

Nachweis von Flugaschedeposition in Waldböden und Auswirkungen auf bodenphysikalische Eigenschaften

P. Hartmann, H. Fleige und R. Horn

Proof of fly ash deposition in forest soils and the effects on soil physical properties

1 Einführung

Für diese Arbeit wurden forstlich genutzte Flächen in den Regionen Dübener Heide und Oberlausitz untersucht, die seit Ende des 19. Jahrhunderts bis in die 1990er-Jahre stark durch die Deposition von Industrieabgasen, insbesondere Flugaschen geprägt waren.

Flugaschen setzen sich je nach Ausgangskohle aus variierenden Anteilen an CaO, silikatischen Gläsern, Al₂O₃, Fe₂O₃ und weiteren Oxiden sowie Braunkohle und Schwermetallen zusammen (DUNGER et al., 1972; KLOSE et al., 2003). Aufgrund dieser Zusammensetzung beeinflussen atmosphärisch deponierte Flugaschen bodenchemische Parameter wie den pH-Wert, die Basensättigung, Anteil und Zusammensetzung der organischen Substanz und die Kationenaustauschkapazität (NEUMEISTER et al., 1991; RUMPEL et al., 1998; WEISDORFER, 1999; SCHAAF et al., 2001; KOCH et al., 2002a; ZIKELI et al., 2002; KLOSE und MAKESCHIN, 2004; FRITZ und MAKESCHIN, 2007). Mineralische Flugaschepartikel entstehen bei der Verbrennung der Braunkohle, wobei mineralische Bestandteile aufschmelzen

und im Abstrom kugelförmig agglomerieren. Diese Partikel sind aufgrund von Ausgasungen während des Abkühlens z.T. porös (ADRIANO et al., 1980). Bezüglich bodenphysikalischer Eigenschaften zeichnen sich atmosphärische Flugaschedepositionen durch einen hohen Sortierungsgrad mit vorherrschenden Feinsand- bis Schlufffraktionen, durch hohe Porositäten und hohe Wasserleitfähigkeiten aus (TAUBNER und HORN, 1998; KLOSE und MAKESCHIN, 2003; KASTLER, 2005; HARTMANN et al., 2009b).

Bei Humusauflagen natürlicher Waldstandorte überwiegen strukturelle Eigenschaften abgestorbener und zersetzter pflanzlicher Partikel, die das Porensystem prägen. So sind Humusauflagen charakterisiert durch geringe Lagerungsdichten und extrem hohe Porositäten bei einer Dominanz der Grobporen und hohen Anteilen an Mittel- und Feinporen (BLEICH et al., 1987; HAMMEL und KENNEL, 2001; HAJNOS et al., 2003). Aufgrund hydrophober organischer Substanzen sind Humusauflagen zumindest temporär bei Austrocknung stark benetzungsgehemmt (BUCZKO ET AL., 2005; WOCHÉ et al., 2005; BUCZKO und BENS, 2006; GREIFFENHAGEN et al., 2006; HARTMANN et al., 2007).

Summary

In this paper, we present soils of forest regions in Saxony and Saxony-Anhalt (Germany), which had been influenced by industrial emissions for decades, in particular by lignite fly ashes. The enrichment of mineral fly ash particles could be proven directly by the soil horizon designation, by texture analyses and by scanning electron microscopy and indirectly by changed soil physical properties. In both study areas, the effects of fly ash enrichment were similar. Close to the emission sources (where there was an accumulation of sandy fly ash), particle density, air capacity, and saturated hydraulic conductivity were increased, whereas the water available to plants and water repellency was decreased. Coarse pores (air capacity) and saturated hydraulic conductivity were comparatively reduced with increasing distance from the emission source of the fly ash, corresponding with less accumulation of ash of decreasing size, whereas plant available water and soil water repellency increased. The investigated properties are partially highly correlated with each other and indicate that the enrichment of fly ash changed the total functionality of forest floor horizons.

Key words: Forest floor horizon, fly ash, scanning electron microscopy, soil physical properties.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Böden forstwirtschaftlich geprägter Regionen in Sachsen und Sachsen-Anhalt vorgestellt, die über Jahrzehnte unter dem Einfluss industrieller Emissionen standen, insbesondere in Form von Flugaschen aus der Braunkohlenverbrennung. Die Anreicherung mineralischer Flugaschepartikel konnte direkt mittels Horizontansprache, Texturanalyse und Rasterelektronenmikroskopie und indirekt aufgrund veränderter bodenphysikalischer Eigenschaften nachgewiesen werden. In beiden Untersuchungsgebieten verursachte die Flugaschanreicherung eine vergleichbare Modifikation bodenphysikalischer Kennwerte. Emittentennah (sandige Flugaschen) sind die Festsubstanzdichten, die Luftkapazitäten und die gesättigten Wasserleitfähigkeiten signifikant erhöht, wohingegen die nutzbaren Feldkapazitäten und die Kennwerte der Benetzungshemmung zum Teil signifikant verringerte Werte aufweisen. Mit zunehmender Entfernung (schluffige Flugaschen bis keine Aschanreicherung) verringern sich die (immer noch sehr hohen) Luftkapazitäten und die gesättigten Wasserleitfähigkeiten, wobei ein Anstieg der nutzbaren Feldkapazität festgestellt wurde. Die untersuchten Eigenschaften sind untereinander korreliert und zeigen damit an, dass die Humusaufgaben durch die Flugaschanreicherung in ihrer Gesamtfunktionalität verändert wurden.

Schlagnworte: Humusaufgabe, Flugasche, Waldböden, Rasterelektronenmikroskopie, bodenphysikalische Eigenschaften.

Flugaschen aus der Braunkohleverfeuerung bestehen zum Teil aus organischem Kohlenstoff, überwiegend jedoch aus anorganischen Mineralen der Sand- und Schlufffraktion und müssten sich somit auf bodenphysikalische Eigenschaften insbesondere des Bodenluft- und Wasserhaushaltes sowie auf die Benetzungseigenschaften der beeinflussten Böden auswirken.

In dieser Untersuchung werden unterschiedlich stark flugaschebeeinflusste Waldbodenhumusaufgaben entlang eines Depositionsgradienten (Details der Region Dübener Heide siehe HARTMANN et al., 2009b) sowie stark flugaschebeeinflusste Waldböden im Vergleich mit unbelasteten Standorten (Region Oberlausitz siehe HARTMANN et al., 2009a) zusammenfassend vorgestellt. Ziel ist es,

- (1) die Flugaschanreicherung nachzuweisen und
- (2) den Einfluss der Flugaschen auf bodenphysikalische Eigenschaften der angereicherten Humusaufgaben zu charakterisieren (Textur, Festsubstanzdichte, Trockenrohddichte, Porengrößenverteilung, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Benetzungshemmung).

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiete

Dübener Heide

Flächenhaft dominieren sandige glaziäre Substrate, auf denen die Prozesse der Verbraunung und der Podsolierung vorherrschen (Tabelle 1). Auf Geschiebelehm, bzw. ge-

ringmächtigen Geschiebedecksanden über Geschiebelehm haben sich von Staunässe geprägte Böden herausgebildet. Grundwasser beeinflusst die Standorte vor allem in den tiefgelegenen Moränenplatten nördlich der Stauchendmoräne (MANNFELD und BERNHARDT, 1995; KAINZ, 2007). Die Humusformen wurden als moderartiger Rohhumus klassifiziert. Aus den Klimawerten für Wittenberg (105 m üNN; 51°53'N; 012°38'E) (1971–2000), am nordöstlichen Rand der Dübener Heide gelegen, ergibt sich ein mittlerer Jahresniederschlag von 546 mm bei einer Durchschnittstemperatur von 9,1 °C.

Insbesondere alkalische Flugaschen wurden in großen Mengen eingetragen und akkumulierten auch in den organischen Aufgaben der Waldböden (NEUMEISTER et al., 1991). Die industrielle Entwicklung im Raum Bitterfeld-Wolfen basierte auf der energetischen Nutzung von Braunkohle. Das Braunkohlekraftwerk in Zschornowitz war bei seiner Errichtung 1915 das weltweit leistungsfähigste und lieferte Strom für die angegliederte chemische Industrie und für die Reichshauptstadt Berlin. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist ein Abbau von 820 Tg Rohbraunkohle dokumentiert (NEUMEISTER et al., 1991). Diese wurde auch größtenteils in der Region verbrannt, wodurch ca. 52 Tg Asche entstanden, die fast ausschließlich in den ausgekohnten Braunkohlentagebaurestlöchern deponiert wurden. Hinzu kommen 12 Tg Flugasche, deren atmosphärische Deposition ebenfalls größtenteils im Raum Bitterfeld-Wolfen erfolgte sowie der atmosphärische Eintrag von Schwefeldioxid mit ca. 18 Tg SO₂. Im Zuge der Wiedervereinigung im Herbst 1989 kam es in der Region zu flächen-

deckenden Betriebsschließungen, womit die Immissionsbelastungen endeten. Das Kraftwerk Zschornewitz wurde 1992 geschlossen (HOLZ, 2007).

Aufgrund der langfristigen Immissionen kam es zu Schädigungen an den Waldbeständen hauptsächlich durch toxische Effekte von SO_2 auf Assimilationsprozesse und die Einschränkung der Stomatafunktionen. Diese Schädigungen wurden anhand von Beobachtungspartellen nach LUX (1965) in Depositionszonen klassifiziert. Trotz der Vielzahl der Schadstoffemittenten in der Region bedingen die Hauptemittenten in Bitterfeld-Wolfen und vor allem der Hauptemittent für Flugasche in Zschornewitz eine räumliche Verteilung der Schadenszonen mit einer deutlichen Abnahme der Schadensintensitäten von West nach Ost der allgemeinen Westwindrichtung folgend. Bodenchemische Untersuchungen bestätigen diesen Immissionseinfluss vor allem emittentennaher Standorte (KOCH et al., 2002b; FRITZ und MAKESCHIN, 2007; MAKESCHIN und FÜRST, 2007), sodass eine modifizierte Einteilung der Standorte entlang eines Distanzgradienten in Bezug auf den Hauptemittenten Zschornewitz vorgenommen wurde (Abbildung 1, Tabelle 1). Zu Referenzzwecken für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung wurde zusätzlich eine reine Flugashedeposition aus Bitterfeld (beschrieben in HARTMANN et al., 2009b) herangezogen.

Oberlausitz

Die östliche Oberlausitz, die sich vom Ostrand des Oberlausitzer Berglandes bis zur Neiße erstreckt, ist eine heterogene

Naturraumeinheit. Die Geologie der Region ist geprägt durch das vorvariskische Lausitzer Granit-Granodioritmassiv, dessen Hohlformen durch elsterzeitliche Grundmoränen und Schmelzwassersande aufgefüllt wurden. Jüngste kaltzeitliche Substrate sind Löss- und deren Umlagerungsprodukte sowie Verwitterungs- und Umlagerungsdecken aus Festgestein. Vorherrschende Bodenbildungsprozesse sind eine leichte Podsolierung und Verbraunung bei überwiegend granitischem Ausgangsgestein, mit steigendem Löß- und Geschiebemergleinfluss nehmen Tonverlagerung und Vernässung an Bedeutung zu (SCHMIDT, 1995) (Tabelle 1). Die Humusformen wurden als (rohhumusartiger) Moder angesprochen. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei $8,2\text{ }^\circ\text{C}$, der durchschnittliche Jahresniederschlag bei 646 mm (Görlitz 238 m üNN ; $51^\circ10'\text{N}$; $014^\circ57'\text{E}$).

Der Abbau und die Verbrennung von Braunkohle ist ein traditioneller Sektor der Energiegewinnung in der Region Oberlausitz entlang der deutsch-polnischen Grenze. Von 1911 bis 1992 produzierte das Kraftwerk in Hirschfelde Elektrizität mit einer Gesamtleistung von $71,3\text{ TWh}$; das Kraftwerk Turów in Polen wurde 1962 in Betrieb genommen und produziert momentan etwa 2 GW . Mit dieser intensiven Braunkohleverbrennung ging ein hoher Ausstoß an Flugaschen, Braunkohlestäuben, SO_2 , NO_x und CO_2 einher (DUNGER et al., 1972; KLOSE et al., 2003). Vor allem Südost- und Südwinde führten zu hohen Immissionsraten in den Forstrevieren nördlich der Kraftwerke, sodass in den 1960er-Jahren mehr als $0,15\text{ mg/m}^2\text{ SO}_2$ pro Tag in 22%

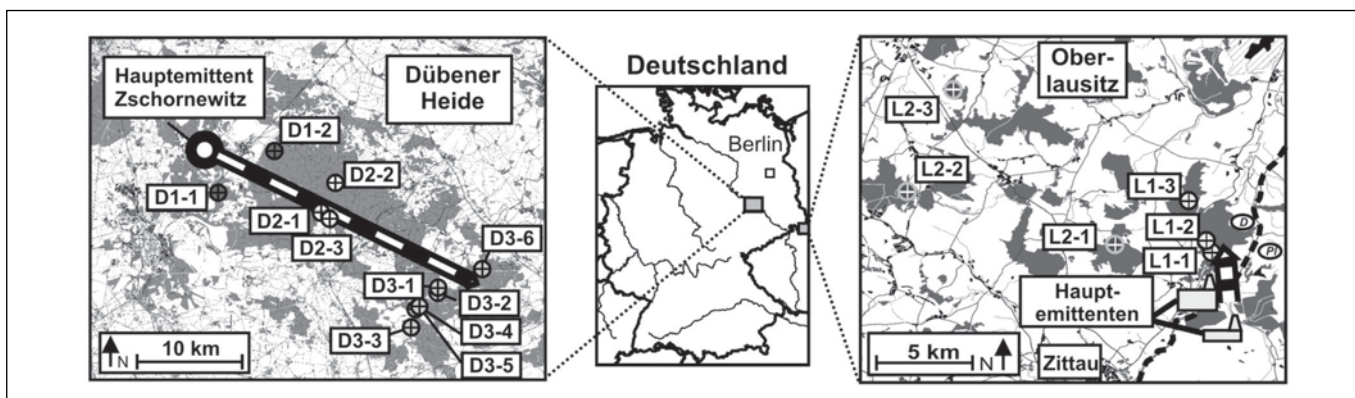


Abbildung 1: Lage der untersuchten Standorte in der Dübener Heide (links) und der Oberlausitz (rechts). Die Standorte der Dübener Heide liegen entlang eines Distanzgradienten in Bezug auf den Hauptemittenten in Zschornewitz (geringe Distanz Standorte D1-1 und D1-2; mittlere Distanz: D2-1, D2-2 und D2-3; große Distanz: D3-1 bis D3-6). In der Oberlausitz sind Standorte mit Flugaschenanreicherung: Standorte L1 1, L1 2 und L1 3 und ohne Flugaschenanreicherung: Standorte L2-1, L2-2 und L2-3

Figure 1: Location of the studied sites in the region Dübener Heide (left) and in Upper Lusatia ("Oberlausitz", right). The sites in the region Dübener Heide are located along a distance gradient related to the main emission source in Zschornewitz (small distance: sites D1-1 and D1-2; medium distance: sites D2-1, D2-2 and D2-3; large distance D3-1 to D3-6). The sites in Upper Lusatia are on the one hand with fly ash enrichment: sites L1-1, L1-2 and L1-3 and without fly ash enrichment: L2-1, L2-2 and L2-3

aller Fälle und mehr als 15 g/m² Flugasche pro Tag in 75–100 % aller Fälle gemessen wurde. In der Oberlausitz ist im Gegensatz zur Dübener Heide kein Flugaschegradient ausweisbar. Das Neißetal verläuft im Untersuchungsgebiet von Südwest nach Nordost. Dadurch werden die vorherrschenden Winde aus westlichen Richtungen lokal dem Talverlauf folgend abgelenkt, so dass diese zusätzlich zu den selteneren Süd- bis Ostwindlagen Flugascheverlagerungen entlang der Neiße verursachen konnten (LUX, 1970). Entlang des Nei-

ßetals wurden sehr hohe Akkumulationen beobachtet (Standorte L1-1, L1-2 und L1-3), im restlichen Untersuchungsgebiet keine nennenswerten (Standorte L2-1, L2-2 und L2-3).

Erst strenge Emissionskontrollen sowie die Schließung von Hirschfelde 1992 führten zu einer deutlichen Reduzierung dieser Immissionen. Entlang der deutsch-polnischen Grenze verringerte sich die Staubemission der deutschen Kraftwerke und Turów von 455 Gg (1989/1990) auf 18 Gg

Tabelle 1: Eigenschaften der reinen Flugasche, der untersuchten Standorte der Dübener Heide (Präfix D) und der Oberlausitz (Präfix L) (Yab = Braunkohlenkraftwerksasche, Yeb = Bergematerial, Sa = Flugsand, Guz = Schwemm Kies, Sp = Geschiebedecksand, Sgf = Schmelzwassersand, Lol = Lösslehm, Lg = Geschiebelehm, +G = Granit, +GDr = Granodiorit, k.A. = kein Ascheeintrag)

Table 1: Properties of the studied fly ash, of the sites in the regions Dübener Heide (prefix D) and Upper Lusatia (prefix L) (Yab = lignite power plant ash, Yeb = spoil, Sa = eolian sand, Guz = alluvial gravel, Sp = glacial sand, Sgf = meltwater sand, Lol = loess loam, Lg = glacial till, +G = granite, +GDr = granodiorite, k.A. = no ash deposition)

Standort	Entfernung zum Hauptemittenten (km)	Bodensubtyp nach AD-HOC-AG BODEN (2005)	Ausgangssubstrat	Soil Group (FAO, 2006)	dominierender Bestand	untersuchter Horizont	Mächtigkeit in cm
Reine Flugasche	0,2	Normregosol	Yab/Yeb	Spolic Technosol	Reitgras	yloC	20
D1-1	4,2	Normbraunerde	Sp/Guz/Sgf	Brunic Arenosol	Kiefer / Eiche	Of,Oh+yloC	6
D1-2	7,5	Podsol-Braunerde	Sp/Sgf	Brunic Arenosol	Kiefer	Of,Oh(+yloC)	6
D2-1	14,9	Normbraunerde	Sp/Sgf/Lg	Brunic Arenosol	Buche	Of,Oh	5
D2-2	14,9	Normpodsol	Sgf	Haplic Podzol	Kiefer / Buche	Of,Oh	6
D2-3	15,2	Podsol-Braunerde	Sp/Sgf	Haplic Podzol	Kiefer / Buche	Of,Oh	7
D3-1	30,2	Pseudogley-Braunerde	Sp/Lg	Stagnic Arenosol	Buche / Eiche	Of,Oh	8
D3-2	30,4	Normpodsol	Sa	Haplic Podzol	Kiefer	Of,Oh	6
D3-3	30,2	Podsol-Gley	Sgf	Endogleyic Arenosol	Kiefer / Buche, Eiche	Of,Oh	5
D3-4	29,6	Podsol-Braunerde	Sp/Sgf	Brunic Arenosol	Buche	Of,Oh	5
D3-5	29,6	Braunerde-Podsol	Sp/Sgf	Haplic Podzol	Buche	Of,Oh	7
D3-6	33,9	Pseudogley-Braunerde	Sp/Lg	Stagnic Podzol	Kiefer	Of,Oh	5
L1-1	3	Pseudogley-Braunerde	Yab/Lol/+G	Stagnic Technic Cambisol	Buche	Of,Oh+yloC	15
L1-2	3,7	Parabraunerde-Pseudogley	Yab/Lol/+G	Luvic Technic Stagnosol	Buche	Of,Oh+yloC	10
L1-3	7	Parabraunerde-Pseudogley	Yab/Lol/+G	Stagnic Technic Luvisol	Fichte	Of,Oh+yloC	14
L2-1	k.A.	Parabraunerde-Pseudogley	Lol/Lg	Luvic Stagnosol	Fichte	Of,Oh	5
L2-2	k.A.	Normbraunerde	Lol/+GDr	Haplic Cambisol	Fichte	Of,Oh	5
L2-3	k.A.	Pseudogley-Braunerde	Lol/+GDr	Stagnic Cambisol	Buche	Of,Oh	4

(2001), SO₂ wurde entsprechend von 1780 auf 85 Gg reduziert (DEUTSCH-POLNISCHE KOMMISSION FÜR NACHBARSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES UMWELTSCHUTZES, 1995).

2.2 Probenahme

Die Beprobung erfolgte von 2005–2006 (Dübener Heide) und 2007 (Oberlausitz). Für die Bestimmung der Wasserretentionsfunktion ($n = 6$), der k_f -Werte ($n = 5$) und von ρ_t ($n = 6$) wurden ungestörte Stechzylinderproben mittels Metallstechzylindern mit 4 cm Höhe und 100 cm³ Volumen genommen. Damit wurden die obersten 4 cm der Humusauflagen (Tabelle 1) auf einer Fläche von 50 * 50 cm beprobt, nachdem die frische Streuschicht (L-Horizont) entfernt wurde. Für weitere laboranalytische Untersuchungen (Textur, ρ_s , θ_{wpm} , Ct) wurden Mischproben aus den zwischen den Zylindern liegenden Bereichen genommen.

2.3 Labormethoden

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen wurden für die reine Flugaschedeposition und die flugascheangereicherte Humusaufgabe des Standortes L1-1 durchgeführt. Das Material wurde für 48 h bei 70 °C getrocknet, um den Wassergehalt möglichst zu reduzieren und gleichzeitig die organische Substanz zu schonen. Die Untersuchungen wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop des Typs *CamScan 44* am Institut für Geowissenschaften, Abteilung Geologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel durchgeführt.

Die folgenden Methoden werden explizit von HARTGE und HORN (1992) beschrieben. Die Korngrößenzusammensetzung wurde durch Nasssiebung und Pipettierung bestimmt, nachdem die gesamte organische Substanz und verkittende Substanzen entfernt wurden und eine vollständige Dispergierung gewährleistet war. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit k_f wurde mit einem Haubenpermeameter unter instationären Bedingungen mit abnehmendem Gradienten bestimmt ($n = 5$). Ungestörte Bodenproben wurden herangezogen, um mittels definierter Entwässerungsstufen (–5, –10, und –30 hPa (auf einem Laborsandbad mit hängender Wassersäule); –60, –150, –300 und –500 hPa (auf keramischen Platten) und in einem Drucktopf (Überdruck +5000 und +15000 hPa) die Porengrößenverteilung zu quantifizieren ($n = 6$). Um die bei der sukzessiven Austrocknung auftretende Veränderung des Gesamtporenvolu-

mens GPV zu quantifizieren, wurde nach jeder Entwässerungsstufe die Schrumpfung der Proben an acht definierten Punkten mittels einer Schieblehre gemessen. Als repräsentative Kennwerte werden die Luftkapazität LK (Wassergehalt bei –60 hPa), die nutzbare Feldkapazität nFK (Wassergehalt zwischen –60 hPa und 15000 hPa) und der Totwasseranteil TW (Wassergehalt bei 15000 hPa) dargestellt. Des Weiteren wurden die ungestörten Proben bei 105 °C getrocknet, um die Trockenrohdichten ρ_t zu bestimmen. Das Gesamtporenvolumen GPV wurde anhand der Trockenrohdichten ρ_t und der Festsubstanzdichten ρ_s bestimmt. Die Festsubstanzdichten ρ_s wurden nach BLAKE & HARTGE (1986) bestimmt, mit der Modifikation, dass die Humusaufgaben bei 70 °C für 48 h getrocknet wurden (REDDING et al., 2005) ($n = 3$). Die fortschreitenden Kontaktwinkel θ_{wpm} wurden nach der Wilhelmy-Platten-Methode (BACHMANN et al., 2003) bestimmt. Für diese Messung wurden luftgetrocknete Proben auf eine Korngröße < 630 µm gesiebt ($n = 3$). Die Untersuchungsergebnisse der physikalischen Untersuchungen wurden anhand der Klassifizierung der AD-HOC-AG BODEN (2005) bewertet.

Zusätzlich zu den bodenphysikalischen Untersuchungen wurde der gesamte Kohlenstoffgehalt Ct mittels coulometrischer Titration und Verbrennung mit einem Ströhlein-Coulomat 702 bestimmt ($n = 3$).

Die statistischen Auswertungen wurden mit der frei verfügbaren Software R Version 2.5.1 (THE R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING, 2007) durchgeführt. Die Normalverteilung wurde mit dem Shapiro Wilk Test überprüft. Außer k_f (log-normal verteilt) sind alle untersuchten Parameter normalverteilt. Ob sich arithmetische Mittelwerte signifikant unterscheiden, wurde anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) überprüft. Unter der Annahme kausaler Zusammenhänge wurden lineare Korrelationen mittels des Pearsons-Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten r auf Signifikanz (***) $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$) überprüft.

3 Ergebnisse

3.1 Horizontansprache und Texturen der mineralischen Komponenten

Bei der Horizontansprache im Gelände wurde die reine Flugasche als „yloC“ klassifiziert (Tabelle 1), da sie anthropogenen Ursprungs, grabbar und lithogene organische Sub-

stanz in Form von Braunkohleresten aufweist. Vergleichbares Material wurde auch an den Standorten D1-1, und D1-2 sowie deutlicher an den Standorten L1-1, L1-2 und L1-3 festgestellt. Die Korngrößenzusammensetzung der reinen Flugasche sowie der flugascheangereicherten Humusauflagen der Standorte D1-1, L1-1, L1-2 und L1-3 zeigen eine Dominanz schluffiger und sandiger Partikel (Abbildung 2). Der unimodale und steile Anstieg in der Korngrößensummenkurve weist auf eine gut sortierte Textur hin. Dabei hat die reine Flugasche die größte Textur (mSfs), der weiter entfernte Standort D1-1 besitzt einen höheren Anteil an Schluff (Su2). Die Standorte der Oberlausitz weisen einen deutlichen Entfernungsgradienten auf, mit zunehmender Entfernung ist eine Verschiebung hin zu feineren Texturen zu erkennen (Su4 – Us – Ut2).

3.2 Nachweis der Flugasche mit Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Durch REM konnten für die reine Flugasche unterschiedliche Bestandteile ausgemacht werden. Organische Braunkohlenreste erscheinen als große Partikel (z.T. > 1000 μm) mit faseriger, holzähnlicher Struktur, auf deren Oberflächen sphärische Aschepartikel anheften (Abbildung 3a). Kennzeichnend für Flugaschen sind kugelige, anorganische Strukturen, die entweder mit einer großen Anzahl an Hohlräumen oder mit glatter Oberfläche in Erscheinung treten (Abbildungen 3b–c). Die aufgefundenen Sphären sind der Grobschluff- bis Feinsandfraktion zuzurechnen. Die Parti-

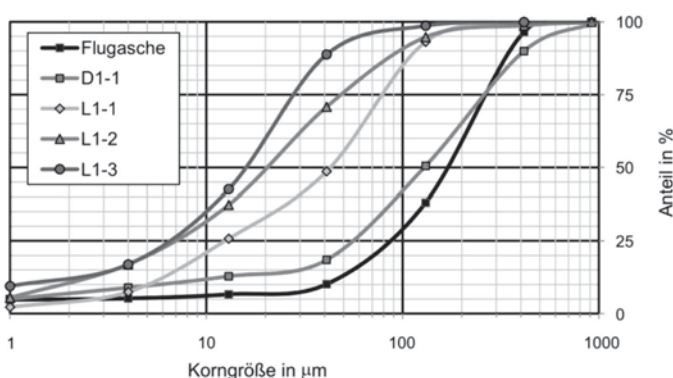


Abbildung 2: Korngrößensummenkurven der mineralischen Bestandteile der reinen Flugasche sowie der flugascheangereicherten Humusauflagen der Standorte D1-1, L1-1, L1-2 und L1-3

Figure 2: Grain size distribution of the mineral components of the pure fly ash and of the fly ash enriched forest floor horizons of the sites D1-1, L1-1, L1-2 and L1-3

kel weisen auf ihrer Oberfläche z.T. Porenräume auf, die im Bereich von 0,5 bis 1,0 μm und somit im feinen Mittelporenbereich liegen. Bei der flugascheangereicherten Humusauflage des Standortes L1-1 herrschen durch organische Substanzen geprägte Strukturen vor (Abbildung 3d). Deutlich zu erkennen sind mineralische Partikel mit sphärischem Charakter, die in großer Anzahl auf organischen Partikeln oder singular vorliegen (Abbildung 3e). Die Größen dieser Partikel liegen im Bereich von Feinschluff bis Feinsand und weisen ebenfalls z.T. Hohlräume auf (Abbildung 3f).

3.3 Eigenschaften der Humusauflagen entlang des Depositionsgradienten in der Region

Dübener Heide

Sehr geringe ρ_t sowie ρ_s zwischen 1,7 und 2,4 g cm^{-3} ergeben sehr hohe GPV, wobei die LK mit wenigen Ausnahmen dominiert (Abbildung 4). Die nFK variiert stark zwischen geringen und sehr hohen Werten. Der TW-Anteil ist als mittel bis sehr hoch einzuordnen. kf erreicht mittlere bis extrem hohe Werte. In Abhängigkeit von der Distanz zum

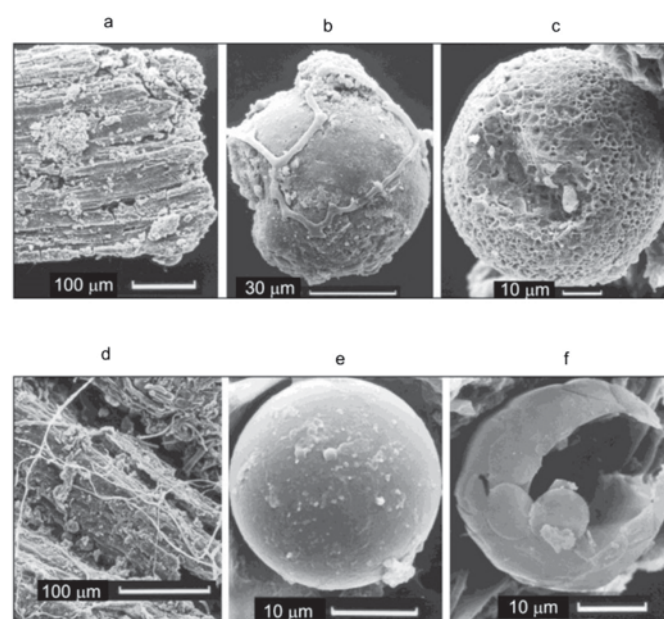


Abbildung 3: Rasterelektronische Aufnahmen der reinen Flugasche (a–c) und der flugascheangereicherten Humusauflage L1-1 (d–f). a: Braunkohlerest; b und c: mineralische Flugaschepartikel; d: organische Struktur; e und f: mineralische Flugaschepartikel

Figure 3: Scanning electron micrographs of the fly ash (a–c) and of the fly ash enriched forest floor horizon L1-1 (d–f). a: lignite rest; b and c: mineral fly ash particle; d: organic structure; e and f: mineral fly ash particle

Hauptemittenten in Zschornowitz konnten graduelle Unterschiede bei der Ausprägung einiger bodenphysikalischer Eigenschaften der Humusauflagen festgestellt werden. Emittentennah sind ρ_s , LK und k_f erhöht, wohingegen Ct, nFK, TW und θ_{wpm} verringerte Werte aufweisen. Statistische Signifikanz ist gegeben für die Kennwerte LK, k_f , nFK, Ct und θ_{wpm} . Kein Einfluss ist erkennbar für ρ_t und GPV.

3.4 Eigenschaften der Humusauflagen mit und ohne Flugasche der Untersuchungsregion Oberlausitz

Die flugascheangereicherten Standorte weisen zum Teil signifikante Unterschiede zu den Humusauflagen ohne Flugascheanreicherung auf (Abbildung 5). Emittentennah erhöhte ρ_s bei ähnlichen, sehr geringen ρ_t führen zu ver-

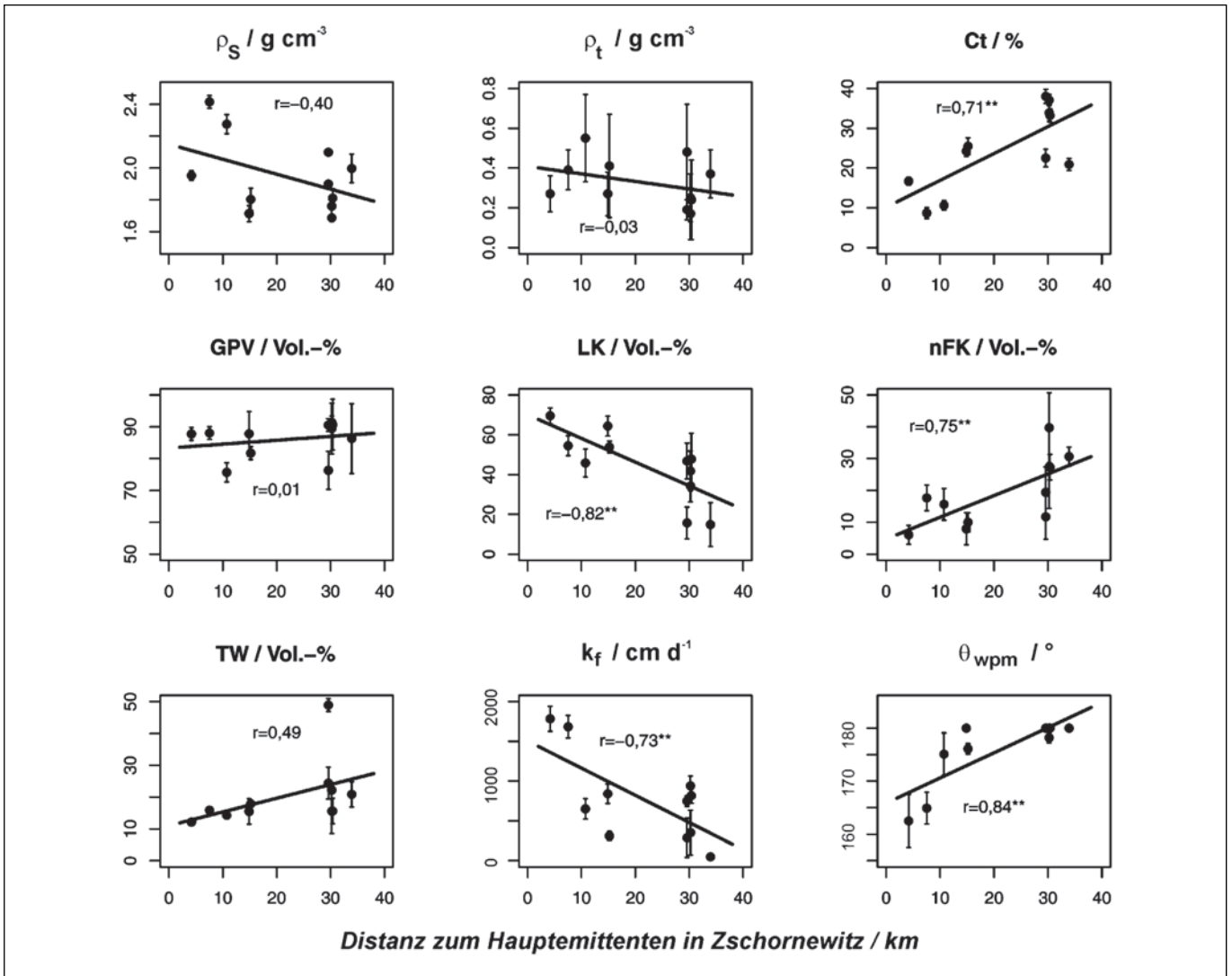


Abbildung 4: Bodenphysikalische Eigenschaften (Mittelwerte und Standardabweichungen) der Humusauflagen der Standorte der Dübener Heide in Abhängigkeit von der Distanz zum Hauptemittenten in Zschornowitz (ρ_s = Festsubstanzdichte, ρ_t = Trockenrohichte, Ct = Gesamtkohlenstoffgehalt, GPV = Gesamtporenvolumen, LK = Luftkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, TW = Totwasseranteil, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit, θ_{wpm} = Wilhelmy-Platten-Methode Kontaktwinkel, r = Pearsons Korrelationskoeffizient; Signifikanz der Korrelation ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$)

Figure 4: Soil physical properties (mean values and standard deviations) of the forest floor horizons of the region Dübener Heide depending on the distance to the main emission source in Zschornowitz (ρ_s = particle density, ρ_t = bulk density, Ct = total carbon content, GPV = total pore volume, LK = air capacity, nFK = plant available water, TW = water content at the wilting point, k_f = saturated hydraulic conductivity, θ_{wpm} = Wilhelmy-plate-method contact angle, r = Pearsons correlation coefficient; significance of correlation ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$)

größerten, jedoch bei allen Standorten immer noch sehr hohen GPV, wobei insbesondere die LK (mittel bis sehr hoch) erhöht sind. Die nFK (mittel bis sehr hoch) ist aufgrund der Sanddominanz der untersuchten Standorte durch Ascheintrag verringert. Der TW-Anteil ist als mittel

bis hoch einzustufen und weist kaum Unterschiede auf. Die kf-Werte sind als hoch bis extrem hoch zu klassifizieren und sind an den Standorten mit Flugascheeinfluss deutlich erhöht. Die Anreicherung der Flugasche führt zu einer signifikanten Reduktion von Ct und von θ_{wpm} .

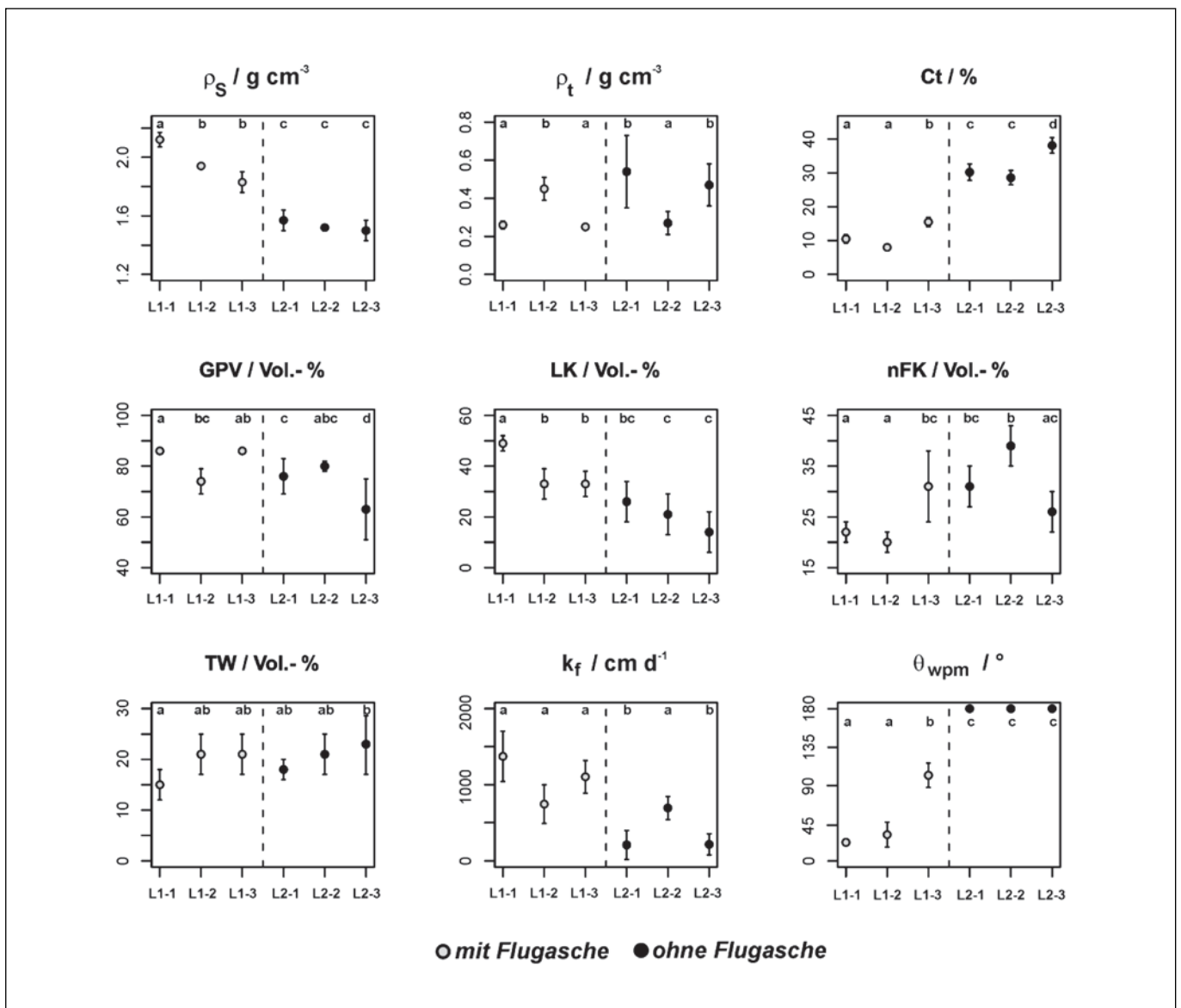


Abbildung 5: Bodenphysikalische Eigenschaften (Mittelwerte und Standardabweichungen) der Humusauflagen mit und ohne Flugascheanreicherung der Standorte der Oberlausitz (ρ_s = Festsubstanzdichte, ρ_t = Trockenrohddichte, Ct = Gesamtkohlenstoffgehalt, GPV = Gesamtporenvolumen, LK = Luftkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, TW = Torwasseranteil, kf = gesättigte Wasserleitfähigkeit, θ_{wpm} = Wilhelmy-Platten-Methode Kontaktwinkel; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte mit $P < 0,05$)

Figure 5: Soil physical properties (mean values and standard deviations) of the partially fly ash enriched forest floor horizons of the region Upper Lusatia (ρ_s = particle density, ρ_t = bulk density, Ct = total carbon content, GPV = total pore volume, LK = air capacity, nFK = plant available water, TW = water content at the wilting point, kf = saturated hydraulic conductivity, θ_{wpm} = Wilhelmy-plate-method contact angle; different letters indicate significant differences of mean with $P < 0.05$)

3.5 Korrelationen zwischen den untersuchten Bodenparametern

Der Vergleich der nadelbaumdominierten Untersuchungsflächen mit den laubbaumdominierten ergibt keine signifikanten Unterschiede bodenphysikalischer Eigenschaften hinsichtlich des Bestandes (nicht dargestellt). Daher werden im Folgenden die Parameter aller untersuchten Humusauflagen zusammen auf kausale Zusammenhänge hin verglichen (Tabelle 2). Die deutlichste (negative) Korrelation besteht zwischen ρ_s und Ct. Durch die Anreicherung überwiegend mineralischer Flugaschen erhöht sich ρ_s und es verringert sich entsprechend der relative Gehalt an Ct. Dies wiederum bedingt eine reduzierte potentielle Benetzungshemmung, was in einer positiven Korrelation zu θ_{wpm} resultiert. Es sind Zusammenhänge zwischen Ct, bzw. ρ_s und der Porengrößenverteilung zu erkennen. Tendenziell weisen emittentennähere Standorte mit Flugaschanreicherung (Ct geringer, ρ_s erhöht) geringere Anteile im Bereich der Feldkapazität (TW und nFK) zu Gunsten von erhöhten LK, bzw. weiten Grobporen auf. Diese erhöhte Makroporosität wiederum ist positiv mit kf korreliert, die ebenfalls eine signifikante Beeinflussung durch ρ_s aufweist. ρ_t zeigt nur schwache Zusammenhänge mit anderen Parametern, am deutlichsten ist noch der negative Zusammenhang mit dem GPV.

4 Diskussion

Die Flugaschanreicherung in Humusauflagen konnte nachgewiesen werden.

(1) Bei der Horizontansprache im Gelände konnte für emittentennahe Standorte der Oberlausitz und der Dübener Heide eine Flugaschanreicherung ausgemacht werden, wobei eine zum Teil deutliche Wechsellagerung von organischem Auflagenmaterial und von Flugaschen (Horizont: Of,Oh+yI(o)C) vorgefunden wurde (Tabelle 1). Die intensive Flugaschanreicherung reduziert den relativen Gehalt an organischem Material, sodass diese Horizonte zum Teil nicht mehr der Definition eines organischen Horizontes nach AD-HOC-AG BODEN (2005) (Humusgehalt $\geq 30\%$) entsprechen (vergleiche auch ZIKELI et al., 2002; KLOSE et al., 2003). Entsprechend der Klassifizierung nach der World Reference Base for Soil Resources (FAO, 2006) wird den Referenzbodengruppen der Qualifier „Technic“ zugeordnet, sobald mindestens 10 Vol.% in den obersten 100 cm aus Artefakten, in diesem Fall aus Flugasche besteht. Dieses Kriterium ist nur für die angereicherten Waldböden der Oberlausitz erfüllt.

(2) Dass es sich bei den mineralischen Anreicherungen in den Humusauflagen um äolische Sedimente handelt, konnte durch die Untersuchung der mineralischen Anteile nachgewiesen werden, die einen hohen Sortierungsgrad (feinsandige bis schluffige Texturen) in Abhängigkeit von der

Tabelle 2: Zusammenhänge der einzelnen untersuchten Bodenparameter; Pearsons Korrelationskoeffizienten mit Signifikanz der Korrelation: *** P < 0,001; ** P < 0,01; * P < 0,05 (GPV = Gesamtporenvolumen, LK = Luftkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, TW = Totwasseranteil, kf = gesättigte Wasserleitfähigkeit, ρ_t = Trockenrohddichte, ρ_s = Festsubstanzdichte, θ_{wpm} = Wilhelmy-Platten-Methode Kontaktwinkel, Ct = Gesamtkohlenstoffgehalt)

Table 2: Correlations of the studied soil parameters; pearsons correlation coefficients and significance: *** P < 0.001; ** P < 0.01; * P < 0.05 (GPV = total pore volume, LK = air capacity, nFK = plant available water, TW = water content at the wilting point, kf = saturated hydraulic conductivity, ρ_t = bulk density, ρ_s = particle density, θ_{wpm} = Wilhelmy-plate method contact angle, Ct = total carbon content)

	Ct	θ_{wpm}	ρ_s	ρ_t	kf	TW	nFK	LK
GPV	-0,06	0	0,21	-0,36	0,67*	-0,28	-0,1	0,7**
LK	-0,42	-0,07	0,42	-0,03	0,68**	-0,57*	-0,61*	
nFK	0,3	0,03	-0,43	-0,2	-0,33	-0,08		
TW	0,44	0,12	-0,12	-0,09	-0,29			
kf	-0,52*	-0,27	0,56*	-0,27				
ρ_t	-0,09	0,33	0,29					
ρ_s	-0,72***	-0,25						
θ_{wpm}	0,62*							

Entfernung zum Emittenten aufweisen (Abbildung 2). Ähnliche Texturen beschreiben KLOSE et al. (2003) für Flugaschen in der Oberlausitz.

(3) Durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen wurden in den angereicherten Horizonten für Flugaschen typische sphärische Morphologien identifiziert (Abbildung 3). Vergleichbare Strukturen beschreiben auch KLOSE et al. (2001) und KOCH et al. (2001) für Standorte in der Dübener Heide, RUMPEL et al. (1998) für forstlich rekultivierte Kippböden des Lausitzer Braunkohlereviere, KASTLER (2005) für aufgespülte Filteraschen in Sachsen-Anhalt und DUDAS und WARREN (1987) zusammenfassend und modellhaft für Filteraschen in den USA.

(4) Die relative Anreicherung mineralischer Substanzen verursacht eine Erhöhung der mittleren Festsubstanzdichten der Humusauflagen. So sind die Festsubstanzdichten in der gesamten Dübener Heide größer als für reine Humusauflagen ($< 1,5 \text{ g cm}^{-3}$ nach BLAKE und HARTGE (1986); $1,5\text{--}1,6 \text{ g cm}^{-3}$ nach REDDING et al. (2005)). Das ist ein Hinweis darauf, dass die gesamte Region unter Depositionseinfluss stand. Die Standorte der Oberlausitz trennen sich im Gegensatz dazu deutlich in flugascheangereicherte Bereiche mit erhöhten Festsubstanzdichten und solche, die für Humus typische Festsubstanzdichten und somit keine mineralische Flugascheakkumulation aufweisen. Die atmosphärische Flugaschedeposition beeinflusst Luft- und Wasserhaushaltskennwerte der untersuchten Humusauflagen. Dabei wurde für beide Untersuchungsgebiete eine vergleichbare Veränderung der untersuchten Parameter festgestellt (Abbildung 4 und Abbildung 5). An den untersuchten Waldstandorten wurde die organische Humusaufgabe sukzessive mit atmosphärischer, überwiegend mineralischer Flugasche in Wechsellagerung angereichert, wodurch eine extrem geringe Lagerungsdichte erhalten blieb. Dies führt im Zusammenhang mit erhöhten Festsubstanzdichten zu einer teilweise erhöhten Porosität, wobei insbesondere die Luftkapazitäten und die gesättigten Wasserleitfähigkeiten der emittentennäheren, überwiegend durch sandige Aschen beeinflussten Standorte zunehmen. Deren nutzbare Feldkapazitäten sind gleichzeitig signifikant reduziert, wohingegen mit größerer Entfernung der Schluffanteil der Aschen zunimmt und der Anteil an weiten Grobporen zu Gunsten der Feldkapazität abnimmt. Die auf Flugascheanreicherung sensiblen Parameter (ρ_s , Ct, LK, kf und θ_{wpm}) sind auch untereinander z.T. signifikant korreliert (Tabelle 2) und bestätigen somit, dass die Humusaufgaben in ihrer Gesamtfunktionalität bezüglich des Bodenwasser- und Lufthaushaltes durch die Deposition von Braunkohlenflugaschen

modifiziert sind. Der Einfluss der Flugaschedeposition auf bodenphysikalische Eigenschaften bleibt auf die Humusaufgaben beschränkt, im mineralischen Oberboden wurden keine auf der Ascheanreicherung basierenden Unterschiede festgestellt (HARTMANN et al., 2009b). Dahingegen weisen chemische Parameter eine deutliche Beeinflussung bis in 30 cm Tiefe auf (FRITZ und MAKESCHIN, 2007).

5 Schlussfolgerung

Durch die Humusaufgaben besitzen Waldböden zusätzlich eine teilweise stark durchwurzelte, extrem poröse Schicht mit hohen Wasserspeicher- und gesättigten Wasserleitfähigkeitswerten bei geringen Festsubstanz- und Trockenrohdichten, die in durch Flugaschedeposition beeinflussten Waldgebieten veränderte Eigenschaften aufweisen (erhöhte Makroporosität und damit erhöhte gesättigte Wasserleitfähigkeit, geringere Benetzungshemmung, reduzierte nutzbare Feldkapazität). Insbesondere mit den überwiegend dominierenden Grobporen gehen extrem hohe gesättigte Wasserleitfähigkeiten einher, wohingegen der stark variierende Mittelporenanteil zusammen mit den engen Grobporen einen zusätzlichen, bedeutenden Wasserspeicher für die Vegetation darstellt, insbesondere durch eine z.T. deutlich erhöhte Mächtigkeit der flugascheangereicherten Humusaufgaben (vergleiche HARTMANN et al., 2009c). Obwohl Humusaufgaben durch Bäume teilweise intensiv durchwurzelte sind und damit eine wichtige Wasserspeicherfunktion innehaben, finden sie bisher kaum Berücksichtigung bei der forststandortlichen Bewertung der nutzbaren Wasserspeicherkapazität im effektiven Wurzelraum (entspricht der nFKWe) (AK STANDORTSKARTIERUNG, 2003). Diese Eigenschaften sowie deren Beeinflussung durch atmosphärische Depositionen von Flugaschen sollten bei zukünftigen Betrachtungen in Hinblick auf Wasserversorgung der Vegetation, Grundwasserneubildung wie auch im Zusammenhang mit einer Nährstoff-, bzw. Schadstoffmobilität beachtet werden.

Danksagung

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMBF über den Projektträger Jülich im Rahmen des Projektes ENFORCHANGE ("ENvironments and FORests under CHANGing conditions") (Kennzeichen SPP 0330634D) und Prof. Dr. P. Schäfer und Ute Schuldt

(Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel) für die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen.

Verwendete Abkürzungen:

Ct = Gesamtkohlenstoffgehalt in %

GPV = Gesamtporenvolumen in Vol.%

k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm d^{-1}

LK = Luftkapazität in Vol.%

nFK = nutzbare Feldkapazität in Vol.%

REM = Rasterelektronenmikroskopie

TW = Totwasseranteil in Vol.%

θ_{wpm} = fortschreitender Kontaktwinkel (Wilhelmy-Platten-Methode) in °

ρ_s = Festsubstanzdichte in g cm^{-3}

ρ_t = Trockenrohddichte in g cm^{-3}

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland. 5. Auflage, E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 2005.
- ADRIANO, D.C., A.L. PAGE, A.A. ELSEEWI, A.C. CHANG und I. STRAUGHAN (1980): Utilization and disposal of fly-ash and other coal residues in terrestrial ecosystems – a review. *Journal of Environmental Quality*, 9(3): 333–344.
- AK STANDORTSKARTIERUNG (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG) (Hrsg.) (2003): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 6. Auflage, IHW-Verlag, Eching bei München, 2003.
- BACHMANN, J., S.K. WOCHER, M.-O. GÖBEL, M.B. KIRKHAM und R. HORTON (2003): Extended methodology for determining wetting properties of porous media. *Water Resources Research*, 39(12): 1353.
- BLAKE, G.R. und K.H. HARTGE (1986). Particle Density. In: A. Klute (Hrsg.), *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Amer. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Amer., Madison (Wisconsin), USA, 363–375.
- BLEICH, K.E., K.H. PAPENFUSS, R.R. VAN DER PLOEG und E. SCHLICHTING (1987): Exkursionführer zur Jahrestagung 1987 in Stuttgart-Hohenheim. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 54: 246–247.
- BUZKO, U. und O. BENS (2006): Assessing soil hydrophobicity and its variability through the soil profile using two different methods. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 718–727.
- BUZKO, U., O. BENS und R.F. HÜTTL (2005): Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Geoderma*, 126(3-4): 317–336.
- DEUTSCH-POLNISCHE KOMMISSION FÜR NACHBARSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES UMWELTSCHUTZES (Hrsg.) (1995): Kraftwerke und Tagebaue beiderseits der deutsch-polnischen Grenze, Berlin.
- DUDAS, M.J. und C.J. WARREN (1987): Submicroscopic model of fly-ash particles. *Geoderma*, 40(1–2): 101–114.
- DUNGER, W., I. DUNGER, H.-D. ENGELMANN und R. SCHNEIDER (1972): Untersuchungen zur Langzeitwirkung von Industrie-Emissionen auf Böden, Vegetation und Bodenfauna des Neissetals bei Ostritz/Oberlausitz. *Abh. Ber. Naturkundemus. Görlitz*, 47(3): 1–40.
- FAO (2006): World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports No. 103*. FAO, Rome.
- FRITZ, H. und F. MAKESCHIN (2007): Chemische Eigenschaften flugaschebeeinflusster Böden der Dübener Heide. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, 46(3): 105–120.
- GREIFFENHAGEN, A., G. WESSOLEK, M. FACKLAM, M. RENGER und H. STOFFREGEN (2006): Hydraulic functions and water repellency of forest floor horizons on sandy soils. *Geoderma*, 132: 182–195.
- HAJNOS, M., G. JOZEFACIUK, Z. SOKOLOWSKA, A. GREIFFENHAGEN und G. WESSOLEK (2003): Water storage, surface, and structural properties of sandy forest humus horizons. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(5): 625–634.
- HAMMEL, K. und M. KENNEL (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte*, 185, München.
- HARTGE, K.H. und R. HORN (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- HARTMANN, P., H. FLEIGE und R. HORN (2007): Flugascheeinfluß auf Böden in der Dübener Heide – Physikalische Eigenschaften, Hydrophobie und Wasserhaushalt. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, 46(3): 79–104.

- HARTMANN, P., H. FLEIGE und R. HORN (2009a): Changes in soil physical properties of forest floor horizons due to long-term deposition of lignite fly ash. *Journal of Soils and Sediments*, DOI 10.1007/s11368-009-0108-7.
- HARTMANN, P., H. FLEIGE und R. HORN (2009b): Physical properties of forest soils along a fly-ash deposition gradient in Northeast Germany. *Geoderma*, 150: 188–195.
- HARTMANN, P., H. FLEIGE und R. HORN (2009c): Veränderung bodenphysikalischer Eigenschaften von Humusauf-lagen auf ehemals flugaschebeeinflussten Waldstandorten der Oberlausitz. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 8: 41–52.
- HOLZ, U. (2007): Das Industriegebiet Bitterfeld-Wolfen – Eine Einführung in die Industriegeschichte der Region. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, 46(3): 5–11.
- KAINZ, W. (2007): Geologie und Bodenentwicklung in der Dübener Heide. *Archiv für Naturschutz und Land-schaftsforschung*, 46(3): 47–64.
- KASTLER, M. (2005): Einfluss der Pedogenese auf die räumliche Porengeometrie und damit verbundene hydraulische Transporteigenschaften in Böden aus Braunkohlenaschen. *Hallenser Bodenwissenschaftliche Abhand-lungen*, 9. Der Andere Verlag, Tönning.
- KLOSE, S., J. KOCH, E. BÄUCKER und F. MAKESCHIN (2001): Indicative properties of fly-ash affected forest soils in North-eastern Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 164: 561–568.
- KLOSE, S. und F. MAKESCHIN (2003): Effects of past fly ash deposition on the forest floor humus chemistry of pine stands in Northeastern Germany. *Forest Ecology and Ma-nagement* 183(1–3): 113–126.
- KLOSE, S. und F. MAKESCHIN (2004): Chemical properties of forest soils along a fly-ash deposition gradient in eastern Germany. *European Journal of Forest Research* 123(1): 3–11.
- KLOSE, S., R. TOLLE, E. BÄUCKER und F. MAKESCHIN (2003): Stratigraphic distribution of lignite-derived atmospheric deposits in forest soils of the Upper Lusatian region, East Germany. *Water, Air, and Soil Pollution*, 142(1–4): 3–25.
- KOCH, J., S. KLOSE und F. MAKESCHIN (2001): Bioele-mentverteilung und Humusmorphologie in flugaschebe-lasteten Oberböden der Dübener Heide. *Freiburger Bo-denkundliche Abhandlungen*, 33: 183–192.
- KOCH, J., S. KLOSE und F. MAKESCHIN (2002a): Long-term effect of fly ash accumulation on soil chemical properties. *3rd International Conference on Water Resources and Environment Research*: 113–118.
- KOCH, J., S. KLOSE und F. MAKESCHIN (2002b): Stratigra-phy and spatial differentiation of chemical properties in long-term fly ash influenced forest soils in the Dübener Heide region, NEGermany. *Forstwissenschaftliches Cen-tralblatt*, 121(4): 157–170.
- LUX, H. (1965): Die großräumige Abgrenzung von Rauch-schadenszonen im Einflußbereich des Industriegebietes um Bitterfeld. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Tech-nischen Universität Dresden*, 14(2): 433–442.
- LUX, H. (1970): Ergebnisse von Luftuntersuchungen im Einflußbereich der Kraftwerke um Hirschfelde (Neiße, Oberlausitz). *Zeitschrift für die gesamte Hygiene und ihre Grenzgebiete*, 16(3): 185–187.
- MAKESCHIN, F. und C. FÜRST (2007). ENFORCHANGE – Einfluss gerichteter Veränderungen von Umweltfaktoren auf Landnutzungskonzepte am Beispiel des Waldes, ENFORCHANGE Wälder von heute für eine Umwelt von morgen – Statusbericht 2007, 4–11.
- MANNSFELD, K. und A. BERNHARDT (1995): Naturräume in Sachsen. *Forschungen zur deutschen Landeskunde* 238. Zentralaussschuß für dt. Landeskunde, Trier.
- NEUMEISTER, H., C. FRANKE, C. NAGEL, G. PEKLO, R. PEKLO und R. ZIERATH (1991): Immissionsbedingte Stoffeinträge aus der Luft als geomorphologischer Faktor – 100 Jahre atmosphärische Deposition im Raum Bitter-feld (Sachsen-Anhalt). *Geoökodynamik*, 12(1/2): 1–40.
- REDDING, T.E., K.D. HANNAM, S.A. QUIDEAU und K.J. DEVITO (2005): Particle density of aspen, spruce, and pine forest floors in Alberta, Canada. *Soil Science Society of America Journal*, 69(5): 1503–1506.
- RUMPEL, C., H. KNICKER, I. KÖGEL-KNABNER, J.O. SKJEM-STAD und R.F. HÜTTL (1998): Types and chemical com-position of organic matter in reforested lignite-rich mine soils. *Geoderma*, 86(1–2): 123–142.
- SCHAAF, W., C. NEUMANN und R.F. HÜTTL (2001): Actual cation exchange capacity in lignite containing pyritic mine soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 164(1): 77–78.
- SCHMIDT, R. (1995): Östliche Oberlausitz, in: *Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde*, 238: 146–150.
- TAUBNER, H. und R. HORN (1998): Schätzung der nutz-baren Feldkapazität und Luftkapazität von anthropo-genen Bodenhorizonten aus einfach zu bestimmenden Kennwerten. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 162: 33–40.

THE R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (Hrsg.) (2007): R version 2.5.1.

WEISDORFER, M. (1999): Einfluss unterschiedlicher Schwefel- und Staubemissionen in der Vergangenheit auf die chemische Entwicklung von Humusaufgaben und Mineralböden in Kiefernwaldökosystemen im nordostdeutschen Tiefland. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, 4. Technische Universität, Cottbus.

WOCHE, S.K., M.-O. GÖBEL, M.B. KIRKHAM, R. HORTON, R.R. VAN DER PLOEG und J. BACHMANN (2005): Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management. *European Journal of Soil Science*, 56(4): 239–251.

ZIKELI, S., R. JAHN und M. KASTLER (2002): Initial soil development in lignite ash landfills and settling ponds in Saxony-Anhalt, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(4): 530–536.

Anschrift der Autoren

Dr. Peter Hartmann, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Umwelt und Boden, Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg i. Br.

E- Mail: peter.hartmann@forst.bwl.de

Dr. Heiner Fleige, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str. 2, 24118 Kiel

Prof. Dr. Rainer Horn, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str. 2, 24118 Kiel

Eingelangt am 26. September 2009

Angenommen am 30. August 2010