Mitt. POLLICHIA	74	115 – 141	2 Abb.	11 Tab.	Bad Dürkheim/Pfalz 1987
					ISSN 0341 – 9665

Lothar HANKE

Schwermetalluntersuchungen an repräsentativen Bodenprofilen im Lennebergwald bei Mainz

Kurzfassung

HANKE, L. (1987): Schwermetalluntersuchungen an repräsentativen Bodenprofilen im Lennebergwald bei Mainz. – Mitt. POLLICHIA, 74: 115 – 141, Bad Dürkheim/Pfalz.

Der Lennebergwald grenzt direkt an das Belastungsgebiet Mainz – Budenheim, in dem die Grenzwerte von Staubniederschlag überschritten werden. Daher wurden die Schwermetalle Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn und Co in vier charakteristischen Bodenprofilen untersucht. Ein Vergleich der ermittelten ökologischen Gesamtgehalte mit anderen Gebieten in der Bundesrepublik Deutschland zeigt, daß der Lennebergwald offenbar nicht so stark belastet ist. Statistisch wurde ermittelt, daß die Bindungsstärke der Böden im Lennebergwald an der organischen Substanz in der Reihenfolge Cr < Co < Ni < Cu < Cd < Zn < Pb, an den Tonmineralen in der Reihenfolge Zn < Pb < Cd < Cu < Co < Cr < Ni sowie an Fe_d in der Reihenfolge Zn < Pb < Cd < Cu < Cr < Co < Ni zunimmt.

Abstract

HANKE, L. (1987): Schwermetalluntersuchungen an repräsentativen Bodenprofilen im Lennebergwald bei Mainz [Studies on heavy metals in representative soil profiles in the Lennebergwald near Mainz (Rheinland-Pfalz, West Germany)]. – Mitt. POLLICHIA, 74: 115 – 141, Bad Dürkheim/Pfalz.

The Lennebergwald directly adjoins the area of Mainz and Budenheim, where limits of dust-precipitation are being exceeded. Therefore, the heavy metals Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Co were studied in 4 soil profiles. Comparing the total ecological contents of soils of other areas of the Federal Republic of Germany, the soils of the Lennebergwald are not as highly contaminated. It has been statistically ascertained that in soils of the Lennebergwald the absorption increases:

a) on organic matter in succession Cr < Co < Ni < Cu < Cd < Zn < Pb,
b) on clay-minerals in succession Zn < Pb < Cd < Cu < Co < Cr < Ni,
c) on Fe_d (Fe-oxide) in succession Zn < Pb < Cd < Cu < Cr < Co < Ni.

Résumé

HANKE, L. (1987): Schwermetalluntersuchungen an repräsentativen Bodenprofilen im Lennebergwald bei Mainz [Recherches de métaux lourds sur quelques profils de sol représentatifs dans le Lennebergwald près de Mayence (Rhénanie-Palatinat, R.F.A.)]. – Mitt. POLLICHIA, 74: 115 – 141, Bad Dürkheim/Pfalz.

Le Lennebergwald touche directement à la région d'industries lourdes de Mayence et de Budenheim où les limites de pollution par la poussière sont dépassées. Par conséquent, les métaux lourds Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn et Co furent examinés dans les 4 profils caractéristiques du sol. Une comparaison des constats écologiques des contenus evec d'autres régions de la R.F.A. montre que le Lennebergwald n'est manifestement pas trop chargé. On a constaté statistiquement que l'importance en liaison des sols dans le Lennebergwald s'accroit

a) en matière organique dans la suite Cr < Co < Ni < Cu < Cd < Zn < Pb,
b) en minéraux argileux dans la suite Zn < Pb < Cd < Cu < Co < Cr < Ni,
c) de même qu'en Fe_d dans la suite Zn < Pb < Cd < Cu < Cr < Co < Ni.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 116

2. Lage des Untersuchungsgebietes 116

3. Quartärgeologie, Böden 117

4. Vorbemerkungen 125

5. Untersuchungsmethoden 125

6. Ergebnisse 126
   6.1 Vergleich mit Literaturdaten aus dem Lennebergwald 126
   6.2 Vergleich mit Literaturdaten aus anderen Gebieten der Bundesrepublik Deutschland 132

7. Bindung der Schwermetalle (ökologischer Gesamtgehalt) an ausgewählten Stoffgruppen 133

8. Tiefenfunktion der Schwermetalle in den Bodenprofilen und deren pflanzenverfügbarer Anteil 137

9. Danksagung 140

10. Schriftenverzeichnis 140

1. Einleitung

Der Lennebergwald scheint im Belastungsgroßraum Rhein-Main hohen Immissionen ausgesetzt zu sein. Das Waldgebiet grenzt direkt an das lokale Belastungsgebiet Mainz – Budenheim, in dem die Grenzwerte von Staubniederschlag und Schwefeldioxid überschritten werden (MINISTERIUM für SOZIALES, GESUNDHEIT und UMWELT des LANDES RHEINLAND-PFALZ 1982 : 1). Daher wurden in einigen repräsentativen Bodenprofilen die Schwermetallgehalte untersucht.

2. Lage des Untersuchungsgebietes

Der ca. 700 ha große Lennebergwald bei Mainz ist ein Teilgebiet des Flugsandgebietes zwischen Mainz und Gau-Algesheim. Das NE bis NNW exponierte Waldgebiet steigt von der Ingelheimer Rheinebene in 85 m ü. NN bis an die obere Kante des Ostrheinhessischen Plateaus in 190 m ü. NN an.

Der Untersuchungsraum ist in den südlichen (rheinland-pfälzischen) Teilen der beiden topographischen Karten 1:25.000 Bl. 5914 Eltville und Bl. 5915 Wiesbaden abgebildet.

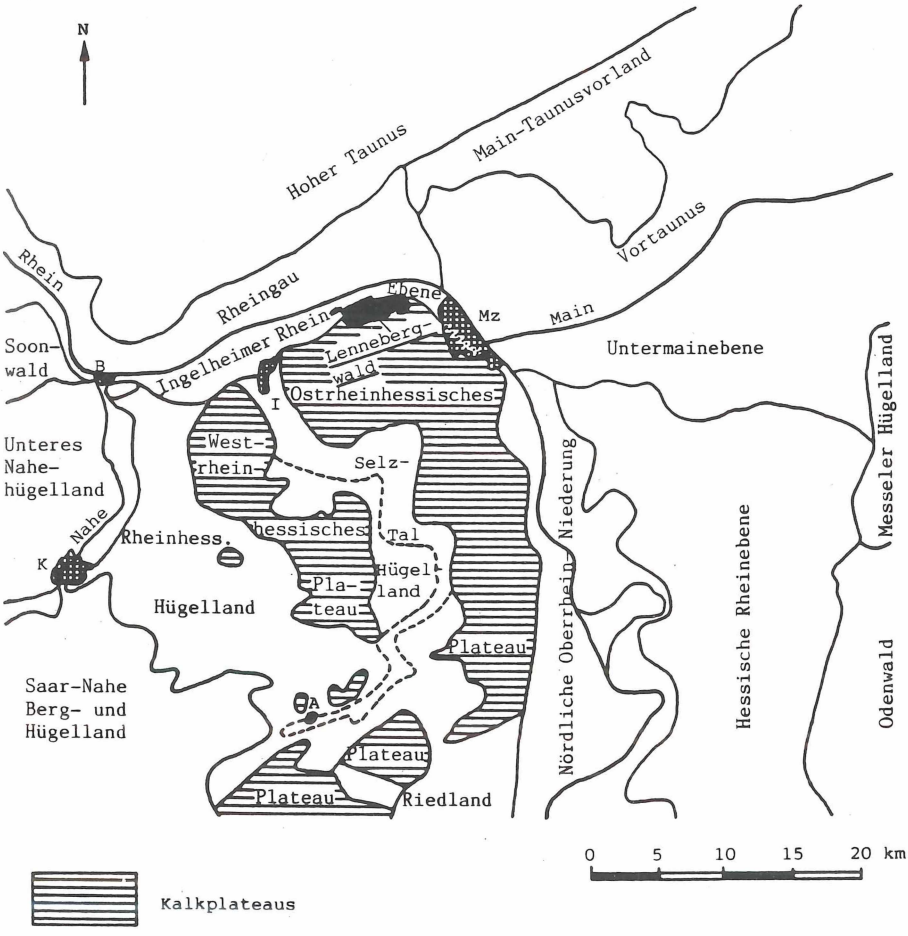

Abb. 1: Naturräumliche Gliederung (Entwurf nach BRÜNING 1975:11; KANDLER 1977:Kt. 1; MEYEN & SCHMITHÜSEN 1959–1961:349–350; UHLIG 1964:Kt. 1).
A = Alzey, B = Bingen, I = Ingelheim, K = Bad Kreuznach, Mz = Mainz

3. Quartärgeologie, Böden

Über dem größten Teil des Gebietes erstrecken sich mehrere Meter mächtige holozäne Flugsanddecken und -dünen (HANKE 1985; HANKE & MAQSUD 1985). An einigen Stellen treten würmzeitliche Solifluktionsschutte (Deck- und Basisschutt nach Semmel 1968) sowie eine würmzeitliche Solimixtionszone[1*)] (nach HANKE 1985:25–26) an die Oberfläche. Ausgangsgesteine dieser Schutte bilden die miozänen Kalke und Mergel der *Corbicula*- und Hydrobien-Schichten. Weiterhin kommen pleistozäne Sande und Kiese der Terrassen t5, t3, t2 (nach KANDLER 1970) vor, die von einem jungtundrenzeitlichen Decksediment oder von holozänem Flugsand überdeckt sind (HANKE 1985:20–28, 38–46). In diesen quartären Deckschichten sind verschiedene Bodentypen entwickelt.

1* Entstanden durch kryoturbate Verwürgung in situ.

Häufiger Substratwechsel, stark reliefiertes Gelände, eine erhebliche anthropogene Landnutzung über längere Zeiträume und verschiedene Klimaeinflüsse seit dem Spätglazial haben ein stark differenziertes Mosaik von Bodenformen hervorgebracht (HANKE 1985). Es wurden 52 Bodentypen aufgenommen, die von einer Pararendzina bis zu einem Niedermoor reichen (HANKE 1985:327–368, Kt. 10). Den größten Flächenanteil nehmen Pararendzinen aus holozänen Flugsanden; Braunerden, gebänderte Braunerden, Parabraunerden-Braunerden, Braunerden-Parabraunerden und Parabraunerden aus holozänen Flugsanden oder aus jungtundrenzeitlichem Decksediment bzw. aus holozänem Flugsand über pleistozänen Terrassenkiesen und -sanden sowie Parabraunerden mit terra-fusca-artigem Bt-Horizont aus jungtundrenzeitlichem Deckschutt, örtlich über jungtundrenzeitlicher Solimixtionszone, über würmzeitlichem Basisschutt aus tertiären Kalken und Mergeln ein.

Die Bestimmung der Schwermetalle wurde an vier ausgewählten charakteristischen Bodenprofilen vorgenommen (s. Profilbeschreibungen), die sich fern von Straßen oder Autobahnen befinden.

1. Profil: Pararendzina aus jüngerem über älterem holozänen Flugsand.
2. Profil: Parabraunerde-Braunerde mit gebändertem unteren Unterboden aus holozänem Flugsand über würmzeitlichem Basisschutt aus Terrassensanden und -kiesen über würmzeitlichem Flugsand.
3. Profil: Parabraunerde, örtlich Podsol-Parabraunerde, mit Bänderung und Fleckung im unteren Unterboden aus subatlantischem über spätsubborealem über präspätsubborealem (jedoch postjungtundrenzeitlichem) Flugsand über pleistozänem Terrassensand und -kies der Terrasse t3 (nach KANDLER 1970) (HANKE 1985:45–46, 216–218; HANKE & MAQSUD 1985:214–216).
4. Profil: Parabraunerde mit terra-fusca-artigem IIIBt-Horizont aus jungtundrenzeitlichem Deckschutt über jungtundrenzeitlicher Solimixtionszone über würmzeitlichem Basisschutt aus untermiozänen Kalken und Mergeln (Hydrobien-Schichten).

Profilbeschreibung: Pararendzina (Profil 1)

1. Topographische Lage	Lennebergwald, Gemarkung Budenheim, Waldabt. 202 a, Bechborn, am Dreigemarksberg, hohe Düne an der Försterschneise, 280 m im NE von Ecke Bechbornschneise/Försterschneise, Bl. 5915 Wiesbaden, R 34 42 230, H 55 42 620
2. Relief	Übergang von konvexem Oberhang einer Düne zur Dünenkuppe, schwach geneigt, NW-exponiert, 136 m ü. NN
3. Nutzung	123jährige Kiefern, III. Bonität
4. Ausgangsgestein	Jüngerer über älterem holozänen Flugsand
5. Bodentyp	Pararendzina
6. Entwicklungstiefe	20–25 cm
7. Gründigkeit	> 760 cm
8. Durchwurzelung	stark 0–15 cm, stark bis mittel 15–20 (25) cm, mittel 20 (25)–30 cm, schwach 30–55 cm, sehr schwach 55–95 (105) cm, mittel 95 (105)–115 (125) cm, sehr schwach 115 (125)–200 cm
9. Humusform	F-Mull
10. Trophie	eu- bis mesotroph
11. Geländewasserhaushalt	trocken
12. Staunässe	keine
13. Mittlerer Grundwasserstand und -schwankung	> 760 cm u. GOF

L	0,5 cm	Kiefernnadelstreu, wenig Laubstreu
Of	0,5 cm	teilzersetzte Kiefernnadel- und Blattstreu, dunkelgrau-schwarz
Ah	0– 5 cm	mS; stark dunkelgrau; schwarz (2,5Y 3/0; 2/0); h; c··; krümelig; stark durchwurzelt; wellige, örtlich schwach zapfenartige Begrenzung
CvAh	–15 cm	mS; dunkelgraubraun; sehr stark grau bis schwarz (2,5Y 3/0; 2/0); h'; c··; einzelkörnig bis schwach kohärent; stark durchwurzelt; undeutliche Begrenzung
AhCv	–20 cm (25)	mS; drunkelgrau; sehr stark dunkelgrau (2,5Y 4/0; 3/0); h"; in Wurzelnähe h'; c·; einzelkörnig; stark bis mittel durchwurzelt; deutliche, etwas wellige Begrenzung
Cv	–95 cm	mS; helles gelb; olivbraun (2,5Y 7/4; 4/4); in Wurzelnähe h"–h'; c···; einzelkörnig; 3 Mauslöcher; mittel (20–30 cm), schwach (30–55 cm), sehr schwach (55–95 cm) durchwurzelt; deutliche, wellige Begrenzung
IIfAhCv	–115 cm (125)	mS; hellgraubraun; dunkelgraubraun (2,5Y 6/2; 3,5/2); h"; c···; einzelkörnig; mittel durchwurzelt; deutliche, wellige Begrenzung
IICv	–200 cm +	mS; helles gelb; olivbraun (2,5Y 7/4; 4/4); in Wurzelnähe h"–h'; c···; einzelkörnig; 1 Mausloch; sehr schwach durchwurzelt; eine ca. 4 cm starke Kiefernwurzel reicht bis in Tiefe >200 cm u. GOF; Grubensohle.

Profilbeschreibung: Parabraunerde-Braunerde mit gebändertem unteren Unterboden (Profil 2)

1. Topographische Lage	Lennebergwald, Gemarkung Budenheim, Waldabt. 2, Aliment, Nähe namenloser Weg, der 130 m von der Bahnlinie entfernt parallel dazu verläuft, Bl. 5914 Eltville, R 34 39 320, H 55 42 310
2. Relief	Mittelhang eines in die untere Mittelterrasse (Talwegterrasse) eingeschnittenen und mit Flugsand verfüllten Tälchens, schwach geneigt, SW-exponiert, 96,0 m ü. NN
3. Nutzung	25 Jahre alte Kieferndickung ohne Bodenvegetation
4. Ausgangsgestein	Holozäner Flugsand über würmzeitlichem Basisschutt aus Terrassensanden und -kiesen über würmzeitlichem Flugsand
5. Bodentyp	Parabraunerde-Braunerde mit gebändertem unteren Unterboden
6. Entwicklungstiefe	100 cm, in Taschen bis 200 cm
7. Gründigkeit	> 700 cm
8. Durchwurzelung	sehr stark 0–10 cm, stark 10–35 cm, mittel 35–55 cm, schwach 55–100/200 cm (in Taschen), sehr schwach, stellenweise nicht durchwurzelt 100–200 cm
9. Humusform	F-Mull
10. Trophie	mesotroph
11. Geländewasserhaushalt	mäßig trocken
12. Staunässe	keine
13. Mittlerer Grundwasserstand und -schwankung	460 cm u. GOF, 420–500 cm u. GOF

L	1 –2 cm	Kiefernnadelstreu
Of	0,5–1 cm	teilzersetzte Kiefernnadelstreu; braunschwarz
Ah	0– 8 cm	fsmS; sehr dunkelgrau; schwarz (10YR 3,5/1; 2/1); h'; einzelkörnig; 1–3 Regenwurmgänge/dm²; sehr stark durchwurzelt; deutliche, wellige, örtlich zapfenartige Begrenzung
Bv	– 55 cm	fsmS; schwach gelblichbraun; stark gelblichbraun (10YR 6/4; 4/4); h'', in Wurzelnähe h'; einzelkörnig; 1–2 Regenwurmgänge/dm² im oberen Bereich; stark (8–35 cm) bis mittel (35–55 cm) durchwurzelt; deutliche, schwach wellige Begrenzung
$IIBlb_1$	– 65 cm	fsmS; fg-mg, stellenweise fg'–mg', aus roten Sandsteinen, Quarzen, Quarziten und Lyditen der Terrasse t3 (nach KANDLER 1970); hellbraun; braun (7,5YR 6,5/4; 5/4); h'', in Wurzelnähe h'; einzelkörnig; schwach durchwurzelt; undeutliche Begrenzung (anhand des Steingehalts) Bänder: 0,2–0,3 cm stark; t'fsmS; g; braun; dunkelbraun (7,5YR 5/4; 4/4); einzelkörnig bis schwach kohärent; 4 Bänder im Abstand von ca. 2–4 cm; feinwellig bis girlandenförmig aufeinanderliegend, stellenweise netzartig verbunden
$IIBlb_2$	– 80 cm	fsmS; fg'–mg', stellenweise fg''–mg'', aus roten Sandsteinen, Quarzen, Quarziten und Lyditen der Terrasse t3; hellbraun; braun (7,5 YR 7/4; 5/4); h''; einzelkörnig; schwach durchwurzelt; deutliche, wellige Begrenzung Bänder: 0,2–0,5 cm stark; t'fsmS; g; rötlichgelb; dunkelbraun (7,5 YR 6,5/6; 4/4); einzelkörnig bis schwach kohärent; 2 deutliche, 0,4–0,5 cm starke, hervortretende Bänder im Abstand von 7–10 cm; feinwellig bis girlandenförmig aufeinanderliegend; davon 0,2–0,3 cm starke Bänder abzweigend; feinwellig bis girlandenförmig, stellenweise netzartig verbunden, oft diffus unterbrochen
IIIBtb	– 90 cm (100) örtl. –200 cm	mS; örtlich fg'' aus Quarzen; hellbraun; dunkelbraun (7,5YR 5,5/4; 4/4); einzelkörnig; schwach durchwurzelt; deutliche Begrenzung Bänder: t'mS; rötlichbraun; rotbraun (5 YR 5/4; 3/3) einzelkörnig bis schwach kohärent; 3 deutliche 1,0–1,5 cm starke, hervortretende Bänder im Abstand von 2–6 cm, girlandenförmig aufeinanderliegend; dazwischen mehrere diffuse und häufig unterbrochene, 0,2–0,4 cm starke Bänder, feinwellig bis girlandenförmig, stellenweise netzartig verbunden
IIIBtb	– 90 cm (100) örtl. –200 cm	Im Abstand von 50 bis 100 cm Ausbildung von Zapfen und Taschen (Durchmesser 10–20 cm) bis 200 cm u. GOF; Fortsetzung des Horizontes; im oberen Teil noch Bänder, im unteren Teil gehen immer dichter aufeinanderliegende Bänder in ein fast homogenes Material über; t'mS; in Randzonen der Zapfen und Taschen starker Wechsel im Tongehalt (mS-t'mS)

IIICc/ IIICkc	–210 cm	mS; hellgrau; graubraun (10YR 7/2; 5/2); Einlagerung von gsmS in 118–120 cm und 126–128 cm u. GOF; hellgrau; grau (10YR 7/1; 5,5/1); c··· bis c̄; stellenweise schwache Osteokollenbildung (110–130 cm u. GOF); einzelkörnig, stellenweise verkittet (Osteokollen); Grubensohle.

Profilbeschreibung: Parabraunerde, örtlich Podsol-Parabraunerde, mit gebändertem und fleckigem unteren Unterboden (Profil 3)

1. Topographische Lage	Lennebergwald, Gemarkung Heidesheim, Waldabt. 4, 100 m südwestlich Ecke Grenzweg/Heiligenweg, Bl. 5914 Eltville, R 34 39 210, H 55 41 890
2. Relief	nicht geneigt, 98 m ü. NN
3. Nutzung	129jährige Kiefern, III. bis IV. Bonität
4. Ausgangsgestein	Subatlantischer über spätsubborealem über präspätsubborealem (jedoch postjungtundrenzeitlichem) Flugsand über pleistozänem Terrassensand und -kies (der Terrasse t3 nach KANDLER 1970)
5. Bodentyp	Parabraunerde, örtlich Podsol-Parabraunerde, mit Bänderung und Fleckung im unteren Unterboden
6. Entwicklungstiefe	155 cm
7. Gründigkeit	> 400 cm
8. Durchwurzelung	sehr stark 0–6 cm, stark 6–45 cm, mittel 45–65/75 cm, mittel bis schwach 65/75–120 cm, schwach 120–152 cm, sehr stark 152–155 cm
9. Humusform	Mullartiger Moder, stellenweise feinhumusarmer Moder
10. Trophie	mesotroph, stellenweise meso- bis oligotroph
11. Geländewasserhaushalt	mäßig frisch
12. Staunässe	keine
13. Mittlerer Grundwasserstand und -schwankung	> 400 cm u. GOF

L	0,5 cm	Kiefernnadelstreu
Of	0,2–0,4 cm	teilzersetzte Kiefernnadelstreu, braunschwarz
Oh	0,1–0,2 cm	schwarzer Moder
Ah	0– 6 cm (8) cm	fsmS; dunkelgrau; sehr dunkelgrau (10YR 4/1; 3/1); h˙; einzelkörnig bis schwach kohärent; sehr stark durchwurzelt; sehr deutliche, etwas wellige, örtlich zapfenartige Begrenzung
Al	– 45 cm	fsmS; sehr hellbraun; braun (10YR 5,5/3; 4,5/3); äußerst schwach fleckig; in Wurzelnähe h''; einzelkörnig; stark durchwurzelt; deutliche, wellige Begrenzung
IIBtvb	– 65 cm (75) cm	l'fsmS; rötlichgelbbraun; dunkelbraun (7,5YR 5,5/6; 4/4); sehr schwach fleckig; einzelkörnig bis schwach kohärent; mittel durchwurzelt; undeutliche wellige Begrenzung Bänder: 0,2–1,0 cm stark; l̄fsmS; gelblichrot; rötlichbraun (5YR 5/6; 4/4); schwach kohärent; 3 deutliche Bänder im Abstand von 3–10 cm girlandenförmig aufeinanderfolgend, in manchen Bereichen sich aufspaltend

IIBt	–120	cm	l'S; gelbrötlichbraun; rötlichbraun (5YR 5/6; 4/4); schwach fleckig; stellenweise Holzkohleschmitzen, in 92 cm u. GOF verkohlter Pinus sylvestris-Zapfen; einzelkörnig bis schwach kohärent; mittel bis schwach durchwurzelt; welliger, undeutlicher Übergang zum IIIBv
IIIBv	–155	cm	msfS; stark braun; dunkelbraun (7,5YR 5/6; 4/4) bis u'msfS; bräunlichgelb; dunkelgelblichbraun (10 YR 6,5/6; 4/4) pantherfleckig; 151 cm u. GOF 0,2 cm starkes gelbes Band; einzelkörnig; schwach durchwurzelt, 152–155 cm u. GOF sehr stark durchwurzelt; deutlich Begrenzung
IIICkc	–260	cm	msfS; hellgrau; graubraun (10YR 7/1; 5/2); $\bar{c}$, stellenweise $\bar{\bar{c}}$ (armdicke Osteokollen vertikal bis an 5–10 mm starkes, leicht gewelltes Kalkband, das Grenze zu IVCc bildet); einzelkörnig bis verkittet (Osteokollen); nicht durchwurzelt; Grubensohle
IVCc	–350 +	cm	gsmS; fg'–mg' (260–280 cm u. GOF), $\bar{f}\bar{g}$–$\bar{g}\bar{g}$, stellenweise mX aus tertiären Kalken (280–300 cm u. GOF), fg–mg (300–350 cm u. GOF) aus tertiären Kalken (dominant), Quarziten, Quarzen, Lyditen; hellgrau; grau (10YR 7/1; 5,5/1); c·; einzelkörnig; nicht durchwurzelt.

Podsol-Parabraunerde (Aufnahme 2 m von Profilwand entfernt)

L	1	cm	Kiefernnadelstreu
Of	1,5	cm	teilzersetzte Kiefernnadelstreu, braunschwarz, vernetzt
Oh	1	cm	schwarzer Moder
Aeh	0– 5	cm	fsmS; sehr dunkelgrau; schwarz (2,5Y 3/0; 2/0); $\bar{\bar{h}}$; krümelig; sehr stark durchwurzelt; deutliche Begrenzung
Ae	– 7	cm	fsmS; helles braungrau; graubraun (10YR 6/2; 5/2); örtlich h'; einzelkörnig; stark durchwurzelt; undeutliche Begrenzung
BshAl	–14	cm	fsmS; gelblichbraun; braun (10YR 5/4; 4/3); h''; einzelkörnig; stark durchwurzelt; undeutliche Begrenzung
Al	–45	cm	Fortsetzung des Normalprofiles.

Profilbeschreibung: Parabraunerde mit terra-fusca-artigem IIIBt-Horizont (Profil 4)

1. Topographische Lage	Lennebergwald, Gemarkung Budenheim, Waldabt. 210 a, „Eichenwäldchen", 250 m nordöstlich der Landstraße Gonsenheim – Heidesheim (Lennebergspange) an der Ludwigschneise, Bl. 5915 Wiesbaden, R 34 41 230, H 55 42 190
2. Relief	schwach geneigt, NE-exponiert, 147,5 m. ü. NN
3. Nutzung	überwiegend 36jährige Buchen II. bis III. Bonität, daneben gleichaltrige Eichen, Ahorn und Kirschen
4. Ausgangsgestein	Jungtundrenzeitlicher Deckschutt über jungtundrenzeitlicher Solimixtionszone über würmzeitlichem Basisschutt aus untermiozänen Kalken und Mergeln (Hydrobien-Schichten) und sehr wenigen Terrassenkiesen

5. Bodentyp	Parabraunerde mit terra-fusca-artigem IIIBt-Horizont
6. Entwicklungstiefe	60–70 cm, stellenweise 120 cm
7. Gründigkeit	> 300 cm
8. Durchwurzelung	stark 0–20/25 cm, mittel 20/25–60/80 cm, schwach 60/80–120 cm
9. Humusform	F-Mull
10. Trophie	eu- bis mesotroph
11. Geländewasserhaushalt	frisch
12. Staunässe	keine
13. Mittlerer Grundwasserstand und-schwankung	> 300 cm u. GOF

L	0,5–1	cm	Laubstreu
Of	0,2–0,5	cm	teilzersetzte Laubstreu
Ah	0– 6 (8)	cm	l'S; fgr'–fx' aus untermiozänen Kalken der Hydrobien-Schichten, mit Längsachse in Gefällsrichtung eingeregelt, oft schwach verkarstet; fg'' aus Quarzen; dunkelgrau; schwarz (2,5Y 4/0; 2/0); h'; krümelig; 3–4 Regenwurmgänge/dm²; stark durchwurzelt; deutliche wellige und zapfenartige Begrenzung
Al	– 20 (25)	cm cm	l'S; fgr'–fx' aus untermiozänen Kalken der Hydrobien-Schichten, mit Längsachse in Gefällsrichtung eingeregelt; oft schwach verkarstet; fg'' aus Quarzen; sehr helles gelbgrau; helles gelbgrau (2,5Y 6,5/2; 5/2); h'' in Wurzelnähe; einzelkörnig; 3–4 Regenwurmgänge/dm²; stark durchwurzelt; undeutlich, welliger Übergang
IIBtv	– 45 (40)	cm cm	t'S; fgr''–ggr'' aus untermiozänen Kalken der Hydrobien-Schichten; fg'' aus Quarzen; rotgelblichbraun; dunkelbraun (7,5YR 6/6; 4/4); subpolyedrig; im oberen Bereich 1–2 Regenwurmgänge/dm²; mittel durchwurzelt; undeutlich, welliger Übergang
IIIBt	– 65 (80)	cm cm	s'T; im unteren Bereich fgr'–fx' aus untermiozänen Kalken der Hydrobien-Schichten, meist mit Längsachse in Gefällsrichtung eingeregelt, oft stark zersetzt durch Verwitterung; fg'' aus Quarzen; gelbrötlichbraun; dunkelgelbrötlichbraun (5YR 5/6; 4/6); subpolyedrig bis polyedrig; mittel durchwurzelt; deutliche, wellige Begrenzung;
örtl.	–120	cm	stellenweise greift Horizont in IIICc, taschen- und zapfenartig, auf ? alten Wurzelbahnen; $\overline{s}$T; $\overline{fgr}$–$\overline{fx}$; fg''; rötlichgelbbraun; braun (7,5YR 6/8); 5/8; c'–c''; subpolyedrig; schwach durchwurzelt; deutliche Begrenzung
IIICc	–120	cm	$\overline{l}$S; $\overline{fgr}$–$\overline{mx}$ aus untermiozänen Kalken und Mergeln der Hydrobien-Schichten, meist mit Längsachse in Gefällsrichtung eingeregelt; fg''–mg'' aus Quarzen; hellbräunlichgelb; bräunlichgelb (5Y 8/5; 7/6); $\overline{\overline{c}}$; subpolyedrig; schwach durchwurzelt; Grubensohle.

Tab. 1: pH, organische Substanz, Fe_d und Ton-Gehalte der einzelnen Horizonte von den vier untersuchten Bodenprofilen.

Profil/Horizont	pH (KCl)	Organische Substanz %	Fe_d %	Ton Gew.-%
Profil 1				
Ah	7,3	8,3	0,1535	2,8
CvAh	7,9	1,5	0,1532	2,6
AhCv	8,0	0,9	0,1522	2,4
C	8,2	–	0,1245	1,6
IIfAhCv	8,3	0,3	0,1235	1,0
IIC	8,1	–	0,1237	0,9
Profil 2				
Ah	4,6	3,7	0,3122	3,2
Bv	4,4	0,3	0,3156	4,3
IIBlb$_1$ ohne Bänder	4,3	0,1	0,1556	2,3
IIBlb$_1$ 4 Bänder je 0,25 cm	4,7	0,3	0,4037	11,6
IIBlb$_2$ ohne Bänder	5,4	0,1	0,1551	2,4
IIBlb$_2$ 2 Bänder je 0,35 cm	4,9	0,2	0,4040	10,0
IIIBtb ohne Bänder	5,1	0,1	0,2040	2,1
IIIBtb 10 Bänder je 1 cm	6,2	0,2	0,4024	8,6
IIICc (mS)	8,3	–	0,1247	0,2
IIICc (2 Bänder gsmS je 2 cm)	8,4	–	0,1238	0,3
Profil 3				
Ah	4,6	5,0	0,3122	4,7
Aeh	4,5	11,6	0,3098	3,9
Ae	3,6	1,5	0,2495	1,6
BshAl	3,8	0,7	0,3124	2,3
Al	4,1	0,2	0,1562	4,9
IIBtvb ohne Bänder	4,6	0,2	0,4020	5,2
IIBtvb 3 Bänder je 0,6 cm	4,5	0,2	0,4093	13,5
IIBt	5,0	0,2	0,4060	7,9
IIIBv hell	5,5	0,08	0,3091	2,3
IIIBv dunkel	5,7	0,11	0,3117	4,0
IIICkc	8,1	–	0,1244	1,9
Profil 4				
Ah	5,3	4,4	0,3060	9,4
Al	3,8	0,7	0,3760	10,4
IIBtv	4,6	0,3	0,8249	19,9
IIIBt	5,1	0,4	1,6251	35,1
IIIBt spaltenartig	7,5	–	3,0624	26,8
IIICc	7,7	–	0,6214	16,2

Untersuchungsmethoden:
pH-Wert nach DIN 19684, Teil 1 (1977).
Organische Substanz nach der Methode von RIEHM & ULRICH (1954).
Fe_d nach MEHRA & JACKSON (1960).
Ton nach DIN 19683, Teil 1 + 2 (1973).

4. Vorbemerkungen

Geringe Mengen einiger Schwermetalle sind für die Pflanze notwendig (u. a. das für diese Arbeit untersuchte Cu, Zn und Mn). Andere der untersuchten Schwermetalle (Co, Cr, Ni) sind wahrscheinlich für die meisten höheren Pflanzen entbehrlich (FINCK 1976:100–115; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:271, 297, 301). Cadmium und Blei wirken in sehr geringen Konzentrationen nicht toxisch auf Pflanzen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:271).

Innerhalb von Waldökosystemen werden durch die erhöhte Anreicherung von Schwermetallen (Überschreitung eines spezifischen Grenzwertes) die Mikroorganismen und die Vegetation gefährdet (MAYER 1981:267). Nach MAYER (1981:267) ist mit einer Schädigung der Bestände im Solling in naher Zukunft zu rechnen.

Eine weitere Gefahr besteht in einer relativ schnellen Verlagerung ins Grundwasser (z. B. durch Kahlschlag oder Düngung) der an die organische Substanz gebundenen Schwermetall-Vorräte (MAYER 1981:267).

Der Lenneberg grenzt direkt an das Belastungsgebiet Mainz – Budenheim, in dem die Grenzwerte von Staubniederschlag und Schwefeldioxid überschritten werden (MINISTERIUM für SOZIALES, GESUNDHEIT und UMWELT des LANDES RHEINLAND-PALZ 1982:1).

Die Hauptemittenten (Industrie, Kohlekraftwerk, Siedlungszentren) befinden sich im N und E des Waldgebietes, und eine Autobahn durchschneidet randlich das Gebiet. Günstig für einen verringerten Eintrag von Schadstoffen in den Lennebergwald wirken sich die dominierenden W-, SW- und NW-Winde aus (ungünstig für den Wiesbadener Stadtwald), wobei der an vierter Stelle der Häufigkeit auftretende E-Wind die Emissionen aus dem Stadtgebiet von Mainz herantransportiert (vgl. MINISTERIUM für SOZIALES, GESUNDHEIT und UMWELT des LANDES RHEINLAND-PALZ 1982:16; Abb. 3). Darüber hinaus werden Schwermetalle als Aerosole ferntransportiert und gelangen mit dem Niederschlag ebenfalls in das Waldgebiet (vgl. FASSBENDER & SEEKAMP 1976:56).

Die Schwermetalluntersuchungen sollen sich in diesem Rahmen auf den Boden beschränken, da er die Grenze zwischen Atmo- und Bio- sowie Litho- und Hydrosphäre bildet und einen Großteil der Schwermetalle bindet.

5. Untersuchungsmethoden

Probenentnahme (mit Plastikschaufel zur Vermeidung von Kontaktkontamination) am Aufschluß für 2 Parallelen erfolgte getrennt.

1) Ökologischer Gesamtgehalt
   a) Bestimmung im Mineralboden (Aufschluß im Geologischen Landesamt Mainz) Verfahren nach GEOLOGISCHE LANDESÄMTER und BUNDESANSTALTEN der BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (1980):
   5 g analysenfeines Bodenmaterial mit 20 ml halbkonz. HNO_3 3 Stunden lang bei 70–75 °C in konditionierten Niederdruckpolyäthylenflaschen aufgeschlossen, filtiert, mit H_2O bidest. nachgespült und auf 100 ml aufgefüllt (2 Parallelen).
   b) Bestimmung in der Humusauflage
   Mittels Autoklav 1 g Einwaage 1 Stunde mit 20 ml 65 %iger HNO_3 auf 110 °C erhitzt, weiteres Vorgehen wie bei 1 a).
2) Pflanzenverfügbarer Gehalt (Aufschluß im Geologischen Landesamt in Mainz) Verfahren nach LAKANEN & ERVIÖ (1971):
   10 g analysenfeines Bodenmaterial mit je 100 ml Lösung aus 3,85 g (≙ 0,5 M) Ammoniumacetat (CH_3COONH_4), 2,5 ml konz. Essigsäure (CH_3COOH) und 0,5845 g

(≙0,02 M) Titriplex III versetzt, 1 bis 1,5 Stunden geschüttelt, weiteres Vorgehen wie bei 1 a) (2 Parallelen).

Aus beiden Lösungen (Gesamtgehalt und pflanzenverfügbarer Gehalt) Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Co mit AAS 2380 der Firma PERKIN-ELMER (mittels Flamme) gemessen; Cd mittels Graphitrohrküvette (PERKIN-ELMER HGA 400) flammenlos bestimmt.

Pro Aufschlußverfahren 3 Blindwerte sowie bei jeder Meßserie mindestens zwei Bodenstandards, deren ökologische Gesamtgehalte im Auftrag der FAO-European Research Network on Trace Elements, Coordination Centre, Gent (Belgien), in 12 europäischen Ländern im Rahmen einer Ringanalyse bestimmt wurden (aus dem Geologischen Landesamt Mainz).

Statistische Auswertung

Es wurde eine statistische Interpretation des Beziehungsgefüges Schwermetall-Ligand vorgenommen, da die Bindungsverhältnisse der sieben Schwermetalle nicht experimentell untersucht wurden. Für einfache und multiple Regressionsanalysen sowie zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten diente ein Tischrechner HAWLETT PACKARD HP 85.

Das Aufschlußverfahren für den ökologischen Gesamtgehalt erfaßt alle Verbindungen der untersuchten Schwermetalle außer dem nur langfristig durch chemische Verwitterung freisetzbaren, silikatisch in Mineralien gebundenen Anteil. Cr_2O_3 geht nur teilweise in Lösung (ANDERSON 1975:125–135; BOR 1983:mündl. Mitt.; LINDNER 1982:67, 111). Damit wird der hinsichtlich ökologischer Fragestellungen relevante Schwermetallgehalt des Bodens erfaßt. Der ökologische Gesamtgehalt beträgt je nach Element und Mineralgehalt ca. 50 bis 90 % des Gesamtgehaltes mit HF-Aufschluß (BOR 1983:mündl. Mitt.; LINDNER 1982:67). Das Extraktionsmittel für die Bestimmung des pflanzenverfügbaren Schwermetallgehaltes simuliert das chemische Milieu im Wurzelraum, da es in erster Linie austauschbare (organische Substanz, Tonminerale) und teilweise an Phosphat und Karbonat gebundene Schwermetalle löst. Der durch dieses Verfahren potentiell ermittelte pflanzenverfügbare Anteil liegt über dem effektiv in den Biokreislauf aufgenommenen Gehalt (LAKANEN & ERVIÖ 1971:223-232; PURVES in LINDNER 1982:68).

6. Ergebnisse

Die in den vier untersuchten Profilen ermittelten Schwermetallgehalte als ökologische Gesamtgehalte und die pflanzenverfügbaren Anteile sind in den Tab. 2 (in ppm = mg/kg) und 3 (in kg/ha/Horizont) aufgeführt. Entscheidend für die Pflanze ist das Schwermetall-Angebot im sehr stark bis mittel durchwurzelten Boden (s. Tab. 4). Im folgenden werden auch Vergleiche mit anderen Gebieten gezogen.

6.1. Vergleich mit Literaturdaten aus dem Lennebergwald

Aus dem östlichen Lennebergwald (TK 25 Bl. 5914 Eltville und 5915 Wiesbaden östlich R 34 40 000) wurden Bodenproben von 8 Stellen (genaue Angaben fehlen) aus Tiefen von 0–5 cm und 40–50 cm auf Cd und Pb untersucht (Pb mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszensspektrometrie; Cd mittels Aufschluß in konz. HNO_3 und Flammen-AAS (MINISTERIUM für SOZIALES, GESUNDHEIT und UMWELT des LANDES RHEINLAND- PFALZ). Dabei liegen die Gehalte an Cd alle unter 1 ppm (eigene Untersuchung: max. 1,98 ppm) und an Pb alle unter 50 ppm (eigene Untersuchung: max. 78 ppm).

Zwei weitere Ah-Horizonte einer Pararendzina aus holozänem Flugsand (TK 25 Bl. 5915 Wiesbaden, in der Nähe von R 34 42 000, H 55 42 000) und einer Braunerde aus holozänem Flugsand (TK 25 Bl. 5915 Wiesbaden, in der Nähe von R 34 43 000, H 55 42 000) wurden von LINDNER (1982:94) untersucht (Tab. 5).

Tab. 2 Schwermetallgehalte (ökologischer Gesamtgehalt und pflanzenverfügbarer Anteil) der vier untersuchten Profile im Lennebergwald.

G = ökologischer Gesamtgehalt in ppm (≙ mg/kg)
p = pflanzenverfügbarer Anteil in ppm (≙ mg/kg)
p/G in %

Profil/Horizont	Cadmium			Chrom			Kupfer			Nickel			Blei			Zink			Kobalt			Mn_d
	G	p	p/G	G	p	p/G	G	p	p/G	G	p	p/G	G	p	p/G	G	p	p/G	G	p	p/G	
Profil 1																						
L	0,25			2			11			2			31			43			1			
Of	1,08			9			19			8			78			98			1			
Ah	1,18	0,67	57	6	1	17	8	5	63	6	2	33	41	34	83	41	37	90	2	1	50	154
CvAh	0,40	0,15	38	4	1	25	2	1	50	6	2	33	8	6	75	6	4	67	2	1	50	153
AhCv	0,31	0,11	35	4	1	25	2	1	50	4	1	25	4	3	75	4	2	50	2	1	50	152
C	0,59	0,16	27	4	1	25	2	1	50	6	3	50	4	3	75	5	1	20	2	2	100	125
IIfAhCv	0,39	0,17	44	4	1	25	2	1	50	6	3	50	4	3	75	4	1	25	2	2	100	124
IIC	0,51	0,14	27	4	1	25	2	1	50	6	3	50	4	3	75	4	1	25	2	2	100	119
Profil 2																						
L	0,47			1			9			1			29			75			1			
Of	0,89			3			11			3			51			50			1			
Ah	0,74	0,53	72	4	<1	–	4	2	50	6	1	17	26	15	58	20	8	40	<1	<1	–	312
Bv	0,40	0,14	35	4	<1	–	2	<1	–	6	<1	–	6	1	17	7	2	29	<1	<1	–	158
$IIBlb_1$ ohne Band	0,19	0,06	32	4	<1	–	2	<1	–	4	<1	–	4	1	25	5	0,3	6	<1	<1	–	3
$IIBlb_1$ Band	0,29	0,10	34	8	<1	–	4	1	25	10	<1	–	6	2	33	9	0,3	3	2	<1	–	404
$IIBlb_2$ ohne Band	0,12	0,03	25	2	<1	–	2	<1	–	6	<1	–	4	<1	–	6	0,1	2	<1	<1	–	3
$IIBlb_2$ Band	0,22	0,05	23	8	1	13	4	1	25	12	<1	–	6	1	17	9	0,3	3	2	<1	–	8
IIIBtb ohne Band	0,60	0,04	7	4	<1	–	2	<1	–	6	<1	–	4	1	25	6	0,2	3	2	<1	–	204
IIIBtb Band	0,89	0,06	7	8	<1	–	4	1	25	14	<1	–	6	2	33	10	0,2	2	2	<1	–	201
IIICc (mS)	0,35	0,08	23	4	1	25	2	1	50	6	3	50	4	3	75	5	0,7	14	2	2	100	125
IIICc (gsmS)	0,61	0,05	8	4	1	25	2	1	50	6	3	50	4	3	75	4	0,8	20	2	2	100	3

Fortsetzung **Tab. 2**

Profil 3																						
L	0,28			1			12			2			28			49			1			
Of	0,93			2			20			3			81			73			1			
Oh	0,98			3			24			6			89			85			1			
Ah	0,80	0,55	69	4	<1	–	6	3	50	6	1	17	32	28	88	25	15	60	<1	<1	–	156
Aeh	1,98	0,87	44	6	<1	–	15	5	33	6	2	33	78	53	68	68	23	34	2	<1	–	3
Ae	0,92	0,12	8	2	<1	–	2	1	50	4	<1	–	6	5	83	6	2	33	<1	<1	–	3
BshAl	0,34	0,10	29	4	<1	–	2	1	50	6	<1	–	6	4	67	8	2	25	2	<1	–	3
Al	0,28	0,07	25	4	<1	–	2	<1	–	6	<1	–	6	1	17	7	0,3	4	2	<1	–	312
IIBtvb ohne Band	0,34	0,11	32	6	<1	–	2	1	50	8	<1	–	8	2	25	9	0,4	4	2	<1	–	804
IIBtvb Band	0,49	0,14	29	14	<1	–	4	1	25	8	<1	–	10	2	20	12	0,6	5	4	<1	–	819
IIBt	0,39	0,13	33	6	<1	–	2	1	50	8	1	13	8	3	38	10	5	50	4	1	25	812
IIIBv hell	0,47	0,10	21	8	1	13	4	<1	–	10	1	10	4	2	50	9	0,2	2	4	1	25	155
IIIBv dunkel	0,51	0,11	22	8	<1	–	4	1	25	10	1	10	6	1	17	10	0,1	1	4	<1	–	156
IIICkc	0,33	0,13	39	6	2	33	4	1	25	10	4	40	8	6	75	8	1	13	4	3	75	187
Profil 4																						
L	0,23			7			8			7			37			87			1			
Of	1,73			10			10			9			48			26			1			
Ah	1,03	0,53	52	4	<1	–	4	3	75	4	1	25	30	24	80	22	12	55	2	<1	–	306
Al	0,48	0,21	44	4	<1	–	2	1	50	4	<1	–	8	4	50	9	3	33	6	2	33	251
IIBtv	0,34	0,26	76	8	<1	–	2	1	50	10	<1	–	8	3	38	11	2	18	4	2	50	8
IIIBt	0,62	0,17	27	16	<1	–	6	1	17	22	1	5	16	7	44	10	2	20	4	2	50	406
IIIBt in Spalten	0,31	0,11	36	6	1	17	8	1	13	28	2	7	14	7	50	13	3	23	12	4	33	383
IIICc	0,62	0,23	37	12	3	25	8	2	25	18	5	28	12	7	58	7	1	14	8	3	38	124

Profil 1: Pararendzina
Profil 2: Parabraunerde-Braunerde mit gebändertem unteren Unterboden
Profil 3: Parabraunerde, örtlich Podsol-Parabraunerde
Profil 4: Parabraunerde mit terra-fusca-artigem Bt-Horizont

Tab. 3 Schwermetallgehalte (ökologischer Gesamtgehalt und pflanzenverfügbarer Anteil) der vier untersuchten Profile im Lennebergwald.

G = ökologischer Gesamtgehalt in kg/ha/Horizont
p = pflanzenverfügbarer Anteil in kg/ha/Horizont

Profil/Horizont	Cadmium		Chrom		Kupfer		Nickel		Blei		Zink		Kobalt		Mn$_d$
	G	p	G	p	G	p	G	p	G	p	G	p	G	p	
Profil 1															
Ah	0,61	0,35	3,12	0,52	4,16	2,60	3,12	1,04	21,32	17,68	21,32	19,24	1,04	0,52	80
CvAh	0,51	0,19	5,12	1,28	2,56	1,28	7,68	2,56	10,24	7,68	7,68	5,12	2,56	1,28	196
AhCv	0,20	0,07	2,56	0,64	1,28	0,64	2,56	0,64	2,56	1,92	2,56	1,28	1,28	0,64	97
C	6,50	1,76	44,10	11,03	22,05	11,03	66,15	33,08	44,10	33,08	55,13	11,03	22,05	22,05	1378
IIfAhCv	1,10	0,48	11,28	2,82	5,64	2,82	16,92	8,46	11,28	8,46	11,28	2,82	5,64	5,64	350
IIC	6,42	1,76	50,32	12,58	25,16	12,58	75,48	37,74	50,32	37,74	50,32	12,58	25,16	25,16	1497
Profil 2															
Ah	0,66	0,47	3,55	< 0,89	3,55	1,78	5,33	0,89	23,09	13,32	17,76	7,10	< 0,89	< 0,89	277
Bv	2,59	0,91	25,94	< 6,49	12,97	< 6,49	38,92	< 6,49	38,92	6,49	45,40	12,97	< 6,49	< 6,49	1025
IIBlb$_1$ ohne Bänder	0,26	0,08	5,40	< 1,35	2,70	< 1,35	5,40	< 1,35	5,40	1,35	6,75	0,41	< 1,35	< 1,35	4
IIBlb$_1$ 4 Bänder je 0,25 cm	0,04	0,02	1,20	< 0,15	0,60	0,15	1,50	< 0,15	0,90	0,30	1,35	0,05	0,30	< 0,15	61
IIBlb$_2$ ohne Bänder	0,26	0,06	4,32	< 2,16	4,32	< 2,16	12,96	< 2,16	8,64	< 2,16	12,96	0,22	< 2,16	< 2,16	6
IIBlb$_2$ 2 Bänder je 0,35 cm	0,02	0,01	0,85	0,11	0,42	0,11	1,27	< 0,11	0,63	0,11	0,95	0,03	0,21	< 0,11	1
IIIBtb ohne Bänder	0,90	0,06	6,00	< 1,50	3,00	< 1,50	13,50	< 1,50	6,00	1,50	9,00	0,30	3,00	< 1,50	306
IIIBtb 10 Bänder je 1 cm	1,34	0,09	12,00	< 1,50	6,00	1,50	21,00	< 1,50	9,00	3,00	15,00	0,30	3,00	< 1,50	302
IIICc (mS)	5,21	1,19	59,52	14,88	29,76	14,88	89,28	44,64	59,52	44,64	74,40	10,42	29,76	29,76	1860
IIICc (2 Bänder gsmS je 2 cm)	0,38	0,03	2,48	0,62	1,24	0,62	3,72	1,86	2,48	1,86	2,48	0,50	1,24	1,24	2

Fortsetzung **Tab. 3**

Profil 3															
Ah	0,49	0,34	2,45	< 0,61	3,67	1,84	3,67	0,61	19,58	17,14	15,30	9,18	< 0,61	< 0,61	95
Aeh	1,01	0,44	3,06	< 0,51	7,65	2,55	3,06	1,02	39,78	27,03	34,68	11,73	1,02	< 0,51	2
Ae	0,26	0,03	0,58	< 0,29	0,58	0,29	1,15	< 0,29	1,73	1,44	1,73	0,58	< 0,29	< 0,29	1
BshAl	0,34	0,10	4,03	< 1,00	2,02	1,00	6,05	< 1,00	6,05	4,03	8,06	2,02	2,02	< 1,00	3
Al	1,57	0,39	22,46	< 5,62	11,23	< 5,62	33,70	< 5,62	33,70	5,62	39,31	1,68	11,23	< 5,62	1752
IIBtvb ohne Bänder	0,93	0,30	16,38	< 2,73	5,46	2,73	21,84	< 2,73	21,84	5,46	24,57	1,09	5,46	< 2,73	2195
IIBtvb 3 Bänder je 0,6 cm	0,13	0,04	3,78	< 0,27	1,08	0,27	2,16	< 0,27	2,70	0,54	3,24	0,16	1,08	< 0,27	221
IIBt	3,11	1,04	47,85	< 7,98	15,95	7,98	63,80	7,98	63,80	23,93	79,75	39,88	31,90	7,98	6476
IIIBv hell und dunkel	2,52	0,54	41,16	< 5,15	20,58	< 5,15	51,45	5,15	25,73	7,72	48,88	0,77	20,58	< 5,15	800
IIICkc	2,17	0,85	39,42	13,14	26,28	6,57	65,70	26,28	52,56	39,42	52,56	6,57	26,28	19,71	1229
Profil 4															
Ah	0,77	0,40	3,00	< 0,75	3,00	2,25	3,00	0,75	22,50	18,00	16,50	9,00	1,50	< 0,75	230
Al	0,95	0,42	7,95	< 1,99	3,98	1,99	7,95	< 1,99	15,90	7,95	17,89	5,96	11,93	3,98	499
IIBtv	1,32	1,01	31,00	< 3,88	7,75	3,88	38,75	< 3,88	31,00	11,63	42,63	7,75	15,50	7,75	31
IIIBt	1,90	0,52	48,96	< 3,06	18,36	3,06	67,32	3,06	48,96	21,42	30,60	6,12	12,24	6,12	1242
IIICc	5,63	2,09	108,90	27,23	72,60	18,15	163,40	45,38	108,90	65,53	63,53	9,08	72,60	27,23	1125

Schwermetallgehalte der C-Horizonte bis 200 cm u. GOF bei Profil 1, 2, 3 und bis 120 cm u. GOF bei Profil 4

Profil 1: Pararendzina
Profil 2: Parabraunerde-Braunerde mit gebändertem unteren Unterboden
Profil 3: Parabraunerde, örtlich Podsol-Parabraunerde
Profil 4: Parabraunerde mit terra-fusca-artigem Bt-Horizont

Tab. 4 Schwermetallgehalte (ökologischer Gesamtgehalt und pflanzenverfügbarer Anteil) im sehr stark bis mittel durchwurzelten Boden.

G = ökologischer Gesamtgehalt in kg/ha/sehr stark bis mittel durchwurzelten Boden
p = pflanzenverfügbarer Anteil in kg/ha/sehr stark bis mittel durchwurzelten Boden

Profil	Tiefe	Cadmium		Chrom		Kupfer		Nickel		Blei		Zink		Kobalt	
	in cm	G	p	G	p	G	p	G	p	G	p	G	p	G	p
1	0– 30, 95–115	3,29	1,33	27,96	6,73	16,58	6,73	39,10	17,11	51,28	40,15	50,19	29,93	13,46	11,02
2	0– 55	3,25	1,38	29,49	7,38	16,52	8,27	44,25	7,38	62,01	19,81	63,16	20,07	7,38	7,38
3	0–120, 152–155	6,45	2,16	96,45	17,65	39,15	18,88	129,58	17,65	143,83	53,35	166,36	52,06	52,04	17,65
3, podsol.	0–120, 152–155	7,21	2,30	96,49	17,54	43,14	19,58	128,39	18,05	164,03	67,41	186,46	56,82	52,17	17,54
4	0– 65	4,94	2,35	90,91	9,68	33,09	11,18	117,02	9,68	118,36	59,00	107,62	28,83	41,17	18,60

Profil 1: Pararendzina
Profil 2: Parabraunerde-Braunerde mit gebändertem unteren Unterboden
Profil 3: Parabraunerde, örtlich Podsol-Parabraunerde
Profil 4: Parabraunerde mit terra-fusca-artigem Bt-Horizont

Tab. 5: Ökologischer Gesamtgehalt an Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn in ppm zweier Ah-Horizonte aus dem Lennebergwald (aus LINDNER 1982:94).

Horizont	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	organ. Substanz in Gew.-%	pH (0,1N KCl)
Ah einer Pararendzina	0,72	8	4	3	27	31	3,13	7,4
Ah einer Braunerde	0,51	15	3	4	19	21	1,84	5,4

Es besteht eine gute Vergleichbarkeit der Daten von LINDNER (1982:94) mit denen der vier untersuchten Profile, da das gleiche Aufschlußverfahren (halbkonz. HNO_3) verwendet wurde.

Die Gesamtgehalte aller Schwermetalle der von LINDNER (1982:94) untersuchten Proben (Ah-Horizonte) zeigen keine bedeutenden Abweichungen von den Ah-Horizonten der Profile 1–4; eine Ausnahme bildet aufgrund des starken Humusgehaltes der Aeh-Horizont von Profil 3.

6.2. Vergleich mit Literaturdaten aus anderen Gebieten der Bundesrepublik Deutschland

Ein Vergleich mit anderen Gebieten ist nur mit starker Einschränkung möglich, da jeder Verfasser (BOR 1984, MAYER 1981; SCHLICHTING & ELGALA 1975; SCHWERTMANN et al. 1982) andere Aufschlußmethoden für den Gesamt-Schwermetallgehalt verwendet. Bisher konnte noch keine einheitliche Methode gefunden werden, die sich z. B. an den Vorschlag der GEOLOGISCHEN LANDESÄMTER und BUNDESANSTALTEN der BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (1980) hält. Auch werden selten Humusgehalt und Korngrößenverteilung angegeben, die auf die Sorptionskapazitäten entscheidend wirken.

Ein guter Vergleich der ökologischen Gesamtgehalte von den Profilen aus dem Lennebergwald ist mit untersuchten terrestrischen Böden aus dem Stadtrandbereich von Mainz möglich, da die gleiche Aufschlußmethode verwandt wurde (LINDNER 1982). Der hohe Cd-Gehalt des Aeh-Horizonts von Profil 3 wird im Stadtrandbereich nicht erreicht (vgl. LINDNER 1982:94–98). Alle anderen untersuchten Schwermetalle überschreiten den höchsten ermittelten Wert im Lennebergwald in 2 % (Ni) bis 96 % (Cr) der untersuchten Horizonte in Oberböden (vgl. LINDNER 1982:94–96). Im Stadtrandbereich von Mainz überschreiten die ökologischen Gesamtgehalte in folgenden Prozenten an Horizonten den höchsten ermittelten Gehalt des jeweiligen Schwermetalls aus dem Lennebergwald:

a) in 46 Oberböden (vgl. LINDNER 1982:94–96): Cr 96 %, Cu 46 %, Ni 2 %, Pb 11 % und Zn 7 %;
b) in 7 ausgewählten Bodenprofilen mit 20 Horizonten (vgl. LINDNER 1982:97–98): Cr 75 %, Cu 35 %, Pb 10 %, Zn 10 % (Ni überschreitet in keinem Horizont den Höchstwert aus dem Lennebergwald).

GABRIEL & MAQSUD (1985) bearbeiteten Böden bezüglich der Schwermetallgehalte im nördlichen Rheinhessen mit dem gleichen Aufschlußverfahren, wie es für die Untersuchungen im Lennebergwald angewendet wurde. Die ökologischen Gesamtgehalte von Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn und Co sowie deren pflanzenverfügbare Anteile in terrestrischen Böden beim Steinbruch Budenheim (nahe des Lennebergwaldes) und bei Ingelheim liegen innerhalb der im Lennebergwald gemessenen höchsten und geringsten Werte (vgl. GABRIEL & MAQSUD

1985:Tab. 16, 17). In den gesamten untersuchten Profilen des nördlichen Rheinhessens überschreiten die Gesamtwerte von Cr, Cu, Co und Ni in sehr vielen Fällen den jeweiligen gemessenen Höchstwert aus dem Lennebergwald. Die Zn- und Pb-Gehalte der einzelnen Horizonte überschreiten den Höchstwert im Lennebergwald nur je in einem Fall. Die Gehalte an Cd erreichen nicht den hohen Wert im Aeh-Horizont von Profil 3 (vgl. GABRIEL & MAQSUD 1985:Tab. 16).

Die Gesamtgehalte von terrestrischen „Sandböden" aus dem gesamten Bundesland Rheinland-Pfalz überschreiten in vielen Horizonten die maximal gemessenen Werte aus dem Untersuchungsgebiet (vgl. BOR 1984:124–141). Besonders gravierend wirkt sich das bei Co, Zn, Ni und Cd aus, wobei die gemessenen Höchstwerte aus Rheinland-Pfalz den doppelten bis dreifachen Höchstwert vom Lennebergwald ausmachen (vgl. BOR 1984:124–141). Die Gesamtgehalte der Of-Lagen im Lennebergwald liegen im Vergleich zu Rheinland-Pfalz weit unterhalb der Maximalwerte oder bewegen sich um den Minimalwert (Cd, Ni, Co) (vgl. BOR 1984:124–141). BOR (1984:124–141) untersuchte nur an einem Profil L- und Oh-Lagen, so daß hier keine Aussagemöglichkeit besteht.

Auch Untersuchungen der Gesamtgehalte an Schwermetallen in terrestrischen Wald-Böden im Nordsauerland (SCHWERTMANN et al. 1982 a, b), im Solling (MAYER 1981) und in Südwestdeutschland (SCHLICHTING & ELGALA 1975) zeigen, daß in einem Großteil dieser Horizonte (meist 50 bis 100 % der Horizonte je nach Schwermetall) der gemessene Maximalwert des jeweiligen Schwermetalls die Werte in den Horizonten der Böden des Lennebergwaldes um ein Mehrfaches übertrifft.

Auch unter der Berücksichtigung, daß bei der Aufschlußmethode für die Profile im Lennebergwald nur 50 bis 90 % des absoluten Gesamtgehalts (HF-Aufschluß) erfaßt wurden, zeigt der Vergleich mit anderen Gebieten (in dem verschiedene Aufschlußmethoden verwendet wurden), daß das Untersuchungsgebiet offenbar nicht stark belastet ist.

7. Bindung der Schwermetalle (ökologischer Gesamtgehalt) an ausgewählten Stoffgruppen

Die Schwermetalle im Boden werden unspezifisch durch Coulombsche Kräfte mit relativ geringer Bindungsstärke an der Oberfläche von Austauschern (organische Substanz und Tonminerale) adsorbiert. An hydroxylierten Oberflächen von Fe-, Al- und Mn-Oxiden werden die Schwermetalle mit steigendem pH zunehmend spezifisch mit größerer Bindungsstärke adsorbiert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:285–286). Des weiteren können Schwermetalle mit der Huminsäure Verbindungen höherer Ordnung eingehen, wobei stabile (metallorganische) Komplexe gebildet werden, dagegen sind die Fulvosäurekomplexe leicht löslich (HERMS & BRÜMMER 1978a:29, 1978b:182; MAYER 1981:176–180; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:286).

Zwischen den Liganden und dem jeweiligen Schwermetall bildet sich im Boden je nach Affinität ein spezifisches Sorptionsgleichgewicht aus. Das Ausmaß der Affinität eines Schwermetalls zu einem Liganden wird durch die einfache ($y = a + bx$) und multiple Regressionsanalyse ($y = a + b_1x_1 + \ldots\ldots + b_nx_n$) ermittelt, wobei eine Beziehung als gesichert gilt, wenn der Korrelationskoeffizient (r) eine von der Anzahl der Wertpaare (n) abhängige Signifikanzschranke überschreitet. Tab. 7 zeigt die lineare einfache Korrelation der einzelnen HNO_3-löslichen Schwermetalle mit den Ligandgehalten. In Tab. 6 sind die gemessenen ökologischen Gesamtgehalte mit den Parametern organische Substanz, Tongehalt und Fe_d korreliert, wobei der aus der Literatur (ANDERSON 1977; BERROW & BURRIDGE 1979; BOR 1980; CARY & ALLAWAY & OLSON 1977; KEILEN & STAHR & ZÖTTL 1978; KINNIGBURGH 1978; MAYER 1978; SCHLICHTING & EGALA 1975; SCHWERTMANN & FISCHER & FECHTER 1982b; STREET & SABEY & LINDSAY 1978; UMWELTBUNDESAMT 1977, 1978; ZIMDAHL & SKOGER-

BOE 1977 in LINDNER 1982:147–148) ermittelte theoretische Grad der Affinität gegenübergestellt ist.

Tab. 6: Natürliche und tatsächliche Verteilung der Schwermetalle (ökologische Gesamtgehalte) an sorptionsrelevanten Stoffgruppen.

	organ. Substanz Grad der Affinität		Tonminerale Grad der Affinität		Fe_d Grad der Affinität	
Element	theoretisch	ermittelt	theoretisch	ermittelt	theoretisch	ermittelt
Cd	xxx	$0{,}84^{xxx}$	x	$0{,}07^{n.s.}$	–	$0{,}09^{n.s.}$
Cr	–	$0{,}12^{n.s.}$	xxx	$0{,}72^{xxx}$	xxx	$0{,}38^{x}$
Cu	xxx	$0{,}73^{xxx}$	xxx	$0{,}31^{n.s.}$	xxx	$0{,}35^{x}$
Ni	x	$0{,}24^{n.s.}$	xx	$0{,}81^{xxx}$	xxx	$0{,}87^{xxx}$
Pb	xxx	$0{,}96^{xxx}$	x	$0{,}04^{n.s.}$	x	$0{,}05^{n.s.}$
Zn	xxx	$0{,}95^{xxx}$	xxx	$0{,}00^{n.s.}$	xxx	$0{,}00^{n.s.}$
Co	–	$0{,}19^{n.s.}$	–	$0{,}64^{xxx}$	–	$0{,}75^{xxx}$

n = 32	$r < 0{,}35^{n.s.}$	nicht signifikant	
	$r \geqq 0{,}35^{x}$	signifikant	(≙ zu 95 % gesicherte Korrelation)
	$r \geqq 0{,}45^{xx}$	hoch signifikant	(≙ zu 99 % gesicherte Korrelation)
	$r \geqq 0{,}55^{xxx}$	sehr hoch signifikant	(≙ zu 99,9 % gesicherte Korrelation)

Die Signifikanzen der vier untersuchten Bodenprofile decken sich entsprechend den aus Literaturangaben theoretisch abgeleiteten bei fast allen Elementen (abgesehen Ni) mit der organischen Substanz, danach folgen die an Eisenoxiden (Fe_d) und Tonmineralen. Insgesamt nimmt vom Zn über Pb, Cu, Ni und Cr zum Cd hin bei allen drei Liganden die Beziehung zum theoretisch ermittelten Grad der Affinität zu. Die Abweichungen sind auf den meist geringen Gehalt einzelner Liganden (Ton, Fe_d) in den Proben aus Sanden zurückzuführen. In den Böden des Lennebergwaldes werden Cd, Pb, Cu und Zn hauptsächlich (sehr hoch signifikant) an der organischen Substanz fixiert (vgl. KEILEN & STAHR & ZÖTTL 1978:590; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:286, 290–291, 299–300; SCHWERTMANN & FISCHER & FECHTER 1982b:190–196). Bei den derzeitigen pH-Werten nimmt die Schwermetallbindung durch die organische Substanz in der Reihe Cu > Cd > Zn > Pb zu. In der Regel bilden Cu und vor allem Pb die stabileren Bindungen (vgl. HERMS & BRÜMMER 1978a:32), da aber Cu noch eine gewisse Affinität zu Fe_d (signifikant) zeigt, ist es bei der statistischen Berechnung am instabilsten. Die sehr hohen Signifikanzen der Schwermetalle Zn und Pb zur organischen Substanz läßt die Korrelation zu Ton und Fe_d nicht mehr zum Ausdruck kommen. In 66 % der Proben gehen Zn und Cd in den Biokreislauf über, da der pH-Wert < 6 liegt; daher ist keine Korrelation zwischen Ton und Fe_d festzustellen. Die Löslichkeit der Schwermetalle wird durch den pflanzenverfügbaren Anteil am ökologischen Gesamtgehalt (p/G in %) dargestellt. Eine Korrelation der Löslichkeit mit dem pH-Wert kann mit hoher Signifikanz nur beim Pb festgestellt werden (s. Tab. 8). Diese Beziehungen sind bei all den anderen untersuchten Schwermetallen nicht gesichert. Ni und Co zeigen sehr gute Affinitäten zu den Tonmineralen und Fe_d, da sie mit an den Verlagerungsvorgängen (Ton, Fe_d) teilnehmen (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:297). Die Korrelation von Cr mit den Tonmineralen

Tab. 7: Orientierungswerte zur qualitativen Verteilung der ökologischen Gesamtgehalte der Schwermetalle an Liganden in Böden im Lennebergwald.

Einfache lineare Regression	$r < 0{,}35^{n.s.}$	nicht signifikant
$y = a + bx$	$r \geqq 0{,}35^{x}$	signifikant
n (Anzahl der Proben) = 32	$r \geqq 0{,}45^{xx}$	hoch signifikant
	$r \geqq 0{,}55^{xxx}$	sehr hoch signifikant

y/x		
Cd/org. Subs.	y = 0,407 + 0,116x	$r = 0{,}84^{xxx}$
Cr/org. Subs.	y = 6,131 - 0,149x	$r = 0{,}12^{n.s.}$
Cu/org. Subs.	y = 2,780 + 0,772x	$r = 0{,}73^{xxx}$
Ni/org. Subs.	y = 9,140 - 0,493x	$r = 0{,}24^{n.s.}$
Pb/org. Subs.	y = 5,079 + 5,505x	$r = 0{,}96^{xxx}$
Zn/org. Subs.	y = 6,091 + 4,580x	$r = 0{,}95^{xxx}$
Co/org. Subs.	y = 2,683 + 0,171x	$r = 0{,}19^{n.s.}$
Cd/Ton	y = 0,580 - 0,003x	$r = 0{,}07^{n.s.}$
Cr/ Ton	y = 3,909 + 0,290x	$r = 0{,}72^{xxx}$
Cu/Ton	y = 3,003 + 0,111x	$r = 0{,}31^{n.s.}$
Ni/ Ton	y = 4,637 + 0,553x	$r = 0{,}81^{xxx}$
Pb/ Ton	y = 11,570 + 0,093x	$r = 0{,}04^{n.s.}$
Zn/ Ton	y = 12,036 - 0,001x	$r = 0{,}00^{n.s.}$
Co/Ton	y = 1,394 + 0,194x	$r = 0{,}64^{xxx}$
Cd/Fe_d	y = 0,582 - 0,058x	$r = 0{,}09^{n.s.}$
Cr/Fe_d	y = 5,014 + 2,200x	$r = 0{,}38^{x}$
Cu/Fe_d	y = 3,050 + 1,742x	$r = 0{,}35^{x}$
Ni/Fe_d	y = 4,997 + 8,348x	$r = 0{,}87^{xxx}$
Pb/Fe_d	y = 11,628 + 1,409x	$r = 0{,}05^{n.s.}$
Zn/Fe_d	y = 11,847 + 0,439x	$r = 0{,}00^{n.s.}$
Co/Fe_d	y = 1,387 + 3,241x	$r = 0{,}75^{xxx}$
Cr/Mn_d	y = 4,736 + 0,005x	$r = 0{,}39^{x}$
Ni/Mn_d	y = 7,465 + 0,005x	$r = 0{,}20^{n.s.}$
Co/Mn_d	y = 2,681 + 0,000x	$r = 0{,}04^{n.s.}$

ist ebenfalls sehr hoch gesichert, aber mit Fe_d nur noch signifikant. Von den drei an Sesquioxiden sorbierten Schwermetallen (Ni, Co, Cr) hat Co besonders mit Mn_d eine signifikante Affinität (s. Tab. 7). Organisch gebundenes Ni, Co und Cr umfaßt nur geringe Anteile und ist statistisch nicht gesichert (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:297, 302). Zwischen den Schwermetallgehalten und Ton nimmt die Stabilität der Bindungen von Co über Cr zum Ni hin zu. Die Signifikanz der Korrelation an Fe_d nimmt vom Cr über Co zum Ni zu.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Bindungsstärke der Böden im Lennebergwald an der organischen Substanz in der Reihenfolge Cr< Co< Ni< Cu< Cd< Zn< Pb, an den Tonmineralen in der Reihenfolge Zn< Pb< Cd< Cu< Co< Cr< Ni sowie an Fe_d in der Reihenfolge Zn < Pb < Cd < Cu < Cr < Co < Ni zunimmt.

Zur mathematischen Beschreibung der mengenmäßigen Verteilung der Schwermetalle an den Bodenliganden bei mindestens zwei signifikanten Korrelationen eines Elementes wird eine multiple lineare Korrelation durchgeführt (Tab. 9). Das gilt für die drei an Ton und Fe_d sorbierten Schwermetalle Cr, Ni, Co sowie für Cr, das noch mit dem dritten Liganden, Mn_d, korreliert wird. Außerdem wird die Abhängigkeit des Quotienten p/G des Pb von der organischen Substanz und dem pH-Wert dargestellt (Tab. 10). Je höher der Wert der Regressionskonstanten a ist, desto mehr dominieren andere, nicht erfaßbare Sorptionsformen und andersartige Einflußfaktoren. Hierzu gehören z. B. Sorptionsprozesse an MnO_2 (bei Ni, Co), Al_2O_3, TiO_2, SiO_2 (CARY & ALLAWAY & OLSON 1977; LA HOUTI & PERTERSON

Tab. 8: Abhängigkeit des Anteiles pflanzenverfügbarer Schwermtalle am ökologischen Gesamtgehalt (p/G) zum pH-Wert in Böden im Lennebergwald.

Einfache lineare Regression
$y = a + bx$ — $r < 0{,}35^{n.s.}$ nicht signifikant
n (Anzahl der Proben) = 32 — $r \geqq 0{,}45^{xx}$ hoch signifikant

y/x		
$Cd_{p/G}/pH$	$y = 39{,}083 - 0{,}922x$	$r = 0{,}08^{n.s.}$
$Cu_{p/G}/pH$	$y = 31{,}344 + 1{,}147x$	$r = 0{,}12^{n.s.}$
$Pb_{p/G}/pH$	$y = 5{,}075 + 8{,}068x$	$r = 0{,}50^{xx}$
$Zn_{p/G}/pH$	$y = 10{,}274 + 2{,}414x$	$r = 0{,}18^{n.s.}$

Tab. 9: Orientierungswerte zur qualitativen Verteilung der ökologischen Gesamtgehalte der Schwermetalle an Liganden in Böden im Lennebergwald.

Multiple lineare Regression
$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + (b_3x_3)$ — $r < 0{,}35^{n.s.}$ nicht signifikant
n (Anzahl der Proben) = 32 — $r \geqq 0{,}35^{x}$ signifikant
$r \geqq 0{,}45^{xx}$ hoch signifikant
$r \geqq 0{,}55^{xxx}$ sehr hoch signifikant

y/x1/x2	
Cr/Ton/Fe_d	$y = 3{,}959 + 0{,}498x_1 + 3{,}580x_2$ $r_{Ton} = 0{,}72^{xxx}$, $r_{Fe_d} = 0{,}38^{x}$
Ni/Ton/Fe_d	$y = 4{,}553 + 0{,}210x_1 + 5{,}916x_2$ $r_{Ton} = 0{,}81^{xxx}$, $r_{Fe_d} = 0{,}87^{xxx}$
Co/Ton/Fe_d	$y = 1{,}361 + 0{,}016x_1 + 3{,}048x_2$ $r_{Ton} = 0{,}64^{xxx}$, $r_{Fe_d} = 0{,}75^{xxx}$
y/x1/x2/x3	
Cr/Ton/Fe_d/Mn_d	$y = 3{,}612 + 0{,}472x_1 - 3{,}496x_2 + 22{,}445x_3$ $r_{Ton} = 0{,}72^{xxx}$, $r_{Fe_d} = 0{,}38^{x}$, $r_{Mn_d} = 0{,}39^{x}$

Tab. 10: Abhängigkeit des Anteiles pflanzenverfügbaren Pb am ökologischen Gesamtgehalt (p/G) zur organischen Substanz und zum pH-Wert in Böden im Lennebergwald.

Multiple lineare Regression
$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 \cdot x_1$ — $r \geqq 0{,}35^{x}$ signifikant
n (Anzahl der Proben) = 32

y/x1/x2	
$Pb_{p/G}$/org. Subs./pH	$y = 46{,}362 - 0{,}840x_1 + 0{,}890x_2 \cdot x_1$ $r_{org.\ Subs. \cdot pH} = 0{,}41^{x}$ $r_{org.\ Subs.} = 0{,}41^{x}$

1979 in LINDNER 1982:153) sowie möglicherweise der anthropogen bedingte Eintrag von Schwermetallen. Außerdem können beträchtliche Schwermetallgehalte außer am Ton auch an der Schlufffraktion gebunden sein (LICHTFUSS & BRÜMMER 1979:545–549). Damit zeigt sich, daß die tatsächlichen Sorptionsverhältnisse im Boden äußerst komplex sind und mittels korrelationsstatistischer Betrachtungsweisen der kausale Zusammenhang nicht mit hundertprozentiger Sicherheit nachgewiesen werden kann.

8. Tiefenfunktion der Schwermetalle in den Bodenprofilen und deren pflanzenverfügbarer Anteil

Die Humusauflage wird als Grenzschicht zwischen dem oberirdischen Teil der Baum- bzw. der Strauch-, Kraut- und Moosschicht und dem Mineralboden vor allem vom Bestand geprägt, der auch die Deposition von Schwermetallen aus der Atmosphäre vermittelt. Die Menge und Verteilung der Schwermetalle im Bodenprofil wird von der Affinität zu den einzelnen Liganden gesteuert und hängt somit vom Ausgangsgestein und vom Bodentyp ab.

In der Humusauflage unter Kiefern- und Buchenbeständen steigen die Gehalte an Cd, Cr, Cu, Ni und Pb mehr oder weniger stark von der L- zur Of- bzw. Oh-Lage an (s. Tab. 2). Ähnliche Konzentrationsgradienten fanden LENTSCHIG & CZERNEY (in MAYER 1981:60–70) und MAYER (1981:60–70) in Humusauflagen aus Fichten- und Buchenstreu. Zn hat bei den Profilen 1 und 3 ebenfalls in der Of-Lage den höchsten Wert; bei den Profilen 2 und 4 verhält es sich umgekehrt. Da alle Co-Werte bei 1 ppm liegen, kann kein Gradient festgestellt werden. Nach MAYER (1981:65) steigen die Co-Gehalte ähnlich wie alle anderen Schwermetalle von der L-zur Of-Lage an. Es besteht, wie schon im Mineralboden (s. Tab. 6), eine enge Korrelation zwischen Fe und Cr, Co und Ni (MAYER 1981:63, 65, 67). Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Aufschlußverfahren des Gesamtgehaltes an Schwermetallen zeigt ein Vergleich zwischen den Werten der Humusauflage im Solling und im Lennebergwald, daß die Belastung an Cr, Cu, Ni, Pb, Zn und Co im Lennebergwald weitaus geringer ist und die Gehalte an Cd ähnlich sind (vgl. MAYER 1981:61).

Abb. 2 zeigt die Tiefenfunktionen der ökologischen Gesamtgehalte und des pflanzenverfügbaren Anteils der vier untersuchten charakteristischen Bodenprofile. In den Ah-Horizonten liegen die Gehalte an Cd, Cu, Pb und Zn infolge hoher Affinität zur organischen Substanz und Immissionen am höchsten und nehmen mit der Tiefe entsprechend der Pedogenese mehr oder weniger kontinuierlich ab (vgl. HERMS & BRÜMMER 1978a, b).

Ein zweites Maximum der Schwermetalle (Cd, Cu, Pb, Zn) wird in den Tonanreicherungshorizonten (Bt und Bänder) erreicht, da hier auch die Al-, Fe- und Mn-Gehalte ansteigen (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:282–301; SCHLICHTING & ELGALA 1975:566–570).

Die drei Schwermetalle Cr, Ni und Co dominieren mehr in den Bt-Horizonten und den Bändern als in den Ah-Horizonten.

Entsprechend der Umverteilung der anthropogen eingebrachten und gesteinsspezifischen Schwermetalle weisen nicht immer die C-Horizonte die geringsten Gehalte auf, so daß die vom Ausgangsmaterial abhängigen Spurenelement-Gehalte nicht bestimmt werden können und die Werte daher nur eine derzeitige Bestandsaufnahme darstellen. Nach MAYER (1981:87) enthält die Hauptmineralkomponente der Sande, der Quarz, nur einen unbedeutenden Anteil der Gesamt-Schwermetallmenge. Auch der Calcit enthält weniger als 1 % (ausgenommen Pb) der Gesamt-Metallmenge. Die höchsten Anteile von Cr, Co und Ni sind in den Schwermineralen, von Cu in den Tonmineralen, von Zn in den Glimmern und von Pb in den Feldspäten gebunden (MAYER 1981:87).

Die Umverteilung der Schwermetalle im Bodenprofil (bzw. Einbeziehung in den organischen Kreislauf) wird durch den mobilen (pflanzenverfügbaren) Anteil am Gesamtgehalt charakterisiert (vgl. KEILEN & STAHR & ZÖTTL 1978:590). Die durchgeführte statistische Auswertung[2*] zur Ermittlung der relativ verfügbaren Schwermetallgehalte ergibt, daß die Verfügbarkeiten in der Reihe Co > Pb > Cu > Cd > Ni > Zn > Cr abnehmen (s. Tab 11; vgl. LINDNER 1982:161).

2*

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\text{pflanzenverfügbarer Anteil } p}{\text{ökologischer Gesamtgehalt } G} \cdot 100}{n} \text{ in \%}$$

Tab. 11: Relative Verfügbarkeiten der Schwermetalle der vier Profile.

Element	relativ verfügbarer Schwermetallgehalt $\bar{x}$ in %	durchschnittlicher pflanzenverfügbarer Schwermetallgehalt in ppm	n = Anzahl der Proben
Co	59	1,9	15
Pb	53	7,7	31
Cu	39	1,5	27
Cd	34	2,0	32
Ni	28	2,0	18
Zn	24	4,1	32
Cr	22	1,3	12

Die ökologischen Gesamtgehalte nehmen aber in der Reihenfolge Zn = Pb > Ni > Cr > Cd > Cu > Co ab (vgl. KEILEN & STAHR & ZÖTTL 1978:590). Daraus läßt sich schließen, daß entgegen den Aussagen in der Literatur (vgl. KEILEN & STAHR & ZÖTTL 1978:590; MAYER 1978:25; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:291) Pb in den Biokreislauf einbezogen scheint. Trotz der Möglichkeit, daß Pb durch lösliche organische Komplexbildner mobilisiert werden kann (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982:291), ist die bezüglich der Stellung von Pb unerwartete Reihenfolge der Löslichkeit auf die Eigenschaften des Extraktionsmittels (hohe Stabilität der Cu- und Pb-EDTA-Komplexe) zurückzuführen (vgl. LINDNER 1982:161). Ebenso verhält es sich mit Cu. Auch die geringe Probenanzahl pflanzenverfügbaren Anteils bei Ni, Co und Cr verursachen möglicherweise eine verfälschte Interpretation. Das essigsaure NH_4- Ac/EDTA-haltige Extraktionsmittel spiegelt aufgrund seiner Zusammensetzung das Milieu in der Umgebung der Pflanzenwurzeln in verstärkter Form wider. Daher dürften tatsächlich in den Böden des Untersuchungsgebietes relativ (Co), Pb, Cu, Cd und absolut gesehen Pb, Zn sowie Cd und Ni den Pflanzen am meisten zur Verfügung stehen. LINDNER (1982:162) konnte ähnliche (abgesehen vom Cd und Ni absolut) Untersuchungsergebnisse im Stadtrandbereich von Mainz (u. a. auch im Lennebergwald) erzielen.

Cd besitzt noch eine verhältnismäßig hohe Mobilität, wobei zwar die relative und absolute Verfügbarkeit im Ah am höchsten ist, aber in den Bändern und in den Bt-Horizonten meist erhöhte pflanzenverfügbare Anteile anzutreffen sind (vgl. KEILEN & STAHR & ZÖTTL 1978:590). Ebenso verhält es sich mit Cu und Pb, wobei in den Tonanreicherungshorizonten vor allem Pb relativ verfügbar angereichert ist. Cr, Ni und Co nehmen in ihrer Verfügbarkeit relativ wie auch absolut vom oberen Profilteil nach unten zu. Co unterliegt, wahrscheinlich wegen seiner hohen Redoxabhängigkeit, stark der Umverteilung (KEILEN & STAHR & ZÖTTL 1978:590). Zn ist vor allem in den Ah-Horizonten pflanzenverfügbar, wobei in der unteren Profildifferenzierung keine direkte Beziehung mehr zu Liganden getroffen werden kann.

Von den untersuchten Schwermetallen werden Cd und Zn in Relation zum jeweiligen Gehalt des Bodens am besten von Pflanzenwurzeln aufgenommen und in vegetative Pflanzenteile verlagert. Während Ni und Cu vergleichsweise weniger gut ins Pflanzeninnere gelangen, stellt für Pb und Cr die Endodermis eine noch wirksamere Barriere dar (AMBERGER 1978; BERROW & BURRIDGE 1979; ERNST 1974; GARBER 1974; KLOKE 1980, 1981, 1982; MAC LEAN & DEKKER 1978; MILES & PARKER 1979; PURVES 1977; SHEWRY & PETERSON 1979; STREET & LINDSAY & SABEY 1977 in LINDNER 1982:165).

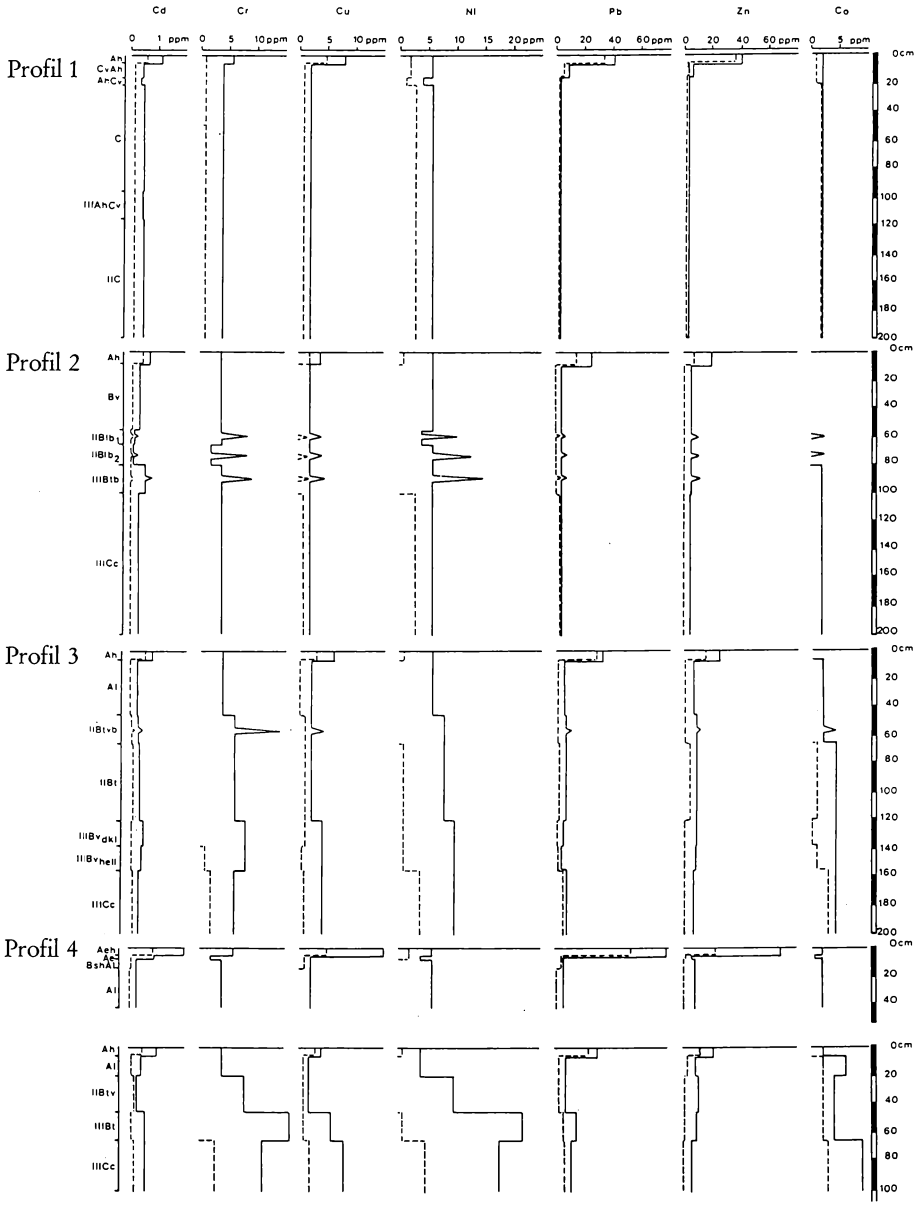

Abb. 2: Tiefenkunktionen der ökologischen Gesamtgehalte und des pflanzenverfügbaren Anteiles von Schwermetallen in den vier Bodenprofilen im Lennebergwald.

9. Danksagung

Ich danke herzlich Herrn Geologie-Direktor Dr. DILLMANN, Herrn Professor Dr. EMMERMANN, Herrn Dr. BOR und Herrn SCHNEIDER (alle Geologisches Landesamt Mainz) sowie Frau BERGMANN-DÖRR (Institut für Physische Geographie, Universität Frankfurt/Main) für die Erlaubnis zur Benutzung der Labors bzw. für die freundliche Unterstützung im Labor. Ich danke Herrn Dr. MAQSUD (Geographisches Institut, Univ. Mainz) für eine Diskussion.

10. Schriftenverzeichnis

ANDERSON, A. (1975): Relative efficiency of nine different soil extractans. – Swedish J. agric. Res., **5**: 125–135; Stockholm.

ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. Anleitung und Richtlinien zur Herstellung der Bodenkarte 1:25.000. – 3. Aufl.: 331 S., 19 Abb., 98 Tab., 1 Beil.; Hannover (Schweizerbart).

BOR, J. (1983): Hinweise zu den Aufschlußverfahren für Schwermetalle. – Mündl. Mitt. August 1983, Geologisches Landesamt Mainz; Mainz.
(1984): Untersuchungen zur Pedogenese und zum Chemismus von Sandböden in Rheinland-Pfalz. – Geol. Jb., Reihe F, **18**: 3–141, 39 Abb., 19 Tab., Tab. A-H im Anh.; Hannover.

BRÜNING, H. (1975): Paläographisch-ökologische und quartärmorphologische Aspekte im nördlichen und nordöstlichen Mainzer Becken. – Mainzer naturwiss. Arch., **14**: 5–91, 37 Abb., 1 Tab.; Mainz.

Deutsche Normen (Beuth-Vertrieb; Berlin, Köln, Frankfurt/Main):

DIN 19 683, Teil 1 (1973): Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung durch Siebung.

DIN 19 683, Teil 2 (1973): Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat.

DIN 19 684, Teil 1 (1977): Bestimmung des pH-Wertes des Bodens und Ermittlung des Kalkbedarfs.

FASSBENDER, H. W. & SEEKAMP, G. (1976): Fraktionen und Löslichkeit der Schwermetalle Cd, Co, Cr, Cu, Ni und Pb im Boden. – Geoderma, **16**: 55–69, 5 Abb., 6 Tab.; Amsterdam.

FINCK, A. (1976): Pflanzenernährung in Stichworten. – 3. Aufl.: 200 S.; Kiel (Hirt).

GABRIEL, D. & MAQSUD, N. (1985): Schwermetalluntersuchungen von Böden im nördlichen Rheinhessen. Grundlegende Arbeitsverfahren und regionale Daten zum Boden- und Umweltschutz. – POLLICHIA-Buch, **7**: 214 S., 28 Abb., 36 Tab.; Bad Dürkheim.

GEOLOGISCHE LANDESÄMTER und BUNDESANSTALTEN der BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (1980): Verfahren zur Schwermetallbestimmung. – 2 S.; Hannover. – [Unveröff.].

HANKE, L. (1985): Boden- und vegetationskundliche Untersuchungen im Lennebergwald bei Mainz. – Unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Frankfurt/Main, 372 S., 90 Abb., 38 Tab., 14 Kt.; Frankfurt/Main.

HANKE, L. & MAQSUD, N. (1985): Pedologisch-stratigraphische Untersuchungen in Flugsanden westlich von Mainz (Sandgrube Walter und Lennebergwald). – Mainzer naturwiss. Arch, **23**: 201–222, 3 Abb., 1 Tab., 3 Profile; Mainz.

HERMS, U. & BRÜMMER, G. 1978 a): Löslichkeit von Schwermetallen in Siedlungsabfällen und Böden in Abhängigkeit von pH-Wert, Redoxbedingungen und Stoffbestand. – Mitt. dt. bodenkdl. Ges., **27**: 23–34, 6 Abb.; Göttingen.
(1978 b): Einfluß organischer Substanzen auf die Löslichkeit von Schwermetallen. – Mitt. dt. bodenkdl. Ges., **27**: 181–192, 7 Abb.; Göttingen.

HESSISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT (1978 a): Topographische Karte 1:25.000 Bl. 5914 Eltville a. Rhein; Wiesbaden.
(1978 b): Topographische Karte 1:25.000 Bl. 5915 Wiesbaden; Wiesbaden.

KANDLER, O. (1970): Untersuchungen zur quartären Entwicklung des Rheintales zwischen Mainz, Wiesbaden und Bingen, Rüdesheim. – Mainzer geogr. Stud., **3**: 92 S., 35 Abb., 1 Tab.; Mainz.

(1977): Das Klima des Rhein-Main-Nahe-Raumes. – Mainzer geogr. Stud., **11**: 285–298, 8 Abb., 2 Tab.; Mainz.

KEILEN, K.; STAHR, K. & ZÖTTL, H. W. (1978): Mobile Fraktionen von Spurenelementen (Be, Cu, Cd, Co, Pb, V, Zn) in Böden des Bärhaldegranitgebietes. – Z. Pflanzenern. Bodenkde, **141**: 583–596, 4 Abb., 2 Tab.; Weinheim/Bergstr.

LAKANEN, E. & ERVIÖ, E. (1971): A comparision of 8 extractans for the determination of plant available micronutrients in soils. – Acta Agraria Fennica, **123**: 223–232; Helsinki.

LICHTFUSS, R. & BRÜMMER, G. (1979): Geochemische Ausgangsgehalte von Schwermetallen in Sedimenten schleswig-holsteinischer Fließgewässer. – Mitt. dt. bodenkdl. Ges., **29**: 549–554; Göttingen.

LINDNER, H.-U. (1982): Schwermetallgehalte von Böden im Stadtrandbereich von Mainz. – Unveröff. Staatsex.-Arb. Univ. Mainz: 200 S., 22 Abb., 20 Tab.; Mainz.

MAYER, R. (1978): Adsorptionsthermen als Regelgrößen beim Transport von Schwermetallen in Böden. – Z. Pflanzenern. Bodenkde., **141**: 11–28, 5 Abb., 6 Tab.; Weinheim/Bergstr.
(1981): Natürliche und anthropogene Komponenten des Schwermetallhaushalts von Waldökosystemen. – Göttinger bodenkdl. Ber., **70**: 292 S., 15 Abb., 26 Tab.; Göttingen.

MEHRA, O.-P. & JACKSON, M.-L. (1960): Iron oxide removel from soils and clays by a dithionit-citrat-system, buffered with Na-carbonate. – Clay and Clay Minerals, Proc. 7, National Congr. (Washington D. C.).

MEYNEN, E. & SCHMITHÜSEN, J. (1959–1961): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. – 1.–7. Lfg., 1090 S.; Bonn-Bad Godesberg (Bundesanst. Landeskde. u. Raumforsch.).

MINISTERIUM für SOZIALES, GESUNDHEIT und UMWELT des LANDES RHEINLAND- PFALZ (1982): Luftreinhalteplan Mainz-Budenheim. – 126 S., 55 Abb., 45 Tab.; Mainz (Strecker).

MUNSELL SOIL COLOR CHARTS (1971). – Baltimore, Maryland 21218, USA (Munsell Color Company).

RIEHM, H. & ULRICH, B. (1954): Quantitativ kolometrische Bestimmung der organischen Substanz im Boden. – Landwirtschaftl. Forsch., **6**: 173–176; Frankfurt/Main.

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1979): Lehrbuch der Bodenkunde. – 10. Aufl.: 394 S., 153 Abb., 77 Tab., 1 Farbtaf.; Stuttgart (Enke).
(1982): Lehrbuch der Bodenkunde. – 11. Aufl. (neu bearbeitet): 442 S., 186 Abb., 97 Tab., 1 Taf.; Stuttgart (ENKE).

SCHLICHTING, E. & ELGALA, A. M. (1975): Schwermetallverteilung und Tongehalte in Böden. – Z. Pflanzenern. Bodenkde., **138**: 563–571, 2 Abb., 2 Tab.; Weinheim/Bergstr.

SCHWERTMANN, U.; FISCHER, W. R. & FECHTER, H. (1982 a): Spurenelemente in Bodensequenzen. I. Zwei Braunerde-Podsol-Sequenzen aus Tonschieferschutt. – Z. Pflanzenern. Bodenkde., **145**: 161–180, 2 Tab.; Weinheim/Bergstr.
(1982 b): Spurenelemente in Bodensequenzen. II. Zwei Pararendzina-Pseudogley-Sequenzen aus Löß. – Z. Pflanzenern. Bodenkde., **145**: 181–196, 2 Tab.; Weinheim/Bergstr.

SEMMEL, A. (1968): Studien über den Verlauf jungpleistozäner Formung in Hessen. – Frankfurter geogr. H., **45**: 133 S., 35 Abb.; Frankfurt/Main.

UHLIG, H. (1964): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 150 Mainz. – Geogr. Landesaufn. 1:200.000: 52 S., 1 Kt.; Bad Godesberg.

(Bei der Schriftleitung eingegangen am 13. 6. 1986)

Anschrift des Verfassers:
Diplom-Geograph Lothar Hanke, Am Stollhenn 28, D-6500 Mainz 1

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Mitteilungen der POLLICHIA

Jahr/Year: 1987

Band/Volume: 74

Autor(en)/Author(s): Hanke Lothar

Artikel/Article: Schwermetalluntersuchungen an repräsentativen Bodenprofilen im Lennebergwald bei Mainz 115-141