

Mitt. österr. geol. Ges.	79 (1986) Umweltgeologie- Band	S. 131-142 5 Abb., 2 Tab.	Wien, Dezember 1986
--------------------------	--------------------------------------	------------------------------	---------------------

Schwermetallanreicherung und -mobilität im Waldboden

Von M. KAZDA, G. GLATZEL und L. LINDEBNER*)

Mit 5 Abbildungen und 2 Tabellen

Zusammenfassung

Die Buchenbestände des Wienerwaldes sind relativ stark durch den Schwermetalleintrag belastet. Die Orographie übt auf die Schwermetalldeposition einen entscheidenden Einfluß aus. So sind die Kuppen und Oberhänge viel stärker belastet als weniger exponierte Geländeteile. In den Buchenbeständen bleibt der Bereich extremer Schwermetallanreicherung meist auf einen schmalen Saum in unmittelbarer Stammnähe beschränkt. Blei wird in diesem Bereich am stärksten angereichert, wobei auch in tieferen Bodenschichten eine Zunahme der Gehalte deutlich wird. Als Folge hoher Einsickerungsmengen, niedriger pH-Werte des Bodens und hoher Konzentrationen starker Mineralsäuren im Stammabflußwasser wird ein beträchtlicher Anteil des deponierten Bleis in tiefere Bodenschichten verlagert.

In einer weiteren Untersuchung in Fichtenbeständen Oberösterreichs konnte eine unterschiedlich starke Bleianreicherung, die in direktem Zusammenhang mit der geographischen Lage und der Orographie steht, festgestellt werden. Die Gehalte an Blei liegen um mehr als das Dreifache höher, die von Kupfer und Zink etwas niedriger als für landwirtschaftliche Böden der gleichen geologischen Substrate ermittelt wurde. Im extrem sauren Waldboden des Kobernaufser Waldes konnte eine Mobilisierung des Eisens festgestellt werden, wobei dabei die sorbierten Schwermetalle (Pb, Cu, Zn) in Lösung gehen dürften.

Eine Gefährdung des Grundwassers durch die Schwermetallverlagerung kann bei basenreichem Unterboden (Wienerwald) kaum bevorstehen, wobei dies bei extrem sauren Böden des Kobernaufser Waldes nicht ausgeschlossen werden kann.

Summary

Heavy metal enrichment and mobility in forest soil

Forest stands in Vienna Woods show relative high pollution by heavy metals. Orography has significant influence upon the deposition processes. Hilltops and upper slopes exhibit the highest contents of heavy metals in the topsoil. In beech stands a small area, close to the stem base, has the highest heavy metal enrichment, especially of lead. Also the fraction of lead extractable with complexing agents increases in the vicinity of the stem base. High amounts of seepage water, low pH

*) Anschrift der Verfasser: Dipl.-Ing. Dr. M. KAZDA, Prof. Dipl.-Ing. Dr. G. GLATZEL und Dipl.-Ing. L. LINDEBNER: Institut für Forstökologie, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien, Österreich.

values of the soil and high concentration of acids in the stem flow water promote leaching of heavy metals into deeper soil strata.

Investigations of heavy metal enrichment in Norway spruce stands of Upper Austria showed that there is a different pattern of lead pollution due to geography and orographical effects. Compared with agricultural soils of the same geological formation the contents of lead in the topsoil are higher, those of copper and zinc lower. At extremely low pH values in the forest soil an increase of complexable iron with simultaneous leaching of lead, copper and zinc can be assumed.

In areas with high base saturation on deep soil no heavy metal leaching into ground water has to be feared, while in soils of extreme low pH a seepage of high soluble elements as manganese or cadmium in the ground water would be possible.

Inhalt

1. Einleitung	132
2. Standorte und Methoden	133
3. Ergebnisse	134
4. Schlußfolgerungen	140
Danksagung	141
Literatur	141

1. Einleitung

Waldökosysteme erfahren durch ihre Filterwirkung gegenüber Luftverunreinigungen vielfach höhere Stoffeinträge als Flächen mit niederwachsener Vegetation. Die trockene Deposition von schwermetallhaltigen Aerosolen und die Ausfilterung von schadstoffbelastetem Nebel an den stark gegliederten Oberflächen der Waldbestände zählen, neben dem Eintrag mit dem Niederschlag, zu den wichtigsten Komponenten der Schwermetalldeposition.

In Buchenbeständen wird der schadstoffbelastete Niederschlag bis zu einem Drittel mit dem Stammabfluß abgeleitet. Dadurch entstehen in unmittelbarer Stammnähe Bereiche mit extremen Veränderungen der Bodeneigenschaften, die sich in pH-Absenkung, Nährstoffauswaschung und Tonmineralzerstörung äußern (GLATZEL et al., 1983; GLAVAC et al., 1985; JOCHHEIM, 1985; WITIG, 1985; PAPRITZ, 1985). Zugleich ist der Boden um den Stammfuß durch hohe Anreicherung von weniger mobilen Schwermetallen gekennzeichnet (KOENIES, 1982; KAZDA & GLATZEL, 1984). Schwermetalle mit einer höheren Löslichkeit (Cd, Mn) werden in diesem Bereich verstärkt ausgewaschen. Bei anderen (Zn, Cu) kann trotz Anreicherung im Oberboden auch eine Auswaschung ihrer löslichen Fraktion angenommen werden (KAZDA & GLATZEL, 1984).

Um geographische Unterschiede in Schadstoffbelastung zu ermitteln, wurden im Rahmen einer Voruntersuchung aus exponierten Fichtenbeständen in vier Waldgebieten Oberösterreichs Bodenproben entnommen und auf Schwermetalle analysiert. Die Ergebnisse lassen nicht nur geographische Unterschiede erkennen, sondern in einigen Fällen auch Schlüsse über die Schwermetallmobilität unter extremen Bodenbedingungen zu.

2. Standorte und Methoden

2.1.1. Untersuchungen im Wienerwald

Für diese Untersuchungen wurden 3 Waldstandorte auf flachen Höhenrücken des nordöstlichen Wienerwaldes in unterschiedlicher Entfernung zu den großstädtischen Emissionsquellen ausgewählt. Die Böden sind Pseudogleye auf unterschiedlich kalkhaltigen Flyschsandsteinen. Sie sind tiefer als 1 m entkalkt und zeigen in etwa 40 bis 60 cm Tiefe bindige, periodisch wasserstauende Horizonte. Auf jeder Probe­fläche wurde in einem Altbuchenbestand (Alter 100 bis 120 Jahre) ein Probebaum herrschender soziologischer Stellung ausgewählt. Vom Stamm weg wurden im Einsickerungsbereich des Stammabflusses in acht Abständen von 0,1 bis 3 m Bodenbohrkerne (70 mm Durchmesser) geworben und aus vier Profiltiefen (0–3, 10–13, 20–23, 30–33 cm) Proben entnommen.

In einer darauf folgenden Untersuchung wurde anhand von Boden- und Blattproben versucht, die Belastung von 152 Buchenaltbeständen des Wienerwaldes zu ermitteln. Je Probe­fläche wurden aus dem Infiltrationsbereich des Stammabflusses von herrschenden Buchen, sowie aus dem durch Stammabfluß nicht betroffenen Waldboden, 7 Mineralbodenproben (0–5 cm) geworben und zu einer Mischprobe vereinigt.

2.1.2. Untersuchungen in Oberösterreich

Ziel dieser Voruntersuchung war, die Möglichkeiten einer Belastungskartierung mit Hilfe von Gesamtgehalten wenig mobiler Schwermetalle zu prüfen. Zu diesem Zweck wurden in exponierten Fichtenaltbeständen jeweils sieben bis neun Proben der obersten 5 cm des Mineralbodens entnommen. Es wurden folgende Waldgebiete untersucht (in Klammern Anzahl der Bestände): Böhmerwald (3), Hongar (1), Kobernaußerald (1), Weihart-Forst (3).

2.2. Probenvorbehandlung und Analysen

Nach der Probennahme wurden die Proben durch ein 2 mm Sieb aus Edelstahl gesiebt und die pH-Werte in Suspensionen mit deionisiertem Wasser und 0,1 m KCl (Volumsverhältnis 1 : 2) elektrometrisch bestimmt.

Die Gesamtgehalte an Schwermetallen wurden im Königswasseraufschluß (AICHBERGER et al., 1981, HORAK et al., 1982) bestimmt. 1 Gramm des im Porzellanmörser gemahlten Feinbodens wurde mit 13 ml Königswasser (HNO_3 und HCl , 3 : 1) versetzt und über Nacht stehen gelassen. Danach wurden die Aufschlußlösungen bei 125° C 2,5 Stunden lang siedend gekocht. Nach dem Abkühlen wurde mit bidestilliertem Wasser auf 75 ml verdünnt und filtriert. Obwohl im Königswasseraufschluß die Silikate nicht vollständig zerstört werden, erschien dieses Verfahren für unsere Problemstellung als annehmbar, da die Gehalte an deponierten Schwermetallen die Ausgangsgesteinsbedingten Gehalte wesentlich übersteigen.

Die komplexierbare Fraktion der Schwermetalle wurde im AED-Auszug (1 m Ammoniumacetat, 1 m Essigsäure, 0,002 m DTPA) bestimmt (HORAK et al., 1982). Dazu wurden 5 Gramm Feinboden mit 50 ml der auf pH 4,65 eingestellten Auszugslösung bei 20° C 2 Stunden geschüttelt. Diese Lösung stellt ein relativ starkes

Auszugsmittel dar. Diese Auszugsmethode entspricht jedoch am besten den Bedingungen in den untersuchten Waldböden (extrem niedrige pH-Werte, Einwirkungsbereich von starken Mineralsäuren und niedermolekularen organischen Verbindungen).

In den Auszügen wurden die Schwermetalle atomabsorptionsflammenphotometrisch bestimmt.

3. Ergebnisse

3.1. Untersuchungen in Buchenbeständen des Wienerwaldes

Der Bereich extremer Schwermetallanreicherung bleibt meist auf einen schmalen Saum in unmittelbarer Stammnähe beschränkt. Dabei werden unlösliche Verunreinigungen an der Bodenoberfläche angereichert, während lösliche Bestandteile in tiefere Bodenschichten verlagert werden, wo sie je nach Bodenreaktion, Redoxbedingungen und anderen Bodeneigenschaften immobilisiert werden können. Die Anreicherung um den Stammfuß nimmt in der Reihenfolge Pb, Cu, Zn, Fe, Ni, Cd ab.

Von allen untersuchten Schwermetallen wird Blei am stärksten angereichert, wobei auch in tieferen Bodenschichten eine Zunahme der Gesamtgehalte deutlich wird (Abb. 1 a). Die im AED-Auszug gemessenen Werte (Abb. 1 b) zeigen ähnlichen Verlauf wie die Gesamtgehalte. Daß Blei in so hohem Maße AED-extrahierbar bleibt, ist auf die niedrigen pH-Werte zurückzuführen. Abbildung 1 c stellt den Anteil der komplexierbaren Fraktion am Gesamtgehalt dar. Sie zeigt, daß trotz hoher Absolutgehalte, der Anteil der austauschbaren Fraktion im stammnahen Oberboden am geringsten ist, in den tieferen Horizonten hingegen am höchsten.

Aus der Abbildung 1 geht hervor, daß als Folge hoher Einsickerungsmengen, niedriger pH-Werte des Bodens und hoher Konzentrationen starker Mineralsäuren im Stammabflußwasser ein beträchtlicher Anteil des deponierten Bleis in tiefere Bodenschichten verlagert wird. Daraus dürften die hohen Gehalte an komplexierbarem Blei in größerer Bodentiefe resultieren.

Auch das Verhalten von Eisen deutet auf eine verstärkte Zerstörung von Tonmineralen durch Säureeinwirkung im stammnahen Bereich hin. Die Gehalte an komplexierbarem Eisen zeigen im Stammfußbereich in allen Tiefen einen Anstieg gegenüber den Zwischenflächen (Abbildung 2). Die Ursache dafür dürfte Ausdruck des Überganges des Bodens in den Eisen-Pufferbereich (ULRICH, 1983) sein. Da bei den Bodenuntersuchungen sehr starke Versauerung, fast vollständige Ca- und Mg-Auswaschung und Verarmung an Aluminium-Komplexen im Stammfußbereich festgestellt wurde (GLATZEL et al. 1983), wird der Säureeintrag zum Teil durch die Freisetzung von Fe^{3+} -Ionen abgepuffert. Dadurch wird auch die Freisetzung der an Tonmineralen gebundenen Schwermetalle verstärkt. Die im Stammfußbereich festgestellte Verarmung an Aluminium und Mangan, fördert ebenfalls die Schwermetallmobilität (PETERSON & GIERLING, 1981).

Unter diesen Bedingungen ist jedoch die organische Substanz an der Schwermetallfixierung wesentlich beteiligt. Die Abbildung 3 zeigt den gesicherten Zusammenhang ($r = 0,81$) zwischen den Kohlenstoff- und Bleigehalten von Böden aus dem Stammfußbereich von 152 Buchenaltbeständen im Wienerwald. Die pH-Werte

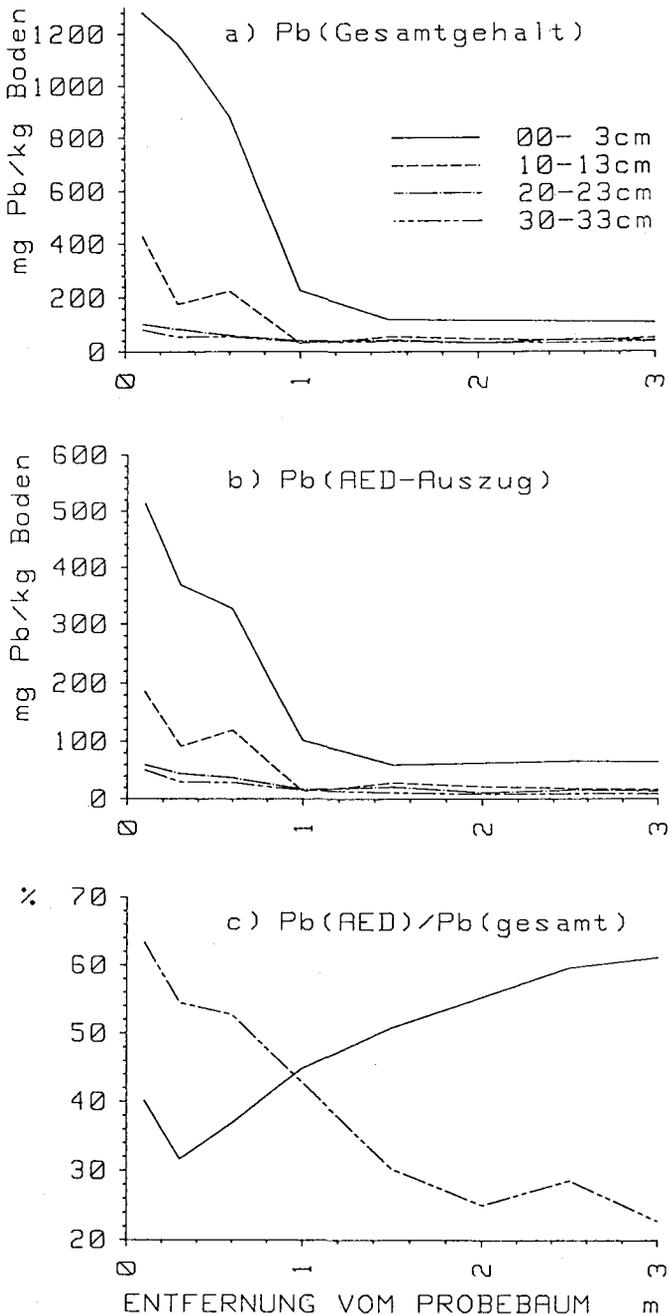


Abb. 1: Bleigehalte in Bodenprofilen in Fallinie abwärts vom Probebaum

a) Gesamt-Blei im HCl/HNO₃-Aufschluß

b) Komplexierbares Blei im AED-Auszug

c) Anteil der komplexierbaren Fraktion am Gesamtgehalt

BAUM Nr. 1 WINDISCHHUETTE OKT 1982
Fe in verschiedenen Bodentiefen

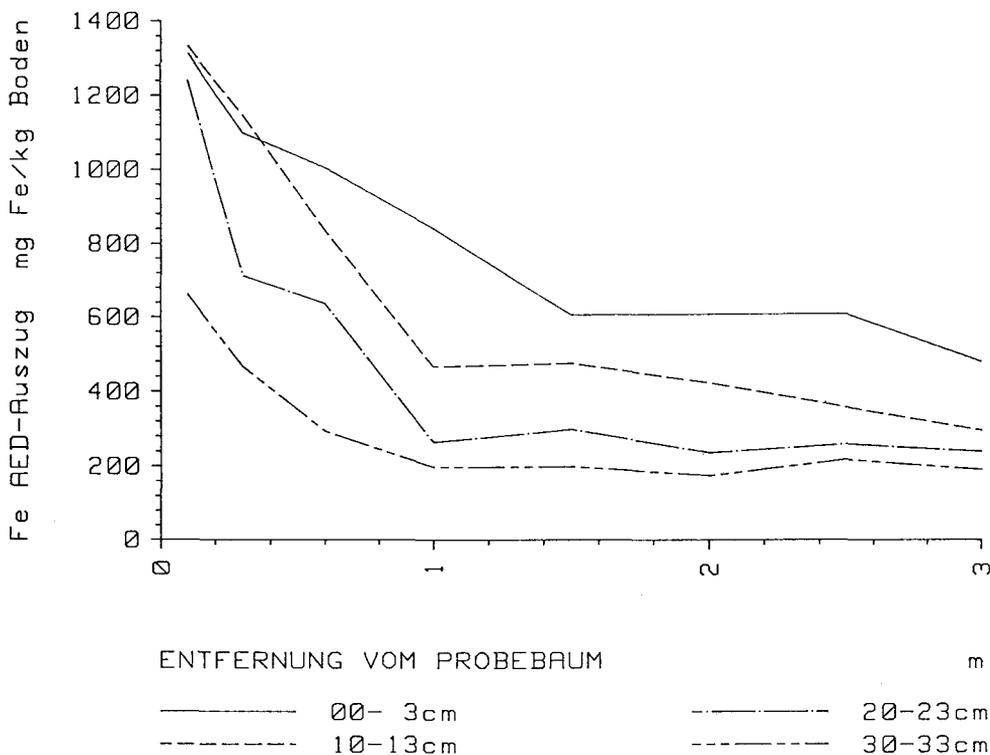


Abb. 2: AED-komplexierbares Eisen im Einsickerungsbereich des Stammabflusses.

(0,1 m KCl) lagen überwiegend zwischen pH 2,8 und 3,3. Für diesen Zusammenhang können zwei Ursachen bestehen. Erstens ist die organische Substanz primär viel stärker als die anorganischen Bodenbestandteile durch Schwermetalle belastet, zweitens besteht eine Bindungsaffinität von Blei zu höhermolekularen Huminstoffen (KÖNIG et al., 1986). Dies wird auch durch die experimentellen Befunde von HERMS & BRÜMMER (1980) bestätigt, die feststellen konnten, daß bei pH-Werten zwischen 3 und 5 Proben mit Zugabe von organischer Substanz viel niedrigere Lösungsgehalte von Blei und Kupfer zeigen als Proben ohne organische Substanz.

Für die Verlagerung von Blei im Stammfußbereich konnten auch bei der Untersuchung von 152 Buchenstandorten im Wienerwald genügend Hinweise gefunden werden. Die extrem versauerten und durch Streuabwehung auch humusarmen Böden des Stammfußbereiches der Kuppen und Rücken weisen, trotz ihrer Ausgesetzttheit für Filterdeposition, häufig geringere Bleigehalte auf als die weniger exponierten Oberhänge (Abbildung 4 a). Offenbar werden in den sauren und humusarmen Böden des Stammfußbereiches der Oberhänge und Kuppen erhebliche Bleimengen in tiefere Bodenhorizonte verlagert. Die Bleigehalte des Oberbodens der

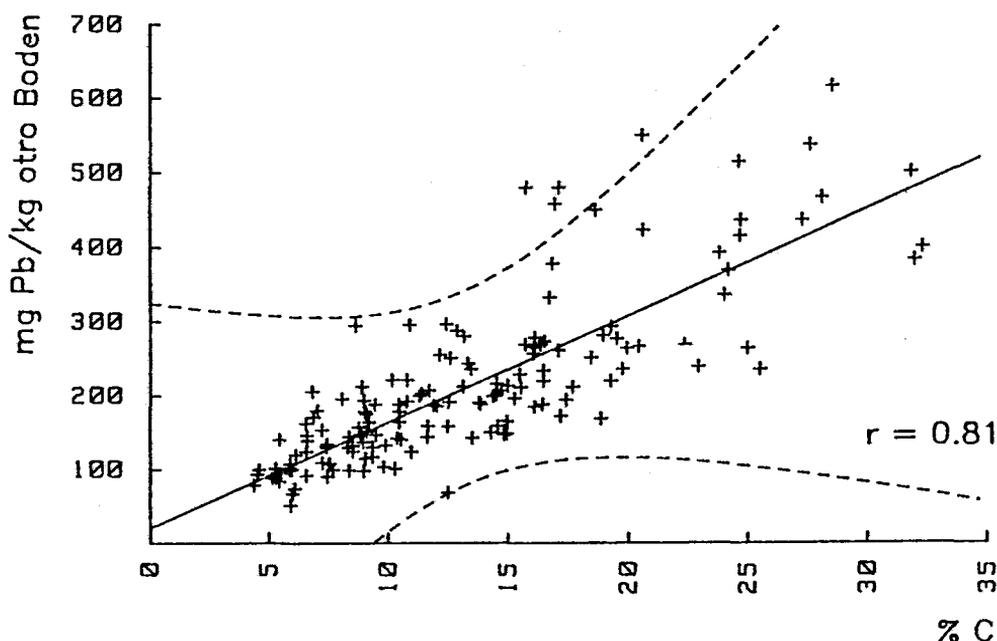


Abb. 3: Zusammenhänge zwischen dem Kohlenstoffgehalt und Bleigehalt (HNO_3 -Aufschluß) von Böden aus dem Stammfußbereich auf 152 Probeflächen im Wienerwald (jeweils Mischprobe von 7 Probebäumen).

Zwischenflächen (Abbildung 4 b) zeigen die erwartete höhere Belastung der stärker exponierten Geländeteile. Im Stammfußbereich hat der größere Säureeintrag im Verein mit geringerer Speicherleistung der Böden zur Tiefenverlagerung von Blei geführt.

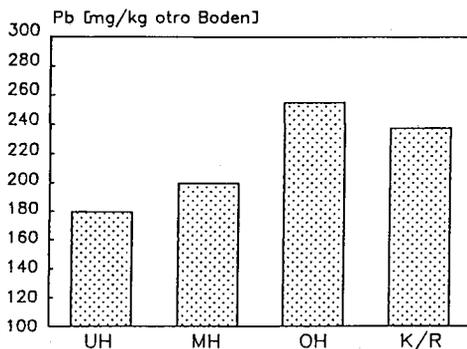
Ein wichtiges Ergebnis dieser Untersuchung ist auch der Nachweis von weitaus höherer Belastung der exponierten Geländeteile durch Schadstoffeintrag. Diese Feststellung ist auch in die ursächlichen Zusammenhänge der neuartigen Waldschäden einzubeziehen.

3.2. Untersuchungen in Fichtenbeständen Oberösterreichs

Die Schwermetallanreicherung im Boden ist ein Ausdruck der Depositionsprozesse und des Retentionsvermögens des Bodens. Die Höhe des Schadstoffeintrages in einem Gebiet ist nicht nur von dem Schadstoffgehalt der Atmosphäre, sondern auch von der Orographie abhängig (CHARURTES & CHOULARTON, 1984; RYAN et al., 1984; LINDEBNER; 1986), vgl. auch Abbildung 4. Die Speicherfähigkeit des Bodens wird bei Schwermetallen hauptsächlich durch die pH-Werte und den Gehalt an organischer Substanz, Tonmineralen und pedogenen Oxiden bestimmt.

Die pH-Werte liegen in allen untersuchten Beständen sehr niedrig, was insbesondere bei den untersuchten Standorten im Hongar trotz basenreicher Ausgangsgesteine der Flyschzone überraschend ist. Auch die Ausgangssubstrate im Weilhart-Forst (Schotter) und Kobernauffer Wald (Molasse) ließen so niedrige pH-Werte nicht

a) Stammnahbereich



b) Zwischenflächenbereich

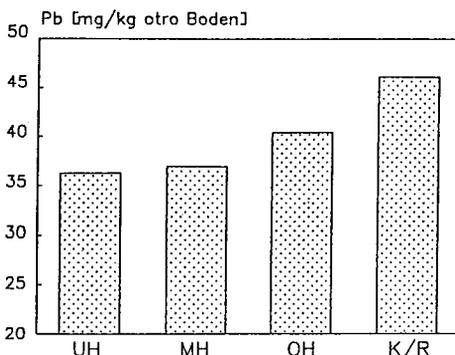


Abb. 4: Bleigehalte im Oberboden von 152 Buchenwäldern des Wienerwaldes nach topographischer Zugehörigkeit der Probeflächen geordnet

a) Stammfußbereich

b) Zwischenflächenbereich

UH . . . Unterhang

MH . . . Mittelhang

OH . . . Oberhang

K/R . . . Kuppe/Rücken

vermuten. Neben der rezenten, in Österreich ausreichend dokumentierten Waldbodenversauerung (STÖHR, 1984), liegt die Ursache sicherlich auch im Biomasseentzug und anderen weiter zurückliegenden anthropogenen Einflüssen.

Die höchsten Bleigehalte konnten auf den Versuchsflächen im Böhmerwald ermittelt werden (Tabelle 1). Die direkten Messungen des Eintrages von Niederschlagshauptkomponenten ergaben sehr hohe Werte, wobei dieses Gebiet hohen Einträgen aus nördlichen sowie südwestlichen Richtungen ausgesetzt ist (GLATZEL et al. 1986).

Auch die Werte im Hongar und Kobernauserwald sind als hoch einzustufen. Die Höhe der Schadstoffeinträge wird hier weitgehend durch die Orographie bestimmt. So erfahren exponierte Geländeerhebungen die höchsten Einträge. Dies zeigt sich auch in der Schwermetallanreicherung im Boden. Aus diesem Grund liegen die Werte aus dem Böhmerwald, Hongar und Kobernauser Wald signifikant höher als die vom Weilhart-Forst.

Die Elemente Blei, Kupfer und Zink korrelieren untereinander sehr stark und zeigen negative Korrelationskoeffizienten mit Eisen und etwas schwächere auch mit Aluminium. Dieser Boden zeigt auch im Vergleich zu anderen untersuchten Standorten die niedrigsten Aluminium- und die höchsten Eisengehalte im Komplexbildnerauszug. Die Säurepufferung dieses Bodens erfolgt also nunmehr überwiegend durch die Freisetzung von Eisen. Aus den Korrelationen der Tabelle 2 kann man folgern, daß bei einer Zunahme des komplexierbaren Eisens die mobile Fraktion der anderen Schwermetalle (Pb, Cu, Zn) abnimmt (Abbildung 5).

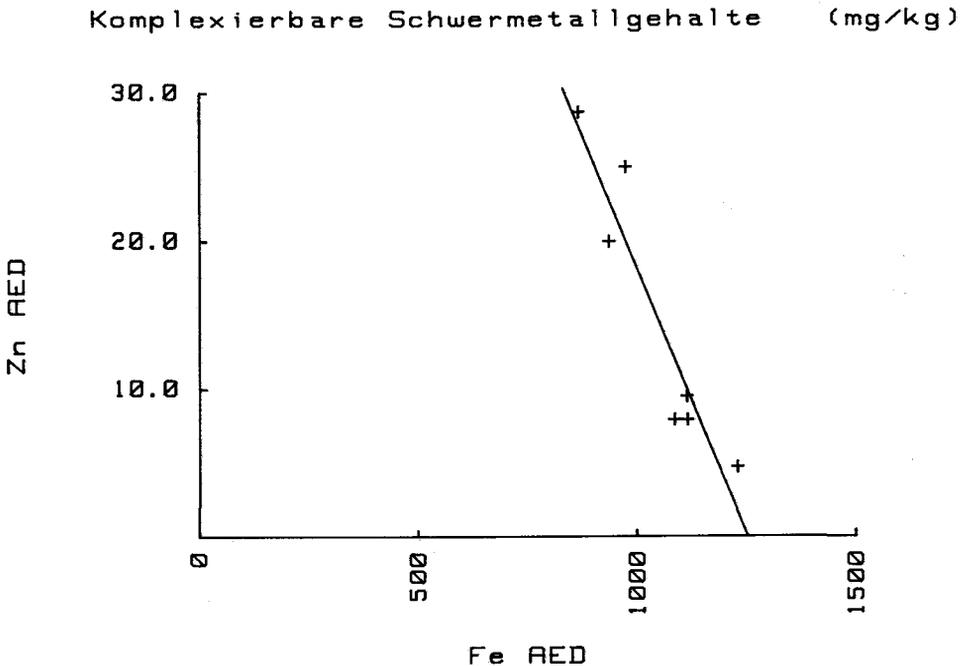


Abb. 5: Bodenuntersuchung Kobernauffer Wald: Zusammenhang zwischen Eisen- und Zinkgehalten im AED-Auszug.

Unter den Bedingungen der Eisenfreisetzung werden die Schwermetalle verstärkt mobil und sie werden so weit in die Tiefe verlagert, bis ihre löslichen Verbindungen durch den Anstieg der pH-Werte bzw. Änderung anderer Bodeneigenschaften ausgefällt werden.

4. Schlußfolgerungen

Da Waldökosysteme aufgrund ihrer stark gegliederten Oberfläche bis um vierfach höheren Schadstoffeinträgen als andere Flächen ausgesetzt sind, stellen sie eine Art Deponie für die in die Atmosphäre freigesetzten Abfallprodukte dar. In Waldökosystemen werden die eingetragenen Stoffe festgehalten, so lange die Retentionskapazität nicht überschritten wird.

Die Retentionskapazität ist im Falle von Schwermetallen stark pH-abhängig. Bei fortlaufendem Säureeintrag wird es immer mehr zur Verlagerung der toxischen Elemente in tiefere Bodenschichten kommen. Ein Beispiel für diesen Fall bieten die Werte aus dem stammnahen Bereich von exponierten Buchenbeständen des Wienerwaldes und die Bodenuntersuchungen aus dem Kobernauser Wald. Ob durch diese Tiefenverlagerung der Schwermetalle auch das Grundwasser betroffen sein könnte, hängt von den Eigenschaften des Unterbodens ab.

Da die Unterböden im Wienerwald noch überwiegend basenreich sind, dürften die ausgewaschenen Schwermetallmengen in tieferen Bodenschichten ausgefällt werden und die Hangsickerwässer und das Grundwasser nicht unmittelbar bedrohen. Anders könnte es in den Beständen ablaufen, die auf tief entkalkten Schottern (Kobernauser Wald) oder basenarmen Silikatgesteinen (Böhmerwald) stocken. Dort wäre eine bis ins Grundwasser reichende Tiefenverlagerung der leicht löslichen Schwermetalle wie Mangan oder Cadmium vorstellbar.

Da eine Kalkung der Waldbestände aus finanziellen und technischen Gründen kaum möglich sein wird, bleibt nur die Lösung, die Emissionen weiter zu reduzieren. Nach einer Untersuchung von RÜHLING & TYLER (1983) hat innerhalb der letzten zwei Dezennien eine beträchtliche Abnahme der Schwermetalleinträge in Nordeuropa stattgefunden. Auch wenn man einen ähnlichen Trend für Mitteleuropa annehmen würde, ist es trotzdem notwendig, die Schwermetallemissionen weiter zu reduzieren, um langfristig die Waldökosysteme und den Menschen selbst vor den Folgen der Umweltbelastung zu schützen.

Danksagung

Diese Forschungsprojekte wurden im Rahmen des Projektes P 4855 des Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung in Österreich durchgeführt. Für zusätzliche Unterstützung danken wir der MA 22 der Gemeinde Wien.

Literatur

- AICHBERGER, K., BACHLER, W. & PICHLER, H.: Schwermetalle in Böden Oberösterreichs und deren Verteilung im Bodenprofil. – *Landwirtschaftl. Forschung, Sonderheft* 38, 1981.
- CHARURTES, D. J. & CHOUARTON, T. W.: Acid deposition in rain over hills. – *Atmospheric Environment* 18, 9: 1905–1908, 1984.
- GLATZEL, G., SONDEREGGER, E., KAZDA, M. & PUXBAUM, H.: Bodenveränderungen durch schadstoffangereicherte Stammablaufniederschläge in Buchenbeständen des Wienerwaldes. – *AFZ* 26/27: 693–694, 1983.
- GLATZEL, G., KAZDA, M., STÖHR, D., KATZENSTEINER, K. & MARKART, G.: Deposition langzeitwirksamer Schadstoffe in Wäldern und Einflüsse auf den Ionenhaushalt. Endbericht 1985 der FIW, 1986.
- GLAVAC, V., JOCHHEIM, H., KOENIES, H., RHEINSTÄDTER, R. & SCHÄFER, H.: Einfluß des Stammablaufwassers auf den Boden im Stammfußbereich von Altbuchen in unterschiedlich immissionsbelasteten Gebieten. – *AFZ* 51/52: 1397–1398, 1985.
- HERMS, U. & BRÜMMER, G.: Einfluß der Bodenreaktion auf Löslichkeit und tolerierbare Gesamtgehalte an Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium und Blei in Böden und kompostierten Siedlungsabfällen. – *Landwirtsch. Forschung* 33, 4, 408–423, 1980.
- HORAK, O., ZVARA, J., REBLER, R. & HENGER, R.: Die Verfügbarkeit von Magnesium und einigen Mikroelementen für Grünmais in einem Gefäßversuch mit Klärschlamm. – *Die Bodenkultur* 33, 298–303, 1982.

- JOCHHEIM, H.: Der Einfluß des Stammablaufwassers auf den chemischen Bodenzustand und die Vegetationsdecke in Altbuchenbeständen verschiedener Waldbestände. – Ber. Forschungszentr. Waldökosysteme/Waldsterben, 13, Univ. Göttingen 1985.
- KAZDA, M. & GLATZEL, G.: Schwermetallanreicherung und Schwermetallverfügbarkeit im Einsickerungsbereich von Stammabflußwasser in Buchenbeständen (*Fagus sylvatica*) des Wienerwaldes. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 147: 743–752, 1984.
- KOENIES, H.: Über die Eigenart der Mikrostandorte im Fußbereich der Altbuchen unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetallgehalte in der organischen Auflage und im Oberboden. – Dissertation, Gesamthochschule Kassel 1982.
- KÖNIG, N., BACCINI, P. & ULRICH, B.: Der Einfluß der natürlichen organischen Substanz auf die Metallverteilung zwischen Boden und Bodenlösung in einem sauren Waldboden. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 149: 68–82, 1986.
- LINDEBNER, L.: Dissertation (in Vorbereitung), 1986.
- PAPRITZ, A.: Stoffeintrag und Bodenveränderungen im Stammabflußbereich einer Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.): Literaturübersicht und Untersuchung des zeitlich-räumlichen Verlaufs der Infiltration des Stammabflußwassers. – Diplomarbeit, ETH Zürich 1985.
- RÜHLING, A. & TYLER, G.: Recent changes in the deposition of heavy metals in Northern Europe. – Water, Air and Soil Pollution 22: 173–180, 1984.
- RYAN, W., LAMB, B. & ROBINSON, E.: An atmospheric tracer investigation of transport and diffusion around a large, isolated hill. – Atmospheric Environment 18, 10: 2003–2021, 1984.
- STÖHR, D.: Waldbodenversauerung in Österreich. Hrsgb. G. GLATZEL, Institut für Forstökologie, Universität für Bodenkultur, Wien 1984.
- ULRICH, B.: Effects of acid deposition. [In:] S. BEILKE & A. J. ELSHOUT [Eds.]: Acid Deposition. – D. Reidel, Dordrecht, Boston, London 1983.
- WITTIG, R., BALLACH, H.-J. & BRANDT, C. J.: Increase of number of acid indicators in the herb layer of the millet grass-beech forest of the Westphalian Bight. – Angewandte Botanik 59, 219–232, 1985.

Bei der Schriftleitung eingelangt am 4. Juli 1986.