

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz	Heft 8	Seite 9–20	7 Fig., 6 Tab.	Tharandt, August 2009
----------------------------------------------------	--------	------------	----------------	-----------------------

## Zukünftige Entwicklung bodenchemischer Parameter auf ehemals emissionsbeeinflussten Waldstandorten

### *Future development of soil chemical parameters on formerly emission affected forest sites*

Heiko Fritz, Mengistu Abiy, Thomas Klinger, Franz Makeschin

#### **Abstract**

*This paper presents scenarios for the future development of selected soilchemical parameters (pH-value, nutrient stocks and heavy metal contents) on fly ash affected forest soils of the Dübener Heide. Twelve forest sites were examined, having different distances from the main emitter and thus lying along a deposition gradient of basic fly ash containing heavy metals. Models were developed for the future development of pH-values and element contents using literature data and actual measurements as well as leaching experiments. According to these model results the most affected site Burgkennitz will be characterized by superior stocks of calcium and magnesium for duration of the next 100 years. In the organic horizons of this site the contents of cadmium, copper, nickel and zinc exceed the threshold values of the BBodSchV (German Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance) presently. But due to high pH-values the mobile contents of these heavy metals are low enough so that currently a risk of damage to plants or microorganisms can not be deduced. Because of continuous acidification the mobile contents of nickel and zinc will exceed the trigger values (PRÜESS 1994) in the next decades. But a high damage is not to be expected. Thus forest management could make use of the improved nutrition conditions at this site on a long-term time scale.*

*Keywords: fly ash, forest soil, Dübener Heide, leaching, heavy metal, calcium, magnesium*

#### **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit stellt Prognosen zur Entwicklung verschiedener bodenchemischer Parameter (pH-Wert, Nährelementvorräte und Schwermetallgehalte) für flugaschebeeinflusste Waldböden der Dübener Heide vor. Untersucht wurden dazu zwölf Waldstandorte mit unterschiedlicher Entfernung vom Hauptemittenten und damit entlang eines Depositionsgradientenbasischer, schwermetallhaltiger Flugasche. Aus der Kombination von vorhandenen Altdaten, dem gemessenen Ist-Zustand und den Ergebnissen von Freisetzungsversuchen wurden Modelle für zukünftig zu erwartende pH-Werte und Elementgehalte der Auflagen abgeleitet. Entsprechend dieser Modelle wird der am stärksten beeinflusste Standort Burgkennitz voraussichtlich noch mindestens 100 Jahre über aufgebaste Auflagen verfügen, die sich

durch überdurchschnittlich hohe Calcium- und Magnesiumvorräte auszeichnen, was als positiv für die Pflanzenernährung zu bewerten ist. Die Schwermetallgesamtgehalte von Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink in den Auflagen dieses Standortes überschreiten zwar heute schon die Vorsorgewerte der BBodSchV. Aufgrund des hohen pH-Wertes sind zur Zeit die mobilen Gehalte aber noch so gering, dass sich daraus keine Gefährdung für Pflanzen und Mikroorganismen ergibt. Die mobilen Schwermetallgehalte von Nickel und Zink werden zwar aufgrund stetiger Wiederversauerung in den nächsten Jahrzehnten die Prüfwerte von PRÜESS (1994) überschreiten. Mit einem hohen Schädigungspotenzial ist allerdings nicht zu rechnen. Das durch die Flugasche verbesserte Nährstoffangebot könnte hier also noch langfristig waldbaulich genutzt werden.

Schlüsselwörter: Flugasche, Waldboden, Dübener Heide, Freisetzung, Schwermetalle, Calcium, Magnesium

#### **1. Einleitung**

Das sich nordöstlich des Ballungsgebietes Leipzig-Halle-Bitterfeld erstreckende Waldgebiet der Dübener Heide wurde im 20. Jahrhundert durch Immissionen aus Braunkohleverbrennung und chemischer Industrie beeinflusst. Neben großen Mengen an Schwefeldioxid, Stickoxiden und Ammoniak, die primär zu massiven Waldschäden führten, wurden durch die Verbrennung von ca. 1 Mrd. t Rohbraunkohle etwa 12 Mio. t Flugasche ausgestoßen und überwiegend im Gebiet der Dübener Heide abgelagert (NEUMEISTER et al. 1991; NEUMEISTER et al. 1997; ENDERS, 2007). Im Gegensatz zur schädlichen Wirkung der Gase führten die Einträge des calciumreichen, basischen Aschenmaterials aber zu basenreichen Humusaufgaben, so dass bereits 1962 für die gesamte Dübener Heide die Einstellung der Bestandeskalkung angeordnet wurde (ENDERLEIN & STEIN, 1964a; KÖHLER & LIEBER, 1968). Die starken und teilweise gegenläufigen Auswirkungen der Stoffeinträge auf die Waldökosysteme gaben bereits frühzeitig Anlass dazu, die Folgen der Industrieimmissionen näher zu untersuchen. Dadurch kann heute auf eine umfangreiche, über viele Jahrzehnte reichende Datengrundlage zurückgegriffen werden. So ließen sich zum Beispiel anhand von Untersuchungen der Humusaufgabe (ENDERLEIN & STEIN, 1964a), Kronenansprachen (LUX, 1965a; LUX, 1965b; LUX & STEIN, 1977; SCHULZ & HUHN, 1997) und Borkenanalysen (NIEHUS & SCHULZ, 1997) deutliche Immissionsgradienten flächen-

deckend über das Gebiet der Dübener Heide ausmachen. Ein besonders hoher Einfluss war demnach im Nordwesten der Region (um Gräfenhainichen und das dort befindliche Kraftwerk Zschornowitz) festzustellen. Doch während die negativen Auswirkungen der Schadgase ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ) auf den Gesundheitszustand der Waldbestände nach der Reduktion der Industrieemissionen weitestgehend zurückgingen, sind die überwiegend positiven Folgen der Flugascheablagerungen aufgrund der verbesserten Nährstoffausstattung der Standorte bis heute nachweisbar (FRITZ & MAKESCHIN, 2007; FRITZ et al. 2008).

Aufgrund der nach Rückgang der basischen Einträge eingesetzten Wiederversauerung (HERPEL et al. 1995; KONOPATZKY, 1995; KONOPATZKY et al. 1995; KALBITZ et al. 1997) besteht jedoch nun zur Planung der optimalen waldbaulichen Nutzung die Herausforderung, die lang- und mittelfristige Freisetzung von Stoffen aus den abgelagerten Flugaschen unter den sich ändernden Bedingungen abzuschätzen. So berichten zum Beispiel KONOPATZKY et al. (1995), KOCH et al. (2001; 2002) und KLOSE & MAKESCHIN (2003) bereits von einem zunehmenden Verlust basischer Kationen aus den Humusaufgaben und einer Verlagerung der Aufbasungsfront in die Tiefe. Durch die sinkenden pH-Werte wird außerdem die Mobilität der zur Zeit in den aufgebasteten Auflagen vorliegenden Schwermetalle (NEUMEISTER et al. 1991; BARONIUS, 1992; NEUMEISTER & RUSKE, 1995; KALBITZ, 1996; KALBITZ et al. 1997; KLOSE et al. 2003; KLOSE & MAKESCHIN, 2004; FÜRST et al. 2007) zunehmen, was ein Gefährdungspotenzial für Pflanzen und Bodenmikroorganismen darstellt. In der vorliegenden Arbeit werden durch den Vergleich von aktuellen Messungen mit vorhandenen Altdaten und mit Hilfe neuer Freisetzungsversuche Aussagen und Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Nährstoff- und Gefahrenpotenzials abgeleitet.

## 2. Material und Methoden

### Standortauswahl, Probenahme

Im Untersuchungsgebiet wurden 12 Standorte ausgewählt (Tab. 1), die 90% der Fläche terrestrischer Böden der Dübener Heide abdecken (EISENHAUER & SONNEMANN, 2008) und außerdem ausgehend vom Hauptemittenten Kraftwerk Zschornowitz auf einem Nordwest-Südost gerichteten Immissionsgradienten liegen. Für detailliertere Informationen zur genauen Lage, Vegetation und Profilbeschreibung siehe FRITZ & MAKESCHIN (2007) und HARTMANN et al. (2007b).

An diesen Standorten wurden Bodenprofile angelegt und in Anlehnung an die BUND-LÄNDER AG BZE II (2006) mit Kunststoffgeräten volumenbezogen in Tiefenstufen beprobt.

Die vorliegende Arbeit ist auf die Darstellung der Ergebnisse der Auflagen (über das Auflagengewicht gewichtete Mittelwerte der Of- und Oh-Horizonte) fokussiert. Für weitere Informationen zu den einzelnen Horizonten und zum Mineralboden wird wieder auf FRITZ & MAKESCHIN (2007) verwiesen.

### Probenvorbereitung, -analyse

Die Probenanalyse erfolgte gemäß dem Handbuch Forstliche Analytik (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK, 2005) in Anlehnung an die BZE II an getrockneten (48 h bei 60°C) und gesiebten (5 mm Kunststoffsieb) Proben. Gemessen wurden jeweils der pH-Wert in KCl-Lösung und sowohl die  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbaren- als auch die Gesamtgehalte der Elemente Ca, Mg, Cd, Cu, Ni und Zn.

Tab. 1: Charakterisierung der Standorte (RSZ = Rauchsadenszone nach Lux (1965a), Entfernung = Entfernung von Zschornowitz, Bodentyp = Bodentyp nach HARTMANN (2008)).

Table 1: Characterisation of the sites (RSZ = zone of damage according to Lux (1965a), Entfernung = distance from Zschornowitz, Bodentyp = soil typ according to HARTMANN (2008)).

Standort	RSZ	Entfernung	Bodentyp	Lokalbodenform
Burgkernitz	1	4,2 km	podsolige Normbraunerde	Bärenthorener Sandbraunerde
Buchholz	1	7,9 km	reliktisch flach vergleyte	Nedlitzer Sand-Braunerde Podsol-Braunerde
Ochsenkopf-BDF	1	11,0 km	Pseudogley-Gley	tonunterlagerter Salmtieflehm-Fahlstaugley
Tornau-45	3	15,0 km	pseudovergleyte Normbraunerde	Nedlitzer Sand-Braunerde
Ochsenkopf-EU	3	15,1 km	Normpodsol	Moschwiger Sand-Rügpodsol
Eisenhammer	3	15,4 km	Podsol-Braunerde	Nedlitzer Sand-Braunerde
Torfhaus-Nord	3	29,8 km	Podsol-Braunerde	Nedlitzer Sand-Braunerde
Torfhaus-Süd	3	29,8 km	vergleyter Braunerde-Podsol	Bärenthorener Sand-Braunerde
Battaune	3	30,5 km	Podsol-Gley	Wiepersdorfer Sand-Graugley
Jagdhaus-Nord	4	30,5 km	podsolige Pseudogley-Braunerde	Nedlitzer Sand-Braunerde
Jagdhaus-Süd	4	30,7 km	Normpodsol	Stahnsdorfer Sand-Rostpodsol
Trossin	4	34,2 km	podsolige Pseudogley-Braunerde	Zahnaer Sand-Braunerde

### Freisetzungsversuch

An gestörten Proben der Auflagen ausgewählter Standorte (Burgkernitz, Buchholz und Torfhaus-Nord) wurden zur Abschätzung der zeitlichen Entwicklung Freisetzungsversuche durchgeführt. Grundannahme der Versuche war, dass die Freisetzung von Stoffen aus dem Boden primär auf die mit dem Niederschlag eingebrachte Säurefracht zurückzuführen ist. Die Säurefracht nach REHFUESS (1990) ist hierbei der Frachtüberschuss an Anionen starker Säuren (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) gegenüber den Basen-Kationen (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) im Niederschlag. Die Frachten der einzelnen Ionen wurden nach folgender Formel berechnet.

$$F_i = P \cdot 10^{-6} \cdot \frac{c_i \cdot z_i}{M_i}$$

- F<sub>i</sub> Säurefracht des Ions i im Niederschlag [kmol(IE)/(ha·a)]
- P Jahresniederschlag [l/(ha·a)]
- c<sub>i</sub> Niederschlagskonzentration des Ions i [mg/l]
- z<sub>i</sub> Wertigkeit des Ions i
- M<sub>i</sub> Molare Masse des Ions i [g/mol]

Für die Dübener Heide beträgt die aktuelle Säurefracht unter Kiefernbeständen 0,6 kmol/(ha·a). Diese wurde berechnet aus Level II-Daten der Messstation Laußnitz, gemittelt über den Zeitraum 2000–2004.

Im Experiment wurden an 25 aufeinander folgenden Tagen die Bodenproben jeweils in 100 ml einer 0,008 M HCl-Lösung aufgeschlämmt, 24 h stehen gelassen, durch Vakuumfiltration von der Lösung abgetrennt und erneut mit 100 ml Säure versetzt. Mit Hilfe einer ICP-AES wurden in der Lösung die Konzentrationen an Ca, Mg, Cd, Cu, Ni und Zn gemessen. Unter der Bedingung, dass im Experiment auf ein Gramm eingesetzter Bodenprobe pro Zeiteinheit die gleiche Säuremenge wirken soll wie am jeweils untersuchten Waldstand-

ort, ergibt sich für jede Probe über die folgende Gleichung ein simulierter Zeitraum pro Experimentiertag. Die 25 Tage des Freisetzungsversuches decken dabei mindestens die Zeit bis 2100 ab.

$$PZ = \frac{V_L \cdot c_L \cdot AG}{F \cdot E}$$

- PZ Prognosezeit [a/d]
- V<sub>L</sub> Volumen des Lösungsmittels [100 ml/d]
- c<sub>L</sub> Konzentration des Lösungsmittels [0,008 mol/l]
- F Säurefracht im Niederschlag [0,6 kmol/(ha·a)]
- AG Auflagegewicht des Horizontes [t/ha]
- E Einwaage der Bodenprobe [g]

Durch Abzug des pro Experimentiertag freigesetzten Elementgehaltes vom bekannten aktuellen Gesamtgehalt lässt sich unter Einbezug der Prognosezeit die zukünftige zeitliche Entwicklung der Nährelement- und Schwermetallgehalte abschätzen.

### Prognose der pH-Wert-Entwicklung

Die zukünftige Entwicklung der Auflagen-pH-Werte in den einzelnen Rauchsadenzonen (LUX, 1965a) wurde mit Hilfe einer exponentiellen Kurvenanpassung an vorhandene Literaturdaten und eigene pH-Messwerte abgeschätzt. Die verwendeten Literaturdaten sind in Tab. 2 zusammengestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden alle darin beschriebenen Standorte den Rauchsadenzonen (LUX, 1965a) zugeordnet. Ausgehend vom aktuellen mittleren pH-Wert der emittentenfernen Auflagen (FRITZ & MAKESCHIN, 2007) und der Angabe von HEINSDORF et al. (1992), dass vor Beginn der großen Fremdstoffeinträge pH-Werte zwischen 3,2 und 3,5 vorgelegen haben, wurde für die exponentielle Anpassung der Funktionsgrenzwert auf pH 3,2 festgelegt.

Tab. 2: Datengrundlage für den Trend der zeitlichen Entwicklung der pH-Werte in den Auflagen der Dübener Heide für die verschiedenen Rauchsadenzonen von Lux (1965a).

Table 2: Database for the trend of pH-value development with time in the organic horizons of the Dübener Heide within the different zones of damage by Lux (1965a).

Probenahmejahr	Literaturquelle	mittlerer pH-Wert in den Rauchsadenzonen (LUX, 1965a)		
		1	3	4
1964*	ENDERLEIN & STEIN (1964a)	6,3	4,1	3,5
	LUX (1964)	6,7	-	3,7
1967	KÖHLER & LIEBER (1968)	5,8	4,5	3,8
1974*	LUX (1974)	6,0	-	3,7
1986	HEINSDORF et al. (1992)	4,9	-	-
1988	HERPEL et al. (1995)	5,4	3,9	3,7
1995	POPP et al. (1997)	4,5	-	-
1996*	NEBE & ZIMMERMANN (1996)	-	-	3,7
1999	KLOSE et al. (2001)	4,7	3,8	-
	KLOSE & MAKESCHIN (2003)			
2005	FRITZ & MAKESCHIN (2007)	4,5	3,4	3,2

\* Probenahmejahr nicht eindeutig feststellbar

### 3. Ergebnisse

#### Aktuelle pH-Werte

Die  $pH_{KCl}$ -Werte der Auflagen (Abb. 1) schwanken von mäßig sauer bis extrem sauer in einem sehr großen Wertebereich (AG-BODEN, 2005). Sehr deutlich ist ein Anstieg der pH-Werte hin zum Kraftwerk Zschornowitz zu erkennen. Zwischen den emittentennahen und emittententfernten Standorten tritt ein pH-Wert-Unterschied von ca. 1,5 pH-Einheiten auf. Während die pH-Werte der dem Emittenten nahe gelegenen Standorte über dem 75%-Perzentil des BZE-Datenkollektives ( $pH_{KCl} = 3,80$ ) liegen und als überdurchschnittlich hoch eingeschätzt werden müssen, weisen die weit vom Emittenten entfernten Standorte pH-Werte im Bereich des Medians ( $pH_{KCl} = 3,35$ ) auf (BML, 1996).

#### Prognose der pH-Wert-Entwicklung

Abb. 2 zeigt eine kontinuierliche und exponentielle Abnahme der pH-Werte der drei untersuchten Rauschschadenszonen mit der Zeit. In den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts lagen noch klare Unterschiede bei den pH-Werten verschiedener Rauchschadenszonen (Lux, 1965a) vor. Seit dem haben sich die weiter entfernten, weniger belasteten Zonen 3 und 4 bezüglich ihrer pH-Werte sehr stark angenähert. Bis 2075 wird der pH-Wert-Unterschied zwischen den Rauchschadenszonen (Lux, 1965a) nach der hier durchgeführten Prognose maximal 0,2 pH-Einheiten betragen.

#### Aktuelle Nährelementvorräte

Die Gesamtvorräte der Nährelemente sind nach BML (1996) für die meisten Standorte als durchschnittlich einzuschätzen (Tab. 3). Die Werte der Standorte Burgkernitz, Buchholz, Tornau-45 und Torfhaus-Süd liegen dagegen jenseits des 75%-Perzentils. Trotz größerer Schwankungen sind die  $NH_4NO_3$ -extrahierbaren Nährelementvorräte der Standorte Burgkernitz und Buchholz im Mittel deutlich höher als die der emittententfernen Standorte der RSZ 3 und 4 (Tab. 1). Die gemeinsame Betrachtung von Auflagen und Oberböden unterstreicht dies (FRITZ & MAKESCHIN, 2007; FRITZ et al. 2008)

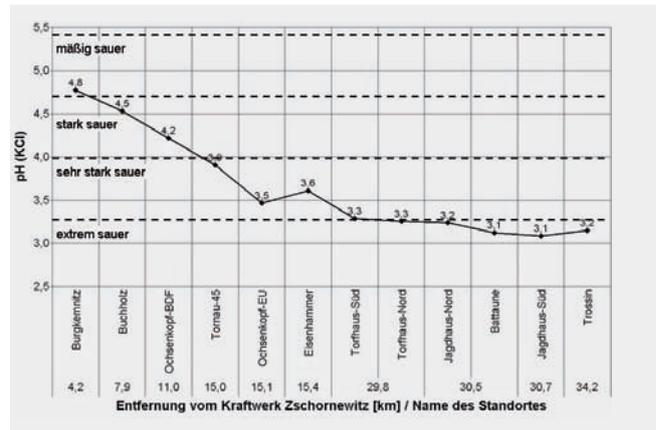


Abb. 1:  $pH_{KCl}$ -Werte in den Auflagen der untersuchten Standorte in Abhängigkeit von der Entfernung vom Kraftwerk Zschornowitz (unter Kennzeichnung der pH-Bereiche nach AG-BODEN (2005)).

Fig. 1:  $pH_{KCl}$ -value in the organic horizons of the investigated sites against the distance from power plant Zschornowitz (with labels of the pH-range after AG-BODEN (2005)).

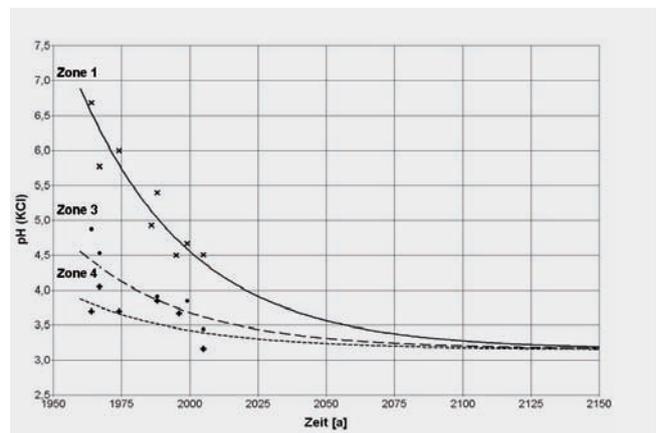
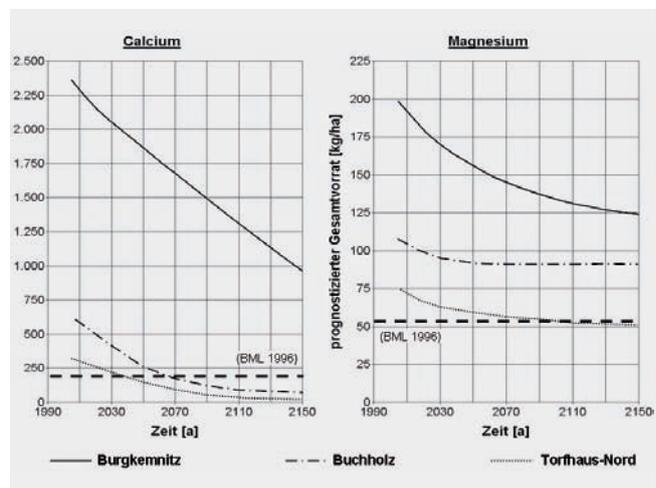


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der  $pH_{KCl}$ -Werte in den Auflagen der Dübener Heide für die verschiedenen Rauchschadenszonen von Lux (1965a) (Zone 1: sehr stark bis stark geschädigt, Zone 3: mäßig geschädigt, Zone 4: gering geschädigt; Datengrundlage siehe Tab. 2).

Fig. 2: Development of pH-value in the organic horizons of the Dübener Heide in different zones of damage by Lux (1965a) (Zone 1: very highly to highly affected, Zone 3: moderately affected, Zone 4: lowly affected, see Table 2 for database).

Abb. 3: Auf Grundlage der Freisetzungsversuche prognostizierte Abnahme des Gesamtvorrates von Calcium und Magnesium in den Auflagen der untersuchten Standorte (unter Kennzeichnung der Hintergrundwerte nach BML (1996)).

Fig. 3: From leaching experiments prognosticated decrease of the total stocks of calcium and magnesium in the organic horizons of the investigation sites (with labels of the background level according to BML (1996)).



Tab. 3: Nährelementvorräte von Calcium und Magnesium in den Auflagen der untersuchten Standorte (mit zunehmender Entfernung vom Kraftwerk Zschornowitz (siehe Tab.1)).

Table 3: Stocks of calcium and magnesium in the organic horizons of the investigation sites (with increasing distance from power plant Zschornowitz (see Table 1)).

Vorräte in kg/ha Standort	Gesamtvorrat		NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> -extrahierbarer Vorrat	
	Ca	Mg	Ca	Mg
Burgkernitz	2360	198	394	16
Buchholz	644	110	273	14
Ochsenkopf-BDF	337	102	169	9
Tornau-45	616	121	45	2
Ochsenkopf-EU	182	38	41	3
Eisenhammer	371	99	45	4
Torfhaus-Nord	352	72	190	18
Torfhaus-Süd	591	111	300	14
Battaune	182	55	51	5
Jagdhaus-Nord	251	80	104	11
Jagdhaus-Süd	215	52	100	8
Trossin	175	36	84	8
Hintergrundwert und 75%-Perzentil nach BML (1996)	211 357	55 105	- -	- -

### Prognose der Nährelement-Entwicklung

Basierend auf den Freisetzungsversuchen ist in Abb. 3 für die Nährelemente Calcium und Magnesium die zukünftige Entwicklung der Gesamtvorräte der untersuchten Auflagen in Abhängigkeit der Zeit dargestellt.

Aus Abb. 3 ist ersichtlich, dass die Calciumvorräte von Torfhaus-Nord voraussichtlich gegen 2040, die von Buchholz gegen 2060 den Hintergrundwert aus der BZE (Tab. 3) unterschreiten werden. Anders gestaltet sich die Situation für den Standort Burgkernitz, bei dem sich bis 2100 der Calciumvorrat nicht einmal halbieren wird, was bedeutet, dass selbst das 90%-Perzentil der BZE (647 kg/ha) überschritten bleibt. Während bei Calcium nahezu der gesamte Vorrat freigesetzt werden kann, scheint ein großer Teil des Magnesiums im Experiment nicht extrahierbar zu sein. So ist für Torfhaus-Nord und Buchholz die Freisetzung bereits gegen 2070 abgeschlossen, obwohl dann noch ca. 80% des derzeit vorhandenen Magnesiumvorrates im Boden vorliegen werden. Für Burgkernitz erfolgt die Abnahme des Gesamtvorrates deutlich langsamer und ist auch nach 2100 noch nicht abgeschlossen. Die Tendenz einer immer geringeren Freisetzungsrates ist auch hier deutlich zu beobachten.

Die Magnesium-Hintergrundwerte der BZE (Tab. 3) werden für den emittententfernen Standort Torfhaus-Nord voraussichtlich gegen 2100 erreicht. Für die emittentennahen Standorte Burgkernitz und Buchholz sind die Werte dagegen zu diesem Zeitpunkt noch weit überschritten.

### Aktuelle Schwermetallgehalte

In Tab. 4 sind für die untersuchten Auflagen die Gesamtgehalte sowie deren prozentuale mobilen (= NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-extrahierbaren) Anteile einiger ausgewählter Schwermetalle zusammengestellt. Für die Gesamtgehalte von Cadmium und Zink ist ein Gradient in Abhängigkeit der Entfernung zum Hauptemittenten festzustellen. Für Kupfer und Nickel lassen sich keine räumlichen Trends abzeichnen.

Eine Bewertung der Höhe der Schwermetallgesamtgehalte erfolgt anhand der Überschreitung der Vorsorgewerte der BBodSchV (Abb. 4). Die oben beschriebenen Gradienten für Cadmium und Zink werden hier besonders offensichtlich, wobei für alle Standorte die Vorsorgewerte für Cadmium deutlich überschritten sind, während sich überhöhte Zinkwerte auf die emittentennäheren Standorte beschränken. Auffällig ist weiterhin, dass der dem Hauptemittenten Zschornowitz am nächsten gelegene Standort Burgkernitz sämtliche Schwermetall-Vorsorgewerte überschreitet, während bereits beim nur wenig entfernten Standort Buchholz deutlich geringere Überschreitungen beobachtet werden. Ähnliche Tendenzen ergeben sich auch beim Vergleich der Daten mit Hintergrundwerten nach BML (1996).

Tab. 4: Schwermetallgehalte in den Auflagen der untersuchten Standorte (mit zunehmender Entfernung vom Kraftwerk Zschornowitz (siehe Tab.1)).

Table 4: Heavy metal content in the organic horizons of the investigated sites (with increasing distance from power plant Zschornowitz (see Table 1)).

Standort	Cd		Cu		Ni		Zn	
	mg/kg*	%**	mg/kg*	%**	mg/kg*	%**	mg/kg*	%**
Burgkernitz	1,37	1	27,8	0,1	16,7	0,7	106,3	2
Buchholz	0,87	4	13,0	0,7	8,2	1,0	70,5	6
Ochsenkopf-BDF	1,03	6	15,6	0,5	12,2	3,4	87,9	8
Tornau-45	1,21	3	20,4	0,5	10,7	1,1	80,9	3
Ochsenkopf-EU	0,61	5	16,8	0,4	6,0	2,1	29,0	9
Eisenhammer	0,79	2	31,9	0,2	11,7	1,0	54,7	3
Torfhaus-Nord	0,82	15	18,0	0,8	7,3	6,7	48,6	21
Torfhaus-Süd	0,87	14	23,6	0,8	9,5	6,7	61,9	23
Battaune	0,52	10	16,0	0,7	6,8	4,8	29,2	13
Jagdhaus-Nord	0,44	8	11,9	1,1	6,4	5,6	29,9	17
Jagdhaus-Süd	0,54	9	18,7	0,7	5,9	5,7	27,2	19
Trossin	0,54	14	18,1	0,8	8,9	5,2	47,3	22
Vorsorgewert nach BBodSchV (1999)	0,40	-	20,0	-	15,0	-	60,0	

\*\* Schwermetallgesamtgehalte in mg/kg

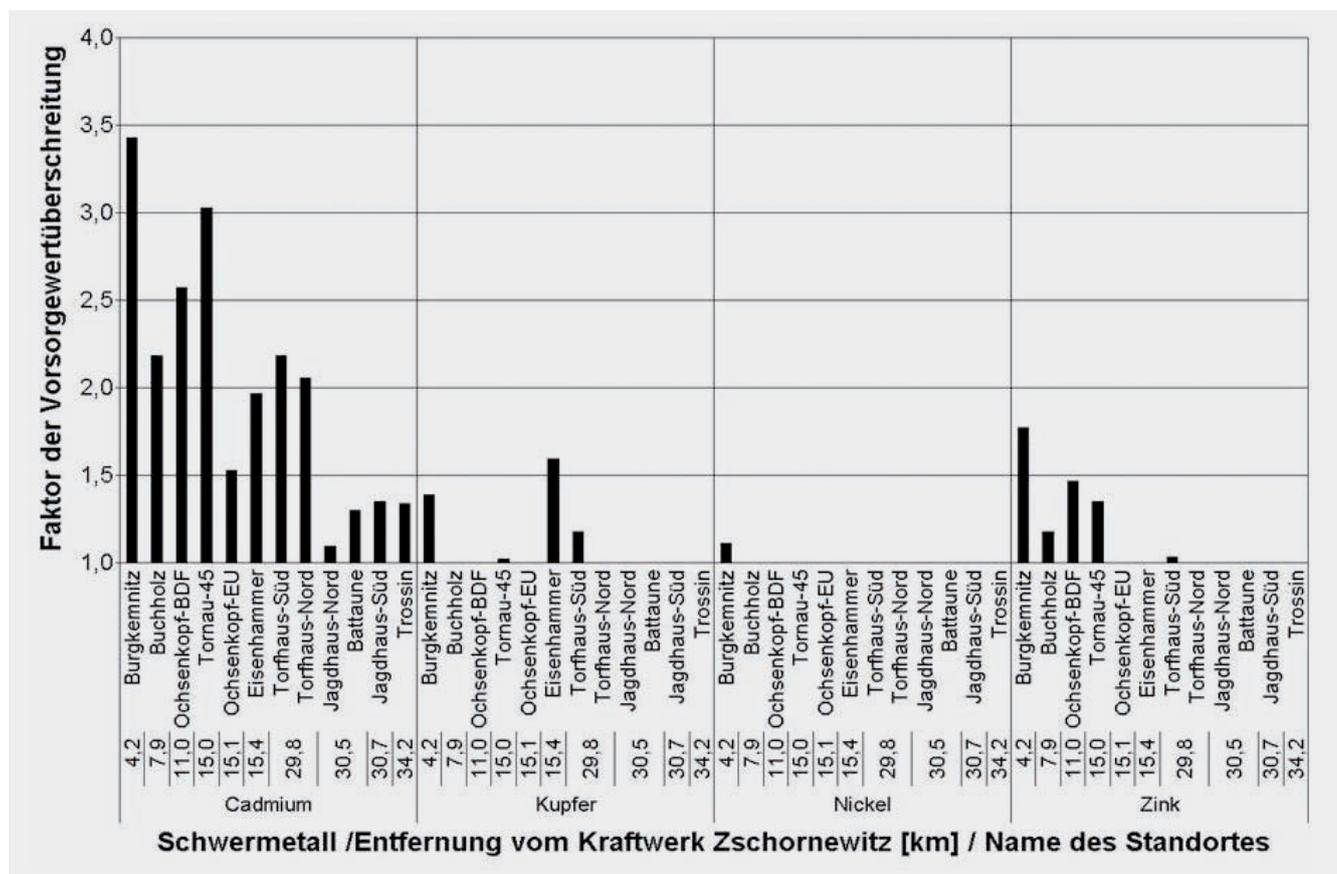
\*\* NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-extrahierbarer Anteile der Gesamtgehalte in %

Abb. 4: Faktor der Vorsorgewert-Überschreitung (BBodSchV) für die Gesamtgehalte verschiedener Schwermetalle in Abhängigkeit der Entfernung zum Kraftwerk Zschornowitz.

Fig. 4: Factor of exceedance of the threshold-values (BBodSchV) for the total amounts of different heavy metals against the distance from power plant Zschornowitz.

Tab. 5: pH-abhängige Vorsorgewerte (definiert als die Obergrenze des Hintergrundwertes) und Prüfwerte von PRÜESS (1994).

Table 5: pH dependent threshold-values (defined as the upper limit of the background level) and inspection-values according to PRÜESS (1994).

mg/kg	Vorsorgewerte			Prüfwerte	
	pH < 4,0	4,0 < pH < 4,5	4,5 < pH < 5,0	Pflanzen	Mikroorganismen
Cadmium	0,08	0,05	0,02	-	-
Kupfer	0,3	0,28	0,25	2±0,4	1±0,2
Nickel	1	1	0,6	1±0,2	-
Zink	5	4	3	10±1,0	-

Weil für die mobilen Schwermetallgehalte der Waldstandorte keine Vergleichswerte nach BBodSchV (1999) vorliegen, wurden die  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbaren Gehalte mit den pH-abhängigen Vorsorge- und Prüfwerten von PRÜESS (1994) verglichen (Tab. 5)

Demnach liegen alle Kupfer- und Nickelgehalte unterhalb des Vorsorgewertes und damit im Hintergrundbereich. Die von PRÜESS (1994) erhobenen Prüfwerte für das Pflanzenwachstum und die Leistung der Mikroorganismen werden für diese beiden Metalle ebenfalls bei keinem der untersuchten Standorte überschritten.

Die mobilen Cadmium- und Zinkwerte sind dagegen als überdurchschnittlich hoch einzuschätzen. Doch während sich für Cadmium kein klarer Trend abzeichnen lässt, sind die Vorsorgewerte für Zink trotz der niedrigen Gesamtgehalte vor allem bei den emittentfernen Standorten überschritten. Auffällig ist, dass für Burgkernitz, wo für alle Metalle die Vorsorgewerte der BBodSchV für die Gesamtgehalte deut-

lich überschritten sind, keine Überschreitung bei den verfügbaren Gehalten nach PRÜESS (1994) vorliegen.

#### Prognose der Schwermetall-Entwicklung

Als Ergebnis der Freisetzungsversuche ist in Abb. 5 für die Schwermetalle die zukünftige Entwicklung der Gesamtgehalte in den untersuchten Auflagen in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen.

Aus Abb. 5 kann abgeschätzt werden, wann die Gesamtgehalte der einzelnen Schwermetalle an den jeweiligen Standorten unter die Vorsorgewerte der BBodSchV fallen werden. Demnach werden bei den weniger schwermetallbelasteten Standorten Buchholz und Torfhaus-Nord 2100 die Gehalte von allen betrachteten Metallen unterhalb der Vorsorgewerte liegen. Dahingegen ist bei Burgkernitz nicht damit zu rechnen, dass bis 2100 die Gehalte ausreichend stark abnehmen, um laut BBodSchV als unbedenklich eingestuft zu werden.

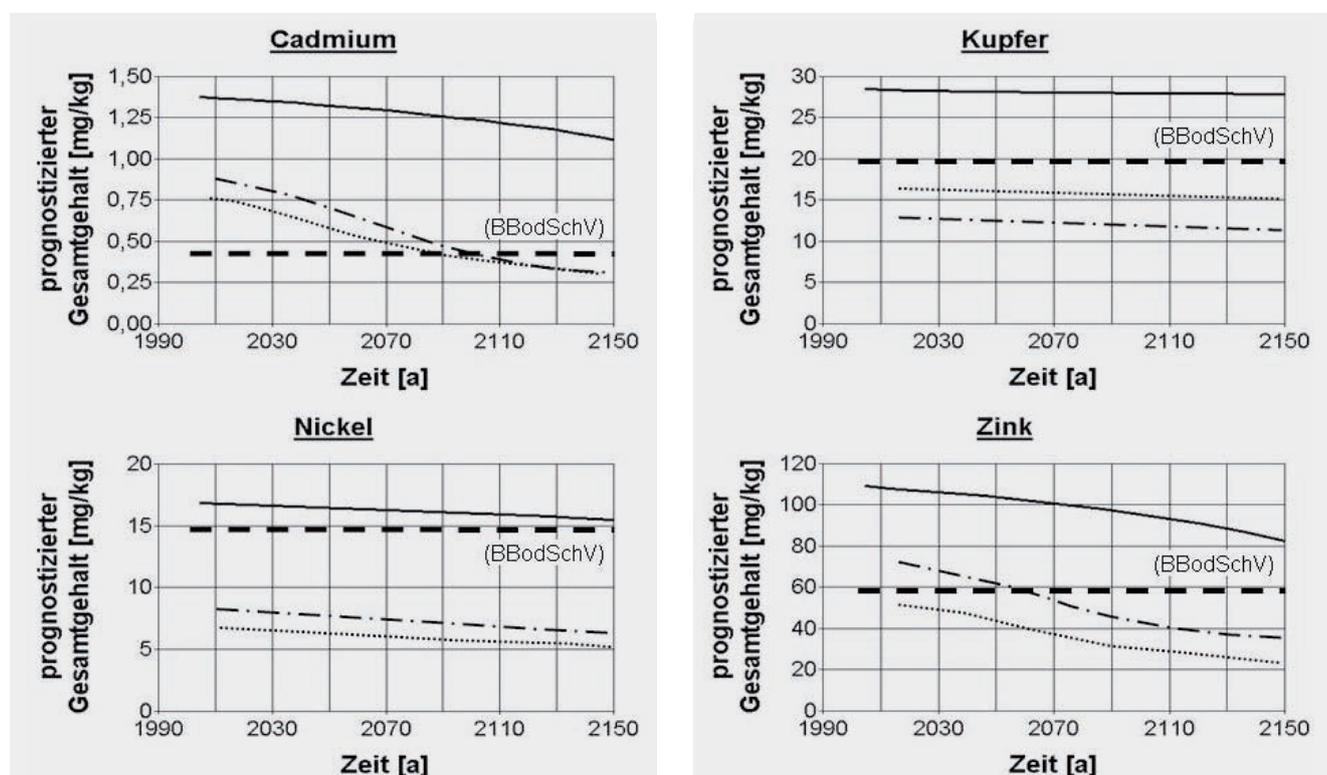


Abb. 5: Auf Grundlage der Freisetzungsversuche prognostizierte Abnahme der Schwermetallgesamtgehalte in den Auflagen der untersuchten Standorte (unter Kennzeichnung der Vorsorgewerte nach BBodSchV).

Fig. 5: From leaching experiments prognosticated decrease of the total amounts of heavy metals in the organic horizons of the investigated sites (with label of the threshold-value according to BBodSchV).

### Prognose der Entwicklung mobiler Schwermetalle

In Abb. 6 ist die durch Kombination der pH-Wert-Entwicklung mit der pH-Wert-Abhängigkeit der Schwermetallmobilität (PRÜESS, 1994) erhaltene Prognose zur zeitlichen Entwicklung der Schwermetallmobilität am Beispiel der Rauchschaadenszone 1 (LUX, 1965a) dargestellt.

Während die Mobilität von Zink sehr stark und die von Cadmium und Nickel stark ansteigen, bleibt die von Kupfer über den betrachteten Zeitraum fast konstant.

Am Beispiel des Standortes Burgkernitz ist in Abb. 7 die voraussichtliche zeitliche Entwicklung der Überschreitung der mobilen Vorsorgewerte von PRÜESS (1994) für die untersuchten Schwermetalle dargestellt.

Demnach ist mit einer Überschreitung der mobilen Vorsorgewerte nach PRÜESS (1994) für Zink bereits ab ca. 2010 und für die restlichen Schwermetalle nach 2040 zu rechnen. Ab 2130 kommt es aber für Zink und Cadmium bereits wieder zu einem Abklingen der Vorsorgewertüberschreitung.

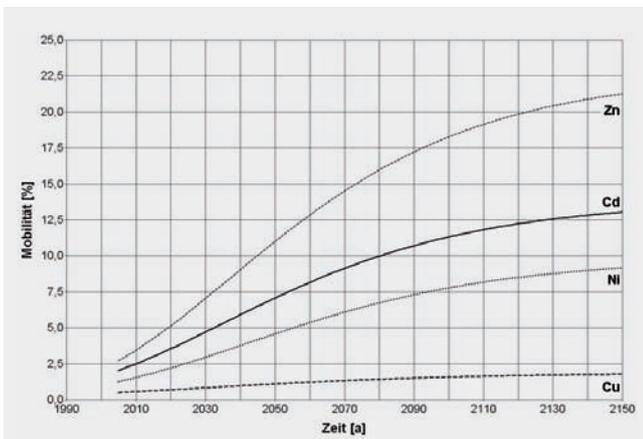


Abb. 6: Aus der zeitlichen Entwicklung der  $pH_{KCl}$ -Werte prognostizierte Entwicklung der Mobilität verschiedener Schwermetalle für die Rauchschaadenszone 1 von Lux (1965a).

Fig. 6: From  $pH_{KCl}$ -value development prognosticated trend for the mobility of different heavy metals within zone of damage 1 by Lux (1965a).

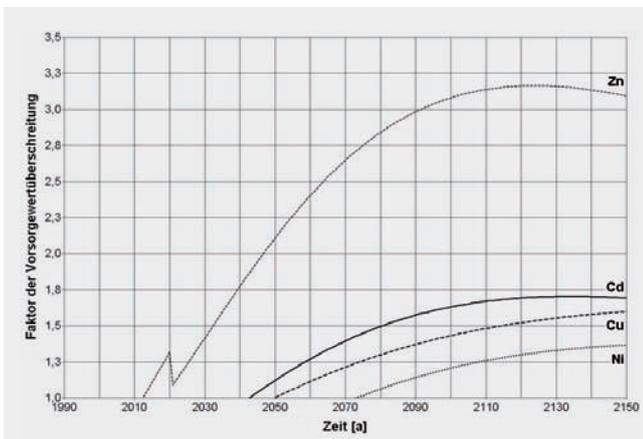


Abb. 7: Prognose zur Überschreitung der Vorsorgewerte nach Pruess (1994) für die mobilen Gehalte verschiedener Schwermetalle am Standort Burgkernitz.

Fig. 7: Prognosis for the exceedance of threshold-values by Pruess (1994) for the mobile contents of different heavy metals at the site Burgkernitz.

## 4. Diskussion

### pH-Werte

Die nachhaltige Beeinflussung der Böden der Dübener Heide durch die Einträge industrieller Flugaschen wurde über die letzten Jahrzehnte umfangreich untersucht (siehe Kap.1). Laut KLOSE et al. (2001) können die Auflagen der beeinflussten Böden als diagnostische Horizonte zum Nachweis der atmosphärischen Einträge dienen, weil hier die indirekten Folgen der Flugascheeinträge, wie die Änderung bodenchemischer Parameter, besonders deutlich sind.

So ist die pH-Wert-Erhöhung der Auflagen in der Dübener Heide ein klares Anzeichen für die noch immer andauernde Beeinflussung der Böden durch die basische Flugasche. Aus den dargestellten Ergebnissen (Abb. 1) ist hierzu sehr deutlich ein Anstieg der pH-Werte hin zum Kraftwerk Zschornowitz zu erkennen, der auf die unterschiedlich starke Aufbausung der Standorte infolge unterschiedlich großer Flugascheeinträge zurückzuführen ist. Forstkalkung als Quelle kann dabei ausgeschlossen werden (ENDERLEIN & STEIN, 1964b; AMARELL, 1997).

Während der pH-Wert an Standorten, die weiter als 20 km vom Hauptemittenten entfernt sind, deutlich abfällt (HARTMANN et al. 2007a) und somit wieder für Wälder durchschnittliche Werte annimmt (BML, 1996), ist besonders an den emittentennahen Standorten der anhaltende Trend der bereits früher beobachtete Wiederversauerung (HERPEL et al. 1995; KONOPATZKY, 1995; KONOPATZKY et al. 1995) noch klar zu erkennen.

Auf Grundlage der erstellten Prognose zur pH-Wert-Entwicklung (Abb. 2) kann unter gleich bleibenden Umweltbedingungen davon ausgegangen werden, dass in der Rauchschaadenszone 1 (LUX, 1965a) noch bis zum Ende dieses Jahrhunderts eine weitere Versauerung der Auflagen stattfinden wird. Erst gegen 2100 werden auch die emittentennahen Standorte den typischen pH-Wert unbeeinflusster Waldböden (BML, 1996) annehmen.

Die ursprüngliche Einteilung der Dübener Heide in die verschiedenen Rauchschaadenszonen durch LUX (1965a) erfolgte anhand des Schädigungsgrades der Vegetation, war aber nach ENDERLEIN & STEIN (1964a) auch auf den Zustand der Oberböden übertragbar. Während sich die Rauchschaadenszonen (LUX, 1965a) in den 70er Jahren in ihren Auflage-pH-Werten noch klar unterschieden, sind heute die Differenzen aber deutlich geringer geworden. Eine Einteilung in mehr als zwei Schadzonen (emittentennah und emittententfern) erscheint kaum noch als sinnvoll.

Diese Ansicht wird auch von bereits an anderer Stelle veröffentlichten Messergebnissen weiterer bodenchemischer Parameter sowie statistischen Analysen gestützt (FRITZ et al. 2007; FRITZ & MAKESCHIN, 2007).

### Nährelemente

Erhöhte Nährelemente sind vor allem bei den emittentennahen Standorten zu finden. Burgkernitz besitzt mit seinen knapp 2400 kg Calcium pro Hektar und knapp 200 kg Magnesium pro Hektar derzeit Nährelementvorräte, die die bun-

desdeutschen Durchschnittswerte um das 10-fache bzw. das 3-fache überschreiten.

Berücksichtigt man neben den Ergebnissen des Freisetzungsversuchs zusätzlich Nährelementverluste aufgrund von Ernteentzug (BLOCK et al. 2008), lässt sich abschätzen, dass die Calcium- und Magnesiumvorräte an diesem Standort erst in 160 bzw. 110 Jahren auf durchschnittliche Werte abgesunken sein werden (Tab.6). (Nährelementeinträge erfolgen hauptsächlich über das Niederschlagswasser und sind deshalb bereits in der potentiellen Säurefracht berücksichtigt.)

Fraglich ist allerdings, inwieweit erhöhte Magnesiumvorräte aber für die Pflanzenernährung nutzbar sind. Da sich im Freisetzungsversuch gezeigt hat, dass sich nur ca. 50–80% des Gesamtvorrates an Magnesium freisetzen lässt, ist davon auszugehen, dass ein großer Teil des Magnesiums relativ fest gebunden und damit nicht pflanzenverfügbar ist. Geht man zum Beispiel für den Standort Burgkernitz davon aus, dass sich nur ein Gesamtvorrat von ca. 100 kg/ha freisetzen lässt (Abb.3) würde sich die Zeit überdurchschnittlich hoher, nutzbarer Magnesiumvorräte auf ca. 80 Jahre verringern.

**Tab. 6: Prognose über den Zeitraum überdurchschnittlich hoher Calcium- und Magnesiumvorräte am Standort Burgkernitz.**

**Table 6: Prognosis for the period superior of stocks of calcium and magnesium at the site Burgkernitz.**

		Ca	Mg
Gesamtvorräte in Burgkernitz	[kg/ha]	2360	198
Hintergrundwerte der BZE	[kg/ha]	211	55
Differenz:	[kg/ha]	2149	143
Ernteentzug für den Bestand			
Kiefer mit Buche*	[kg/(ha·a)]	3,6	0,7
durchschnittliche Freisetzungsrage	[kg/(ha·a)]	10	0,6
Gesamtentzug:	[kg/(ha·a)]	13,6	1,3
<b>Prognostizierter Zeitraum:</b>	<b>[a]</b>	<b>160</b>	<b>110</b>

\* für hohe konventionelle Nutzungsintensität nach BLOCK et al. (2008)

### Schwermetalle

Die Überschreitung der Schwermetallgesamtgehalte (Abb.4) verdeutlicht, dass in Übereinstimmung mit KALBITZ (1996) nur für Cadmium und Zink ein Gradient in Abhängigkeit von der Entfernung zum Hauptemittenten festzustellen ist. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass nur diese beiden Schwermetalle in ausschlaggebenden Mengen mit den Flugaschen eingetragen wurden.

Für eine ökotoxikologische Betrachtung sind aber neben den Schwermetallgesamtgehalten vor allem die mobilen Gehalte von Bedeutung. Diese sind unter anderem abhängig von den Gesamtgehalten und der pH-abhängigen Mobilität (WONG & WONG, 1990; CARLSON & ADRIANO, 1993; ARIESE et al. 2002). So kommt es zum Beispiel auch dazu, dass am besonders flugaschebeeinflussten Standort Burgkernitz alle untersuchten Schwermetallgesamtgehalte die Vorsorgewerte der

BBodSchV überschreiten, aber aufgrund der stark aufgebauten Auflagen und der damit verbundenen geringen Schwermetallmobilität die Prüfwerte der verfügbaren Gehalte derzeit alle noch unterschritten sind. Während aber die Gesamtgehalte der untersuchten Schwermetalle über die Zeit immer weiter absinken (Abb.5) kommt es aufgrund der prognostizierten pH-Wert-Abnahme (Abb.2) besonders bei Zink und Cadmium zur Zunahme der Mobilität (Abb.6).

Für den emittentennahen Standort Burgkernitz, der zur Rauchschadenszone 1 (LUX, 1965a) gehört, wird aufgrund der hohen Schwermetallgesamtgehalte und der noch bevorstehenden starken pH-Wert-Änderung hier ein gesteigertes Gefahrenpotenzial vorliegen. Mit einer Überschreitung der mobilen Vorsorgewerte nach PRÜESS (1994) ist für Zink an diesem Standort bereits ab ca. 2010 und für die restlichen Schwermetalle nach 2040 zu rechnen. Die Vorsorgewerte stellen dabei aber nur die Obergrenze des Hintergrundbereiches dar und enthalten keine Informationen über ein Schädigungspotenzial.

Eine Überschreitung der Prüfwerte für das Pflanzenwachstum nach PRÜESS (1994) ist für Zink ab etwa 2050 und für Nickel ab 2060 zu erwarten. Allerdings besitzt Zink, welches die höhere Prüfwertüberschreitung aufweist, nur ein geringes phytotoxisches Potenzial und Nickel, welches zwar als stärker toxisch gegenüber Pflanzen zu bewerten ist, überschreitet den Prüfwert nur knapp. Trotzdem ist es für die Planung zukünftiger waldbaulicher Maßnahmen aber auf jeden Fall empfehlenswert, die Verträglichkeit der Baumarten gegenüber diesen Schwermetallen mit zu berücksichtigen, um die extrem hohen Nährstoffpotenziale an diesem Standort optimal nutzen zu können.

### Freisetzungsversuche

Nach VAN GRINSVEN & VAN RIEMSDIJK (1992) sind die Ergebnisse von Batchversuchen mit aufgeschlämmten Proben (kein Rühren oder Schütteln) am ehesten mit denen von Säulenversuchen vergleichbar, weil die Bodenpartikel mechanisch nicht beansprucht werden. Von Säulenversuchen selbst wurde aufgrund des Einflusses von Randeffekten und des deutlich höheren Aufwands Abstand genommen. Ein Nachteil des durchgeführten Freisetzungsversuches gegenüber Säulenversuchen besteht allerdings in der Nicht-Berücksichtigung präferentieller Fließbahnen, die vor allem beim Vorliegen trockener Böden entscheidend das Auswaschen von Stoffen beeinflussen (HARTMANN, 2008).

Die mit Hilfe der Freisetzungsversuche abgeleiteten Prognosen stellen eine Untergrenze der tatsächlich für den Elementaustrag benötigten Zeit dar. Tatsächlich werden erhöhte Stoffvorräte/-gehalte über noch größere Zeiträume vorliegen, da an den Standorten unvollständige Benetzung sowie Verlagerung von Stoffen in tiefere Bodenschichten (anstelle vollständiger Auswaschung) auftreten. Außerdem wurde im Versuch angenommen, dass die gesamte Säurefracht des Niederschlags ausschließlich in den Auflagen und nicht in tieferen Schichten wirkt.

Der Freisetzungsversuch basiert auf der Annahme einer konstanten Säurefracht über den gesamten simulierten Zeit-

raum. Es kann aber nach aktuellem Kenntnisstand nicht davon ausgegangen werden, dass über einen Zeitraum von 100 Jahren gleichbleibende Umweltbedingungen vorliegen werden. Nach GOLDBERG et al. (2007) ist in der Dübener Heide bis 2100 ein Temperaturanstieg von 2 bis 3°C und eine Niederschlagsabnahme um 100 mm zu erwarten. Diese sich ändernden Standorteigenschaften werden das derzeitige Ökosystem beeinflussen, was zu Veränderungen im Bestandsbild führen wird.

Der Einfluss auf das vorgestellte Modell zur Entwicklung bodenchemischer Parameter wird dagegen gering bis vernachlässigbar sein, weil im Modell die Bilanz aus Stoffein- und -austragen für die Veränderung von Elementgehalten und pH-Werten entscheidend ist. Bei gleich bleibenden Emissionen führt eine Verringerung der Niederschlagsmenge jedoch lediglich zu einer Erhöhung der Stoffkonzentration im Niederschlag oder zur Erhöhung trockenerer Einträge, nicht aber zu einer signifikanten Veränderung der Stofffracht. Deshalb kann für den Prognosezeitraum von einer konstanten Säurefracht im Niederschlag ausgegangen werden. Eine Verringerung der Niederschlagsmenge führt aber zu insgesamt trockeneren Böden und damit zu einem noch stärkeren Einfluss von Benetzung und präferentieller Fließbahnen (HARTMANN, 2008), die in diesem Modell unberücksichtigt bleiben.

### Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung durch das BMBF über den Projektträger Jülich im Rahmen des Projektes Enforchange (ENVironments and FORests under CHANGing conditions, Förderkennzeichen: 0330634K) vielen Dank.

### Literatur

- BBODSCHV (1999): Bundes- Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999, BGBl. I, S. 502.
- AG-BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, Hannover.
- AMARELL, U. (1997): Umweltbelastungen in der Region Leipzig-Halle-Bitterfeld und deren Bewertung: Anthropogene Vegetationsveränderungen in den Kiefernforsten der Dübener Heide. In: FELDMANN, R.; HENLE, K.; AUGÉ, H.; FLACHOWSKY, J.; KLOTZ, S. & KRÖNERT, R.: Regeneration und nachhaltige Landnutzung – Konzepte für belastete Regionen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- ARIESE, F.; SWART, K.; MORABITO, R.; BRUNORI, C.; BALZAMO, S.; SLOBODNIK, J.; KORENKOVÁ, E.; JANOSS, P.; WILDNEROVA, M.; HLAVAY, J.; POLYÁK, K.; FODOR, P.; MUNTAU, H. (2002): Leaching studies of inorganic and organic compounds from fly ash. *Int J Environ Anal Chem* 82 (11–12): 751–770.
- BARONIUS, G. (1992): Zur Ausbildung und Dynamik von Ernährungs- und Chlorosezuständen der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) im Immissionsgebiet Dübener Heide. Unveröffentl. Dissertation, Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen, Technische Universität Dresden: 183 S.
- BLOCK, J.; SCHUCK, J.; SEIFERT, T. (2008): Einfluss unterschiedlicher Nutzungsintensitäten auf den Nährstoffhaushalt von Waldökosystemen auf Bundsandstein im Pfälzerwald. *Forst Holz* 63 (7/8): 66–70.
- BML (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996; Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987–1993 (BZE). Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten, Bonn.
- BUND-LÄNDER AG BZE II (2006): Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Hrsg.: Bundesministerium für Verbraucherschutz Ernährung und Landwirtschaft (BMELV).
- CARLSON, C. L.; ADRIANO, D. C. (1993): Environmental impacts of coal combustion residues. *J. Environ. Qual.* 22 (2): 227–247.
- EISENHAEUER, D.-R.; SONNEMANN, S. (2008): Waldentwicklungstypen – Grundlage für die Entwicklung regionaler Waldbaurichtlinien in Sachsen. *Forst Holz* 63 (10): 12–17.
- ENDERLEIN, H.; STEIN, G. (1964a): Der Säurezustand der Humusaufgabe in den rauchgeschädigten Kiefernbeständen des Staatlichen Forstwirtschaftsbetriebes Dübener Heide. *Arch. Forstwes.* 13: 1181–1191.
- ENDERLEIN, H.; STEIN, G. (1964b): Schädigung der Kiefernwälder durch industrielle Exhalationen und sich daraus ergebene Folgerungen für den Forstschutz und den Waldbau. *Sozial. Forstwirtsch.* 14: 21–23.
- ENDERS, K. (2007): Die Entwicklung der Verunreinigung der Luft im Raum Bitterfeld/Wolfen. *Arch. Nat.schutz Land.sch.forsch.* 46 (3): 25–30.
- FRITZ, H.; ABIY, M.; FÜRST, C.; MAKESCHIN, F. (2007): Auswirkungen von Flugasche-Emissionen auf den Stoffhaushalt von Waldböden. *Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges.* 110(1): 189–190.
- FRITZ, H.; ABIY, M.; MAKESCHIN, F. (2008): Einfluss von Indus-

- triebmissionen auf bodenchemische Kennwerte in Waldböden der Dübener Heide. *Forst Holz* 63(7/8): 18–20.
- FRITZ, H.; MAKESCHIN, F. (2007): Chemische Eigenschaften flugaschebeeinflusster Böden der Dübener Heide. *Arch. Nat.schutz Landsch.forsch.* 46 (3): 105–120.
- FÜRST, C.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. (2007): Development of forest ecosystems after heavy deposition loads considering Dübener Heide as example-challenges for a process-oriented forest management planning. *For. Ecol. Manage.* 248(1–2): 6–16.
- GOLDBERG, V.; SURKE, M.; BERNHOFER, C. (2007): Regionalisierte Klimadaten für forstliche Anwendungen am Beispiel der Lausitz und der Dübener Heide. *Forst Holz* 62 (7): 24–27.
- GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK (2005): Handbuch Forstliche Analytik (HFA) – Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Hrsg.: Bundesministerium für Verbraucherschutz Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), Bonn.
- HARTMANN, K.-J.; ABIY, M.; FÜRST, C. (2007a): Bewertung und Planung – Bodenkundliche Flächeninformationen für die nördliche Dübener Heide. *Arch. Nat.schutz Landsch.forsch.* 46 (3): 65–78.
- HARTMANN, P. (2008): Bodenphysikalische Eigenschaften, Benetzbarkeiten und Wasserhaushalt von Waldböden unter Flugascheeinfluss. Unveröffentl. Dissertation, Fakultät der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel: 143 S.
- HARTMANN, P.; FLEIGE, H.; HORN, R. (2007b): Flugascheeinfluß auf Böden in der Dübener Heide – Physikalische Eigenschaften, Hydrophobie und Wasserhaushalt. *Arch. Nat.schutz Landsch.forsch.* 46 (3): 79–103.
- HEINSDORF, D.; EINERT, P.; FENNERT, A.; SCHNEIDER, R. (1992): Charakterisierung des atmosphären Fremdstoffeintrages in Kiefernökosystemen des norddeutschen Tieflandes. *Beitr. Forstwirtschaft. Landsch.ökol.* 26 (1/2): 24–29.
- HERPEL, J.; HEINZE, M.; FIEDLER, H. J. (1995): Veränderung von Boden und Vegetation in Kieferbeständen der Dübener Heide zwischen 1966 und 1990. *Arch. Nat.schutz Landsch.forsch.* 34: 17–41.
- KALBITZ, K. (1996): Untersuchungen zur Freisetzung der gelösten organischen Substanz des Bodens (DOM) und zum Einfluß der DOM auf die Mobilisierung ausgewählter Schadstoffe in Abhängigkeit von Boden- und Standorteigenschaften. *UFZ-Bericht* 23: 139 S.
- KALBITZ, K.; KNAPPE, S.; TANNEBERG, H.; KONOPATZKY, A. (1997): Umweltbelastungen in der Region Leipzig-Halle-Bitterfeld und deren Bewertung: Belastungs- und Regenerationspotenzial der Böden. In: FELDMANN, R.; HENLE, K.; AUGE, H.; FLACHOWSKY, J.; KLOTZ, S. & KRÖNERT, R.: *Regeneration und nachhaltige Landnutzung – Konzepte für belastete Regionen.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- KLOSE, S.; KOCH, J.; BÄUCKER, E.; MAKESCHIN, F. (2001): Indicative properties of fly-ash affected forest soils in North-eastern Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 561–568.
- KLOSE, S.; MAKESCHIN, F. (2003): Effects of past fly ash deposition on the forest floor humus chemistry of pine stands in Northeastern Germany. *For. Ecol. Manage.* 183 (1–3): 113–126.
- KLOSE, S.; MAKESCHIN, F. (2004): Chemical properties of forest soils along a fly-ash deposition gradient in eastern Germany. *Eur. J. For. Res.* 123 (1): 3–11.
- KLOSE, S.; WERNECKE, K. D.; MAKESCHIN, F. (2003): Microbial biomass and enzyme activities in coniferous forest soils as affected by lignite-derived deposition. *Biol. Fertil. Soils* 38 (1): 32–44.
- KOCH, J.; KLOSE, S.; MAKESCHIN, F. (2001): Bioelementverteilung und Humusmorphologie in flugaschebelasteten Oberböden der Dübener Heide. *Ber. Freibg. Forstl. Forsch.* 33: 183–192.
- KOCH, J.; KLOSE, S.; MAKESCHIN, F. (2002): Stratigraphic and Spatial Differentiation of Chemical Properties in Long-term Fly Ash Influenced Forest Soils in the Dübener Heide Region, NEGermany. *Forstwiss. Cent.bl.* 121 (4): 157–170.
- KÖHLER, S.; LIEBER, H. (1968): Zur Kartierung von Schadzonen im Rauchschadensgebiet der Dübener Heide mit Hilfe der Bodenvegetation. Unveröffentl. Ingenieurarbeit, VEB Forstprojektierung Potsdam.
- KONOPATZKY, A. (1995): Untersuchungen zum langjährigen Oberbodenzustandswandel in den Waldökosystemen der Dübener Heide. In: HÜTTL, R. F.; BELLMANN, K. & SEILER, W.: *Atmosphärensanierung und Waldökosysteme/SANA: Wissenschaftliches Begleitprogramm zur Sanierung der Atmosphäre über den neuen Bundesländern – Wirkung auf Kiefernbestände.* Umweltwissenschaften, Bd. 4, Eberhard Blottner Verlag, Taunusstein.
- KONOPATZKY, A.; KOPP, D.; HEYMANN, G.; KÖHLER, S.; KÜMMEL, G.; FREYER, C. (1995): Bodenzustandswandel forstlich genutzter Standorte des Immissionsgebietes Dübener Heide und seine Erfassung über die forstliche Boden- und Standortskartierung. *Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges.* 77: 95–124.
- LUX, H. (1964): Beiträge zur Kenntnis des Einflusses der Industrieexhalation auf die Bodenvegetation in Kiefernforsten (Dübener Heide). *Arch. Forstwes.* 13(11): 1215–1223.
- LUX, H. (1965a): Die großräumige Abgrenzung von Rauchschadenszonen im Einflußbereich des Industriegebietes um Bitterfeld. *Wiss. Z. Tech. Univ. Dresd.* 14 (2): 433–442.
- LUX, H. (1965b): „Rauchschaden-Großraumdiagnose“ – ein Verfahren zur großflächigen Erfassung und Abgrenzung von Rauchschäden in Kieferngebieten. Unveröffentl. Dissertation, Fakultät für Forstwirtschaft, Technische Universität Dresden:
- LUX, H. (1974): Zur Beeinflussung des Oberbodens von Kiefernbeständen durch basische Industriestäube. *Wiss. Z. Tech. Univ. Dresd.* 23 (3/4): 915–920.
- LUX, H.; STEIN, G. (1977): Die forstlichen Immissions-schadgebiete im Lee des Ballungsraumes Halle und Leipzig. *Hercynia* 14: 413–421.
- NEBE, W.; ZIMMERMANN, R. (1996): Führer zur standortlichen Exkursion des Institutes für Bodenkunde und Standortlehre in die Reviere Jagdhaus, Roitzsch und Spitze im Sächsischen Forstamt Falkenberg. Unveröffentl. Exkursionsführer.

- NEUMEISTER, H.; FRANKE, C.; NAGEL, C.; PEKLO, G.; ZIERRATH, G.; PEKLO, G. (1991): Immissionsbedingte Stoffeinträge aus der Luft als geomorphologischer Faktor – 100 Jahre atmosphärische Deposition im Raum Bitterfeld (Sachsen-Anhalt). *Geoökodynamik* 12: 1–40.
- NEUMEISTER, H.; PEKLO, P.; NIEHUS, B. (1997): Umweltbelastungen in der Region Leipzig-Halle-Bitterfeld und deren Bewertung: Immissionsbedingte Stoffeinträge. In: FELDMANN, R.; HENLE, K.; AUGÉ, H.; FLACHOWSKY, J.; KLOTZ, S. & KRÖNERT, R.: *Regeneration und nachhaltige Landnutzung – Konzepte für belastete Regionen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- NEUMEISTER, H.; RUSKE, R. (1995): Immissionsgeprägte Böden der Industrieregion Bitterfeld. *Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges.* 77: 95–124.
- NIEHUS, B.; SCHULZ, H. (1997): Umweltbelastungen in der Region Leipzig-Halle-Bitterfeld und deren Bewertung: Eintrag von Fremd- und Nährstoffen in Vergangenheit und Gegenwart. In: FELDMANN, R.; HENLE, K.; AUGÉ, H.; FLACHOWSKY, J.; KLOTZ, S. & KRÖNERT, R.: *Regeneration und nachhaltige Landnutzung – Konzepte für belastete Regionen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- POPP, P.; FEIST, B.; NIEHUS, B.; PEKLO, G.; THUSS, U. (1997): Vorkommen und Verteilung von toxisch relevanten organischen Komponenten und Schwermetallen in ausgewählten Untersuchungsgebieten. *UFZ-Bericht* 25
- PRÜESS, A. (1994): Einstufung mobiler Spurenelemente in Böden. In: ROSENKRANZ, D.; BACHMANN, G.; KÖNIG, W. & EINSELE, G.: *Bodenschutz, Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*, 2. Band. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- REHFUESS, K. E. (1990): *Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung*. Pareys Studentexte. 2. Aufl., Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- SCHULZ, H.; HUHN, G. (1997): Umweltbelastungen in der Region Leipzig-Halle-Bitterfeld und deren Bewertung: Wirkung der Luftbelastung auf die Waldkiefer als dominante Baumart. In: FELDMANN, R.; HENLE, K.; AUGÉ, H.; FLACHOWSKY, J.; KLOTZ, S. & KRÖNERT, R.: *Regeneration und nachhaltige Landnutzung – Konzepte für belastete Regionen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- VAN GRINSVEN, J. J. M.; VAN RIEMSDIJK, W. H. (1992): Evaluation of batch and column techniques to measure weathering rates in soils. *Geoderma* 52 (1–2): 41–57.
- WONG, J. W. C.; WONG, M. H. (1990): Effects of fly ash on yields and elemental composition of two vegetables, *Brassica parachinensis* and *B. chinensis*. *Agric. Ecosyst. Environ.* 30 (3–4): 251–264.

## Autorenanschriften

Heiko Fritz  
 Technische Universität Dresden  
 Institut für Bodenkunde und Standortslehre  
 Pienner Straße 19, D-01737 Tharandt  
 Telefon +49 3520 338-31381  
 Email heiko\_fritz@gmx.de