

Veränderung bodenphysikalischer Eigenschaften von Humusauflagen auf ehemals flugaschebeeinflussten Waldstandorten der Oberlausitz

Modifications of soil physical properties of forest floor horizons at previously fly ash affected forest sites in the region Upper Lusatia

Peter Hartmann, Heiner Fleige, Rainer Horn

Abstract

This study describes the influence of predominantly historical atmospheric depositions of lignite fly ashes upon physical properties of forest soils and especially of forest floor horizons. We compared 6 soil profiles with and without fly ash enrichment in the region Upper Lusatia, Eastern Germany. Fly ash enriched sites have a 1.0 to 1.5 dm thick and densely rooted top horizon consisting of a mixture of humus and fly ash. Uncontaminated forest floor horizons are less thick (<0,6 dm) and less rooted. Fly ash enriched forest floor horizons show higher air capacities, saturated conductivities and particle densities, whereas plant available water is reduced emission source close. Deposition rates were estimated at 150 to 280 t/ha, whereby at sites located close to the emission source the highest values were calculated. The vertical root development of the trees is constrained at locations characterized by temporary water logging and shallow soils with surface-near bedrock. Hence, properties of forest floor horizons and the mineral top soil condition plant available water in the effective root zone. Fly ash enriched forest floor horizons amount to 20 to 42% of plant available water in the effective root zone, whereas uncontaminated forest floor horizons only amount to 8 to 16%.

Keywords: forest soil, lignite fly ash, soil physical properties, Upper Lusatia

Zusammenfassung

In dieser Studie wird der Einfluss überwiegend historischer atmosphärischer Flugaschedepositionen auf physikalische Eigenschaften von Waldböden und insbesondere deren Humusauflagen untersucht. Es werden sechs Leitprofile der Region Oberlausitz mit und ohne Flugascheanreicherungen vorgestellt. Die flugascheangereicherten Standorte sind geprägt durch 1,0 bis 1,5 dm mächtige Durchmischungshorizonte (Humusauflage mit Flugasche), die extrem stark durchwurzelt sind. Die reinen Humusauflagen sind geringmächtiger (<0,6 dm) und auch weniger stark durchwurzelt. Im Vergleich mit reinen Humusauflagen zeigen die flugascheangereicherten zum Teil signifikant höhere Luftkapazitäten, gesättigte Wasserleitfähigkeiten und Festsubstanzdichten,

wohingegen emittentennah die nutzbaren Feldkapazitäten geringer sind. Für die flugascheangereicherten Standorte wurden mineralische Flugascheanreicherungen von 150 bis 280 t/ha berechnet, wobei emittentennähere Standorte höhere Werte aufweisen. Zeitweise Vernässung und anstehendes Ausgangsgestein schränken die Durchwurzelbarkeit stark ein. Die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums nFKWe ist daher deutlich von den Eigenschaften der Auflagen und des Oberbodens geprägt. Die flugascheangereicherten Humusauflagen stellen 20 bis 42% der nFKWe, die reinen Humusauflagen nur 8 bis 16%.

Stichwörter: Flugasche, bodenphysikalische Eigenschaften, Waldboden, Oberlausitz

1. Einleitung

Der Abbau und die Verbrennung von Braunkohle ist ein traditioneller Sektor der Energiegewinnung in der Region Oberlausitz entlang der deutsch-polnischen Grenze. Insbesondere die Kraftwerke Hirschfelde (D) und Turów (PL) emittierten großen Mengen an Flugaschen, Braunkohlestäuben, SO₂, NO_x und CO₂, bis verstärkte Emissionskontrollen und die Schließung des Kraftwerkes Hirschfelde zu einer deutlichen Reduzierung der Emissionen führte. Flugaschen in der Region Oberlausitz setzen sich vornehmlich aus silikatischen Gläsern (44%), Al₂O₃ (40%), Fe₂O₃ (8%) und weiteren Oxiden sowie Braunkohle und Schwermetallen zusammen (DUNGER et al. (1972); KLOSE et al. (2003)). Aufgrund dieser Zusammensetzung beeinflussen atmosphärische 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. 2002; ZIKELI et al. 2002; KLOSE & MAKESCHIN 2004; FRITZ & MAKESCHIN 2007). Bezüglich bodenphysikalischer Eigenschaften zeichnen sich Flugaschen durch einen hohen Sortierungsgrad mit vorherrschenden Feinsand- bis Schlufffraktionen, durch hohe Porositäten und hohe Wasserleitfähigkeiten aus (BLUME & SCHLEUSS 1997; KLOSE et al. 2003; KASTLER 2005). Unter anderem wird zum Teil schwermetallbelastete Flugasche aus der Kohleverbrennung als landwirtschaftliche Meliorationszugabe verwendet,

womit der Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser und die Wasserleitfähigkeiten verbessert werden können (GANGLOFF et al. 2000; PATHAN et al. 2003; YUNUSA et al. 2006). In der Region Dübener Heide (Sachsen-Anhalt / Sachsen) wurden ebenfalls Böden unter Flugascheeinfluss untersucht, wobei die flugascheangereicherten Humusauflagen sich durch höhere gesättigte Wasserleitfähigkeiten, höhere Luftkapazitäten und leicht erhöhte Festsubstanzdichten auszeichnen, wohingegen die nutzbaren Feldkapazitäten sowie die Benetzungshemmungen reduziert sind (HARTMANN et al. 2007). In den mineralischen Oberbodenhorizonten wurde bereits kein Einfluss der Flugasche mehr festgestellt, da unterschiedliche Ausgangssubstrate und Gehalte an organischer Substanz die physikalischen Eigenschaften der Horizonte prägen. In dieser Untersuchung werden flugaschebeeinflusste Waldböden im Vergleich mit unbelasteten Standorten der Region Oberlausitz vorgestellt. Ziel ist, die persistenten Flugaschemengen zu quantifizieren und deren Einfluss auf bodenphysikalische Eigenschaften der angereicherten Humusauflagen zu charakterisieren (Textur, Porengrößenverteilung, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Festsubstanzdichte, Trockenroh-dichte, nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum).

2. Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Die untersuchten Waldstandorte liegen in der Region Oberlausitz / Sachsen nahe der Deutsch-Polnischen Grenze (Abbildung 1). Die Region stand langfristig unter dem Einfluss atmosphärischer Depositionen durch die Kraftwerke entlang der deutsch-polnischen Grenze. Von 1911 bis 1992 produzierte das Kraftwerk in Hirschfelde Elektrizität mit einer Gesamtleistung von 71.300.000 MWh; Turów in Polen wurde 1962 in Betrieb genommen und produziert momentan etwa 2000 MW. Mit dieser intensiven Braunkohleverbrennung ging ein hoher Ausstoß an Flugaschen, Braunkohlestäuben, SO_2 , NO_x und CO_2 einher. Vor allem Südost- und Südwinde führten zu hohen Immissionsraten in den Forstrevieren nördlich der Kraftwerke, so dass in den 1960er Jahren mehr als $0,15 \text{ mg/m}^2 \text{ SO}_2$ pro Tag in 22 % aller Fälle und mehr als 15 g/m^2 Flugasche pro Tag in 75–100 % aller Fälle gemessen wurden (Lux 1970). Erst strenge Emissionskontrollen sowie die Schließung von Hirschfelde 1992 führten zu einer deutlichen Reduzierung dieser Immissionen. Entlang der deutsch-

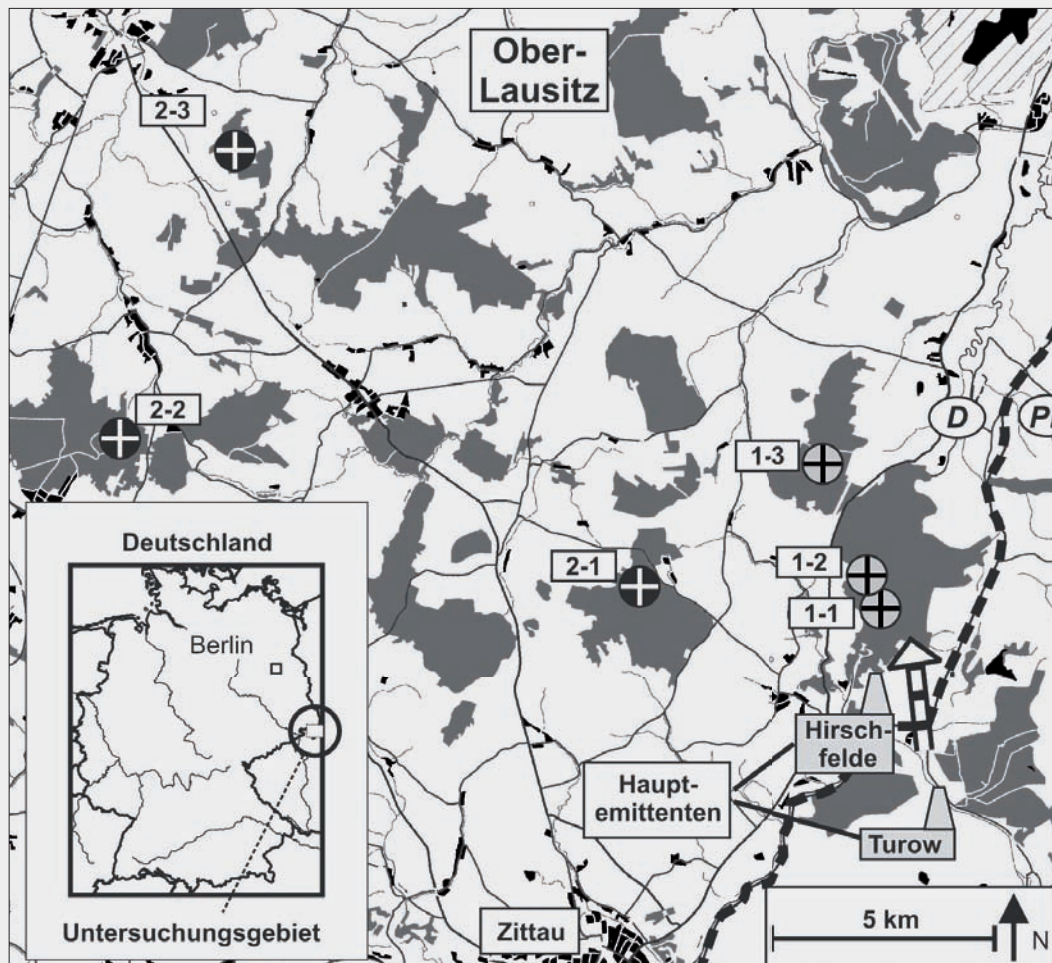


Abb. 1: Lage der untersuchten Standorte in der Oberlausitz (grau: mit Flugascheanreicherung, Standorte 1-1, 1-2 und 1-3; schwarz: ohne Flugascheanreicherung, Standorte 2-1, 2-2 und 2-3).

Fig. 1: Location of the investigated sites in the region Upper Lusatia (grey: with fly ash enrichment, sites 1-1, 1-2, 1-3; black: without fly ash enrichment, sites 2-1, 2-2, 2-3).

polnischen Grenze verringerte sich die Staubemission der deutschen Kraftwerke und Turów von 455 Gg (1989/1990) auf 18 Gg (2001), SO_2 wurde entsprechend von 1780 auf 85 Gg reduziert (DEUTSCH-POLNISCHE KOMMISSION FÜR NACHBARSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES UMWELTSCHUTZES 1995). Drei Forststandorte mit hohem Flugascheeintrag (Standorte 1-1, 1-2 und 1-3) und drei ohne nennenswerte Flugascheanreicherung (Standorte 2-1, 2-2 und 2-3) wurden untersucht. Diese Standorte repräsentieren typische Bodentypen und Forstbestände der Oberlausitz. 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 leichte Podsolierung und Verbraunung bei überwiegend granitischem Ausgangsgestein, mit steigendem Löß- und Geschiebemergel einfluss nehmen Tonverlagerung und Vernässung (Pseudovergleyung) an Bedeutung zu (SCHMIDT 1995). Die ökologische Wirkung der Staunässe auf Waldbestände muss nach ARBEITSKREIS STANDORTKARTIERUNG (2003) ab einer Tiefe von 6 dm uGOF und weniger als begrenzend für den Wurzelraum bis hin zu Leistungsminderungen aufgrund eines verzögerten Laubaustriebes und Luftmangel insbesondere bei Buchen berücksichtigt werden. Die Waldbestände sind geprägt durch Fichten (*Picea abies*) und Rotbuchen (*Fagus sylvatica*). Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 8.2°C, der durchschnittliche Jahresniederschlag bei 646 mm (Görlitz 238 m üNN; 51°10'N; 14°57'E).

Profilansprache und Probenahme

In den ausgewählten Flächen wurden 2 m tiefe Leitprofile (bzw. bis zum nicht mehr grabbaren Ausgangsgestein) angelegt und diese nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (AG BODEN 2005) auf Subtypenniveau (inkl. der Varietät Podsoligkeit) klassifiziert. Die Beprobung erfolgte im Mai 2007. Für die Bestimmung der Wasserretentionsfunktion (nur Humusaufgabe), der Wasserleitfähigkeiten und der Trockenrohdichten (alle grabbaren Horizonte) wurden ungestörte Stechzylinderproben (100 cm³) genommen. Für weitere laboranalytische Untersuchungen wurden gestörte Proben eines jeden Horizontes genommen. Den Schwerpunkt bei der Laboranalytik bilden die organischen Auflagen, da hier die größte Beeinflussung durch die Flugaschen zu erwarten ist. Für die mineralischen Horizonte wurden anhand der Bodenart, der Trockenrohdichte ρ_r , des Humusgehaltes und der Mächtigkeit die nutzbare Feldkapazität (= nutzbare Wasserspeicherkapazität) eines jeden Horizontes nach AG BODEN (2005) abgeleitet und für unterschiedliche effektive Durchwurzelungstiefen W_e aufsummiert. W_e ist für Laubgehölze als das 1,5-fache des Wertes für Ackerstandorte anzunehmen und beläuft sich so für Schluffe und Lehme auf ca. 15 dm bei einer mittleren Trockenrohdichte, für Nadelgehölze auf 10 dm (AG BODEN 2005). Bei Stauwasserböden wird die Obergrenze des Sd-Horizontes zzgl. 1 dm als unterste Grenze der max. Durchwurzelungstiefe angenommen (RAISSI

et al. 2001). Der Arbeitskreis Standortkartierung (2003) nennt zur Abschätzung des effektiven Wurzelraumes denjenigen Horizont als Untergrenze, der eine Durchwurzelungsintensität von weniger als W2 (=3–5 Feinwurzeln/dm²) aufweist, um somit eine Überschätzung der effektiven Durchwurzelungstiefe zu vermeiden. Aus dieser Untergrenze ergibt sich die Gründigkeit eines Standortes. Die Durchwurzelungsintensität wurde an den Schürfgruben abgeschätzt, indem in einem 1 dm² Raster die Feinwurzeln ausgezählt und in Klassen eingeteilt wurden (Tabelle 1).

Tab. 1: Klassifizierung der Bodeneigenschaften nach AG Boden (2005).

Table 1: Classification of root density according to AG BODEN (2005).

Wurzeln/dm ²	Klasse	Durchwurzelungsintensität
0	0	wurzelfrei
1–2	1	sehr schwach durchwurzelt
3–5	2	schwach durchwurzelt
6–10	3	mittel durchwurzelt
11–20	4	stark durchwurzelt
21–50	5	sehr stark durchwurzelt
> 50	6	extrem stark durchwurzelt bis Wurzelfilz

Labormethoden

Die folgenden Methoden beschreiben explizit HARTGE & HORN (2009). Die Korngrößenzusammensetzung wurde durch Nasssiebung und Pipettierung bestimmt, nachdem die gesamte organische Substanz und verkittende Substanzen entfernt wurden und eine vollständige Dispergierung gewährleistet war. Der Grobbodenanteil <2 mm wurde an den Profilgruben abgeschätzt. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit k_f wurde mit einem Haubenpermeameter 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 Gesamtporenvolumens zu quantifizieren, wurde nach jeder Entwässerungsstufe die Schrumpfung der Proben gemessen. Als repräsentative Kennwerte werden die Luftkapazität LK (Wassergehalt bei -60 hPa), die nutzbare Feldkapazität nFK (zwischen -60 hPa und 15000 hPa = nutzbare Wasserspeicherkapazität) und der Totwasseranteil TW (15000 hPa) dargestellt. Des Weiteren wurden die ungestörten Proben bei 105° C getrocknet, um die Trockenrohdichten ρ_t zu bestimmen. Das Gesamtporenvolumen 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 (REDDING et al. 2005 (n=3)). Zusätzlich zu den bodenphysikalischen Untersuchungen wurden der Gehalt an organischer Substanz sowie der pH-Wert bestimmt. Der gesamte Kohlenstoffgehalt wurde mittels

Tab. 2: Klassifizierung der Bodeneigenschaften nach AG Boden (2005). Table 2: Classification of soil properties according to AG BODEN (2005).

	Einheit	sehr gering [1]	gering [2]	mittel [3]	hoch [4]	sehr hoch [5]	extrem hoch [6]
GPV ^a	[Vol.-%]	< 30	- < 38	- < 46	- < 54	≥ 54	-
LK ^b	[Vol.-%]	< 2	- < 5	- < 13	- < 26	≥ 26	-
nFK ^c	[Vol.-%]	< 6	- < 14	- < 22	- < 30	≥ 30	-
TW ^d	[Vol.-%]	< 4	- < 10	- < 22	- < 34	≥ 34	-
k _f ^e	[cm/d]	< 1	- < 10	- < 40	- < 100	< 300	≥ 300
ρ _t ^f	[Mg/m ³]	< 1.2	- < 1.4	- < 1.6	- < 1.8	≥ 1.8	-
> 2 mm ^g	[Vol.-%]	< 2	- < 10	- < 25	- < 50	- < 75	> 75

^a Gesamtporenvolumen^b Luftkapazität^c nutzbare Feldkapazität^d Totwasser* gesättigte

Wasserleitfähigkeit

^f Trockenrohdichte^g Grobbodengehalt >2 mm

coulometrischer Titration und Verbrennung mit einem Ströhlein-Coulomat 702 bestimmt (n=3). Daraus errechnet sich der Gehalt an organischer Substanz C_{org} (Faktor 2 für Humusauflagen und Faktor 1,724 für mineralische Horizonte (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)). Der pH-Wert wurde potentiometrisch in 0.01 M CaCl₂ Lösung gemessen.

Die Untersuchungsergebnisse der physikalischen Untersuchungen wurden anhand der Klassifizierung der AG BODEN (2005) bewertet (Tabelle 2).

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit der frei verfügbaren Software R Version 2.5.1 durchgeführt. Alle Messungen wurden auf Normalverteilung geprüft. Außer k_f (log-normal verteilt) sind alle untersuchten Parameter normalverteilt. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um arithmetische Mittelwerte (k_f = geometrischer Mittelwert). Ob sich Mittelwerte signifikant unterscheiden, wurde anhand einer einseitigen Varianzanalyse (ANOVA) überprüft.

3. Ergebnisse und Diskussion

Standortbeschreibung

Alle untersuchten Profile sind durch Substratwechsel gekennzeichnet (Tabelle 3 und Tabelle 4). Die mineralischen Oberböden werden von schluffigem Lößlehm dominiert, der unterschiedliche Mächtigkeiten aufweist (40 bis 120 cm). Unterhalb des (umgelagerten) Lößlehms stehen zunehmend durch Grobbodenpartikel (> 2 mm) geprägte Zersetzprodukte des Ausgangsgesteins (Biotitgranit, Biotitgranodiorit) oder Geschiebelehme an, deren Feinsubstanzen schluffigen bis lehmigen Sandcharakter aufweisen. Da die flugascheangereicherten Humusauflagen teilweise C_{org}-Gehalte von weniger als 30% aufweisen, können diese nicht mehr als rein organische Horizonte klassifiziert werden. Aufgrund der Durchmischung von Humusauflagen (Of-Oh) und der akkumulierten Flugasche (γIcV = lockeres, anthropogen umgelagertes verwittertes Ausgangsmaterial) werden Mischhorizonte mit entsprechendem Ausgangssubstrat Flugasche (Braunkohlenkraftwerksasche) vergeben. Daher wird in den Profilen mit Flugascheanreicherung bereits der natürliche mineralische Oberboden einem zweiten Ausgangssubstrat („II“) zugeordnet. Als Humusform dominieren (rohhumusartige) Moder.

Vorherrschende bodenbildende Prozesse im Oberboden sind Humusanreicherung („Ah“), eine leichte Podsolierung („Ae“) und eine Auswaschung von Tonpartikeln („Al“). Die mineralischen Unterböden sind durch unterschiedliche Prozesse geprägt. So ist der Prozess der Verbraunung („Bv“) als vorherrschend an den Standorten 1-1, 2-2 und 2-3 zu beobachten, Tonverlagerung als Folge der Lessivierung (Parabraunerde) konnte anhand von Körnungsunterschieden festgestellt werden. So weisen die Standorte 1-2, 1-3, und 2-1 einen Tonanreicherungshorizont („Bt“) auf. Dies führt im Zusammenspiel mit der tiefenabhängigen Zunahme der Trockenrohdichten ρ_t zu einer deutlichen Verringerung der gesättigten Wasserleitfähigkeiten k_f, so dass es zu zeitweiligem Wasserstau nach Niederschlag oberhalb dieser dichten Stauschichten („Sd“) kommt. Dementsprechend sind auch die darüber gelagerten wasserführenden Horizonte („Sw“) durch Marmorierung (Rost- und Bleichfleckung) gekennzeichnet. Diese Staunässe hat unterschiedliche Vernäsungsgrade zur Folge (nicht vernässt: Standort 2-2 bis sehr stark vernässt: Standorte 1-2, 1-3 und 2-1). Durch die Tonverlagerung (sekundärer Pseudogley) wird der durch die Substratschichtung (Lößlehm über Biotitgranit, primärer Pseudogley) bereits induzierte Stau von Niederschlagswasser noch verstärkt. Des Weiteren sind alle Standorte durch eine starke Azidität mit pH-Werten zwischen 2,9 und 4,3 geprägt; durch die Akkumulation der alkalischen Flugaschen kam es zu einer Aufbasung der Humusauflagen, die dann pH-Werte zwischen 4,2 und 5,7 aufweisen. Bei der Bewertung der Durchwurzelungsintensitäten ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Standorten mit und ohne Flugascheanreicherung (Abbildung 2). So fällt eine sehr starke bis extrem starke Durchwurzelung vor allem der flugascheangereicherten Humusauflagen auf, die reinen Humusauflagen weisen eine zwar geringere, jedoch immer noch starke bis sehr starke Durchwurzelung auf. Die Durchwurzelungsintensität im mineralischen Boden nimmt mit der Tiefe rasch ab. Aufgrund der Durchwurzelungsintensitäten können Aussagen über die aktuelle Durchwurzelbarkeit (Durchwurzelungsintensität ≥ 2) getroffen werden. So sind die untersuchten Standorte als flach- bis mittelgründig einzustufen. Der Feinwurzelanteil der Klasse 1 (1-2 Feinwurzeln/dm²) ist bei den Standorten ohne Flugasche noch in Tiefen von -70 cm bis -90 cm erkennbar, hat jedoch keinen Einfluss mehr auf die Abschätzung der Durchwurzelbarkeit.

Tab. 3: Profilbeschreibungen der flugascheangereicherten Standorte 1-1, 1-2 und 1-3 (BArt = Bodenart; S, U, T = Sand, Schluff, Ton; >2 mm = Grobbo-denanteil, geschätzt; Corg = Humusgehalt; pt = Trockenrohdichte; kf = gesättigte Wasserleitfähigkeit).

Table 3: Description of the fly ash enriched sites 1-1, 1-2 and 1-3 (BArt = soil textural class, S, U, T = sand, silt, clay, Corg = humus content; further abb. see table 2).

Horizont	Tiefe cm	BArt	S %	U %	T %	>2mm %	pH CaCl ₂	C _{org} %	pt g/cm ³	kf cm/d
1-1: podsolige Pseudogley-Braunerde aus Flugasche über umgelagertem Lößlehm über Biotitgranit; flachgründig; sehr schwach vernässt; Bestand: Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i>)										
L	+17	-	-	-	-	-	5,7	61,6	-	-
Of-Oh +yICv	+15	Su4	51	46	2	< 2	5	21,0	0,26	1372
II A(e)h	-2	Ut2	14	77	9	< 2	3,9	5,2	1,09	106
B(s)v	-5	Ut2	15	75	10	< 2	3,8	2,9	1,29	99
Bv	-17	Ut2	9	81	10	< 2	3,8	0,9	1,44	37
Sw-Bv	-65	Ut2	9	81	10	2-< 10	3,6	0,3	1,51	33
III Sd-Cv	-105	SI4	53	34	13	≥ 75	3,7	0,0	1,62	-
1-2: podsoliger Parabraunerde-Pseudogley aus Flugasche über Lößlehm über Biotitgranit; mittelgründig; sehr stark vernässt; Bestand: Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i>)										
L	+12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Of-Oh +yICv	+10	Us	29	65	5	< 2	4,8	16,0	0,45	745
II A(e)h	-1	Us	13	75	12	< 2	4,0	2,6	1,09	194
Al-Sw	-9	Ut3	13	75	12	< 2	3,8	1,4	1,21	157
Bt-Swd	-22	Ut4	10	71	19	< 2	3,8	1,0	1,48	9
Btv-Swd1	-50	Ut3	10	76	14	< 2	3,7	0,5	1,53	13
Btv-Swd2	-80	Ut3	11	74	15	2-< 10	3,7	0,3	1,53	10
III Sd	-100	Slu	44	41	15	50-< 75	3,7	0,2	1,63	-
1-3: vergleyter, podsoliger Parabraunerde-Pseudogley aus Flugasche über Lößlehm über Biotitgranit; flachgründig; sehr stark vernässt; Bestand: Fichte (<i>Picea abies</i>)										
L	+15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Of-Oh +yICv	+14	Us	21	73	3	< 2	4,2	31,0	0,25	1104
II A(e)h	-3	Ut2	6	85	9	< 2	3,5	7,1	0,92	93
Al-Sw	-27	Ut3	6	82	13	< 2	3,7	1,9	1,43	30
Bt-Sd	-52	Ut4	5	77	18	< 2	3,6	0,5	1,54	3
Btv-Sd	-110	Ut3	12	73	15	< 2	3,8	2,8	1,59	1
III Go	-150	SI3	55	33	12	25-< 50	3,9	0,2	1,39	132

Tab. 4: rechts, Profilbeschreibungen der Standorte 2-1, 2-2 und 2-3 ohne Flugascheanreicherung (BArt = Bodenart; S, U, T = Sand, Schluff, Ton; >2mm = Klasse Grobbodenanteil, geschätzt; C_{org} = Humusgehalt; ρ_t = Trockenrohdichte; k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit).

Table 4: Description of the sites without fly ash enrichment 2-1, 2-2 and 2-3 (BArt = soil textural class, S, U, T = sand, silt, clay, C_{org} = humus content; further abbrev. see table 2).

Horizont	Tiefe cm	BArt	S %	U %	T %	>2mm %	pH CaCl ₂	Corg %	ρ _t g/cm ³	k _f cm/d
2-1: podsoliger Parabraunerde-Pseudogley aus umgelagertem Lößlehm über Geschiebelehm; mittelgründig; sehr stark vernässt; Bestand: Fichte (<i>Picea abies</i>)										
L	+6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Of	+5	-	-	-	-	-	3,2	60,4	0,54	209
Sw-A(e)h	-6	Ut3	8	79	13	<2	3,1	5,7	1,04	96
Al-Sw	-35	Ut2	7	83	11	<2	3,3	3,8	1,04	70
Bt-Sd1	-90	Ut3	6	79	15	<2	3,8	0,7	1,34	2
Bt-Sd2	-120	Ut3	5	78	17	<2	4,0	0,3	1,58	1
II Sd	-150	Lu	14	60	25	<2	4,3	0,0	1,68	1
2-2: podsolige Normbraunerde aus Lößlehm über Biotitgranodiorit; mittelgründig; nicht vernässt; Bestand: Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i>) und Fichte (<i>Picea abies</i>)										
L	+6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Of(Oh)	+5(2)	-	-	-	-	-	2,9	57,2	0,27	695
A(e)h	-3	Ut3	19	66	16	10 - < 25	3,1	5,3	0,47	639
B(s)v	-8	Uls	23	62	15	10 - < 25	3,7	1,9	0,87	434
Bv	-40	Uls	27	59	14	25 - < 50	3,9	0,3	1,23	714
II Bv	-80	Sl3	67	25	8	25 - < 50	3,7	0,2	1,44	1106
Cv	-150	Su3	66	27	8	50 - < 75	3,7	0,2	1,48	-
2-3: podsolige Pseudogley-Braunerde aus Lößlehm über Biotitgranodiorit; mittelgründig; mittel vernässt; Bestand: Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i>)										
L	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Of(Oh)	+3(1)	-	-	-	-	-	3,4	76,2	0,47	216
A(e)h	-2	Uls	38	53	9	10 - < 25	3,1	4,5	1,06	184
B(s)v	-20	Uls	36	54	10	10 - < 25	3,5	1,6	1,26	153
Sw-Bv	-35	Uls	32	58	10	10 - < 25	3,9	0,5	1,45	133
Sdw-Bv	-70	Uls	29	61	10	10 - < 25	3,9	0,3	1,57	12
II Sd-Cv	-100	Su3	64	31	5	50 - < 75	3,8	0,2	1,69	2

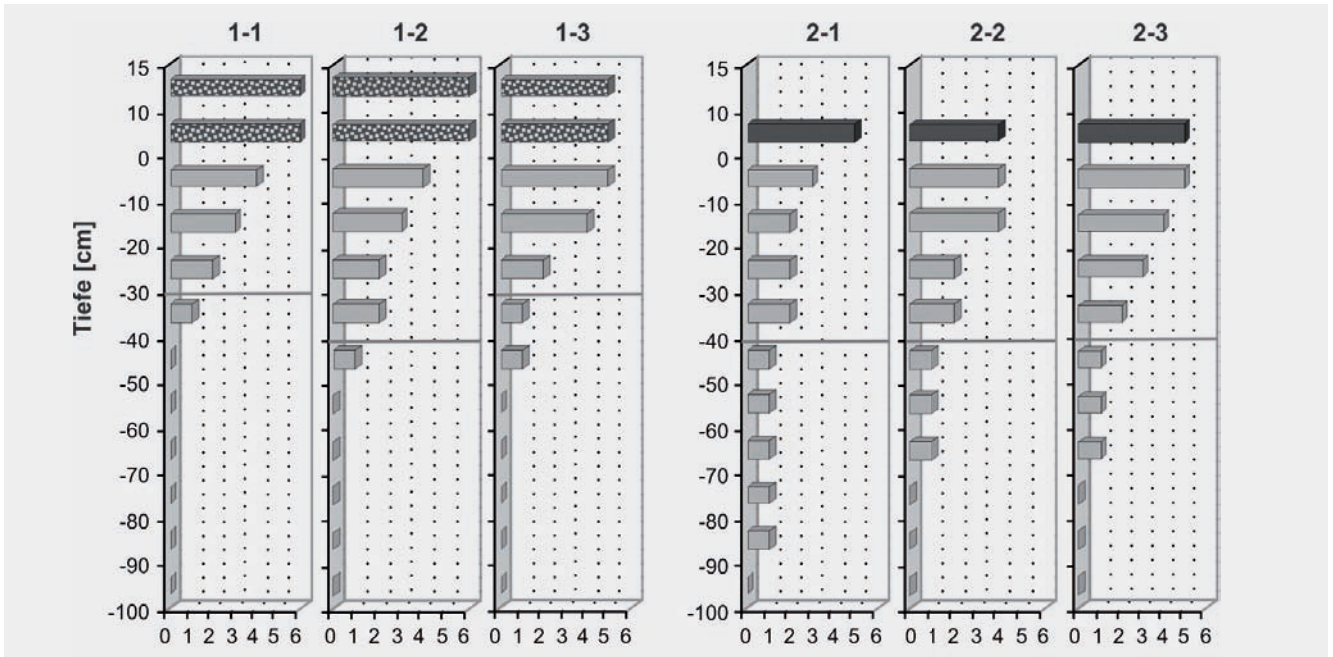


Abb. 2: Durchwurzelungsintensitäten (in Klassen nach AG BODEN (2005)) der flugascheangereicherten Standorte sowie der Standorte ohne Flugascheanreicherung.

Fig. 2: Root densities according to AG BODEN (2005) of the sites with and without fly ash enrichment.

Flugascheeinfluss auf physikalische Eigenschaften der Humusauflagen

Deutlich erhöhte Festsubstanzdichten ρ_s der flugascheangereicherten Standorte deuten auf einen hohen Anteil an mineralischen Flugaschepartikeln hin (Abbildung 3). Dadurch wird auch die Porengrößenverteilung beeinflusst. So ist bei flugascheangereicherten Standorten eine zum Teil signifikante Erhöhung der Gesamtporenvolumina GPV und der Luftkapazitäten LK zu verzeichnen, wohingegen eine signifikante Abnahme der nutzbaren Feldkapazitäten nFK trotz hoher Schluffanteile erkennbar ist. Ein eindeutiger Effekt auf den

Totwasseranteil TW ist nicht erkennbar. Eine Zunahme der Grobporen führt zu erhöhten gesättigten Wasserleitfähigkeiten k_f (Korrelation LK- k_f : $r=0,83^*$).

Bei einer bewertenden Betrachtung der Humusauflagen zeichnen sich alle Standorte durch sehr hohe GPV aus. Die flugascheangereicherten Standorte weisen eine sehr hohe LK und mittlere bis sehr hohe nFK auf, die Humusauflagen ohne Flugasche hohe bis sehr hohe LK und nFK-Werte. Der Totwasseranteil TW ist als mittel bis hoch einzustufen. Die gesättigten Wasserleitfähigkeiten k_f sind als extrem hoch einzuordnen, außer für die Standorte 2-1 und 2-3, die sehr hohe Werte aufweisen.

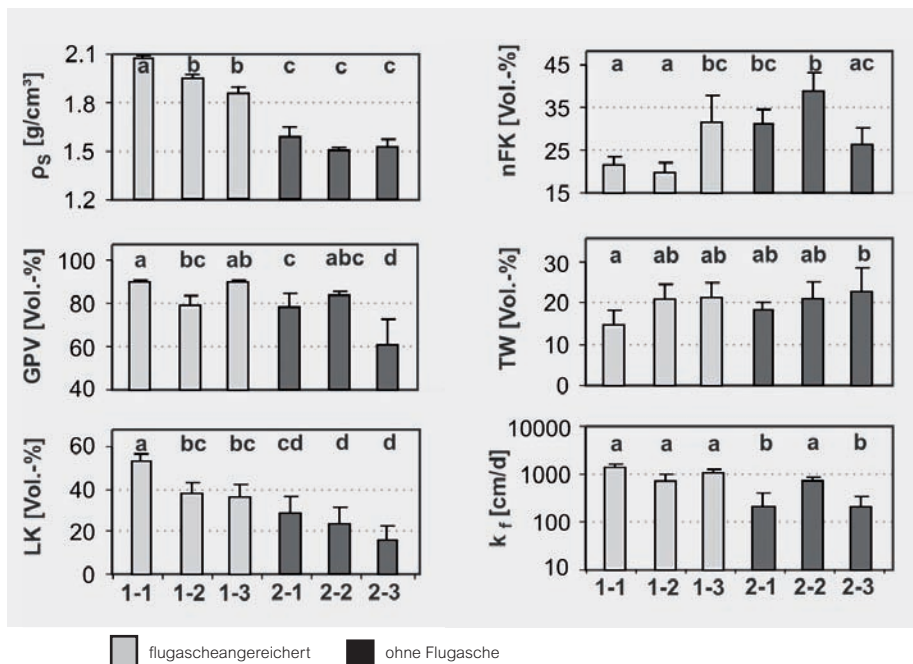


Abb. 3: Bodenphysikalische Eigenschaften flugascheangereicherter Humusauflagen (grau: 1-1, 1-2 und 1-3) sowie unbelasteter Humusauflagen (schwarz: 2-1, 2-2, 2-3) (ρ_s =Festsubstanzdichte, GPV=Gesamtporenvolumen, LK=Luftkapazität, nFK=nutzbare Feldkapazität, TW=Totwasseranteil, k_f =gesättigte Wasserleitfähigkeit; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte $p<0.05$).

Fig. 3: Soil physical properties of forest floor horizons with fly ash enrichment (grey: 1-1, 1-2, 1-3) as well as without fly ash enrichment (black: 2-1, 2-2, 2-3) (ρ_s =particle density, GPV=total pore volume, LK=air capacity, nFK=plant available water, TW=water content at the wilting point, k_f =saturated hydraulic conductivity; different letters indicate statistically significant differences of means with <0.05).

Bilanzierung der mineralischen Flugaschedeposition

Für die flugascheangereicherten Humusauflagen wurden basierend auf den flugaschebürtigen mineralischen Anteilen (60 bis 79 Gew.-%), der Trockenrohichte und der Mächtigkeit die persistente mineralische Flugaschedeposition abgeschätzt. Emittentennah wurden höhere Werte berechnet als emittententfern und beziffern sich auf 280 t/ha beim Standort 1-1, auf 210 t/ha beim Standort 1-2 und auf 150 t/ha beim Standort 1-3 (Abbildung 4). Des Weiteren wurde ein hoher Sortierungsgrad der Korngrößenzusammensetzung festgestellt, der mit zunehmender Entfernung zu den Hauptemittenten eine Verschiebung der dominierenden Fraktion von Feinsand zu Grob- und Mittelschluff aufweist.

Bewertung des Flugascheeinflusses auf die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum

Die Akkumulation von Flugasche bewirkt eine Zunahme der Mächtigkeiten der Humusauflagen (vgl. Kapitel 3.1), wodurch die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum nFKWe erhöht wird (Abbildung 5), obwohl die flugascheangereicherten Humusauflagen im Vergleich zu nicht belasteten Auflagen geringere relative nutzbare Feldkapazitäten nFK aufweisen (vgl. Kapitel 3.2).

Die Werte für Nadelgehölz (We = 10 dm, bzw. max. bis Oberkante Sd-Horizont +1 dm) und für Laubgehölz (We = 15 dm, bzw. max. bis Oberkante Sd-Horizont +1 dm oder Ausgangsgestein) sind aufgrund der Schluffdominanz aller Standorte als mittel bis hoch für staunässegeprägte Standorte (1-2, 1-3,

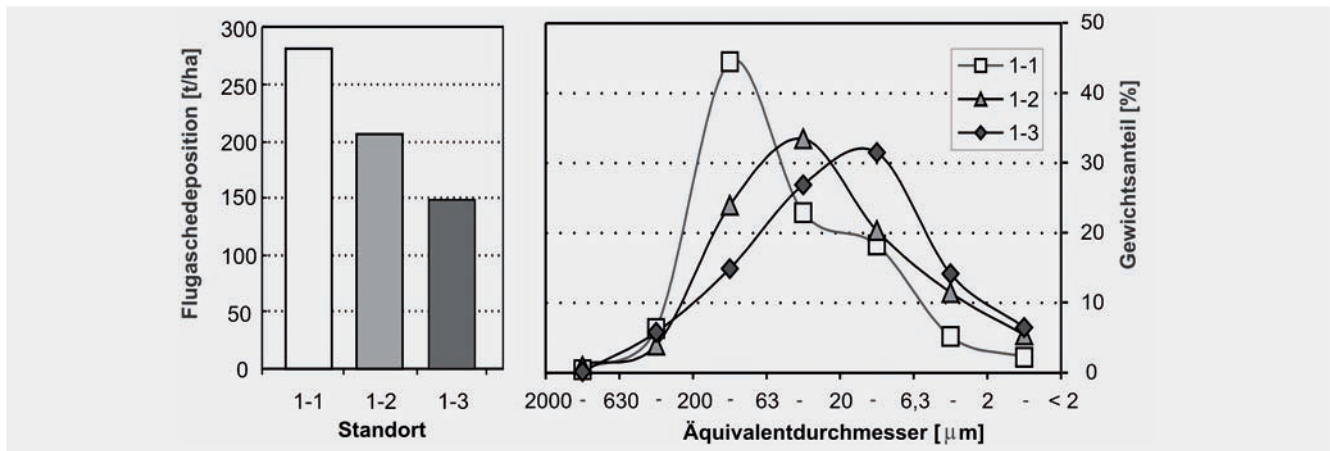


Abb. 4: Flugaschedeposition und Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Komponente der flugascheangereicherten Standorte.

Fig. 4: Fly ash deposition and grain size distribution of the mineral component of the fly ash enriched sites.

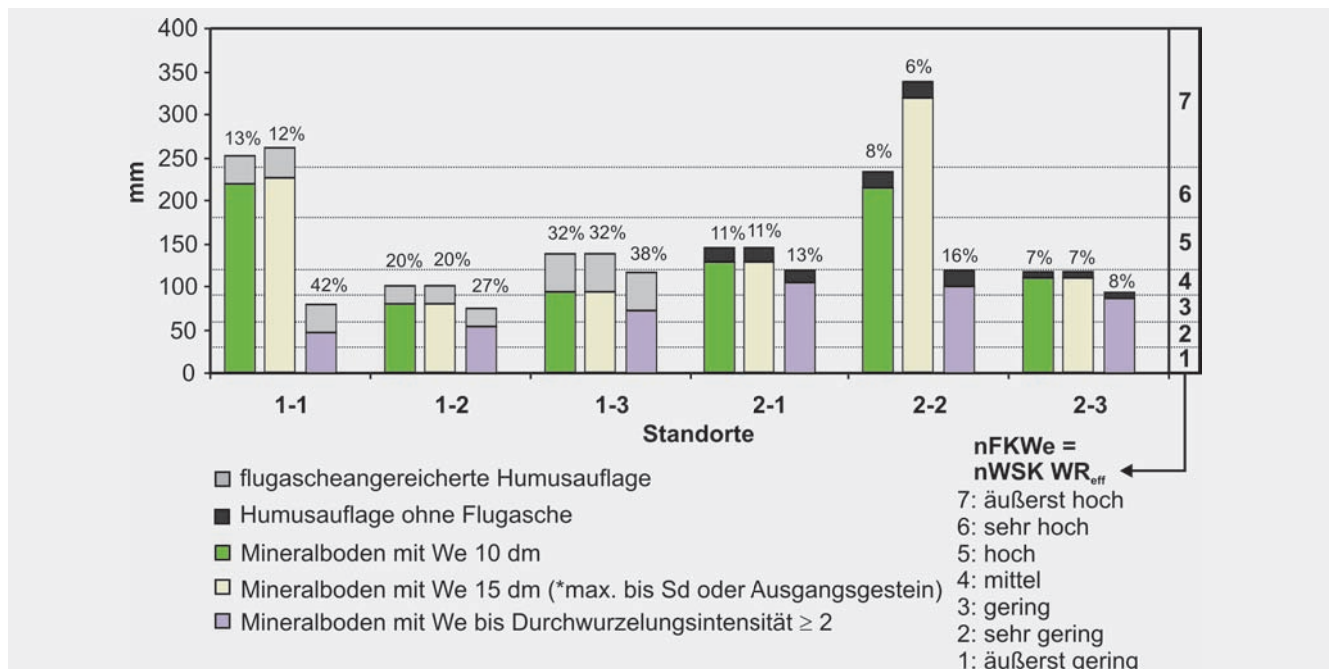


Abb. 5: Nutzbare Feldkapazitäten des effektiven Wurzelraumes nFKWe für unterschiedlich bestimmte effektive Wurzelräume We sowie relativer Anteil der Humusauflagen an der nFKWe (grün: 10 dm = Nadelbestand; gelb: 15 dm = Laubbestand und violett: aktuell bestimmt über Durchwurzelungsintensitäten ≥ 2 , vgl. Abbildung 2; Klassifizierung der nFKWe = nWSK WR_{eff} nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Fig. 5: Plant available water in the effective root zone (nFKWe) as well as the percentage of plant available water contributed by the forest floor horizons (green: 10 dm = conifer; yellow: 15 dm = deciduous trees; purple: actual rooting zone estimated due to root densities ≥ 2 , compare figure 2; classification of nFKWe = nWSK WR_{eff} according to ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2003).

2-1 und 2-3) und als sehr hoch bis äußerst hoch für die Standorte mit Staunässe im Untergrund (1-1), bzw. ohne Staunässe (2-2) einzustufen. Dabei stellen die flugascheangereicherten Humusauflagen 12 bis 32% der nFKWe. Die Humusauflagen ohne Flugascheanreicherung nehmen nur 6 bis 11% der nFKWe ein. Wird der effektive Wurzelraum allerdings über die an den Profilgruben bestimmten Durchwurzelungsintensitäten abgeschätzt, so fallen die gesamten nFKWe teilweise deutlich geringer aus und sind nur noch als gering bis mittel einzustufen. Auch die Standorte ohne bedeutenden Stauwassereinfluss weisen demnach nur mittlere Gründigkeiten auf. Der Anteil, den die Auflagehorizonte an der nFKWe einnehmen, vergrößert sich dementsprechend. So nehmen die flugascheangereicherten Humusauflagen 27 bis 42% ein, wohingegen der Anteil der reinen Humusauflagen nur bei 8 bis 16% liegt.

4. Diskussion

Die Untersuchung flugaschebeeinflusster Waldstandorte und insbesondere der Vergleich flugascheangereicherter Humusauflagen mit nicht belasteten Humusauflagen lassen deutliche Unterschiede erkennen, die im Zusammenspiel mit den geologischen und pedologischen Voraussetzungen den Luft- und Wasserhaushalt von Waldstandorten beeinflussen. Die Festsubstanzdichten der Humusauflagen der Standorte ohne offensichtlichen Flugascheeinfluss sind vergleichbar mit den Werten von REDDING et al. (2005) (unterschiedliche Bestände: 1,5 bis 1,6 g/cm³). Im Gegensatz dazu zeichnen sich die flugascheangereicherten Standorte durch erhöhte Festsubstanzdichten und verringerte Gehalte an organischem Material aus, so dass diese Horizonte zum Teil nicht mehr der Definition eines organischen Horizontes nach AG BODEN, (2005) (Corg \geq 30%) entsprechen (vergleiche auch ZIKELI et al. 2002; KLOSE et al. 2003). Die Texturen der mineralischen Anteile an den flugascheangereicherten Humusauflagen sind aufgrund des hohen Sortierungsgrades und der Dominanz von Feinsanden und Schluffen typisch für äolische Sedimente. Ähnliche Texturen beschreiben BLUME & SCHLEUSS (1997) für Regosole, die sich aus Rost- und Flugasche entwickelten und des weiteren KLOSE et al. (2003) für Flugaschen in der Oberlausitz.

KLOSE & MAKESCHIN (2005) haben ebenfalls eine starke Anreicherung emittentennaher Standorte in der Oberlausitz ermittelt, allerdings sind die Gesamtmengen pro Flächeneinheit der flugascheangereicherten Horizonte (L, Of, Oh) geringer als die von uns ermittelten mineralischen flugaschebürtigen Depositionsmengen.

Entlang eines Flugaschegradienten wurden in der Dübener Heide (Sachsen-Anhalt und Sachsen im Lee der Industrieregion Bitterfeld-Wolfen) ähnliche physikalische Eigenschaften flugaschebeeinflusster Humusauflagen beobachtet (HARTMANN et al. 2007). So sind emittentennah die Festsubstanzdichten und die Luftkapazitäten ebenfalls erhöht, wohingegen die nutzbaren Feldkapazitäten verringert sind. Aufgrund geringerer Mächtigkeiten der akkumulierten Flugaschen ist der Einfluss auf die nFKWe hier jedoch geringer.

Deutlich wird, dass sich Staunässe unabhängig vom Flugascheeinfluss ökologisch vor allem auf die Durchwurzelbarkeit auswirkt. Ab einer Tiefe uGOF von 6 dm und weniger reduziert diese den Wurzelraum mit Folgen für Ertragsleistungen (nach Arbeitskreis Standortkartierung 2003). Die Sauerstoffversorgung wird für staunasse Böden als gering bewertet (DVWK 1995). Dies stimmt mit der Beobachtung überein, dass bei der Profilsprache in den von Stauwasser geprägten Horizonten kaum Feinwurzeln ausgemacht wurden. Die Akkumulation der Flugaschen jedoch bedeutet nun aufgrund der Mächtigkeitszunahme ein Zugewinn an nutzbarer Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, der sich positiv auf den Standort auswirken kann. Die Ergebnisse können auf andere Regionen übertragen werden, die in der Vergangenheit oder auch in der Zukunft langfristigen atmosphärischen Depositionen ausgesetzt waren oder sein werden. Da Kohle der ergiebigste fossile Energieträger ist und der Verbrauch vor allem in Indien und in China, die beide die „Konvention für großräumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (CLRTAP)“ (UNECE 2007) nicht ratifiziert haben, gesteigert werden wird (OECD/IEA 2005), werden Industrieregionen und benachbarte Gebiete auch in Zukunft durch Flugascheakkumulationen geprägt sein.

5. Schlussfolgerungen

Humusauflagen von Waldstandorten mit einer deutlichen Anreicherung an Flugasche aus der Braunkohleverbrennung zeigen signifikant veränderte bodenphysikalische Eigenschaften im Vergleich zu Humusauflagen ohne Flugascheakkumulation. Neben einer Erhöhung der Luftkapazitäten und der gesättigten Wasserleitfähigkeiten weisen flugascheangereicherte Humusauflagen eine geringere nutzbare Feldkapazität auf als unbelastete Humusauflagen. Aufgrund deren Mächtigkeit jedoch bewirken die Flugascheanreicherungen eine deutliche Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum. Da auf den untersuchten Standorten die gemessene Durchwurzelung eine relative flache Gründigkeit anzeigt, ist die relative Bedeutung der Humusauflagen für die Wasserspeicherung umso größer und müssen bei der Standortbewertung beachtet werden.

Danksagung

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) sei herzlich gedankt.

Literatur

- AG BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Aufl. (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung), Hannover, 438 S.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003): *Forstliche Standortsaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen*, 6. Auflage, IHW-Verlag, Eching bei München, 352 S.
- BLAKE, G. R. & HARTGE, K. H. (1986): Particle Density. KLUTE, A. (Hrsg.): *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods*, Amer. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Amer., Madison (Wisconsin), USA, 363–375.
- BLUME, H.-P. & SCHLEUSS, U. (1997) (Hrsg.): *Bewertung anthropogener Stadtböden*. (Hrsg.): *Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* (38), Kiel, 346 S.
- DEUTSCH-POLNISCHE KOMMISSION FÜR NACHBARSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES UMWELTSCHUTZES (1995): *Kraftwerke und Tagebaue beiderseits der deutsch-polnischen Grenze*. Berlin, 98 S.
- DUNGER, W.; DUNGER, I.; EBGELMANN, H.-D. & SCHNEIDER, R. (1972): *Untersuchungen zur Langzeitwirkung von Industrie-Emissionen auf Böden, Vegetation und Bodenfauna des Neissetals bei Ostritz/Oberlausitz*. Abh. Ber. Naturkundemus. Görlitz 47: 1–40.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft) (1995) (Hrsg.): *Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortskarakterisierung, Teil 1: Ansprache der Böden. Regeln zur Wasserwirtschaft*, 115. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 42 S.
- FRITZ, H. & MAKESCHIN, F. (2007): *Chemische Eigenschaften flugaschebeeinflusster Böden der Dübener Heide*. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 46: 105–120.
- GANGLOFF, W. J.; GHODRATI, M.; SIMS, J. T. & VASILAS, B. L. (2000): *Impact of fly ash amendment and incorporation method on hydraulic properties of a sandy soil*. *Water Air and Soil Pollution* 119: 231–245.
- HARTGE, K. H. & HORN, R. (2009): *Die physikalische Untersuchung von Böden*. 4. Auflage: Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag), 177 S.
- HARTMANN, P.; FLEIGE, H. & HORN, R. (2007): *Flugascheeinfluß auf Böden in der Dübener Heide – Physikalische Eigenschaften, Hydrophobie und Wasserhaushalt*. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 46: 79–104.
- KASTLER, M. (2005): *Einfluss der Pedogenese auf die räumliche Porengeometrie und damit verbundene hydraulische Transporteigenschaften in Böden aus Braunkohlenschichten*. *Hallenser Bodenwissenschaftliche Abhandlungen* (9), Tönning (Der Andere Verlag), 150 S.
- KLOSE, S.; TOLLE, R.; BAUCKER, E. & MAKESCHIN, F. (2003): *Stratigraphic distribution of lignite-derived atmospheric deposits in forest soils of the Upper Lusatian region, East Germany*. *Water Air and Soil Pollution* 142: 3–25.
- KLOSE, S. & MAKESCHIN, F. (2004): *Chemical properties of forest soils along a fly-ash deposition gradient in eastern Germany*. *European Journal of Forest Research* 123: 3–11.
- KLOSE, S. & MAKESCHIN, F. (2005): *Soil properties in coniferous forest stands along a fly ash deposition gradient in eastern Germany*. *Pedosphere* 15: 681–694.
- KOCH, J.; KLOSE, S. & MAKESCHIN, F. (2002): *Long-term effect of fly ash accumulation on soil chemical properties*. 3rd International Conference on Water Resources and Environment Research 113–118.
- LUX, H. (1970): *Ergebnisse von Luftuntersuchungen im Einflußbereich der Kraftwerke um Hirschfelde (Neiße, Oberlausitz)*. *Zeitschrift für die gesamte Hygiene und ihre Grenzgebiete* 16: 185–187.
- NEUMEISTER, H.; FRANKE, C.; NAGEL, C.; PEKLO, G.; PEKLO, R. & ZIERATH, R. (1991): *Immissionsbedingte Stoffeinträge aus der Luft als geomorphologischer Faktor - 100 Jahre atmosphärische Deposition im Raum Bitterfeld (Sachsen-Anhalt)*. *Geoökodynamik* 12: 1–40.
- OECD/IEA (2005): *World energy outlook*. Paris (STEDI), 600 S.
- PATHAN, S. M.; AYLMOORE, L. A. G. & COLMER, T. D. (2003): *Properties of several fly ash materials in relation to use as soil amendments*. *Journal of Environmental Quality* 32: 687–693.
- RAISSI, F.; MÜLLER, U. & MEESENBURG, H. (2001): *Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. = Geofakten 9. Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung*, Hannover.
- REDDING, T. E.; HANNAM, K. D.; QUIDEAU, S. A. & DEVITO, K. J. (2005): *Particle density of Aspen, Spruce, and pine forest floors in Alberta, Canada*. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1503–1506.
- RUMPEL, C.; KNICKER, H.; KÖGEL-KNABNER, I.; SKJEMSTAD, J. O. & HÜTTL, R. F. (1998): *Types and chemical composition of organic matter in reforested lignite-rich mine soils*. *Geoderma* 86: 123–142.
- SCHAAF, W.; NEUMANN, C. & HÜTTL, R. F. (2001): *Actual cation exchange capacity in lignite containing pyritic mine soils. - Journal of Plant Nutrition and Soil Science Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 164: 77–78.
- SCHAEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Auflage: Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag GmbH), 593 S.
- SCHMIDT, R. (1995): *Östliche Oberlausitz*, in: *Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde* 238 146–150.
- UNECE (2007): *Status of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and its related Protocols*. – Geneve, 2 S.
- WEISDORFER, M. (1999): *Einfluss unterschiedlicher Schwefel- und Staubemissionen in der Vergangenheit auf die chemische Entwicklung von Humusauflagen und Mineralböden in Kiefernwaldökosystemen im nordostdeutschen Tiefland*. *Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung* (4), Cottbus (Technische Universität), 214 S.
- YUNUSA, I. A. M.; EAMUS, D.; DESILVA, D. L.; MURRAY, B. R.; BURCHETT, M. D.; SKILBECK, G. C. & HEIDRICH, C. (2006): *Fly-ash: An exploitable resource for management of Australian agricultural soils*. *Fuel* 85: 2337–2344.

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

Autorenanschriften

Peter Hartmann
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
Hermann-Rodewald-Straße 2, D-24118 Kiel
Telefon +49 431 8805024
Email p.hartmann@soils.uni-kiel.de