagerfläche	Forstliche Rekultivierung	Landwirtschaftl. Rekultivierung
NH ₄ -N	▲	▲	●	●
NO ₃	●	▲	▲	▼
N _{min}	▲	▲	▲	▼
pH(CaCl ₂)	▼	▲	▲	▼
EC	▲	▲	▲	▼
Cl (H ₂ O)	▲	▲	●	▲
NO ₃ -N (H ₂ O)	▲	▼	▲	●
SO ₄ (H ₂ O)	▲	▲	▲	▲
NH ₄ -N (H ₂ O)	▲	▼	●	▼
ph (H ₂ O)	▼	●	▲	▼
DOC	▲	▲	▲	▲
C _{org}	▲	▲	▲	▲
N _{ges}	▲	▲	▲	▲
Carbonat	●	●	▼	▼
Dichte	●	▼	▼	▼
PO ₄ (H ₂ O)	●	▼	▲	▲
Austausch-K	●	▲	▲	▼
Austausch-Mg	●	▲	▲	▲
KAK _{eff}	▲	▲	▲	▼
KAK _{pot}	▲	▲	▲	▲
BS	●	▲	▲	▼
Al (H ₂ O)	▲	▼	▼	▲
Ca (H ₂ O)	●	▲	▲	▼
Fe (H ₂ O)	▲	▲	●	▲
K (H ₂ O)	●	▲	▼	▼
Mg (H ₂ O)	●	▲	▲	▲
Mn (H ₂ O)	▼	▼	●	●
Na (H ₂ O)	▲	▲	▲	▲
 <p> statistisch signifikanter Unterschied nicht signifikanter Unterschied kein Unterschied (siehe Kap.3.3) Wert der Kohlefläche höher Wert der Kohlefläche niedriger </p>				

Die Unterschiede zwischen den Vergleichsflächen sollen abschließend hinsichtlich der Auswirkungen auf die Bodenfunktionen diskutiert werden. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5-2 zusammengefasst und visualisiert.

Die natürliche Ertragsfunktion kann durch die festgestellten Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte gefördert werden. Die Festlegung des Stickstoffs, hier als erhöhter Gehalt des Gesamtstickstoffs wiedergegeben, kann dabei möglicherweise als Pool für eine langfristige Abgabe des Stickstoffs fungieren. Der mineralisierte Stickstoff ist auf den meisten Kohleflächen ebenfalls höher als auf den Referenzflächen. Das gegenläufige Verhalten auf den landwirtschaftlichen Rekultivierungsflächen ist wahrscheinlich auf Düngung und Bodenbearbeitung zurückzuführen. Im Wesentlichen werden durch die Anwesenheit von Kohle im Boden die Mengen der Hauptnährelemente Mg, S und P erhöht und die effektive Lagerungsdichte verringert. Dadurch wird die natürliche Ertragsfunktion ebenfalls gestärkt.

Die Filterfunktion für Schadstoffe wird durch die reaktive Oberfläche der Kohle und die Erhöhung der organischen Bodensubstanz ebenfalls gestärkt. Dies ist bereits in früheren Untersuchungen, z.B. durch Hille & Ouden (2005) oder Lair et al. (2006) beschrieben. Die Steigerung der Sorption und Festlegung von Schadstoffen und phytotoxischen Stoffen wirkt sich somit positiv auf die land- und forstwirtschaftliche Nutzung aus.

Die Verringerung der Trockenrohdichte bzw. effektiven Lagerungsdichte und die hier festgestellte Erhöhung der KAK_{pot} und des DOC sowie Festlegung des Stickstoffs durch den Eintrag von Kohle stärken die Funktion als Regler und Speicher, da es dadurch wahrscheinlich zu geringeren Austrägen von Stickstoff in das Grundwasser kommt. Negativ können sich die Zunahmen der gelösten Stoffe Cl, S, Mg, P und Na auswirken, da mit dem Sickerwasser möglicherweise mehr Stoffe ausgetragen werden und in das Grundwasser gelangen können.

Die Erhöhung des Stickstoffgehaltes hat möglicherweise negative Einflüsse auf die Lebensraumfunktion. Besonders an nährstoffarmen Standorten kann die vorhandene Vegetation in ihrer Zusammensetzung beeinflusst werden, z.B. durch Verdrängung von Nährstoffarmut liebenden Pflanzen.

Die potentielle Aufweitung des C/N-Verhältnisses beeinflusst die Funktionen Lebensraum und natürliche Ertragsfunktion, da sie zu einer geringeren

Mineralisierung von Stickstoff führt und damit zu einer schlechteren Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen und einer geringeren mikrobiellen Aktivität.

Zusammenfassend ist eine Verbesserung der Funktion als landwirtschaftlicher oder forstwirtschaftlicher Standort (natürliche Ertragsfunktion) erkennbar. Die Funktion als Speicher- und Reglermedium kann sich durch den Eintrag von Kohle ebenfalls verbessern. Negativ können sich hingegen die höheren Gehalte an gelösten Substanzen auswirken, da diese mit dem Sickerwasser ausgetragen und ins Grundwasser eingetragen werden können. Die Lebensraumfunktion dagegen kann nicht eindeutig verbessert werden. Abschließend bleibt festzustellen, dass die Literatur zeigt, dass ähnliche Ergebnisse durch den Einsatz von Biokohle erreicht werden können. Dabei ist die Verbesserung abhängig vom Ausgangsmaterial und der Herstellung der Kohle (Albuquerque et al., 2013, Sun & Lu, 2013). Darüber hinaus sind durch Mischungen und Kombinationen von Biokohle und Kompost oder Düngern ebenfalls gute bis bessere Ergebnisse als beim Einsatz von reiner Biokohle von u. a. von Schulz & Glaser (2012) und Liu et al. (2012) gezeigt worden. Der Vorteil des Einsatzes der Biokohle-Mischungen gegenüber den reinen Kompostgaben lag in der Stabilität des organischen Kohlenstoffgehaltes und der damit erwarteten länger andauernden positiven Wirkung (Liu et al., 2006).

Tab. 5-2 Wirkung von Kohle auf Bodeneigenschaften und daraus resultierende positive oder negative Beeinflussung der Bodenfunktionen

	Regler- und Speicherfunktion (Filter und Puffer)	Lebensraum für Flora und Fauna	Standort für land- und forstwirtschaftliche Nutzung (Ertragsfunktion)
TRD / LD _{eff}	+	+	+
N _{ges}	0	-(1)	+
C/N	0	-	-
pH(CaCl ₂)	0	0	0
EC	+ / -	+ / -	+ / -
KAK _{eff}	0	0	0
KAK _{pot}	+	+	+
wasserlös. Al	0	0	0
wasserlös. Ca ²⁺	0	0	0
wasserlös. Fe ³⁺	0	0	0
wasserlös. K ⁺	0	0	0
wasserlös. Mg ²⁺	-(2)	0	0
wasserlös. Mn ²⁺	0	0	0
wasserlös. Na ⁺	-(2)	0	0
wasserlös. NH ₄ -N	0	0	0
wasserlös. NO ₃ ⁻	0	0	0
wasserlös. Cl ⁻	-(2)	0	0
wasserlös. SO ₄ ²⁻	-(2)	0	0
wasserlös. DOC	+	+	0
N _{min}	0	-(1)	+
C _{org}	+	+	+
PO ₄	0	0	+
Austausch-K	0	0	+ / -
Austausch-Mg	+	0	+
+	positive Beeinflussung		
0	keine eindeutige Beeinflussung des Parameters durch Kohle / keine eindeutige Aussage möglich		
-	negative Beeinflussung		
(1)	Erhöhte Nährstoffgehalte bedingen eine Verdrängung Stickstoffarmut liebender Pflanzen und somit eine Veränderung von geschützten Standorten		
(2)	ggf. höhere Stofffrachten mit Sickerwasser		

5.2 Vegetationskundliche Untersuchungen

In der Gesamtbetrachtung der vegetationskundlichen Untersuchungsergebnisse wird versucht, allgemeingültige Aussagen zu Unterschieden in der Vegetation zu treffen und diese mit möglichen Auswirkungen der Kohle in Verbindung zu bringen. Als erstes ist festzustellen, dass die verschiedenen gewählten Standorte sich in ihrer Artenzusammensetzung deutlich unterscheiden. Dies ist durch die verschiedenartige Nutzungsgeschichte und derzeitige Nutzung zu erklären. Parallelen sind in den Zeigerwerten der Flächen zu erkennen, wobei die forstwirtschaftlich genutzte Rekultivierungsfläche mit Kohlebeeinflussung, wie oben beschrieben nicht ausreichend aussagekräftig ist, da hier nur für zwei Pflanzen Zeigerwerte ermittelt werden konnten. Die Mediane der Zeigerwerte für die einzelnen Flächen sind in Tabelle 5-3 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Rekultivierungsflächen in der Feuchtezahl und der Reaktionszahl Unterschiede zu den beiden anderen Standorten aufweisen, sowohl auf der Kohlefläche als auch auf der Referenzfläche. Die vegetationskundlichen Ergebnisse unterstützen damit die im Labor ermittelten Ergebnisse zu den pH-Werten. Zu der Feuchtezahl können an dieser Stelle keine gesicherten Aussagen getroffen werden, da keine Feuchtemessungen vorgenommen wurden. Es lassen sich nur hinsichtlich des Ausgangssubstrates, der geomorphologischen Lage und der Feldaufnahme mögliche Erklärungen finden. Die beiden Standorte Kohlelager und Köhlereifläche sind beide reine Sandstandorte ohne rezente Grundwassereinfluss oberhalb einer Tiefe von 1,2 m. Ebenso ist die Lage auf Sanderflächen eine Erklärung für die hier vorgefundenen, eher Trockenheit anzeigenden Indikatoren. Die Rekultivierungsstandorte sind durch ihr lehmigeres Ausgangsmaterial besser in der Lage, Wasser verfügbar zu halten. Am Referenzstandort Plessa

kommt zusätzlich die relative Nähe zum Seewaldsee, Floßgraben und Grünwalder Lauch als Erklärungsmöglichkeit für das Auftreten der höheren Feuchtezahlen hinzu. Die Pflanzen geben somit Anhaltspunkte über den mittleren Feuchtezustand.

Die Stickstoffzahl ist auf den Kohleflächen deutlich unterschiedlich zwischen den Rekultivierungsstandorten und der Kohlelagerfläche sowie der Köhlereifläche. Die Pflanzen geben an dieser Stelle nicht eindeutig die Ergebnisse der Laboranalysen wieder. Dort wurden auf den Standorten der Köhlerei und des Kohlelagers die höheren Gesamtstickstoffgehalte gemessen. Ebenso sind die Zeigerwerte nicht durch die N_{min} -Gehalte der Standorte erklärbar. Auf der Köhlereifläche ist eine mögliche Erklärung der massive Eingriff durch den Kahlschlag. Durch das Beharrungsvermögen der Pflanzen sind die Reste der Kiefernwaldvegetation noch vorhanden und es hat sich noch keine Folgevegetation gebildet, anders als auf der Referenzfläche, welche näher zu den landwirtschaftlich genutzten Standorten der Griebener Hochfläche liegt. Hier besteht jedoch noch weiterer Klärungsbedarf. Aufschluss könnten weitere Vegetationsaufnahmen zu anderen Zeitpunkten im Jahr geben. Auf der landwirtschaftlichen Rekultivierungsfläche wäre möglicherweise auch eine zusätzliche Stickstoff-Beprobung im Frühjahr aufschlussreich.

Die Unterschiede der Zeigerwerte auf den Referenzstandorten sind nur gering, einzig die Fläche in Britz weist einen anderen Wert auf. Aber auch hier werden die zum Teil deutlichen Unterschiede in den Stickstoffgehalten der Flächen nicht durch die Pflanzen wiedergegeben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Analyse der Zeigerwerte nicht alle im Labor erzielten Ergebnisse widerspiegeln. Unterschiede sind vor allem in der Stickstoffzahl zu erkennen. Um weitere Aussagen treffen zu können, wären zusätzliche Aufnahmen der Vegetation zu anderen Zeitpunkten im Jahr aufschlussreich.

Tab. 5-3 Median der Zeigerwerte aller Kohle- und Referenzflächen

Standort	L	T	K	F	R	N
Britz (KF)	8	6	3	3.5	4	2.5
Jänschwalde (KF)	7	5	3	4	2	2
Tröbitz (KF)	5	5	4	5.5	7	7
Grünwalde (KF)	7	6	3	5	6	6
Referenzflächen						
Britz (RF)	7.5	6	4	3	3.5	3

Jänschwalde (RF)	7	6	4	3.5	5	5
Schipkau (RF)	6	6	4	5	8	5
Plessa (RF)	7	6	5.5	5	6.5	5.5

6. Zusammenfassung

Böden stellen u. a. die Grundlage der Land- und Forstwirtschaft und Nahrungsmittelproduktion dar. Ihr Schutz und ihre nachhaltige Verbesserung für die Produktion ist ein wichtiges und aktuelles Thema. Dazu wird derzeit die Verbringung von technisch erzeugter Bio- bzw. Pflanzenkohle zur Bodenverbesserung diskutiert und untersucht. Aus diesem Grund initiierte das Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz das Projekt „Stabilität und Wirkung von Kohlen-C (Bio- und Pflanzenkohle) auf Böden“. Die Fragestellung war, ob und wie sich Kohle auf Böden hinsichtlich der Veränderung bzw. der Verbesserung von Bodeneigenschaften auswirkt. Es sollte untersucht werden, wie sich die zeitliche Stabilität von Pflanzenkohle verhält. Um die Stabilität der Wirkung eines Kohleeintrags beurteilen zu können, sind Einträge mit fossilem Kohlenmaterial analysiert worden, da Standorte mit aktuellen Pflanzen- und Biokohleeinsatz nicht das entsprechende Alter aufweisen. Eine Vergleichbarkeit zwischen fossiler Kohle und technogener Pflanzenkohle ist dabei gegeben.

Zusätzlich wurden Vegetationsaufnahmen durchgeführt, welche zeigen sollten, ob sich der Eintrag von Kohle im Bewuchs widerspiegelt. Dies ist mit Hilfe der Analyse der Zeigerwerte von Ellenberg et al. (2001) durchgeführt worden.

Als Standorte für die Untersuchung wurden vier Flächen mit jeweils unterschiedlichem Kohleeintragspfad und vier dazu vergleichbare Referenzflächen gewählt. Die Standorte unterscheiden sich außerdem hinsichtlich des Zeitpunktes bzw. Zeitraumes des Kohleeintrages. Der Standort Köhlereifläche bei Jänschwalde ist mit etwa 100 bis 150 Jahren der älteste. Die Standorte der landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Rekultivierung sind jeweils etwa 50 – 60 Jahre alt. Als jüngster Standort ist ein Kohlelagerplatz bei Britz untersucht worden (etwa 20-30 Jahre alt).

Es zeigte sich eine signifikante Erhöhung der Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalte auf den Kohlenflächen. Eine Erhöhung der mineralisierten Stickstoffgehalte war ebenfalls teilweise feststellbar. Außerdem waren die Gehalte der Makronährstoffe Magnesium, Schwefel und

Phosphor, die KAK_{pot} sowie die elektrische Leitfähigkeit gegenüber der Referenzfläche überwiegend erhöht. Eine Verringerung der Lagerungsdichten ist durch die Kohle an den verschiedenen Standorten ebenfalls feststellbar.

Diese Veränderungen lassen den Schluss zu, dass der historische Eintrag von Kohle die Funktion als land- und forstwirtschaftlicher Standort verbessert hat. Ebenso werden durch die Erhöhung des organischen Kohlenstoffs die Reglungs- und Filterfunktion des Bodens gestärkt, da sich durch die von der Kohle ausgehenden reaktiven Oberflächen Möglichkeiten zur Sorption von u.a. Schadstoffen ergeben. Die Erhöhung der Mengen gelöster Stoffe hingegen kann zu einer negativen Beeinflussung führen, da die Stoffe durch das Sickerwasser ausgetragen werden können. Die Langfristigkeit der Wirkung zeigt sich darin, dass die Ergebnisse auf nahezu allen Standorten ersichtlich waren. Die Unterschiede der Köhlereifläche gegenüber den anderen Flächen sind durch den vorgenommenen Kahlschlag des Kiefernwaldes und die anschließende freie Sukzession bedingt. Trotzdem zeigte auch dieser Standort ein ähnliches Verhalten hinsichtlich der Gesamtgehalte von Kohlenstoff und Gesamtstickstoff. Die übrigen Ergebnisse sind nicht in der statistischen Signifikanz ersichtlich, was einerseits auf das Alter des Kohleeintrages zurückzuführen ist und andererseits auf den Kahlschlag.

Die Pflanzenaufnahmen und Zeigerwertanalyse zeigten keine großen Unterschiede zwischen den Kohle- und Referenzflächen. Die sich ergebenden Unterschiede sind auf Nutzungsveränderungen (Kahlschlag) zurückzuführen. Außerdem sind mögliche Unterschiede vor allem auf der landwirtschaftlichen Rekultivierungsfläche durch Nutzung und Pestizideinsatz unterdrückt bzw. überlagert. Um weitere Aussagen treffen zu können und zu überprüfen, sind zusätzliche Aufnahmen zu verschiedenen Jahreszeiten anzustreben.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine eindeutige Tendenz hinsichtlich der Verbesserung der landwirtschaftlichen Nutzungsfunktion beim Einsatz von (Pflanzen-)Kohle. Die angesprochene Vergleichbarkeit von fossiler und technogener Kohle

ist in soweit gegeben, dass die an den Standorten erzielten Ergebnisse durch die Literatur zur Biokohleapplikation ebenfalls belegt werden. Die erzielte Wirkung der Biokohle ist aber abhängig von der Herstellung und dem Ausgangsmaterial, deshalb sind in der Literatur unterschiedlichste Ergebnisse zu finden.

Das Spannungsfeld Biokohle / Kompost kann durch dieses Projekt dahingehend analysiert werden, dass durch den Einsatz von Pflanzenkohle die Kohlenstoffgehalte im Boden langfristiger angehoben werden können, wie es auch Liu et al. (2012)

vermuten. Die verschiedenen Versuche in der Literatur zeigen aber, dass ein kombinierter Einsatz von Pflanzenkohle und Kompost oder Dünger bessere Ergebnisse erzielt als der Einsatz reiner Pflanzenkohle.

Um die Aussagen weiter zu verbessern, besonders die Effekte von Nutzung und Düngung auf landwirtschaftlichen Flächen herauszuarbeiten, sind weitergehende Untersuchungen auf Ackerflächen notwendig.

7. Literatur

- Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005):** Bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Aufl., Hannover
- Alburquerque, J.A., Calero, J.M., Barrón, V., Torrent, J., del Campillo, M.C., Gallardo, A., Villar, R. (2013):** Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 176:1-10
- Bahrenberg, G., Giese, E., Nipper, J. (1999):** Statistische Methoden der Geographie, Band 1 Univariate und Bivariate Statistik, Teubner, Stuttgart
- Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG)(1998):** Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, Stand:2012, zuletzt geändert: 24.2.2012
- Böcker, R., Kowarik, I., Bornkamm, R. (1983):** Untersuchungen zur Anwendung der Zeigerwerte nach Ellenberg, Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie. Göttingen, 11:35-56
- BKA (Braunkohlenaussschuß des Landes Brandenburg) (1996):** Sanierungsplan Lauchhammer, Teil II, Beschluß. Cottbus 14.03.1996, 73 S.
- Chamier Glisczinski, J. von (2013):** Ökologische Auswirkungen von Kohleanreicherungen in Oberböden Untersuchung einer, mit fossiler Kohle angereicherten Fläche und einer Referenzfläche, Bachelorarbeit (vorgelegt 26.Juli.2013)
- DeLuca, T.H., Mackenzie, M.D., Gundale, M.J. (2009):** Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations, In: Lehmann, J., Joseph, S. [Hrsg]: Biochar for environmental Management – Science and Technology, London
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2013):** Tabellen der langjährigen Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag für den Zeitraum 1981-2010, Internetdownload:
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwwwDesktop?nfpb=true&pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten_kostenfrei%2Fkldat_D_mittelwerte_node.html%3Fnnn%3Dtrue
(entnommen am 25.09.2013)
- Dierßen, K. (1990):** Einführung in die Pflanzensoziologie, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W. (2001):** Zeigerwerte der Pflanzen in Mitteleuropa, In: Scripta Botanica, 3.durchgesehene Auflage, Göttingen
- Feldwisch, N., Swaton, T. (2003):** Eignung mineralischer Materialien zur Verwertung auf und in Böden unter Berücksichtigung von Anforderungen des Bodenschutzes, Abschlussbericht (unveröffentlicht)
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W. (2001):** The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics, *Naturwissenschaften*, 88:37-41
- Großer, K.H. (1998):** Das Lausitzer Braunkohlerevier – Der Naturraum und seine Umgestaltung, In: Pflug [Hrsg.]: Braunkohletagebau und Rekultivierung – Landschaftsökologie, Folgenutzung und Naturschutz, Springer, Berlin
- Hille, M., Den Ouden, J. (2005):** Charcoal and activated carbon as adsorbate of phytotoxic compound: a comparative study, *Oikos* 108:202–207
- Hochfeld, B., Gröngröft, A., Miehlich, G. (2003):** Großmaßstäbige Bodenfunktionsbewertung für Hamburger Böden, HRSG: Behörde für Umwelt und Gesundheit Hamburg, Bodenschutz/Altlasten
- Katzur, J., Böcker, L. (2007):** Landwirtschaftliche Testversuche zur Verwendung von N-modifizierter Weichbraunkohle als Humusdüngestoff bei der Rekultivierung von Kippenböden des Braunkohlebergbaus, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 53(4): 355-389
- Katzur, J., Fischer, K., Böcker, L., Liebner, F., Schiene, R. (2003):** Freilandversuche zur Eignung chemisch veränderter Weichbraunkohle als Bodenverbesserungsmittel bei der landwirtschaftlichen Rekultivierung humusfreier Kippenböden, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 49:639-653

- Katzur, J., Böcker, L., Knoche, D., Mertzig, C.-C. (1999):** Untersuchungen zur Optimierung der Meliorationstiefe für die forstliche Rekultivierung schwefelsaurer Kippenböden. Beiträge zur Forstwirtschaft und Landschaftsökologie 33(4):172-179.
- Klik, A. (2001):** Bodenerhaltung und Bodenschutz, Skript Uni-Wien, <http://www.wau.boku.ac.at/fileadmin//H81/H815/Skripten/Bodenschutz/Bodenschutz.pdf>
- Köhler, W., Schachtel, G., Voleske, P. (2007):** Biostatistik. Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler, 4.Aufl., Springer, Berlin
- Lair, G.J., Gerzabek, M.H., Haberhauer, G., Jakusch, M., Kirchmann, H. (2006):** Response of the sorption behavior of Cu, Cd and Zn to different soil management. J Plant Nutr Soil Sci 169:60–68
- LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft) (2013):** Plessa/Lauchhammer/Schwarzheide, In: Wandlungen und Perspektiven, Band 05, Senftenberg
- LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft) (2007):** Tröbitz/Domsdorf, In: Wandlungen und Perspektiven, Band 06, Senftenberg
- Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B., Glaser, B. (2012):** Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions, J. Plant Nutr. Soil Sci., 175:698–707
- Meynen, E., Schmithüsen, J. (1961):** Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands, Bad Godesberg
- Neumann, C. (1999):** Zur Pedogenese pyrit- und kohlehaltiger Kippsubstrate im Lausitzer Braunkohlenrevier. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, Bd. 8
- Raab, A., Raab, T., Takla, M., Nicolay, A., Bönisch, E., Rösler, H. (2011):** Böden als Archive der Landschaftsgeschichte im Vorfeld des Tagebaus Jänschwalde, In: DBG [Hrsg.]: Exkursionsführer zur Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft in Berlin
- Raab, A., Nicolay, A., Takla, M., Raab, T. (2010):** Zum Einfluss des Menschen auf die Landschaft im Tagebauvorfeld Jänschwalde, Lkr. Spree-Neiße, In: Archäologie in Berlin und Brandenburg, S.27-28
- Riek, W., Stähr, F. (2004):** Eigenschaften typischer Waldböden im Nordostdeutschen Tiefland unter besonderer Berücksichtigung des Landes Brandenburg, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 19, Eberswalde
- Rösler, H. (2006):** Energiegewinnung mit Umweltfolgen. Holzkohlemeiler im Tagebau Jänschwalde, In: Archäologie in Berlin und Brandenburg, S.125-127
- Rumpel, C. (1999):** Differenzierung und Charakterisierung pedogener und geogener organischer Substanz in forstlich rekultivierten Kippböden. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, Bd. 5
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2010):** Lehrbuch der Bodenkunde, 16.Auflage, Spektrum Verlag, Heidelberg
- Schubert, R., Hilbig, W., Klotz, S. (1995):** Bestimmungsbuch der Pflanzengesellschaften Mittel- und Nordostdeutschlands, Gustav-Fischer Verlag, Jena
- Schultz-Sternberg, R., Schmidt, H., Teschke, T. (2012):** Stabilität und Wirkung von Kohle-C in Böden im Vergleich zu Huminstoff-C - Bericht zu Projektphase 1: Flächenauswahl -, In: Fachbeiträge des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, FB:134, Potsdam
- Schulz, H., Glaser, B. (2012):** Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment, J. Plant Nutr. Soil Sci., 175:410–422
- Slobodda, S. (1987):** Pflanzengemeinschaften und ihre Umwelt, Urania-Verlag, Leipzig
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T. (2008):** Bodenkunde und Standortlehre, Ulmer Verlag, Stuttgart
- Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Blum, W. E. H., Zech, W. (2008):** Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal., J. Plant Nutr. Soil Sci., 171:893–899
- Sun, F. and Lu, S. (2013):** Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil, J. Plant Nutr. Soil Sci., 171:893–899, Online-Version early View

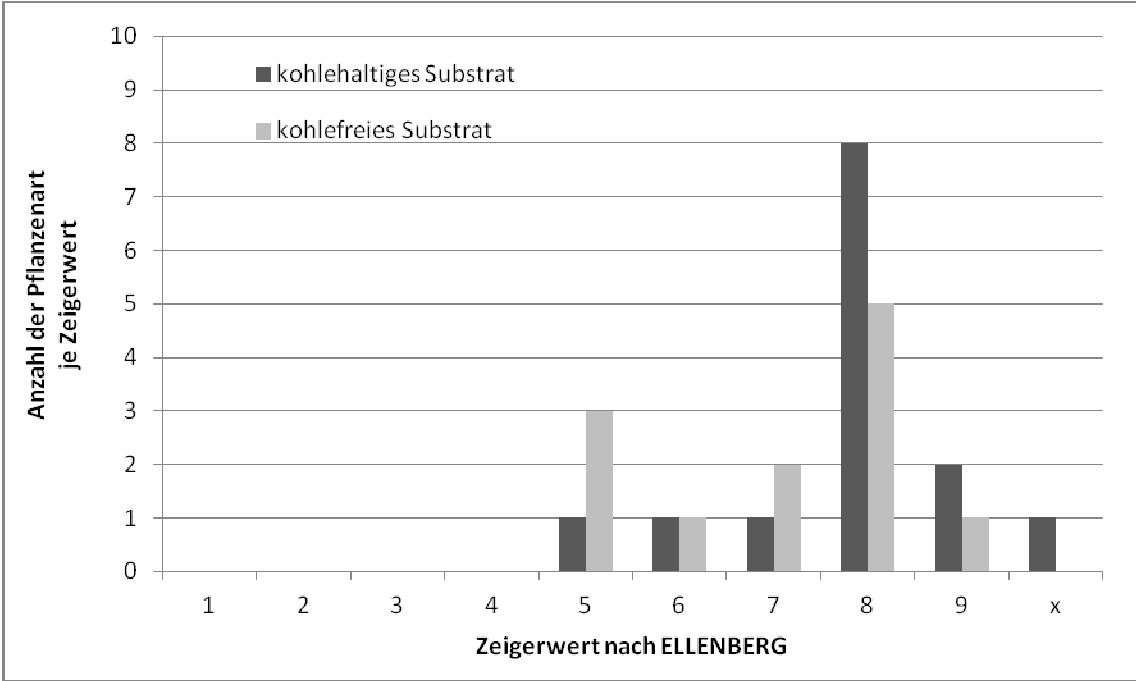
- Weiß, U., Klug A., Haubold-Rosar M., Zeitz J. (2013):** Zur Wirkung von Biokohle-Substraten auf den Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt ertragsschwacher Acker- und Kippenböden der Lausitz - Ergebnisse aus Feldversuchen, In: Böden–Lebensgrundlage und Verantwortung, 7.-12.09.2013 Rostock, Online-Beitrag
- Zimmermann, F. (2007a):** Biotopkartierung Brandenburg – Band 1 Kartieranleitung und Anlagen, 3.Aufl. Potsdam, Landesumweltamt Brandenburg
- Zimmermann, F. (2007b):** Biotopkartierung Brandenburg – Band 2 Beschreibung der Biotoptypen, 3.Aufl. Potsdam, Landesumweltamt Brandenburg

8. Anhang

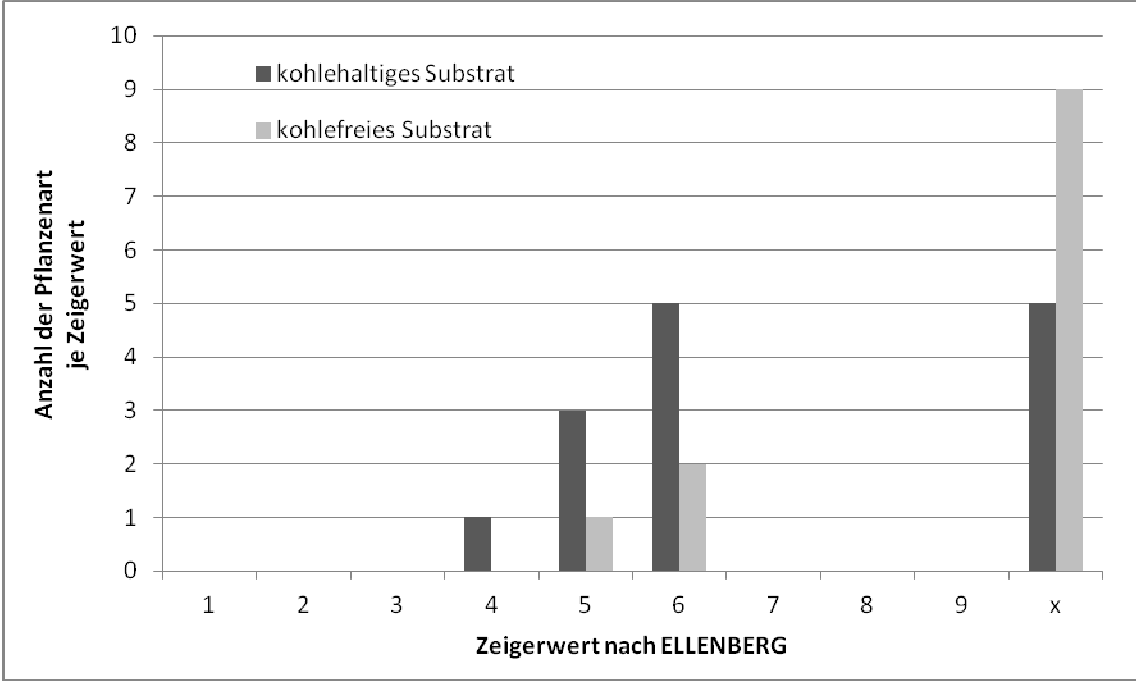
Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte am Standort ehemaliges Kohlelager bei Britz	1
Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte am Standort ehemalige Köhlereifläche bei Jänschwalde	4
Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte an den forstlichen Rekultivierungsstandorten Tröbitz und Schipkau	7
Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte an den landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorten Grünewalde und Plessa	10
Laborergebnisse der Kohlelagerfläche bei Britz	13
Laborergebnisse der Referenzfläche bei Britz	14
Laborergebnisse der Köhlereifläche bei Jänschwalde	15
Laborergebnisse der Referenzfläche bei Jänschwalde	16
Laborergebnisse der forstlichen Rekultivierungsfläche (kohlehaltig) Domsdorf / Tröbitz	17
Laborergebnisse der forstlichen Rekultivierungsfläche (kohlefrei) Schipkau	18
Laborergebnisse der landwirtschaftlichen Rekultivierungsfläche (kohlehaltig) Grünewalde	19
Laborergebnisse der landwirtschaftlichen Rekultivierungsfläche (kohlefrei) Plessa	20

Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte am Standort ehemaliges Kohlelager bei Britz

Lichtzahl

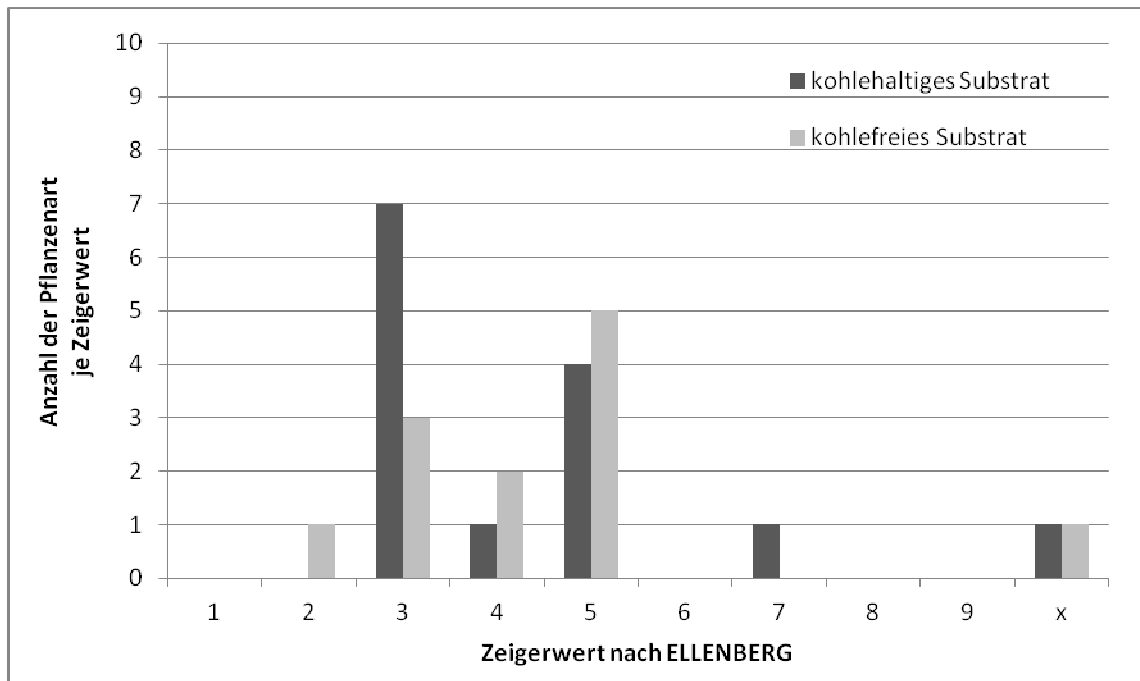


Temperaturzahl

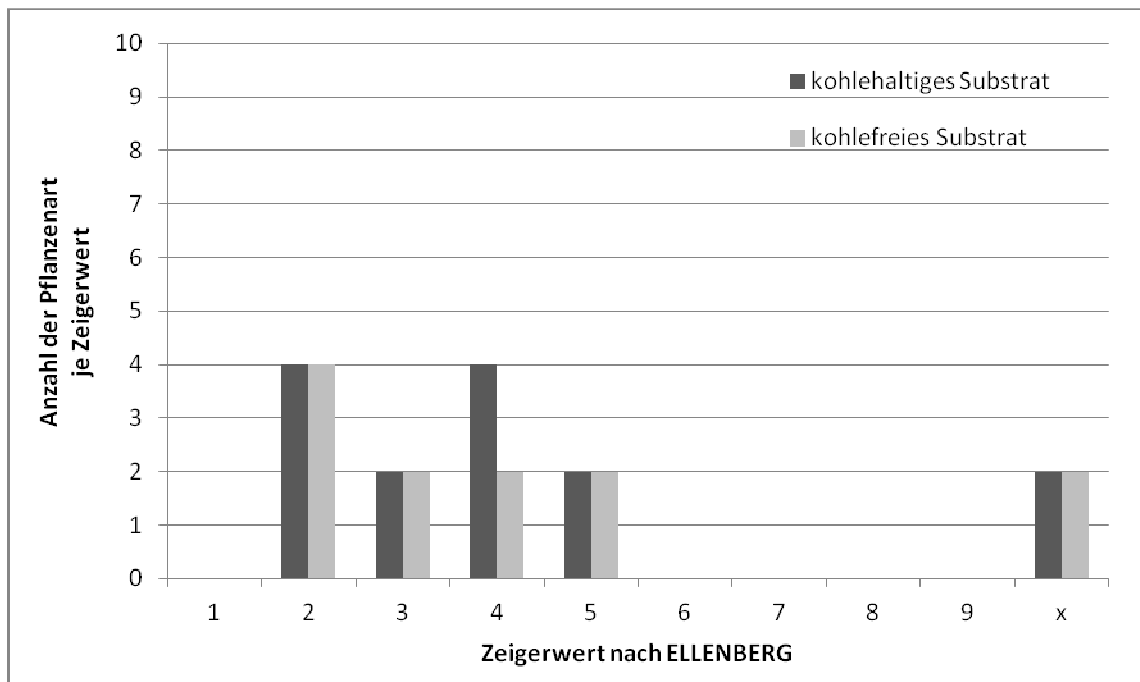


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte am Standort ehemaliges Kohlelager bei Britz

Kontinentalitätszahl

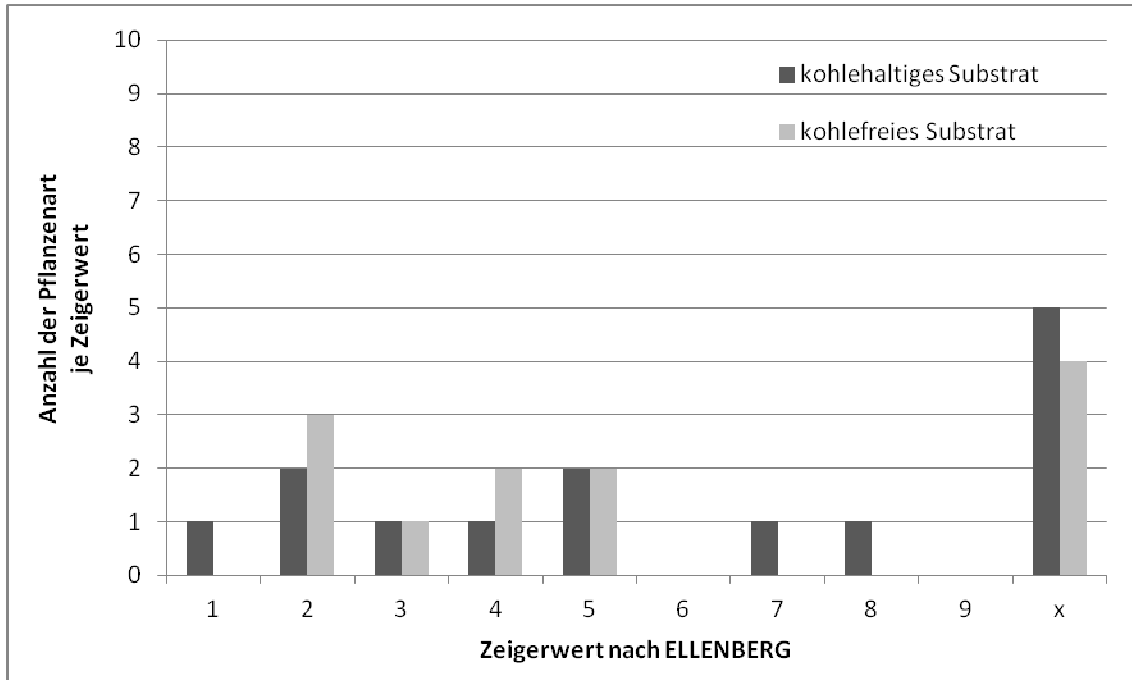


Feuchtezahl

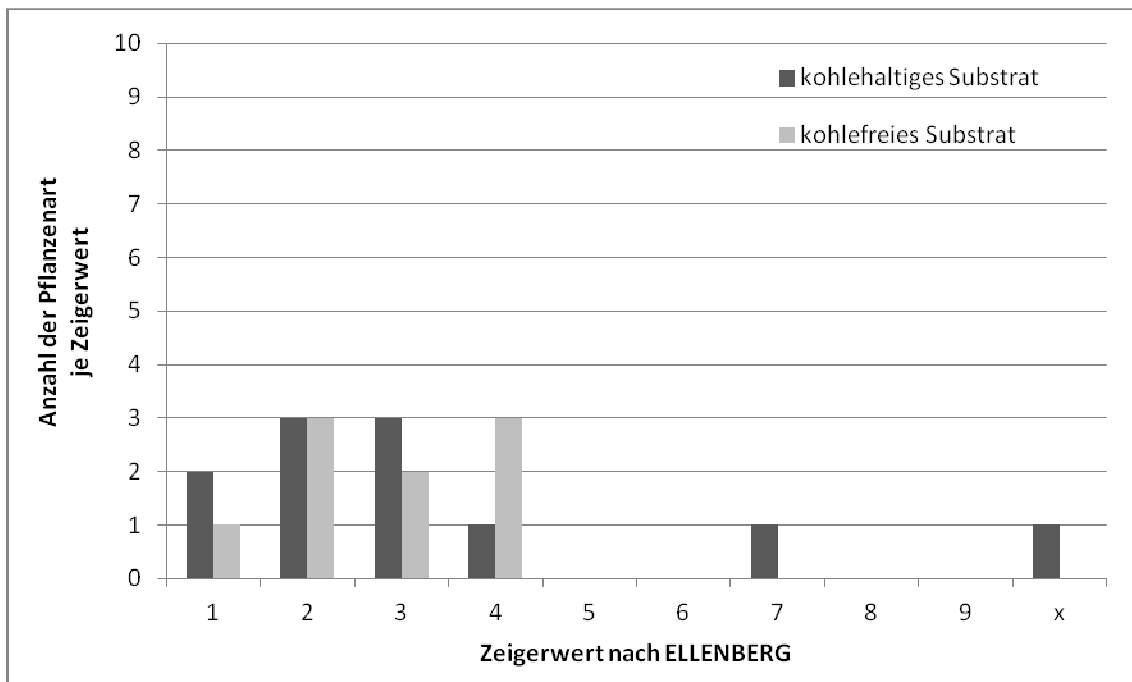


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte am Standort ehemaliges Kohlelager bei Britz

Reaktionszahl

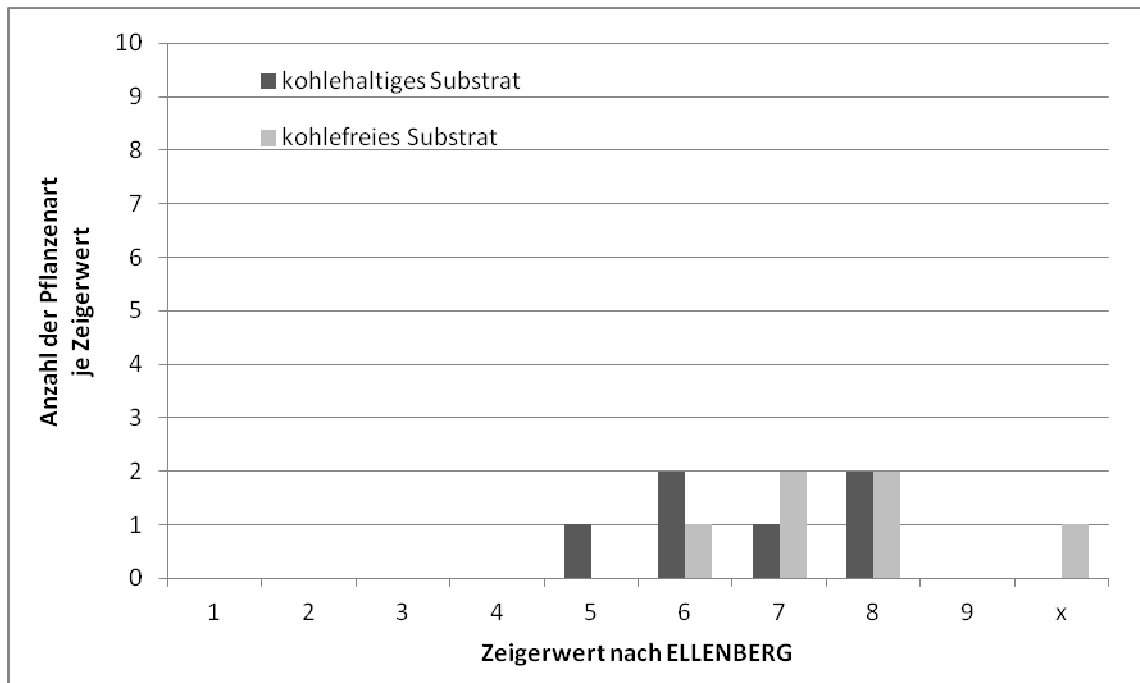


Stickstoffzahl

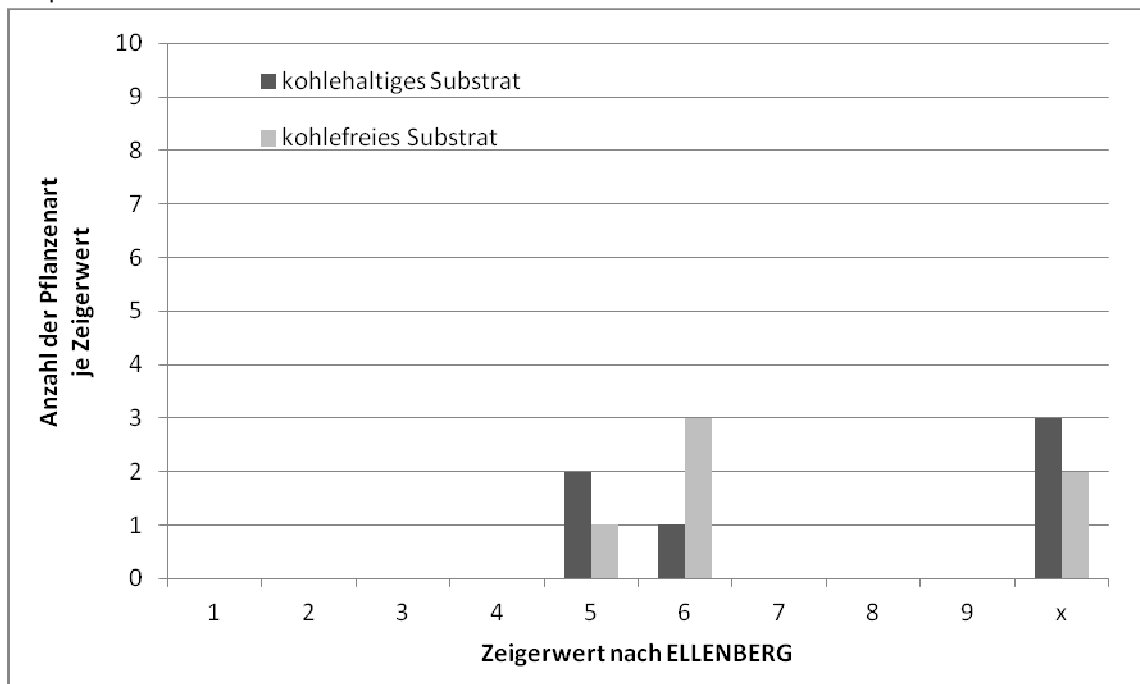


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte am Standort ehemalige Köhlereifläche bei Jänschwalde

Lichtzahl

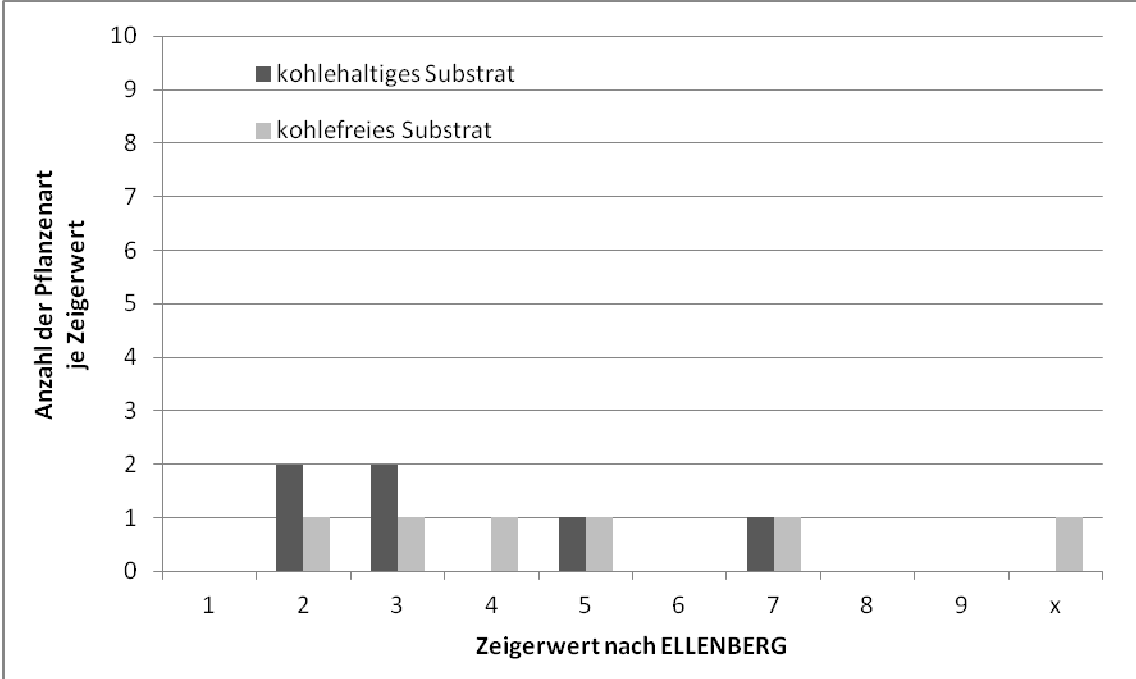


Temperaturzahl

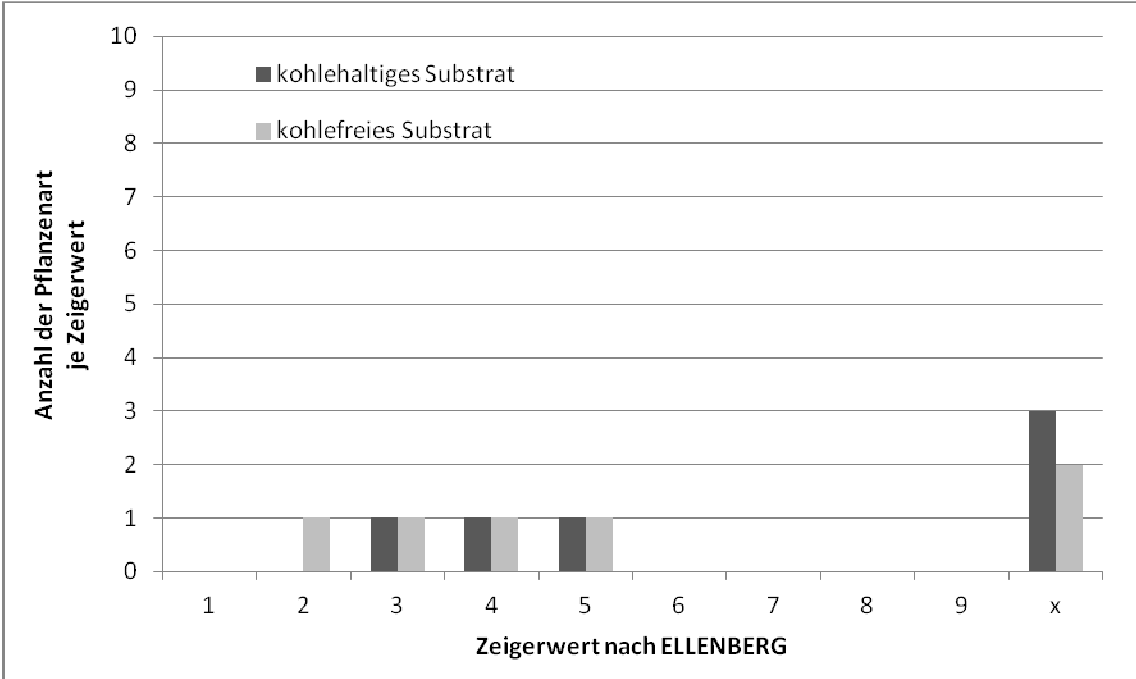


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte am Standort ehemalige Köhlereifläche bei Jänschwalde

Kontinentalitätszahl

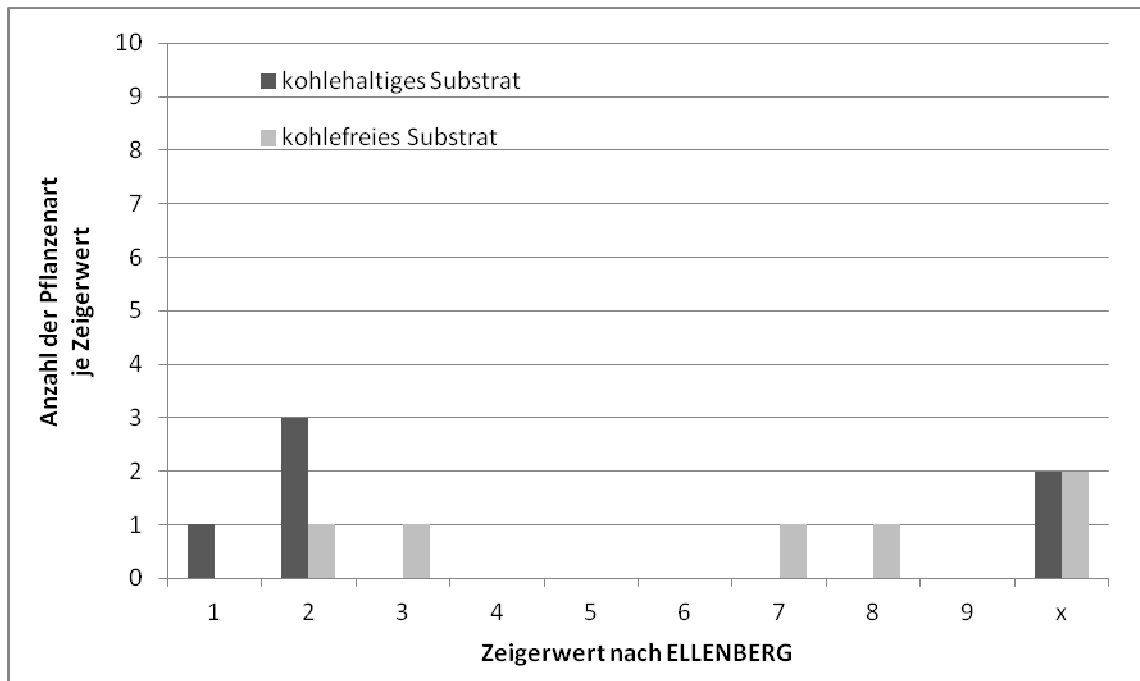


Feuchtezahl

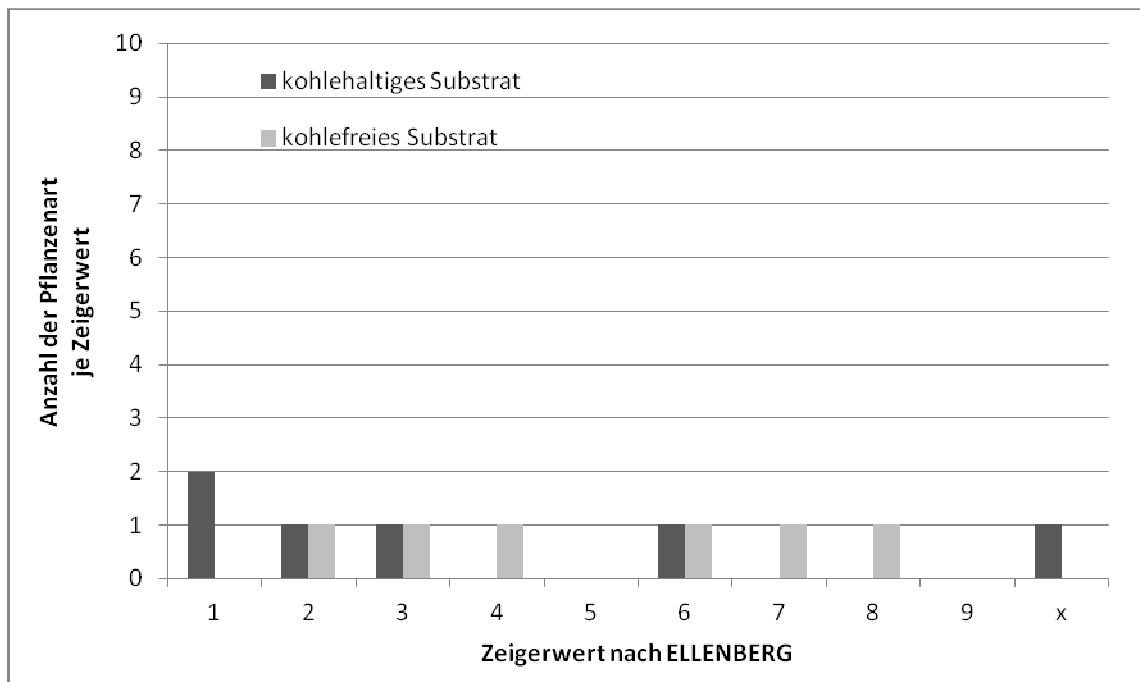


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte am Standort ehemalige Köhlereifläche bei Jänschwalde

Reaktionszahl

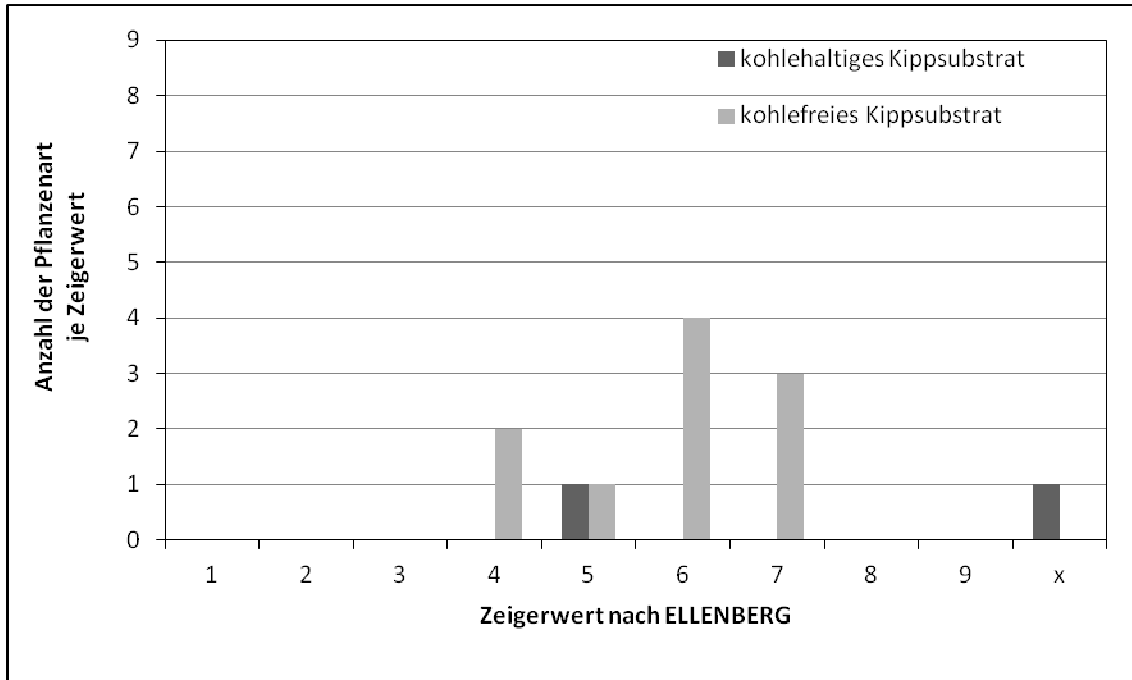


Stickstoffzahl

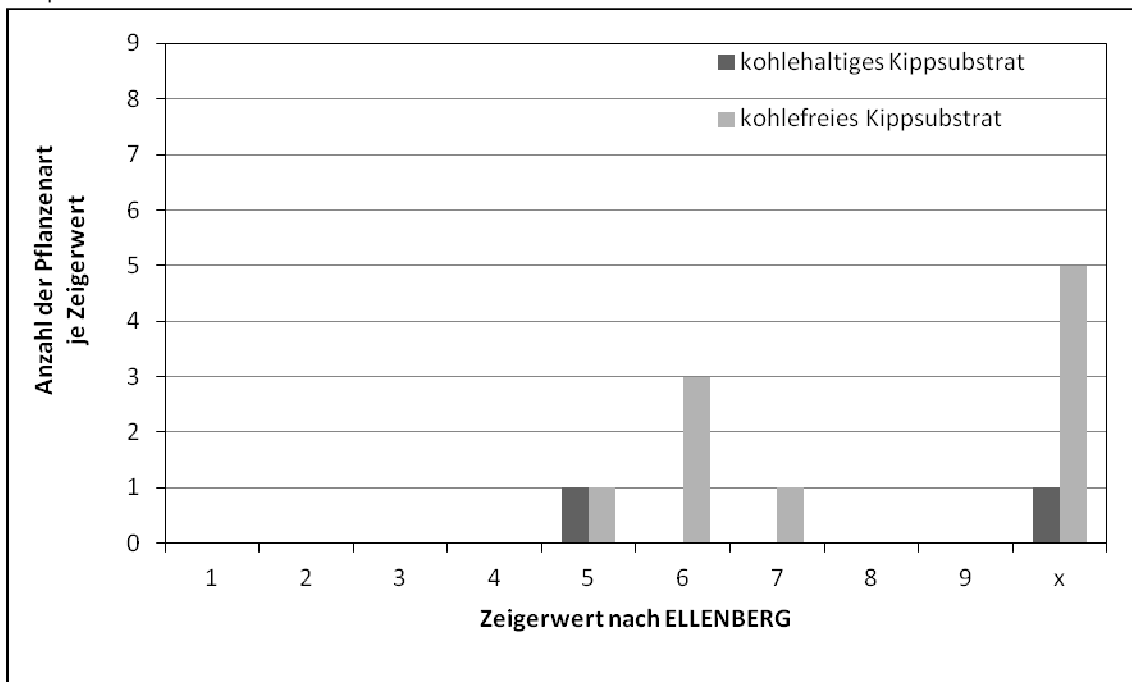


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte an den forstlichen Rekultivierungsstandorten Tröbitz und Schipkau

Lichtzahl

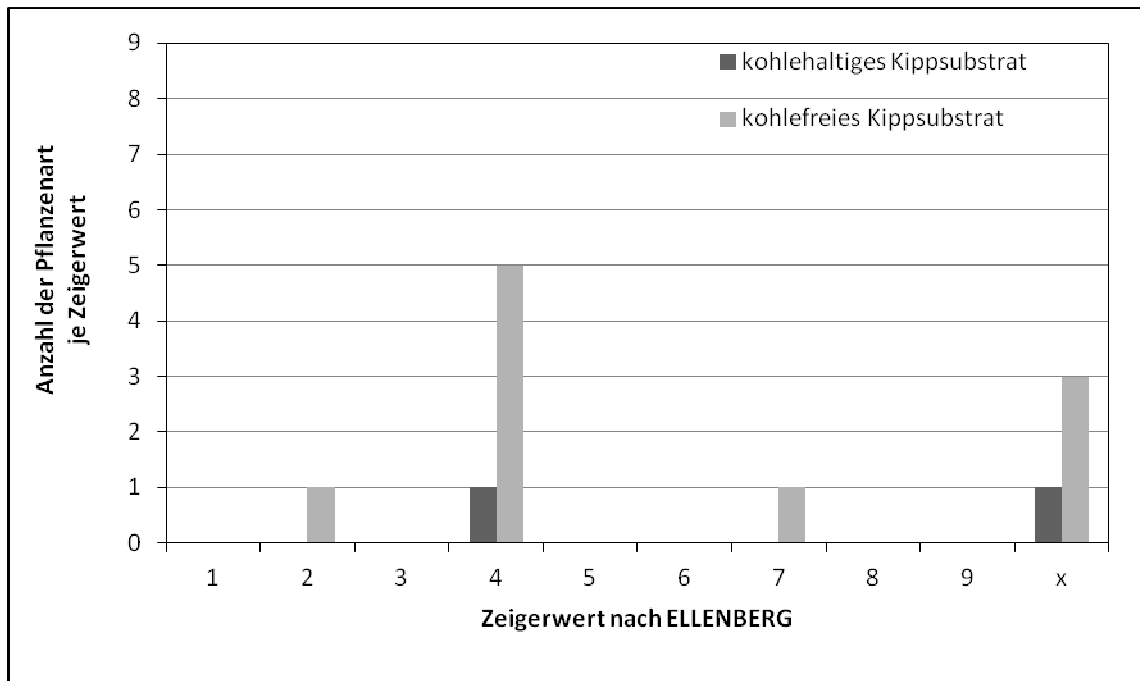


Temperaturzahl

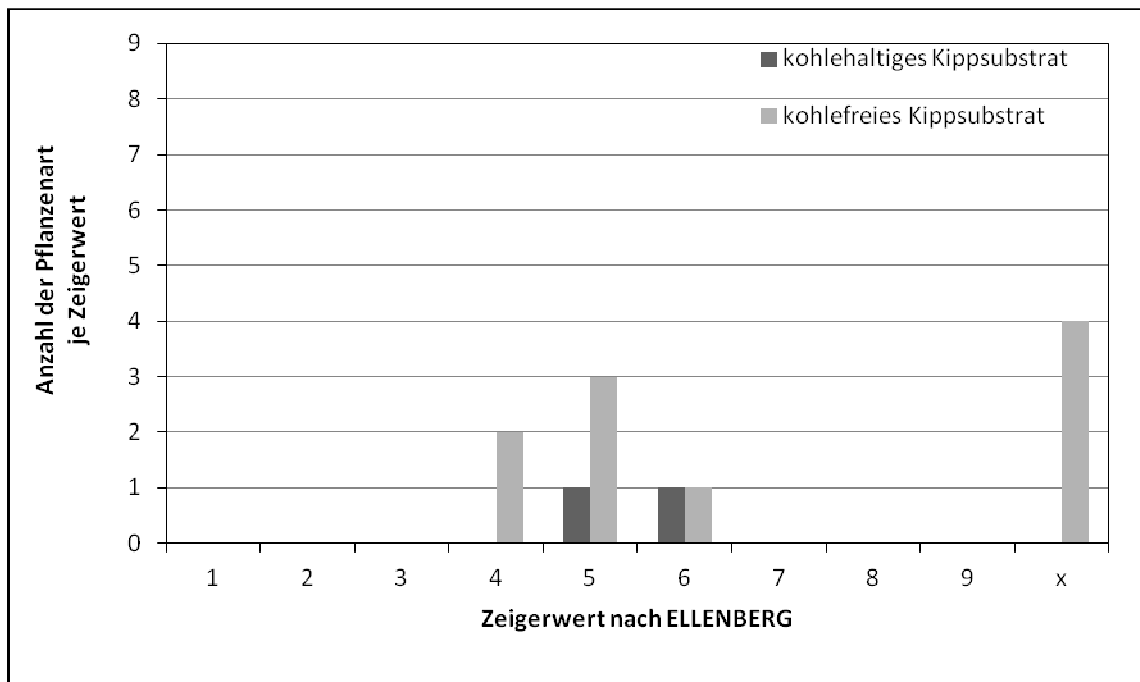


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte an den forstlichen Rekultivierungsstandorten Tröbitz und Schipkau

Kontinentalitätszahl

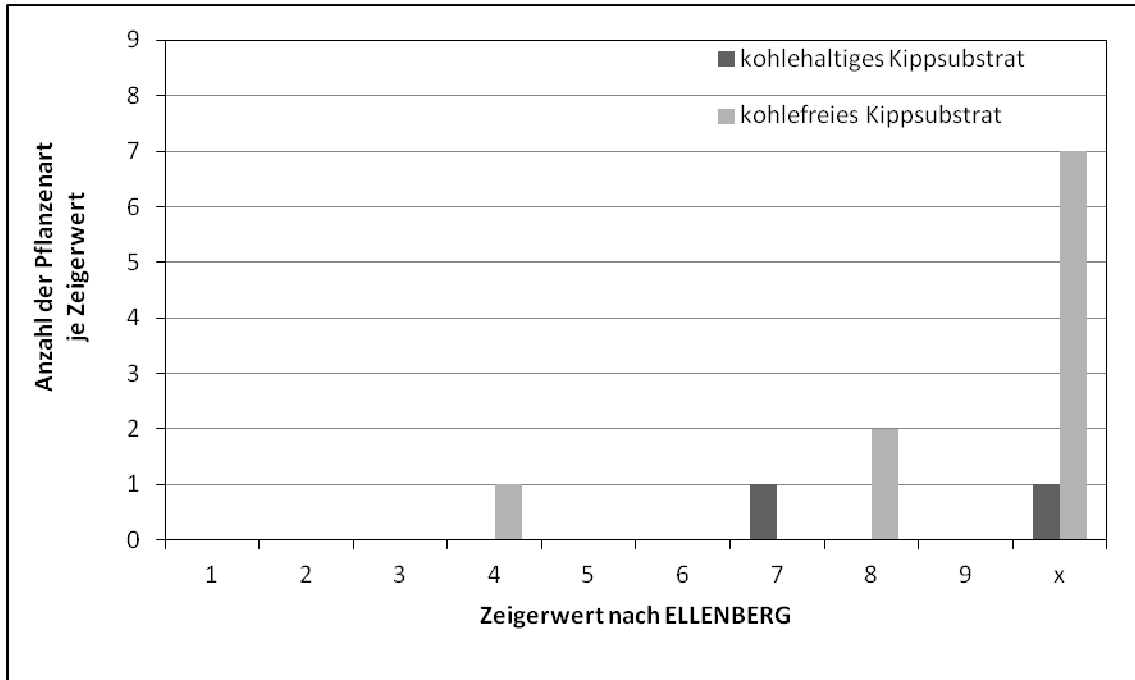


Feuchtezahl

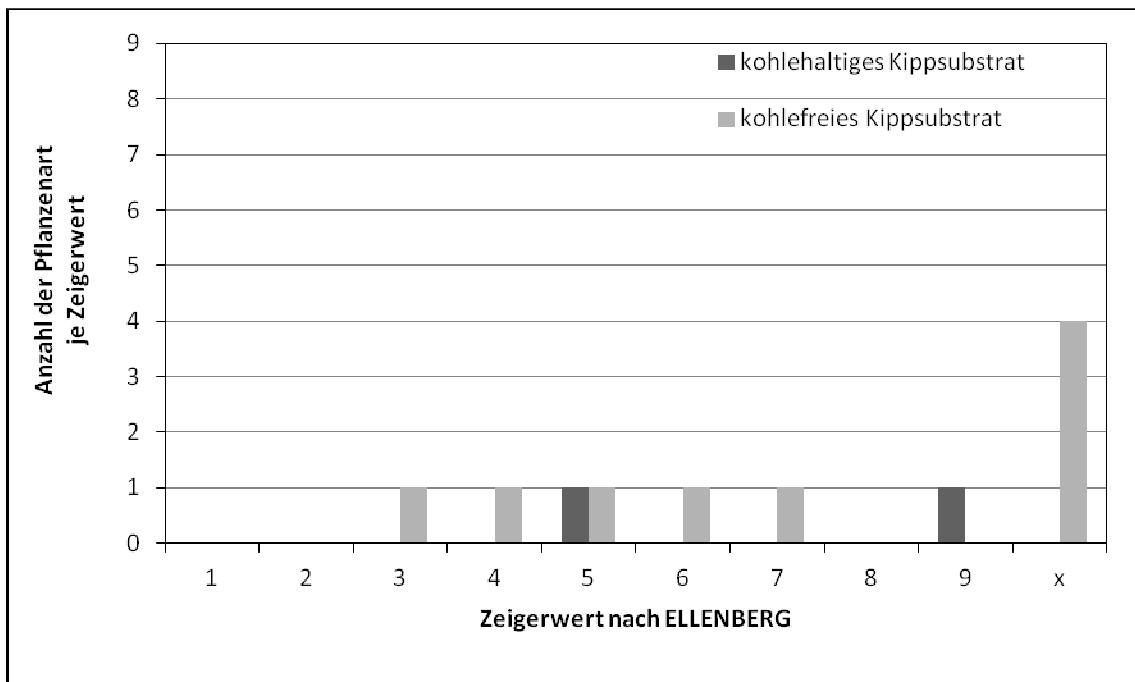


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte an den forstlichen Rekultivierungsstandorten Tröbitz und Schipkau

Reaktionszahl

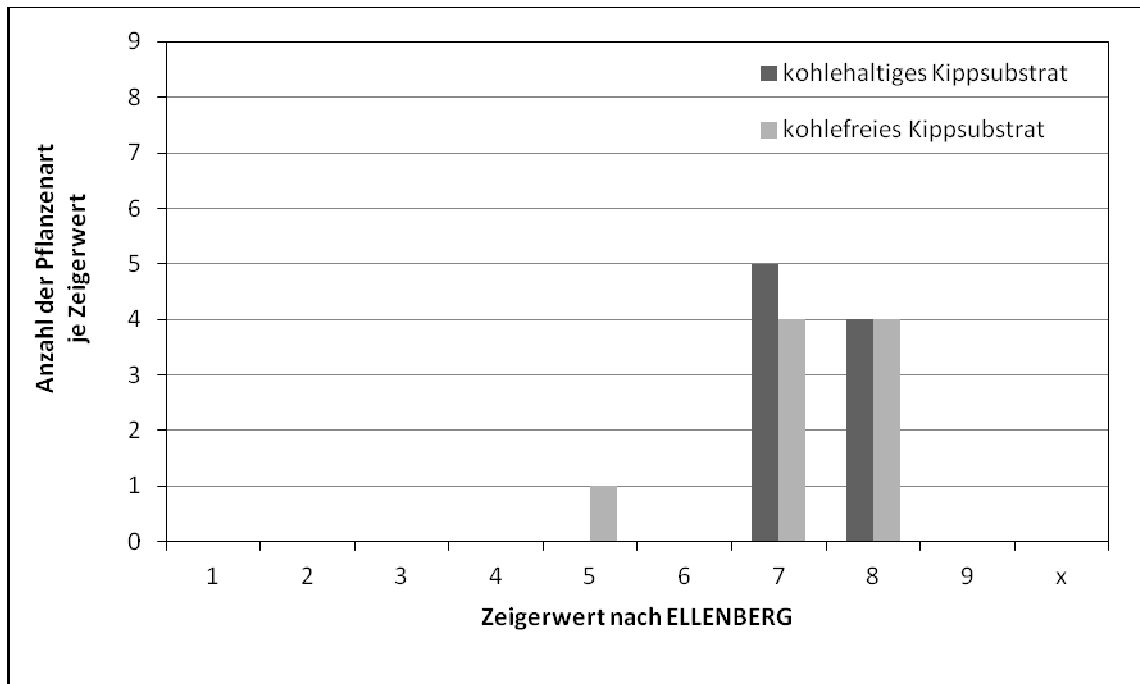


Stickstoffzahl

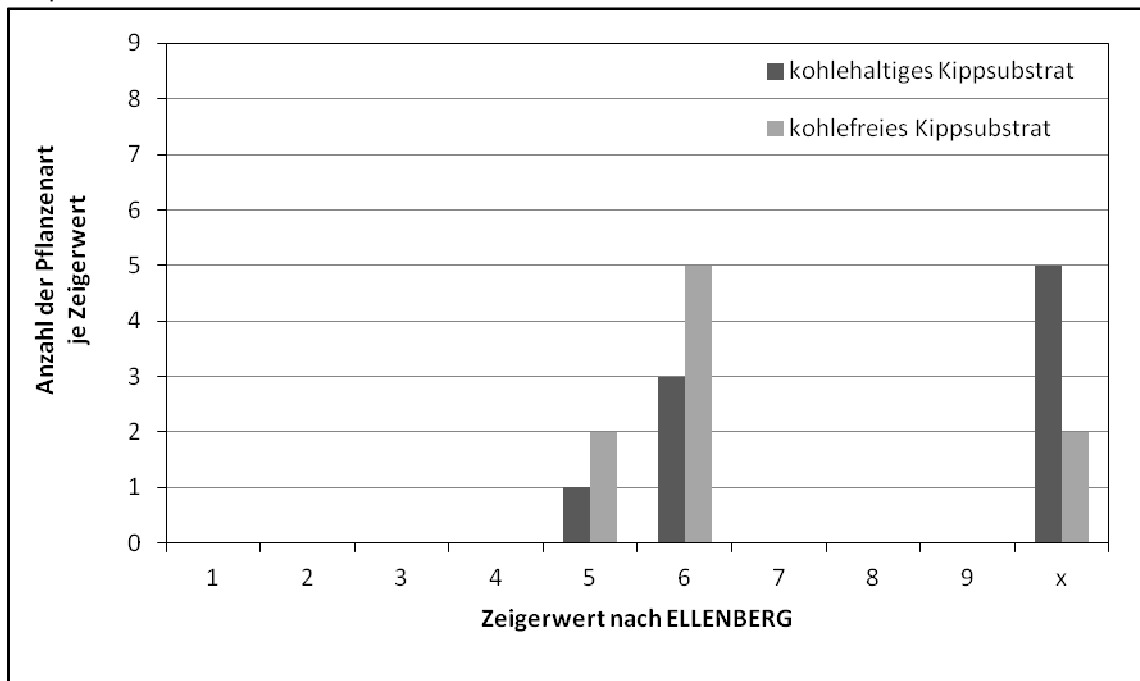


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte an den landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorten Grünwalde und Plessa

Lichtzahl

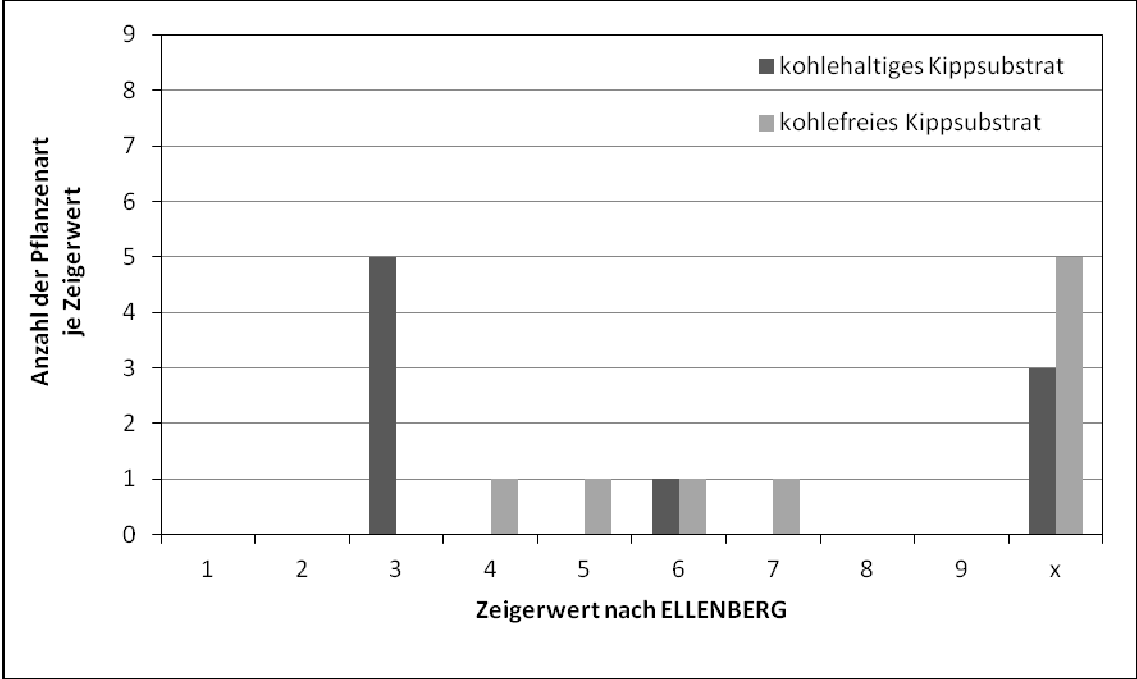


Temperaturzahl

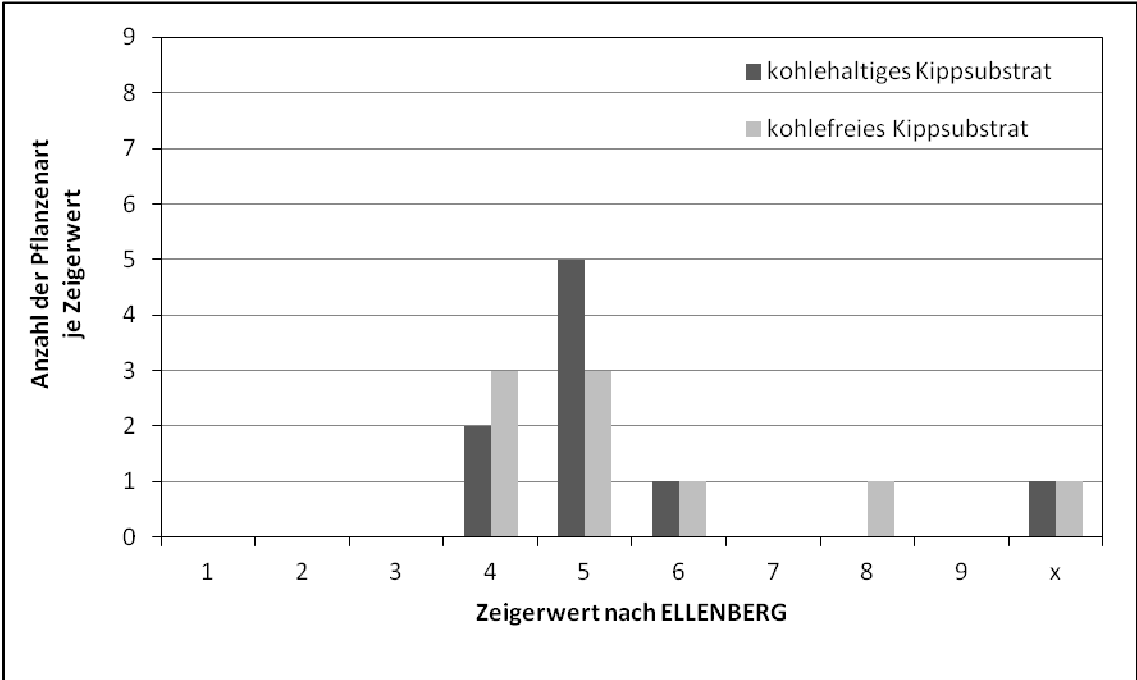


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte an den landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorten Grünwalde und Plessa

Kontinentalitätszahl

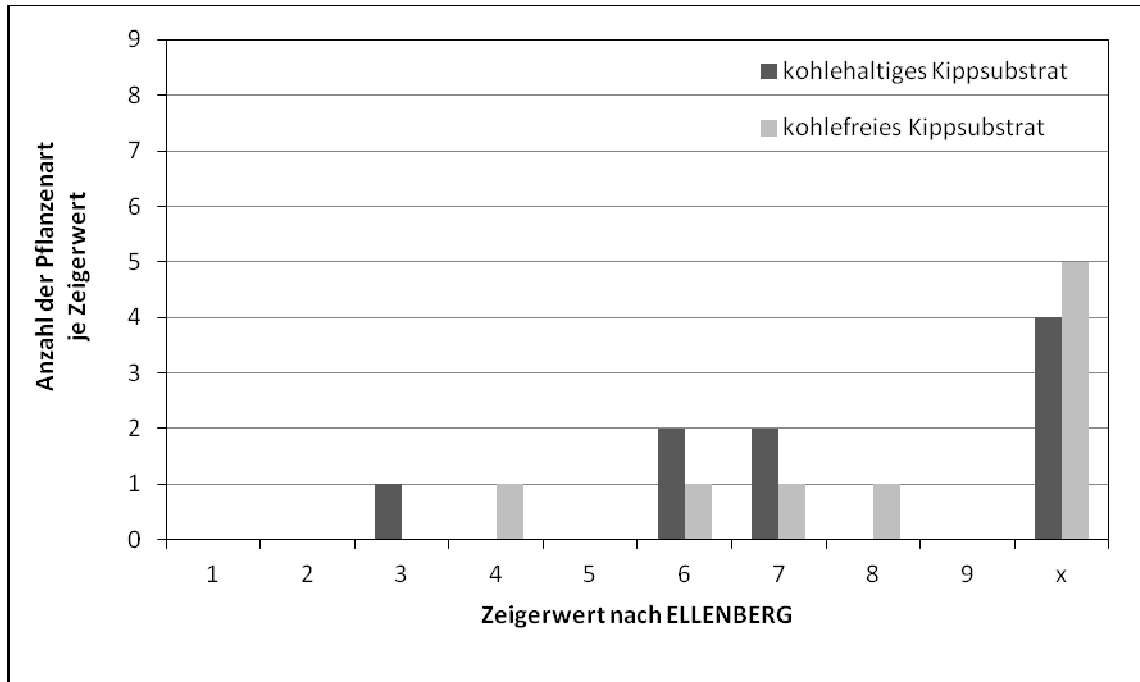


Feuchtezahl

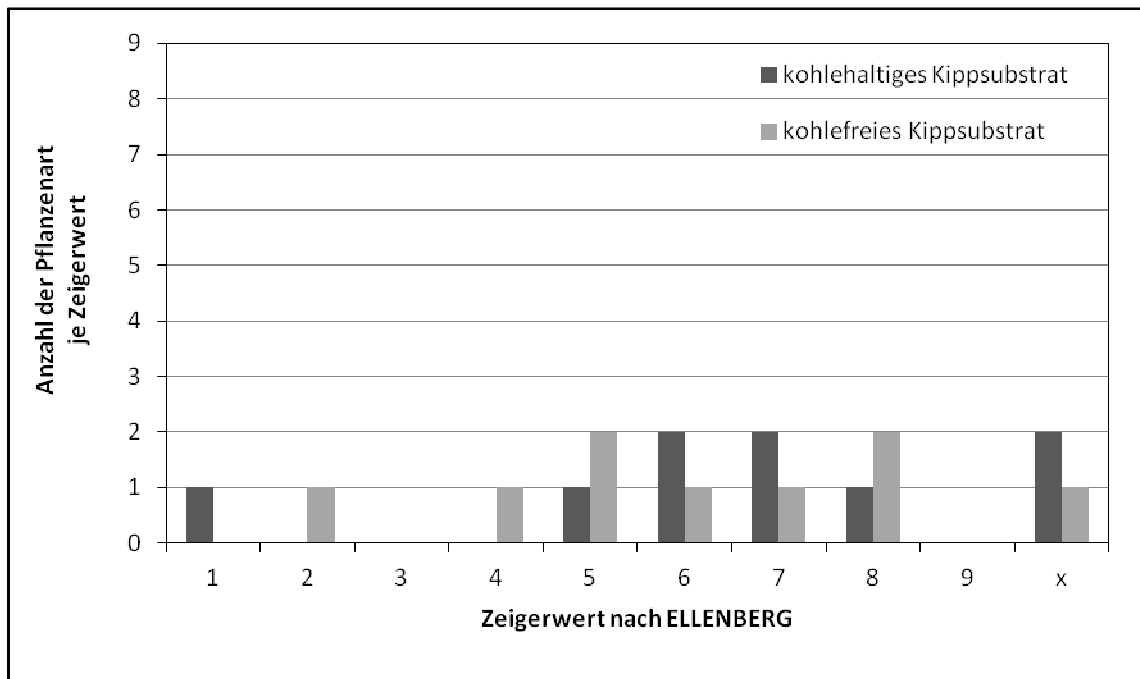


Verteilungsdiagramme der Zeigerwerte an den landwirtschaftlichen Rekultivierungsstandorten Grünwalde und Plessa

Reaktionszahl



Stickstoffzahl



Laboregebnisse der Kohlelagerfläche bei Britz

	Einheit	Mittelwert	Median	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Korngrößenverteilung	-	Ss (fSms)	-	-	-	-
TRD	g/cm ³	0,9	0,8	0,2		
N _{ges}	%	0,4	0,4	0,1	0,3	0,5
pH (CaCl ₂)		4,1	4,1	0,1	4,0	4,2
pH (H ₂ O)		4,9	4,9	11,5	4,8	5,0
EC	µS/cm	63,6	41,5	56,5	28,6	177,7
Carbonat	%	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3
KAK _{eff}	mmolc/kg	325,1	339,3	57,2	241,9	394,1
Na	mmolc/kg	0,5	0,4	0,3	0,3	1,1
K	mmolc/kg	0,9	0,9	0,4	0,4	1,4
Ca	mmolc/kg	280,3	284,1	55,9	202,2	349,7
Mg	mmolc/kg	33,9	34,3	10,8	16,4	48,0
Fe	mmolc/kg	1,2	1,2	0,5	0,5	2,0
Mn	mmolc/kg	2,0	2,1	0,3	1,5	2,4
Al	mmolc/kg	3,5	3,4	0,6	2,6	4,5
H+	mmolc/kg	5,8	6,4	3,5	1,4	11,6
KAK _{pot}	mmolc/kg	221,2	222,7	14,4	201,3	242,0
Na	mmolc/kg	0,2	0,2	0,2	0,0	0,3
K	mmolc/kg	0,9	1,0	0,2	0,6	1,1
Mg	mmolc/kg	14,2	15,0	3,9	8,9	18,7
Ca	mmolc/kg	131,5	130,5	29,0	96,6	169,1
BS	%	66,6	65,5	15,8	47,5	91,2
wasserlösl. Al	mg/kg	0,8	0,8	0,2	0,6	1,3
wasserlösl. Ca ²⁺	mg/kg	36,7	24,0	32,4	16,4	108,8
wasserlösl. Fe ³⁺	mg/kg	1,8	1,8	0,4	1,4	2,2
wasserlösl. K ⁺	mg/kg	2,5	1,9	1,8	0,9	6,1
wasserlösl. Mg ²⁺	mg/kg	10,1	6,3	9,2	4,4	30,6
wasserlösl. Mn ²⁺	mg/kg	0,4	0,3	0,3	0,2	1,1
wasserlösl. Na ⁺	mg/kg	3,3	2,1	3,0	1,6	10,0
wasserlösl. NH ₄ -N	mg/kg	0,7	0,7	0,1	0,5	0,9
wasserlösl. NO ₃ ⁻	mg/kg	0,7	0,5	0,9	0,0	2,2
wasserlösl. Cl ⁻	mg/kg	3,5	3,7	0,7	2,6	4,4
wasserlösl. SO ₄ ⁻	mg/kg	82,7	33,0	131,5	17,7	349,9
wasserlösl. DOC	mg/kg	174,0	172,0	12,5	159,4	197,3
N _{min}	mg/kg	1,7	1,7	0,6	1,0	2,5
C _{org}	%	24,8	24,8	5,2	17,7	33,0
PO ₄	mg/kg	51,5	50,9	7,3	44,0	64,5
K (austauschb.)	mg/kg	32,0	31,4	9,8	21,4	46,3

Mg (austauschb.)	mg/kg	261,9	254,9	53,2	204,2	327,0
------------------	-------	-------	-------	------	-------	-------

Laborergebnisse der Referenzfläche bei Britz

	Einheit	Mittelwert	Median	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Korngrößenverteilung	-	Ss (fSms)	-	-	-	-
TRD	g/cm ³	1,3	1,3	0,1	1,2	1,5
N _{ges}	%	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
pH (CaCl ₂)		3,9	3,9	0,1	3,7	4,1
pH (H ₂ O)		5,0	5,0	0,2	4,7	5,2
EC	μS/cm	18,2	16,4	4,5	14,7	27,3
Carbonat	%	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3
KAK _{eff}	mmolc/kg	18,8	18,1	4,1	13,7	25,8
Na	mmolc/kg	0,7	0,7	0,1	0,6	0,8
K	mmolc/kg	0,2	0,2	0,0	0,2	0,3
Ca	mmolc/kg	2,7	2,4	1,4	1,3	5,4
Mg	mmolc/kg	0,2	0,2	0,1	0,2	0,4
Fe	mmolc/kg	0,4	0,4	0,2	0,2	0,8
Mn	mmolc/kg	0,6	0,6	0,1	0,4	0,7
Al	mmolc/kg	11,7	11,7	2,0	9,1	15,2
H+	mmolc/kg	3,3	2,9	1,3	2,1	6,0
KAK _{pot}	mmolc/kg	64,8	63,7	14,1	42,5	86,8
Na	mmolc/kg	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2
K	mmolc/kg	0,2	0,1	0,2	0,0	0,5
Mg	mmolc/kg	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2
Ca	mmolc/kg	1,3	1,0	0,7	0,8	2,9
BS	%	2,6	2,3	1,2	1,4	5,0
wasserlösl. Al	mg/kg	1,5	1,4	0,5	0,7	2,5
wasserlösl. Ca ²⁺	mg/kg	3,8	3,1	1,5	2,4	6,3
wasserlösl. Fe ³⁺	mg/kg	0,9	0,9	0,4	0,3	1,7
wasserlösl. K ⁺	mg/kg	1,7	1,7	0,7	0,9	3,1
wasserlösl. Mg ²⁺	mg/kg	0,6	0,5	0,2	0,4	0,9
wasserlösl. Mn ²⁺	mg/kg	0,7	0,8	0,2	0,4	0,9
wasserlösl. Na ⁺	mg/kg	1,6	1,6	0,3	1,0	1,9
wasserlösl. NH ₄ -N	mg/kg	1,9	2,2	0,8	1,0	3,2
wasserlösl. NO ₃ ⁻	mg/kg	1,6	1,5	0,6	1,0	2,5
wasserlösl. Cl ⁻	mg/kg	2,5	2,4	0,5	2,0	3,3
wasserlösl. SO ₄ ⁻	mg/kg	5,8	5,4	2,5	3,5	10,1
wasserlösl. DOC	mg/kg	81,7	84,3	19,0	55,0	102,3
N _{min}	mg/kg	1,2	1,1	0,3	0,9	1,7
C _{org}	%	1,5	1,5	0,4	0,9	2,1
PO ₄	mg/kg	128,3	107,7	53,9	94,9	237,2
K (austauschb.)	mg/kg	16,0	15,0	3,3	12,7	21,2

Mg (austauschb.)	mg/kg	3,8	3,8	1,2	2,4	5,5
------------------	-------	-----	-----	-----	-----	-----

Laborergebnisse der Köhlereifläche bei Jänschwalde

	Einheit	Mittelwert	Median	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
Korngrößenverteilung	-	Ss (fSms)	-	-	-	-
TRD	g/cm ³	0,8	0,8	0,4	0,3	1,3
N _{ges}	%	0,3	0,3	0,1	0,1	0,4
pH (CaCl ₂)		3,3	3,3	0,1	3,2	3,4
pH (H ₂ O)		4,1	4,1	0,1	3,9	4,2
EC	µS/cm	88,2	94,3	29,6	45,1	119,4
Carbonat	%	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2
KAK _{eff}	mmolc/kg	71,9	69,8	15,3	54,3	101,9
Na	mmolc/kg	0,2	0,2	0,0	0,2	0,3
K	mmolc/kg	1,6	1,7	0,5	0,6	2,0
Ca	mmolc/kg	19,3	20,1	5,8	8,5	25,8
Mg	mmolc/kg	2,3	2,5	0,8	0,8	3,3
Fe	mmolc/kg	2,5	2,7	0,5	1,6	3,1
Mn	mmolc/kg	0,7	0,8	0,2	0,3	1,0
Al	mmolc/kg	29,3	27,8	6,5	22,6	42,0
H ⁺	mmolc/kg	19,3	16,8	4,8	15,4	28,7
KAK _{pot}	mmolc/kg	172,3	176,4	23,9	128,0	205,8
Na	mmolc/kg	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
K	mmolc/kg	2,9	2,9	0,4	2,3	3,4
Mg	mmolc/kg	1,0	1,0	0,4	0,3	1,4
Ca	mmolc/kg	5,2	5,5	1,7	2,4	7,4
BS	%	5,2	4,8	1,2	3,9	7,4
wasserlösl. Al ⁺	mg/kg	5,5	5,6	1,2	3,2	6,7
wasserlösl. Ca ²⁺	mg/kg	9,5	9,6	2,0	6,9	11,9
wasserlösl. Fe ³⁺	mg/kg	5,9	6,0	1,6	3,3	8,3
wasserlösl. K ⁺	mg/kg	13,4	14,9	5,4	3,2	19,7
wasserlösl. Mg ²⁺	mg/kg	1,9	1,9	0,5	1,2	2,7
wasserlösl. Mn ²⁺	mg/kg	0,6	0,6	0,2	0,3	0,8
wasserlösl. Na ⁺	mg/kg	1,7	1,8	0,3	1,2	2,2
wasserlösl. NH ₄ -N	mg/kg	23,2	24,0	13,4	3,2	38,0
wasserlösl. NO ₃ ⁻	mg/kg	59,2	58,9	30,7	23,0	93,1
wasserlösl. Cl ⁻	mg/kg	3,8	4,0	1,0	2,3	5,2
wasserlösl. SO ₄ ⁻	mg/kg	17,5	18,0	6,6	5,7	24,0
wasserlösl. DOC	mg/kg	358,0	372,0	118,9	146,7	483,2
N _{min}	mg/kg	14,4	14,6	8,0	3,9	24,1
C _{org}	%	8,1	7,9	2,6	5,3	13,2
PO ₄	mg/kg	70,0	66,1	21,0	42,4	103,0
K (austauschb.)	mg/kg	47,7	52,0	17,0	20,4	71,9

Mg (austauschb.)	mg/kg	25,4	27,5	11,2	7,5	37,3
------------------	-------	------	------	------	-----	------

Laboregebnisse der Referenzfläche bei Jänschwalde

	Einheit	Mittelwert	Median	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Korngrößenverteilung	-	Ss (fSms)	-	-	-	-
TRD	g/cm ³	1,0	1,0	0,4	0,3	1,5
N _{ges}	%	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2
pH (CaCl ₂)		3,5	3,5	0,1	3,4	3,6
pH (H ₂ O)		4,3	4,2	0,1	4,1	4,5
EC	μS/cm	63,2	64,1	12,1	46,1	82,3
Carbonat	%	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
KAK _{eff}	mmolc/kg	41,8	41,2	10,1	26,3	59,3
Na	mmolc/kg	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3
K	mmolc/kg	1,2	1,1	0,4	0,7	1,8
Ca	mmolc/kg	12,1	11,3	4,0	6,2	17,5
Mg	mmolc/kg	1,7	1,8	0,5	0,9	2,3
Fe	mmolc/kg	2,4	2,4	0,4	1,8	2,9
Mn	mmolc/kg	0,6	0,7	0,2	0,3	0,7
Al	mmolc/kg	16,5	16,0	2,7	13,6	22,3
H ⁺	mmolc/kg	10,0	10,1	3,2	4,6	15,4
KAK _{pot}	mmolc/kg	119,5	121,4	26,2	78,6	157,9
Na	mmolc/kg	0,6	0,6	0,0	<0,1	0,6
K	mmolc/kg	1,3	1,1	0,8	0,6	2,9
Mg	mmolc/kg	0,7	0,8	0,2	0,4	0,9
Ca	mmolc/kg	3,6	3,4	1,0	2,5	5,1
BS	%	4,7	4,3	1,0	3,8	6,9
wasserlösl. Al ⁺	mg/kg	4,1	4,1	0,6	3,3	5,1
wasserlösl. Ca ²⁺	mg/kg	11,0	9,8	4,3	5,3	17,1
wasserlösl. Fe ³⁺	mg/kg	4,7	4,7	0,8	3,2	5,8
wasserlösl. K ⁺	mg/kg	12,6	11,9	3,8	7,1	17,8
wasserlösl. Mg ²⁺	mg/kg	2,2	2,1	0,7	1,1	3,2
wasserlösl. Mn ²⁺	mg/kg	0,8	0,8	0,3	0,3	1,2
wasserlösl. Na ⁺	mg/kg	1,5	1,5	0,2	1,2	1,8
wasserlösl. NH ₄ -N	mg/kg	9,5	9,9	4,3	3,2	15,0
wasserlösl. NO ₃ ⁻	mg/kg	43,3	42,4	17,2	25,0	69,6
wasserlösl. Cl ⁻	mg/kg	2,9	2,9	0,5	2,4	3,8
wasserlösl. SO ₄ ⁻	mg/kg	13,8	13,7	3,8	8,4	20,1
wasserlösl. DOC	mg/kg	252,0	242,0	42,3	215,3	315,3
N _{min}	mg/kg	9,6	9,5	4,0	5,0	16,0
C _{org}	%	3,3	3,2	0,9	2,1	5,1
PO ₄	mg/kg	73,5	67,0	28,2	43,4	121,6
K (austauschb.)	mg/kg	45,4	41,1	15,7	26,7	67,2

Mg (austauschb.)	mg/kg	21,8	22,6	7,5	11,2	30,3
------------------	-------	------	------	-----	------	------

Laborergebnisse der forstlichen Rekultivierungsfläche (kohlehaltig) Domsdorf / Tröbitz

	Einheit	Mittelwert	Median	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Korngrößenverteilung	-	SI4/Ls4	-	-	-	-
TRD	g/cm ³	1,4	1,4	0,1	1,2	1,6
N _{ges}	%	0,17	0,17	0,03	0,1	0,2
pH (CaCl ₂)		5,0	4,9	0,3	4,7	5,5
pH (H ₂ O)		6,1	6,0	0,5	5,4	6,8
EC	µS/cm	83,0	74,0	22,4	66,0	125,0
Carbonat	%	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3
KAK _{eff}	mmolc/kg	279,7	235,0	89,5	212,3	446,0
Na	mmolc/kg	0,4	0,4	0,2	0,1	0,8
K	mmolc/kg	0,6	0,6	0,1	0,4	0,7
Ca	mmolc/kg	271,6	228,1	81,9	202,4	437,9
Mg	mmolc/kg	5,3	5,4	1,4	3,3	7,3
Fe	mmolc/kg	0,5	0,5	0,2	0,3	0,8
Mn	mmolc/kg	0,5	0,5	0,2	0,3	0,8
Al	mmolc/kg	0,9	0,8	0,4	0,6	1,5
H ⁺	mmolc/kg	0,2	0,0	0,2	0,0	0,7
KAK _{pot}	mmolc/kg	190,1	200,6	27,6	135,1	206,9
Na	mmolc/kg	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
K	mmolc/kg	0,9	0,6	0,5	0,5	1,5
Mg	mmolc/kg	2,9	2,8	0,6	2,0	4,0
Ca	mmolc/kg	93,0	92,4	24,9	64,6	138,7
BS	%	51,8	53,5	15,5	33,7	69,3
wasserlösl. Al ⁺	mg/kg	0,8	0,8	0,3	0,3	1,1
wasserlösl. Ca ²⁺	mg/kg	74,7	73,0	24,0	48,6	104,0
wasserlösl. Fe ³⁺	mg/kg	1,4	1,5	0,4	1,0	2,0
wasserlösl. K ⁺	mg/kg	3,3	3,2	0,4	2,9	3,8
wasserlösl. Mg ²⁺	mg/kg	4,4	3,9	1,2	3,0	5,9
wasserlösl. Mn ²⁺	mg/kg	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3
wasserlösl. Na ⁺	mg/kg	2,7	2,8	0,7	1,8	3,4
wasserlösl. NH ₄ -N	mg/kg	1,0	1,0	0,1	0,8	1,1
wasserlösl. NO ₃ ⁻	mg/kg	2,2	2,1	1,4	0,7	4,2
wasserlösl. Cl ⁻	mg/kg	3,2	3,2	0,5	2,6	3,9
wasserlösl. SO ₄ ⁻	mg/kg	92,7	79,2	45,9	54,4	182,0
wasserlösl. DOC	mg/kg	203,0	203,0	21,1	180,0	229,0
N _{min}	mg/kg	1,6	1,4	0,8	0,7	2,6
C _{org}	%	6,8	7,0	1,1	5,3	8,3
PO ₄	mg/kg	9,8	9,8	1,4	7,9	11,3
K (austauschb.)	mg/kg	23,0	23,5	3,4	18,0	26,9

Mg (austauschb.)	mg/kg	65,8	65,6	11,6	50,6	84,5
------------------	-------	------	------	------	------	------

Laboregebnisse der forstlichen Rekultivierungsfläche (kohlefrei) Schipkau

	Einheit	Mittelwert	Median	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Korngrößenverteilung	-	St2/SI2/SI3	-	-	-	-
TRD	g/cm ³	1,6	1,6	0,1	1,5	1,7
N _{ges}	%	0,03	0,02	0,01	0,0	0,1
pH (CaCl ₂)		4,1	4,1	0,3	3,8	4,4
pH (H ₂ O)		5,3	5,3	0,4	4,8	5,9
EC	μS/cm	23,0	24,0	3,7	17,0	27,0
Carbonat	%	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2
KAK _{eff}	mmolc/kg	29,8	25,9	12,3	15,4	48,5
Na	mmolc/kg	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2
K	mmolc/kg	0,6	0,6	0,2	0,4	1,0
Ca	mmolc/kg	15,5	12,1	10,3	4,8	35,0
Mg	mmolc/kg	2,2	1,8	1,1	0,9	4,3
Fe	mmolc/kg	1,0	1,0	0,2	0,6	1,3
Mn	mmolc/kg	0,2	0,2	0,2	0,1	0,6
Al	mmolc/kg	9,3	9,0	2,1	6,6	13,2
H ⁺	mmolc/kg	1,0	0,9	0,3	0,6	1,4
KAK _{pot}	mmolc/kg	61,2	50,8	31,0	31,2	110,9
Na	mmolc/kg	0,2	0,2		<0,1	0,2
K	mmolc/kg	2,3	2,3	0,2	1,8	2,6
Mg	mmolc/kg	1,0	0,8	0,5	0,5	1,9
Ca	mmolc/kg	4,3	2,5	2,8	2,3	9,7
BS	%	13,3	13,4	4,1	6,5	18,6
wasserlösl. Al ⁺	mg/kg	3,3	2,7	0,9	1,9	6,8
wasserlösl. Ca ²⁺	mg/kg	9,7	9,2	3,4	5,7	14,1
wasserlösl. Fe ³⁺	mg/kg	1,6	1,4	0,6	0,9	2,3
wasserlösl. K ⁺	mg/kg	6,3	5,8	1,4	5,2	8,9
wasserlösl. Mg ²⁺	mg/kg	1,6	1,5	0,5	0,9	2,3
wasserlösl. Mn ²⁺	mg/kg	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
wasserlösl. Na ⁺	mg/kg	1,2	1,1	0,2	0,9	1,5
wasserlösl. NH ₄ -N	mg/kg	1,1	1,1	0,2	0,8	1,5
wasserlösl. NO ₃ ⁻	mg/kg	0,8	0,8		<0,6	0,8
wasserlösl. Cl ⁻	mg/kg	2,8	2,5	0,8	2,0	3,9
wasserlösl. SO ₄ ⁻	mg/kg	9,4	9,6	2,0	6,7	11,9
wasserlösl. DOC	mg/kg	125,0	125,0	25,0	96,0	159,0
N _{min}	mg/kg	0,5	0,5	0,2	0,4	0,8
C _{org}	%	0,9	0,7	0,4	0,5	1,4
PO ₄	mg/kg	5,8	5,0	2,3	3,6	9,7
K (austauschb.)	mg/kg	19,4	17,8	6,3	13,4	28,0

Mg (austauschb.)	mg/kg	24,4	21,4	13,2	11,0	47,0
------------------	-------	------	------	------	------	------

Laborergebnisse der landwirtschaftlichen Rekultivierungsfläche (kohlehaltig) Grünwälder

	Einheit	Mittelwert	Median	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
Korngrößenverteilung	-	St2	-	-	-	-
TRD	g/cm ³	1,2	1,2	0,1	1,1	1,3
N _{ges}	%	0,13	0,13	0,01	0,12	0,14
pH (CaCl ₂)		5,0	5,0	0,1	4,8	5,2
pH (H ₂ O)		6,5	6,5	0,3	6,2	7,0
EC	µS/cm	48,0	48,0	5,3	40,0	54,0
Carbonat	%	0,4	0,4	0,0	0,3	0,4
KAK _{eff}	mmolc/kg	198,9	197,9	17,9	181,6	218,9
Na	mmolc/kg	0,8	0,9	0,3	0,4	1,0
K	mmolc/kg	0,8	0,8	0,1	0,8	0,9
Ca	mmolc/kg	179,9	177,4	14,9	164,3	200,6
Mg	mmolc/kg	16,2	15,6	3,0	13,7	22,5
Fe	mmolc/kg	0,4	0,4	0,0	0,4	0,5
Mn	mmolc/kg	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
Al	mmolc/kg	1,3	1,2	0,4	0,9	1,9
H ⁺	mmolc/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KAK _{pot}	mmolc/kg	181,7	185,9	28,3	147,6	218,9
Na	mmolc/kg	0,2	0,2	0,0	<0,1	0,2
K	mmolc/kg	1,1	1,1	0,4	0,4	1,6
Mg	mmolc/kg	9,5	8,4	2,1	8,0	13,8
Ca	mmolc/kg	50,4	50,2	7,0	40,4	59,5
BS	%	33,9	33,4	4,6	27,7	39,3
wasserlösl. Al ⁺	mg/kg	0,9	0,8	0,2	0,7	1,1
wasserlösl. Ca ²⁺	mg/kg	28,1	28,3	1,8	25,6	30,4
wasserlösl. Fe ³⁺	mg/kg	0,9	0,9	0,2	0,7	1,2
wasserlösl. K ⁺	mg/kg	4,2	4,1	0,9	3,2	5,3
wasserlösl. Mg ²⁺	mg/kg	10,4	9,8	1,8	8,8	13,5
wasserlösl. Mn ²⁺	mg/kg	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
wasserlösl. Na ⁺	mg/kg	2,7	2,8	0,2	2,4	2,9
wasserlösl. NH ₄ -N	mg/kg	1,1	1,0	0,2	1,0	1,4
wasserlösl. NO ₃ ⁻	mg/kg	1,4	1,5	0,4	0,7	1,8
wasserlösl. Cl ⁻	mg/kg	2,9	2,9	0,4	2,3	3,6
wasserlösl. SO ₄ ⁻	mg/kg	27,3	27,0	4,3	20,6	33,2
wasserlösl. DOC	mg/kg	137,0	141,0	12,1	120,0	148,0
N _{min}	mg/kg	1,0	1,0	0,1	0,9	1,2
C _{org}	%	4,6	4,6	0,5	3,9	5,2
PO ₄	mg/kg	103,3	104,4	24,3	69,8	132,7
K (austauschb.)	mg/kg	30,1	30,1	4,0	25,0	35,2

Mg (austauschb.)	mg/kg	232,9	218,7	37,3	203,5	303,1
------------------	-------	-------	-------	------	-------	-------

Laboregebnisse der landwirtschaftlichen Rekultivierungsfläche (kohlefrei) Plessa

	Einheit	Mittelwert	Median	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Korngrößenverteilung	-	SI4/Ls4	-	-	-	-
TRD	g/cm ³	1,7	1,8	0,2	1,5	1,9
N _{ges}	%	0,07	0,07	0,01	0,06	0,08
pH (CaCl ₂)		7,4	7,4	0,0	7,4	7,4
pH (H ₂ O)		8,2	8,2	0,1	8,0	8,3
EC	µS/cm	125,0	127,0	7,5	114,0	133,0
Carbonat	%	5,1	5,7	1,9	2,4	7,0
KAK _{eff}	mmolc/kg	720,9	726,2	54,8	641,1	779,6
Na	mmolc/kg	0,5	0,5	0,1	0,4	0,6
K	mmolc/kg	2,7	2,8	0,5	2,0	3,3
Ca	mmolc/kg	709,6	714,8	48,6	632,1	767,1
Mg	mmolc/kg	7,3	7,5	0,8	6,1	8,3
Fe	mmolc/kg	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2
Mn	mmolc/kg	0,4	0,4	0,0	0,4	0,5
Al	mmolc/kg	0,6	0,6	0,0	0,6	0,6
H ⁺	mmolc/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KAK _{pot}	mmolc/kg	114,9	113,3	13,4	95,8	130,8
Na	mmolc/kg	0,1	0,1	0,0	<0,1	0,1
K	mmolc/kg	4,2	4,2	0,7	3,2	4,9
Mg	mmolc/kg	2,1	2,3	0,4	1,5	2,6
Ca	mmolc/kg	61,9	65,4	8,6	46,6	71,4
BS	%	59,4	56,8	6,7	53,6	71,8
wasserlösl. Al ⁺	mg/kg	<0,06	<0,06		<0,06	<0,06
wasserlösl. Ca ²⁺	mg/kg	79,3	79,0	2,7	76,0	83,8
wasserlösl. Fe ³⁺	mg/kg	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2
wasserlösl. K ⁺	mg/kg	18,1	18,2	2,9	14,5	21,6
wasserlösl. Mg ²⁺	mg/kg	3,1	3,1	0,4	2,5	3,6
wasserlösl. Mn ²⁺	mg/kg	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
wasserlösl. Na ⁺	mg/kg	1,2	1,2	0,2	1,0	1,4
wasserlösl. NH ₄ -N	mg/kg	1,8	1,9	0,2	1,5	1,9
wasserlösl. NO ₃ ⁻	mg/kg	1,1	1,1	0,3	0,7	1,6
wasserlösl. Cl ⁻	mg/kg	1,8	1,8	0,3	1,4	2,2
wasserlösl. SO ₄ ⁻	mg/kg	12,0	12,1	4,1	6,1	17,6
wasserlösl. DOC	mg/kg	73,0	73,0	4,2	67,0	79,0
N _{min}	mg/kg	2,1	2,0	0,4	1,7	2,7
C _{org}	%	1,1	1,1	0,1	1,0	1,2
PO ₄	mg/kg	72,2	63,2	31,1	50,8	133,8
K (austauschb.)	mg/kg	88,5	90,1	14,4	66,8	101,8

Mg (austauschb.)	mg/kg	40,7	41,9	7,7	29,4	49,1
------------------	-------	------	------	-----	------	------

P:\AZ_T7\14-az\16\16_811_FE_LUA\2_48_Biokohle\2013\LUGV-Fachbeitrag\Abschlussbericht-Wirkung-Kohlen-C_final-korr 140505.docx

**Ministerium für Umwelt,
Gesundheit und Verbraucherschutz
des Landes Brandenburg**

**Landesamt für Umwelt,
Gesundheit und Verbraucherschutz
des Landes Brandenburg**

Referat Umweltinformation/Öffentlichkeitsarbeit

Seeburger Chaussee 2
14476 Potsdam OT Groß Glienicke
Tel. 033201 442 171
Fax 033201 43678
E-Mail infoline@lugv.brandenburg.de
www.lugv.brandenburg.de

