

Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf.	34	471 - 492, 11 Abb., 2 Tab.	Krefeld, Dez. 1986
------------------------------------	----	----------------------------	--------------------

Boden, Bodenlösung und Vegetation auf Standorten mit starker Schwermetallbelastung im ehemaligen Bergbaurevier Mechernich

Von HUBERT WICHTMANN *

Heavy metal, Pb, Zn, concentration, contamination, soil, soil solution, plant, ore mining district (Mechernich), Rhenish Massif (Eifel Mts.), Northrhine-Westphalia

Kurzfassung: Auf bleireichen und zinkhaltigen Böden des ehemaligen Bergbaureviers Mechernich wurden Untersuchungen zur Klärung des Transfers von Schwermetallen vom Boden in die Pflanze durchgeführt. Dazu wurde über eine Vegetationsperiode hinweg die Zusammensetzung der Bodenlösung an zehn Meßstationen in zwei Bodentiefen kontrolliert. Die gefundenen Blei- und Zinkkonzentrationen waren sehr unterschiedlich. Sie lagen teilweise weit über den Toxizitätsgrenzen und ließen sich eindeutig mit Vegetationsschäden und Schwierigkeiten bei der Durchführung der Rekultivierung parallelisieren.

Die Kontrolle der Bindungsform der gelösten Schwermetalle hat ergeben, daß Blei im Gegensatz zu Zink größtenteils als organische Komplexverbindung in der Bodenlösung vorliegt.

Aus der Konzentrationsverteilung im Bodenprofil lassen sich Lösungs- und Sorptionsmechanismen ableiten. In den Ah- und Ae-Horizonten von Podsolen überwiegen die Lösungsvorgänge, in den Bh- und Bv-Horizonten die Sorptionsmechanismen.

Gefahren der Grundwasserkontamination durch Blei sind im Untersuchungsgebiet nur lokal vorhanden. Da bei Zink die Sorptionsmechanismen weniger ausgeprägt sind, ist trotz der geringen Zn-Gehalte im Boden und in der Bodenlösung die Gefahr der Grundwasserbelastung durch Zink wesentlich größer.

In der Bodenlösung wurden außerdem verbreitet nur sehr geringe Manganwerte festgestellt. Sie ließen Manganmangel erkennen und können für Vegetationsschäden im ehemaligen Bergbaurevier von größerer Bedeutung sein als die teilweise hohen Schwermetallgehalte.

[Soil, soil solution and vegetation in locations with a high charge of heavy metals deposits in the former mining area of Mechernich]

Abstract: Tests were carried out to clarify the transfer of heavy metals in the soil to the plant life at the site of the former mining area in Mechernich, where heavy concentrations of lead and zinc are present in the ground. The composition of the soil solution during a period of vegetation, was examined at two different depths and at ten different sites. Lead and zinc concentrations were determined that varied greatly. Some of the concentrations fell into the region which exceeded the level of toxicity, and parallels can be drawn to vegetation damage and difficulties in carrying out recultivation.

Analysis of the form of the chemical bonds in the heavy metal solutes revealed that lead, in contrast to zinc, exists to the greater extent as organic chemical complexes within the soil solutions.

* Anschrift des Autors: Dr. H. WICHTMANN, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, De-Greif-Strasse 195, D-4150 Krefeld 1

The distribution of the concentration levels in the soil profiles allows analysis of solution and sorption. The Ah and Ae horizons of the podzols are primarily indications of solution and the Bh_s and Bv horizons the indications of sorption.

The danger of a lead contamination in the ground water of the test areas is only present locally. Since the sorption level of zinc is low, despite the fact that the zinc content of the soil and the soil solutions are smaller, there is a greater danger that it will be the zinc that will load the ground water.

The soil solutions also contained only a very small amount of manganin. It is possible that this manganin deficiency is a greater factor in the damage to the vegetation within the former mining region in Mechernich than is the sporadic high heavy metal content of the soil.

[Sol, eau du sol et végétation dans stations avec une grande charge des métaux lourds dans l'ancienne exploitation des mines de Mechernich]

Résumé : Des recherches, du sol riche en plomb et contenant du zinc de l'ancienne exploitation des mines de Mechernich, ont été faites pour expliquer le transfert des métaux lourds du sol aux plantes. La composition de l'eau du sol a été contrôlée au delà d'une période de végétation, dans dix stations pédologiques et en deux profondeurs du sol. Les concentrations de plomb et de zinc trouvées, étaient très différentes. Elles étaient en partie au-dessus de la limite toxique et se laissent clairement voir en parallèle avec les dommages de la végétation et les difficultés dans l'exécution de la réculture.

Le contrôle de la forme de liaison des métaux lourds dissous a donné que le plomb, à l'opposé du zinc, dépose en grande partie une liaison organique complexe dans l'eau du sol.

De la concentration répartie sur les profils du sol, se laissent dériver des mécanismes de la solution et de la sorption. Dans les Ah- et Ae-horizons de podzols les processus de la solution prédominent, ainsi que dans les Bh_s- et Bv-horizons les mécanismes de la sorption.

Les dangers de contamination de l'eau potable par le plomb n'existent seulement que dans la région locale contrôlée. Cependant les mécanismes de la sorption du zinc sont moins marqués, malgré la teneur en zinc petit du sol et dans l'eau du sol, le danger de contamination de l'eau potable est essentiellement grand.

En outre, on a constaté la présence d'une très petite teneur en manganèse, dans l'eau du sol. Il est possible que ceci endommage la végétation dans l'ancienne exploitation des mines de Mechernich, l'insuffisance en manganèse est de signification plus importante que la haute teneur en partie des métaux lourds.

1. Problemstellung

Ein beträchtlicher Teil der Umweltbelastung durch Schwermetalle besteht in der Emission von Schadstoffen in die Atmosphäre. Aus der Luft aber gelangen die Schadstoffe früher oder später in den Boden und sammeln sich dort von Jahr zu Jahr stärker an. Dabei bilden sie entweder eine neue Quelle der Umweltbelastung oder aber verstärken das bereits vorhandene natürliche Potential durch die zunehmende Konzentration. Untersuchungen zum Schwermetallhaushalt der Böden (MAYER 1981) haben diesen Vorgang aufgezeigt und auf die Möglichkeit einer zunehmenden Gefährdung aufmerksam gemacht.

Anders wiederum ist die Situation in Gebieten der Schwermetallerzeugung oder -verarbeitung wie in Stolberg und Mechernich. Dort gibt es große Areale mit Schwermetallkonzentrationen vor allem an Blei (Abb. 1), aber auch an Zink, die weit über die normale Belastung hinausgehen (SCHNEIDER 1982, SCHALICH & SCHNEIDER & STADLER 1986; dieser Band, S. 11–91). Von den Halden und den schwermetallreichen Rückständen der Erzaufbereitung ge-

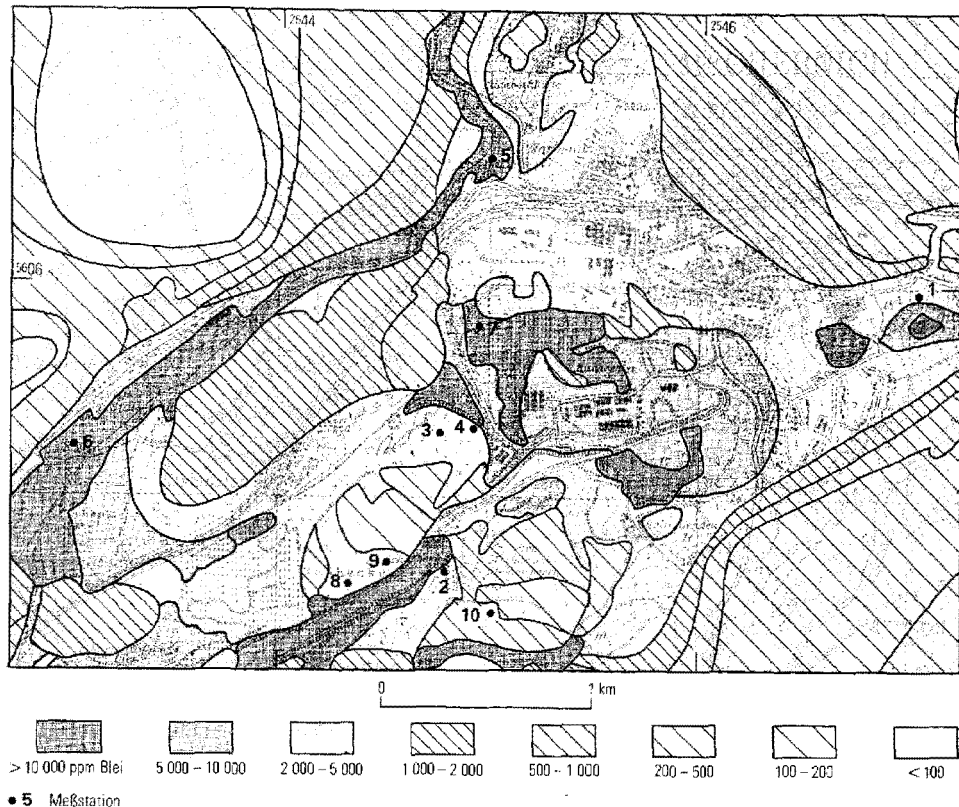


Abb. 1 Lage der Meßstationen 1 – 10 und Bleigehalt des Bodens nach SCHALICH & SCHNEIDER & STADLER (1986: Taf. 2)

Fig. 1 Location of field sites 1 – 10 and lead content of the soils after SCHALICH & SCHNEIDER & STADLER (1986: Taf. 2)

hen direkte Gefahren aus, wenn das Material durch Wind und Wasser verfrachtet Atmosphäre und Boden verunreinigt oder Futter- und Nahrungsmittel kontaminiert. Karten des Bleigehalts lassen den Grad solcher Gefährdung gut erkennen und sind für Vorsorgemaßnahmen eine wichtige Hilfe geworden.

Wegen der Schwierigkeiten bei der Rekultivierung aufgelassener Bergwerksflächen in Mechnich stellte sich schon früh die Frage auch nach der Vegetationsfeindlichkeit der Schwermetalle im Boden (BUTZKE 1970). Da es an Erfahrungen und analytischen Methoden fehlte, um den vegetationswirksamen, das heißt löslichen Anteil der Schwermetalle zu bestimmen, konnte sie seinerzeit nicht beantwortet werden.

Ähnlich verhielt es sich im Raume Stolberg mit der Erwartung, durch Bodenuntersuchungen zu klären, „in welchem Maße eine Gefährdung des Weideviehs neben der Schwermetallbelastung aus der Luft durch Schwermetallaufnahme aus dem Boden erfolgt“. Auch bei den Unterschieden im Schwermetallgehalt von Obst und Gemüseproben ließ sich vermuten, daß „neben den industriellen Emissionen auch örtlich stark unterschiedliche Schwermetall-

gehalte in den Gartenböden von Bedeutung sind". Sowohl die Gefährdung des Weideviehs wie auch die Kontamination von Nahrungsmitteln wurden in direktem Zusammenhang mit der Löslichkeit der Schwermetalle gesehen (Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen 1975).

Ein ähnliches Problem besteht auch im Zusammenhang mit dem neuartigen Waldsterben. „Der Anstieg der Schwermetallvorräte birgt potentielle Gefahren in sich“, und es besteht zur Zeit noch eine Forschungslücke in bezug auf „Langzeiteffekte verschiedener Schadstoffe in den für die Schadensgebiete repräsentativen Konzentrationen“ (Bundesminister für Forschung und Technologie 1985). Auch Schwermetalle können zu dem Komplex der Stressoren zählen, die Waldsterben hervorrufen.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, die Beziehungen zwischen Bodenbelastung und Vegetation im Sinne der Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle analytisch zu erfassen. Eine gute Übersicht über frühere Verfahren zur Bestimmung der aktuell umweltrelevanten Schwermetalle gibt HERMANN (1979). Vergleichende Untersuchungen mit 23 Extraktionsmitteln führten RIETZ & SÖCHTIG (1981) durch, aber „eine für alle Böden gültige Methode zur Bestimmung der verfügbaren Gehalte wurde bisher nicht gefunden und wird voraussichtlich auch in Zukunft nicht gefunden werden“ (FRÜCHTENICHT & VETTER 1982). Auch nach PLUQUET (1983) sollte deshalb der Frage nach der Verfügbarkeit von Schwermetallen durch zusätzliche Untersuchungen verstärkt nachgegangen werden.

Zur Klärung der Beziehungen zwischen Boden und Vegetation hatte ERNST schon 1975 die Forderung aufgestellt: „Zur Beurteilung der Schwermetalle im Boden ist die Bodenlösung zu untersuchen.“ Ihre Zusammensetzung soll offenbar auch ohne die Bestimmung des Gesamtgehaltes bereits „allein ein geeignetes Maß für die ökologisch wirksame Schadstoffmenge sein“ (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982). Die Angabe von Toxizitätsgrenzen (das ist die Grenzkonzentration für eine beginnende Schädigung) wäre ohne diese Erwartung kaum sinnvoll. Sie wurden allerdings aus Untersuchungen mit Nährlösungen gewonnen und werden für Blei mit ca. 10 mg Pb/l, bei Zink mit etwa 2,5 mg Zn/l angegeben (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982).

Nun liegen einerseits die bisher in der Bodenlösung gefundenen Werte meist um zwei bis drei Zehnerpotenzen niedriger als die angegebenen Toxizitätsgrenzen (SEEKAMP 1977, MAYER 1981). Andererseits aber haben Untersuchungen von GODBOLD & HÜTTERMANN (1985) eine teilweise erhebliche Hemmung des Wurzelwachstums von *Picea-abies*-Keimlingen bei Konzentrationen bereits von 0,02–0,4 ppm Blei erbracht. Die Verfasser unterstreichen die Bedeutung ihrer Untersuchungen mit Hinweis auf Werte gleicher Größenordnung der Schwermetallkonzentration, die auf der Bärhalde im Schwarzwald (P. TRÜBY & H. W. ZÖTTEL), in Wohldorf bei Hamburg (N. RASTIN) und im Solling (E. MATZNER, alle zitiert in GODBOLD & HÜTTERMANN 1985) gefunden worden sind. Da Wurzelschäden eines der auffallenden Phänomene sind, die im Zusammenhang mit dem Waldsterben beobachtet werden (SCHÜTT 1983), ist die Frage der Beurteilung der Schwermetallkonzentration und ihrer Schädigung von großer Bedeutung.

Auch nach dem neuesten Stand der Erkenntnisse über die Beziehungen zwischen Boden und Vegetation ist also die bereits erwähnte Frage „ob der

vermutlich vorhandene Blei- und Zinkgehalt des Materials sich wachstumshemmend auf die anzupflanzenden Gehölze auswirken kann" (BUTZKE 1970) noch aktuell und nur über die Untersuchung der Bodenlösung zu beantworten. Außerdem sollten sich über die Bodenlösung auch die anderen Faktoren der Pflanzenernährung kontrollieren lassen. Im ehemaligen Bergbauggebiet Mechernich geht es vor allem um die Vermutung von THOME (1954), daß Nährstoffmangel oder auch Wassermangel entscheidende Minimumfaktoren sein könnten.

Mit dem Sickerwasser können gelöste Schwermetalle schließlich auch ins Grundwasser gelangen. Für Blei liegt der Trinkwasser-Grenzwert bereits bei einem Gehalt von nur 0,04 mg/l (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982). Die Gefahr einer Grundwasserkontamination ist somit ebenfalls gegeben.

So standen für die Untersuchung der Schwermetalle in der Bodenlösung eine Reihe wichtiger Fragen an:

- Sind die Schwermetalle im Boden wasserlöslich und wie hoch ist ihr Gehalt in der Bodenlösung?
- Wie sind die Beziehungen zwischen gelösten Anteilen und Gesamtgehalt?
- Besteht eine Beziehung zwischen den Schwermetallgehalten in der Bodenlösung und den Schwierigkeiten der Rekultivierung beziehungsweise den sichtbaren Vegetationsschäden?
- Wie hoch ist die Verträglichkeit der Vegetation für gelöste Schwermetalle?
- Gibt es andere Ursachen für die Schwierigkeiten bei der Rekultivierung oder für das Auftreten von Vegetationsschäden?
- Wie hoch sind die Schwermetallgehalte in den Pflanzenwurzeln und bestehen Beziehungen zum Gehalt der Bodenlösung an Schwermetallen?
- Besteht die Gefahr einer Grundwasserkontamination durch Schwermetalle?

2. Methodik

Für die Auswahl geeigneter Untersuchungsstandorte erwiesen sich die Bodenkarte und die Karte des Bleigehaltes der Böden und Halden im Raum Mechernich (SCHALICH & SCHNEIDER & STADLER 1986) als sehr nützlich. Im Hinblick auf die geringen Erwartungen bezüglich der Löslichkeit der Schwermetalle konnten die Untersuchungen auf Böden begonnen werden, bei denen noch am ehesten mit einem Auftreten von Schwermetallen in der Bodenlösung zu rechnen war, nämlich auf zwei sauren Podsolen aus stark bleihaltigem Sand. Nach den ersten Ergebnissen mit teilweise beträchtlichen Blei- und Zinkgehalten wurden die Untersuchungen auf weitere Problemstandorte mit sichtbaren Vegetationsschäden ausgedehnt. Die Anregungen des für die forstwirtschaftliche Rekultivierung zuständigen Revierbeamten, Forstamtmann W. STADLER (Mechernich), waren dabei eine wertvolle Unterstützung.

Insgesamt wurden zehn Meßstationen eingerichtet. Ihre Lage ist in Abbildung 1 dargestellt. Station 4 allerdings liegt außerhalb des Kartenausschnittes auf einem Boden höchster Bleibelastung in der Nähe von Kall. Bis auf die Station 4, deren Boden als Grünland genutzt wird, liegen die Standorte unter Wald oder sind für Waldbestockung vorgesehen. Typologisch handelt es sich um Podsole bei den Stationen 1 und 2, um eine Braunerde bei der Station 4, um

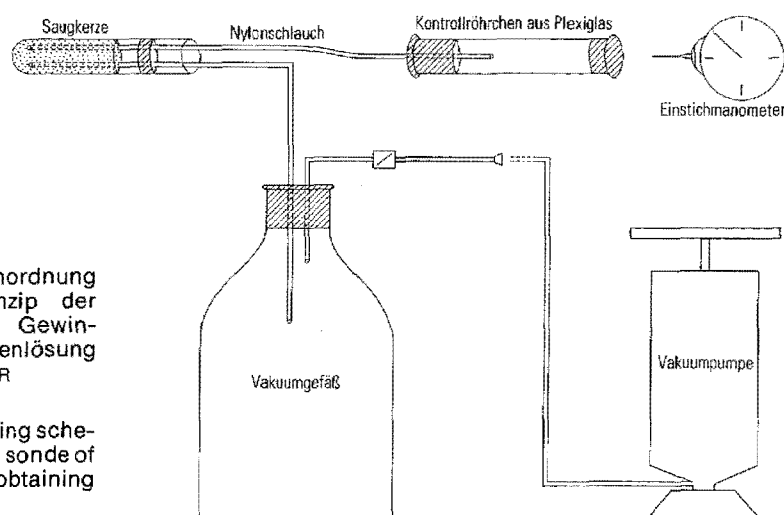
einen Auenboden bei der Station 6 und um aufgeschüttete Böden aus Flotationssand bei den übrigen Stationen. Entsprechend der Ausbildung des Ausgangsgesteins ist die Bodenart Sand bis lehmiger Sand mit Ausnahme des Auenbodens, wo im Untergrund ein sandiger Lehm ansteht.

Während der Vegetationsperiode 1985/86 wurde an jeder Meßstation die Bodenlösung über vier Saugkerzen aus 50 und aus 200 cm Bodentiefe mit einem Unterdruck von 600 cm Wassersäule abgezogen. Dabei hat sich eine von G. VÖLKNER (Geol. L.-Amt Nordrh.-Westf.) entwickelte Apparatur bewährt, deren Funktion in der Abbildung 2 dargestellt ist.

Die Apparatur besteht aus vier Saugkerzen, die über die Nylonkapillare mit dem Vakuumgefäß und einem Kontrollröhrchen verbunden sind. Mit der Vakuumpumpe wird der Unterdruck erzeugt, mit dem Einstichmanometer im Kontrollröhrchen die Einstellung überprüft. Die Bodenlösung sammelt sich in der Vakuumflasche und wird dort je nach Witterungsverlauf im Abstand von 1–4 Wochen entnommen, wobei die so gewonnenen Bodenwassermengen meist zwischen 50 und 500 cm³ lagen. Die Zusammensetzung der Bodenlösung wurde im Emissionsspektrometer mit Plasmaanregung der Fa. Bausch & Lomb untersucht (H. WERNER, Geol. L.-Amt Nordrh.-Westf.).

Abb. 2
Schematische Anordnung und Arbeitsprinzip der Saugsonde zur Gewinnung der Bodenlösung nach G. VÖLKNER

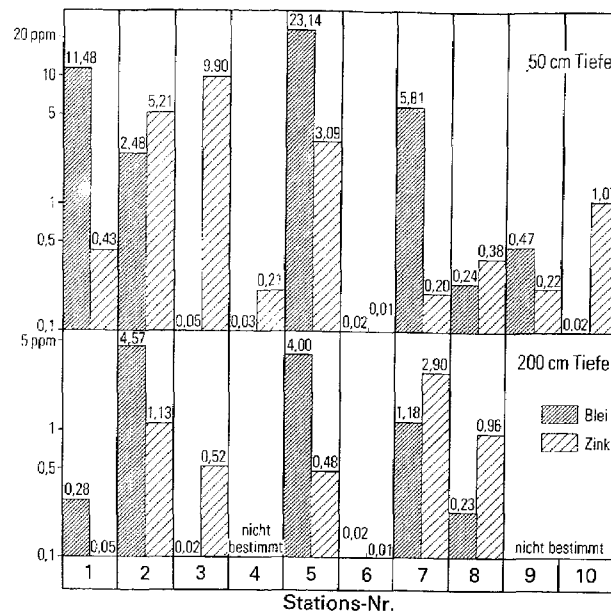
Fig. 2
Sketch and working scheme of the suction sonde of G. VÖLKNER for obtaining the soil solution



3. Sind die Schwermetalle wasserlöslich und wie hoch ist ihr Gehalt in der Bodenlösung?

Nach den Analysenergebnissen, die in der Abbildung 3 dargestellt sind, gibt es in den Mechnicher Böden ohne Zweifel wasserlösliche Blei- und Zinkverbindungen. Teilweise werden Schwermetallgehalte der Bodenlösung in einer Höhe gefunden, wie sie aus der Literatur bisher nicht bekannt sind. Sie liegen eindeutig sogar über den Toxizitätsgrenzen nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1982). Der Podsol von Station 1 hat zum Beispiel in 50 cm Tiefe einen Durchschnittswert für Blei von 11,48 mg/l, der aufgeschüttete Boden von Station 5 in derselben Bodentiefe sogar 23,14 mg/l. Bei anderen Stationen

Abb. 3
Durchschnittswerte von Blei
und Zink in der Bodenlösung
Fig. 3
Average values of lead and
zinc in soil solutions



wie 4 und 6 sind die Pb-Werte dagegen niedrig und liegen sogar unter der Nachweisgrenze von 0,04 mg/l. Auch ist festzustellen, daß der Pb-Wert in 200 cm Bodentiefe ganz allgemein abnimmt.

Weiter zeigt die Abbildung 3, daß auch hohe Zinkgehalte in der Bodenlösung auftreten. Die Durchschnittswerte von 5,21, 9,90 und 3,09 mg/l in 50 cm Bodentiefe an den Stationen 2, 3 und 5 liegen ebenfalls über der Toxizitätsgrenze nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1982), auf Station 7 wird mit 2,9 mg/l ein solcher Wert auch in 200 cm Bodentiefe erreicht. Daneben gibt es sehr geringe Zn-Gehalte, beispielsweise beim Auenboden auf der Station 6.

Die Ergebnisse bestätigen, daß Blei und Zink im Mechernicher Revier in verschiedener chemischer Bindung vorliegen, deren Wasserlöslichkeit unterschiedlich ist. Von Bedeutung für die Löslichkeit mag darüber hinaus die mechanische Zerteilung der Schwermetallverbindungen im Boden sein sowie auch der pH-Wert. Bei der Kalkung eines Aufschüttbodens in der Nähe der Station 5 mit einer pH-Verschiebung von 6,4 auf 7,4 fiel der Bleigehalt in der Bodenlösung von 14,9 auf 5,8 mg/l. Doch reichen diese Feststellungen nicht aus, um die angetroffenen Schwermetallkonzentrationen zu erklären. Teilweise werden Konzentrationen erreicht, die über die Löslichkeit der im Mechernicher Revier vorhandenen Bleiverbindungen wie Cerussit (PbCO_3), Anglesit (PbSO_4) und Bleioxid (PbO) weit hinausgehen. Nach RÖSLER & LANGE (1976) beträgt die Wasserlöslichkeit von Cerussit bei 20° C 11 mg/l, von Anglesit bei 25° C 42,5 mg/l und von Bleioxid 17 mg/l. In Mechernich aber wurden Gehalte bis 81 mg/l Blei gefunden. Sie sind nur dadurch erklärbar, daß organische Komplexbildner im Bodenwasser auftreten und das Lösungsgefälle für Schwermetalle verändern.

Im Hinblick auf diese Zusammenhänge und auf die Reproduzierbarkeit der Messungen interessiert, welche Änderungen des Bleigehalts in der Bodenlö-

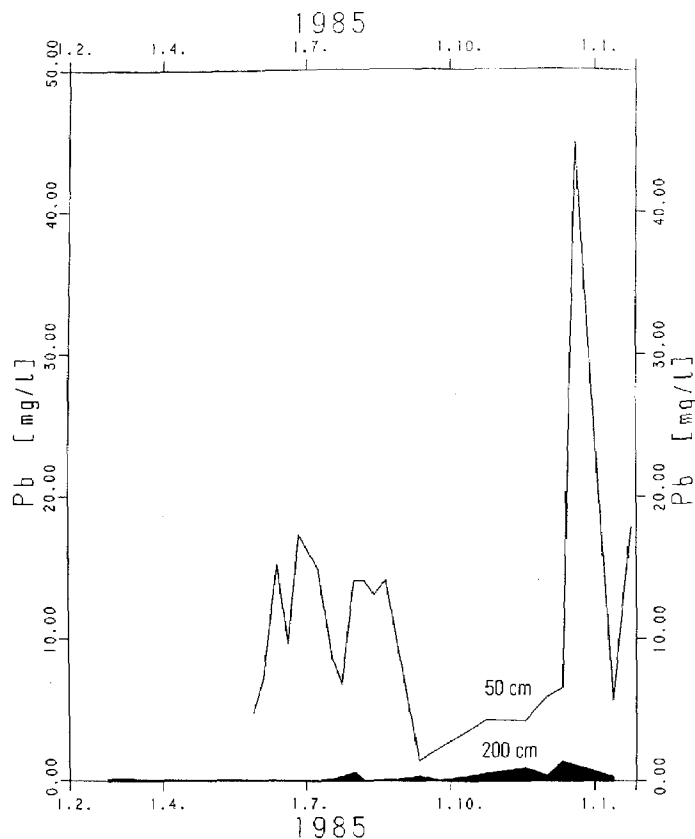


Abb. 4
Veränderung der Bleikonzentration der Bodenlösung in 50 und 200 cm Bodentiefe eines Podzols, Station 1

Fig. 4
Change in the lead content in soil solution of a podzol in the depths of 50 and 200 cm, field site 1

sung während der Beobachtungszeit auftraten. Wie Abbildung 4 zeigt, ist die Bleikonzentration in 50 und 200 cm Bodentiefe auf dem Podsol der Station 1 sehr unterschiedlich. In 200 cm Tiefe bleiben die Werte durchgängig auf einem gleichmäßig niedrigen Niveau, in 50 cm Tiefe aber treten starke Schwankungen auf. Und zwar liegt der Minimalwert bei 1,44 mg/l, der Maximalwert bei 44,87 mg/l. Dazu ist festzustellen, daß die Lage der vier Saugkerzen zur Gewinnung der Bodenlösung während der gesamten Beobachtungszeit nicht verändert wurde und weiter, daß auch eine Abhängigkeit zum Witterungsverlauf nicht festzustellen war. Es kann aber sein, daß die Konzentration der organischen Komplexbildner in der Bodenlösung schwankt und die Löslichkeit der Schwermetalle beeinflusst.

Wie aus den Meßergebnissen in 50 und 200 cm Bodentiefe von Station 3 in Abbildung 5 zu entnehmen ist, treten auch im Zinkgehalt der Bodenlösung Unterschiede auf, doch sind die Schwankungen wesentlich geringer als die des Bleigehalts. In 50 cm Tiefe liegt beispielsweise das Minimum bei 6,34 mg/l, das Maximum bei 15,92 mg/l. Das mag damit zusammenhängen, daß die organischen Komplexbildner die Löslichkeit von Zink weniger stark beeinflussen als die von Blei.

Nun ändert sich nicht nur die Konzentration der Schwermetalle in der Bodenlösung, auch die Bodenlösung selbst ist hohen Konzentrations-

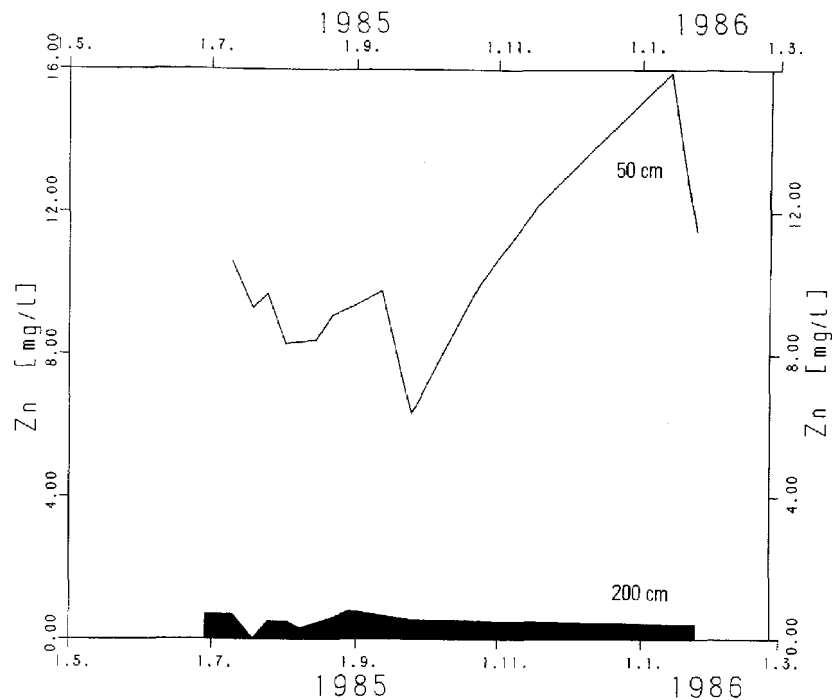


Abb. 5 Veränderung der Zinkkonzentration der Bodenlösung in 50 und 200 cm Tiefe eines Aufschüttbodens, Station 3

Fig. 5 Change in the zinc content in soil solution of a man made soil aggradation in depths of 50 and 200 cm, field site 3

schwankungen unterworfen. Aus der Abbildung 6 läßt sich entnehmen, daß die Werte der Kationenkonzentration der Station 1 in 50 cm Tiefe sogar noch größeren Schwankungen unterworfen sind als die des Bleigehaltes. Mit der normalen Vorstellung von einem Gleichgewichtszustand zwischen Boden und Bodenlösung sind die Ergebnisse nicht ohne weiteres in Übereinstimmung zu bringen. Es scheint eine Basiskonzentration von etwa 1 mval zu geben, die vermutlich der geringen Sorptionskapazität des Ae-Horizontes aus Sand entspricht. Die hohen Werte bis etwa 3 mval könnten dem Einfluß des überlagernden Ah-Horizontes mit seiner wesentlich höheren Sorptionskapazität zuzuordnen sein.

Für diese Deutung spricht der ausgeglichene Verlauf der Kationenkonzentration von Station 1 in 200 cm Tiefe. Die Werte bewegen sich ständig zwischen 1,5 und 2,5 mval, meist aber nahe an der Grenze von 2 mval. Die Bleikonzentration ist in dieser Tiefe gering; sie liegt nahe der Nachweisgrenze.

4. Wie sind die Beziehungen zwischen Gesamtgehalt und Löslichkeit von Schwermetallen unter Laborbedingungen?

Die Methoden der Bodenuntersuchung sollen die Eigenschaften feststellen, die das Gedeihen der Pflanzen bestimmen. Um zu prüfen, ob die Pflanzenverfügbarkeit auch unter Laborbedingungen zu bestimmen ist, wurden an 40 Bodenproben der Meßstationen Extraktionsversuche mit Wasser und mit

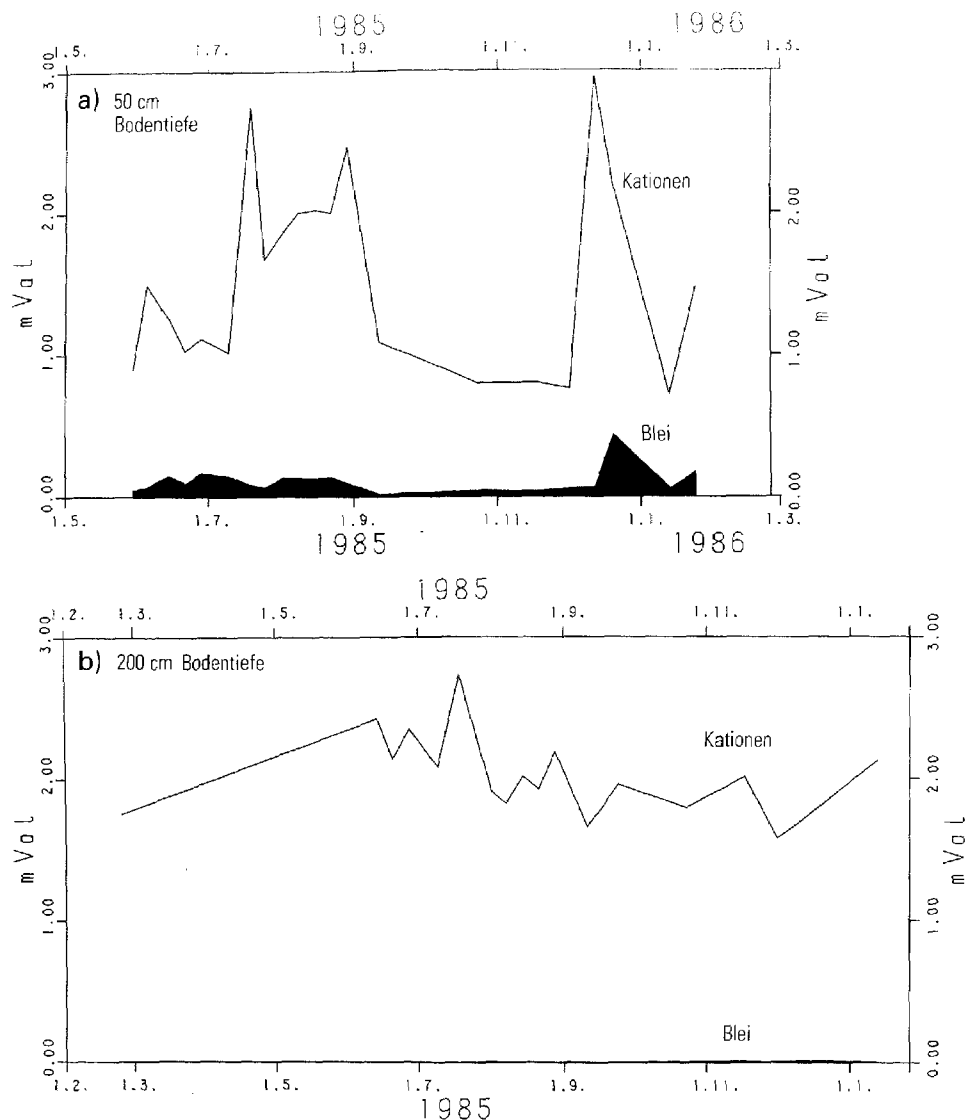


Abb. 6 Veränderung der Kationenkonzentration der Bodenlösung im Vergleich zu Blei in 50 cm (a) und 200 cm (b) Bodentiefe eines Podzols, Station 1

Fig. 6 Change in the cations content in soil solution of a podzol in comparison to lead in a depth of 50 cm (a) and 200 cm (b), field site 1

0,005 M Diethylentriaminpentaessigsäure, einem organischen Komplexbildner (Kurzbezeichnung DTPA) durchgeführt. Die im Extrakt gefundenen Blei- und Zinkmengen wurden wiederum mit den röntgenographisch ermittelten Gesamtgehalten verglichen.

Das Ergebnis ist in der Abbildung 7 dargestellt. Die Abszisse gibt die Pb-Konzentration im Bodenauszug an, die Ordinate den Gesamtgehalt an Blei. Es

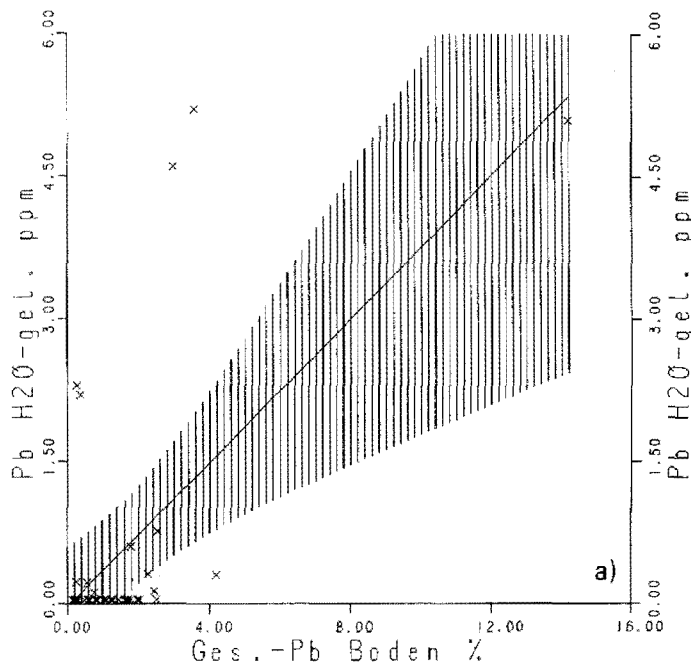
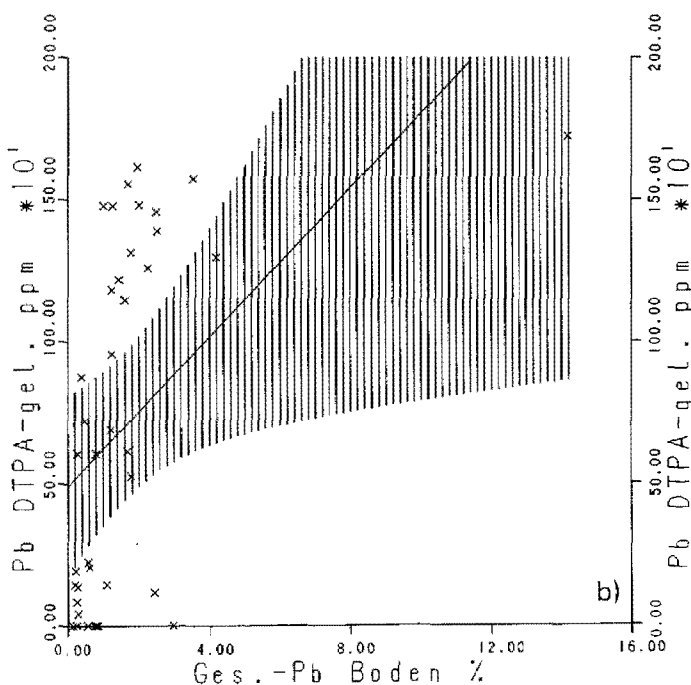


Abb. 7
Beziehungen zwischen Gesamtbleigehalt des Bodens und Bleikonzentration im Wasserauszug (a) und im DTPA-Auszug (b)

Fig. 7
Correlation between total content of lead in soil with lead content in water extract (a) and DTPA extract (b)



zeigt sich, daß von den 40 Proben nur 13 einen wasserlöslichen Anteil haben. Im Durchschnitt sind nur etwa 0,1 ‰ des Gesamtgehaltes wasserlöslich. Die Beziehungen Gesamtgehalt zu wasserlöslichem Anteil sind für die Einzelprobe durch den niedrigen Korrelationskoeffizienten von $r = 63$ gekennzeichnet. Im DTPA-Auszug sind Bleigehalte bei 32 der 40 Proben vorhanden. Der Durchschnittswert der Löslichkeit bewegt sich bei 13 % vom Gesamtgehalt, ist also um mehr als das tausendfache höher. Die Korrelation ist mit $r = 48$ noch etwas schlechter ausgefallen. Die für Zink gefundenen Werte sind ähnlich wie die für Blei, die Korrelationskoeffizienten aber sind mit $r = 24$ beziehungsweise $r = 26$ noch schlechter.

Nach den großen Unterschieden in der Löslichkeit der Schwermetalle scheinen die untersuchten Bodeneigenschaften weitgehend voneinander un-

abhängig zu sein. Von vier Proben aus dem Podsolprofil von Station 1 mit Bleigehalten zwischen 1,24 und 1,76 % hatte zum Beispiel nicht eine Probe einen wasserlöslichen Anteil. In der Bodenlösung aber wurden hier max. 81 mg/l gefunden. Von sieben Proben des Podsols von Station 2 mit Bleigehalten zwischen 0,20 und 0,80 % wies zwar eine Probe einen wasserlöslichen Anteil auf, dieser aber wurde im Ae-Horizont angetroffen. Die Bh- und Bs-Horizonte der Profile von Station 1 und 2 mit ihrer starken Bleiakкумуляtion hatten dagegen keinerlei wasserlösliche Anteile. Das läßt annehmen, daß Schwermetalle in organischer Bindung beim Austrocknen des Bodens ausfallen und wasserunlöslich werden. Damit aber würde sich der wichtigste Teil der Schwermetalle in der Bodenlösung der Bestimmung durch Wasserextraktion getrockneter Böden entziehen.

Bei den Ergebnissen des DTPA-Auszuges ist es umgekehrt. Hier werden allgemein zu hohe Löslichkeiten ermittelt. Besonders auffallend ist die Diskrepanz zwischen Bodenlösung und DTPA-Auszug beim Auenboden der Station 6. Dort wurden Werte bis fast 0,5 % DTPA-lösliches Blei bezogen auf Bodensubstanz gefunden. In der Bodenlösung waren die Werte aber so gering, daß es analytisch nicht mehr nachgewiesen werden konnte.

Bei den Bleigehalten des Bodens, den Bleigehalten der Bodenlösung und den Bleigehalten der Bodenextrakte scheint es sich also um weitgehend voneinander unabhängige Faktoren zu handeln. In ihren Aussagen zur Charakterisierung eines Pflanzenstandorts stimmen sie nicht überein und können deshalb auch in ihrer ökologischen Aussage nicht befriedigen.

5. Besteht eine Beziehung zwischen den Schwermetallgehalten der Bodenlösung und den Schwierigkeiten der Rekultivierung beziehungsweise der Vegetationsentwicklung?

Für die Bewertung der Schwermetallfracht der Bodenlösung sind die großen Unterschiede in der Konzentration hilfreich, die bei den verschiedenen Meßstationen aufgetreten sind. Können diese Unterschiede mit Unterschieden in der Vegetationsentwicklung parallelisiert werden?

Der Podsol von Station 1 beispielsweise ist durch hohe Bleigehalte in der Bodenlösung gekennzeichnet. Im Durchschnitt waren es in 50 cm Bodentiefe 11,48 mg/l. Der aufstockende Kiefernbestand ist 120 Jahre alt und weist auffällig viele Bäume mit gestauchtem Habitus und Drehwuchs auf. Der Nutzwert des Bestandes ist dadurch wesentlich beeinträchtigt. Außerdem hat der Bestand Vegetationslücken. Es wurde geprüft, ob solch auffällige Lücken durch Bleivergiftung bedingt sein können. Tatsächlich wies die aus 50 cm Bodentiefe in einer Vegetationslücke gewonnene Bodenlösung eine Konzentration von max. 81,4 mg/l Blei auf. Beides, das Auftreten von Wuchshemmungen und Drehwuchs sowie das Auftreten von Vegetationslücken im Zusammenhang mit einem sehr hohen Bleigehalt der Bodenlösung kann kaum anders als durch die Wirkung des hohen Bleigehalts erklärt werden.

Auf dem Podsolboden der Station 2 betrug der Bleigehalt nur 2,48 mg/l, aber der Zinkgehalt lag mit 5,12 mg/l deutlich über der Toxizitätsgrenze. Eine Wachstumsbeeinträchtigung des ebenfalls 120jährigen Kiefernbestandes, der von wesentlich besserer Qualität ist, konnte trotzdem nicht festgestellt werden.

Erst mit 9,9 mg/l Zink in 50 cm Bodentiefe auf dem Aufschüttboden der Station 3 schien die Toxizitätsgrenze für den aufstockenden Birken- und Erlenbewuchs eindeutig überschritten. Kleinblättrigkeit, Absterben des Haupttriebes und schließlich totales Absterben der aufstockenden Pflanzen nach anfänglich normaler Entwicklung sind weit verbreitet. Bisher haben nur wenige Birkenbüsche eine Höhe von mehr als 2 m erreicht.

Der Aufschüttboden von Station 5 mit durchschnittlichen Bleigehalten von 23 mg/l und hohen Zinkgehalten in der Bodenlösung ist fast vegetationsfrei. Die Untersuchungsfläche liegt im Bleibachtal und hat an einer eingetieften Stelle Grundwasser zwischen 50 und 100 cm Bodentiefe, das heißt, es sind Bodenbereiche mit optimaler Wasserversorgung vorhanden. Trotzdem sind nur wenige kleine Vegetationsinseln entwickelt. Unter deren kümmerlicher Vegetation hat sich ein dichter Wurzelfilz aus abgestorbenen Wurzeln gebildet. Das spricht dafür, daß auch die biologische Aktivität durch den hohen Gehalt an Schwermetallen beeinträchtigt ist.

Auf den übrigen Stationen sind Schwermetalle in der Bodenlösung weniger oder gar nicht vertreten. Aber auch dort sind Vegetationsschäden – jedoch von anderer Art – aufgetreten. Am meisten verbreitet ist das Auftreten von Chlorose. Bei den Kiefern sind häufig nur wenige Nadeljahrgänge vorhanden, Kurz-nadeligkeit und Rindennekrosen sind weit verbreitet. Birken sind meist sehr kleinblättrig im Laubwerk, Aspen zeigen im Spätsommer eine Chlorose der Blattfläche bei kräftiger Grünfärbung der Blattadern. Auf dem Auenboden im Bleibachtal tritt früher oder später Wipfeldürre auf. Infolge des starken Lichtdurchfalls ist eine üppige Gras- und Krautvegetation im Bodenbereich entwickelt.

Die Frage, welchen Einfluß die Schwermetallkonzentration in der Bodenlösung auf die Vegetation hat, ist bei der Vielfalt von Wachstumsstörungen nicht leicht zu beantworten. Mit Sicherheit kann gesagt werden, daß es neben dem deutlichen Einflußfaktor Blei- und Zinkgehalt in der Bodenlösung andere Faktoren geben muß, die sich vegetationsschädlich auswirken, und es wird vermutet, daß auch diese Faktoren über den Boden und die Bodenlösung wirksam werden. Die Beobachtungen im Bleibachtal auf Standorten optimaler Wasserversorgung schließen für diesen Bereich Wassermangel als Ursache aus.

6. Wie hoch ist die Verträglichkeit der Vegetation für gelöste Schwermetalle?

Der Feststellung von SCHÜTT (1984) „Völlig unzureichend sind unsere Kenntnisse über Schwellenwerte von Schwermetallbelastungen bei Holzgewächsen“ kann man kaum widersprechen. Es ist aber offensichtlich, daß die vorliegenden Ergebnisse mehr für die hohen Toxizitätsgrenzen sprechen, die von SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1982) angegeben werden, als für die niedrigen, die nach den Untersuchungen von GODBOLD & HÜTTERMANN (1985) zu befürchten wären.

Nun lassen einerseits die Ergebnisse von GODBOLD & HÜTTERMANN erkennen, daß Unterschiede in der Wachstumshemmung bei gleicher Schwermetallkonzentration auftreten können. Sie sind durch Unterschiede in der Zusammensetzung der Nährlösung bedingt. Andererseits aber ist nach ERNST

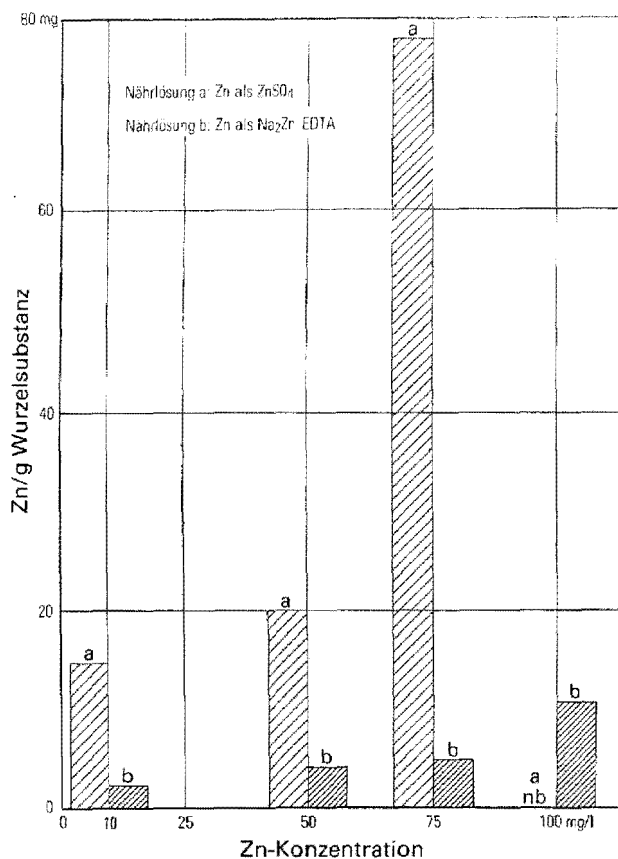


Abb. 8
Zinkgehalt in den Wurzeln der Kuckuckslichtnelke (*Silene cucubalus*) bei steigender Zinkkonzentration der Nährlösung (nach ERNST 1974)

Fig. 8
Zinc content in the roots of *Silene cucubalus*, dependent on the increasing zinc content in nutrient solution (after ERNST 1974)

(1974) die Aufnahme von Zink durch die Kuckuckslichtnelke (*Silene cucubalus*) in höchstem Maße von der Bindungsart des Schwermetalls abhängig. Aus zinksulfathaltiger Nährlösung nehmen die Pflanzen mehrfach höhere Zinkmengen auf als aus zinkchelathaltiger Nährlösung, wie Abbildung 8 erkennen läßt.

Bei der Erhöhung des Zn-Angebots von 10 auf 76 mg/l in organischer Bindung als Chelat nimmt bei diesen Untersuchungen der Zn-Gehalt der Wurzeln von 2,2 auf 4,8 mg/g Wurzelmasse zu, bei der gleichen Erhöhung der Konzentration als $ZnSO_4$ aber von 13,8 auf 77,3 mg. Die Gesamtaufnahme der Wurzeln beträgt aus der chelathaltigen Lösung in dem einen Fall 15 %, im anderen Fall sogar nur etwa 6 % der Aufnahme aus zinksulfathaltiger Nährlösung. Das sind erhebliche Unterschiede.

Nun liegen die Schwermetalle nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1982) „offenbar vorwiegend als negativ geladene metallorganische Komplexe in der Bodenlösung vor“. Kann man davon ausgehen, daß die bei den vorliegenden Untersuchungen gefundenen Blei- und Zinkmengen tatsächlich ausnahmslos komplex gebunden sind?

Um die organisch gebundenen Schwermetallmengen zu entfernen (SCHLICHTING & BLUME 1966), wurde bei zehn im März/April 1986 gewonnenen Bodenlösungen eine Ausschüttung mit Aktivkohle vorgenommen. Die

Tabelle 1
Blei- und Zinkgehalt von Bodenlösungen vor
und nach Ausschüttung mit Aktivkohle

Proben-Nr.	Bleige halt			Zinkge halt		
	vor Ausschüttung (mg/l)	nach Ausschüttung (mg/l)	(%)	vor Ausschüttung (mg/l)	nach Ausschüttung (mg/l)	(%)
1	59,85	8,23	13,8	0,79	0,62	78,5
2	18,87	1,28	6,8	0,25	0,17	68,0
3	4,37	<0,04	0	0,46	0,43	93,5
4	5,02	0,57	11,4	7,94	7,19	90,6
5	2,55	<0,04	0	6,54	3,17	48,5
6	7,55	0,12	1,6	1,53	0,85	55,6
7	0,23	<0,04	0	0,59	0,11	18,6
8	0,21	<0,04	0	2,01	0,58	28,9
9	81,43	2,68	3,3	0,53	0,16	30,2
10	<0,04	<0,04	0	3,70	1,46	39,5
Mittel	18,01	1,29	7,2	2,43	1,47	60,5

Blei- und Zinkwerte vor und nach der Ausschüttung waren sehr unterschiedlich. Wie Tabelle 1 zeigt, gingen die Werte für Blei im Durchschnitt auf 7,2 % zurück, die Werte für Zink fielen auf 60,5 %. Die Absolutwerte von ionargelöstem Blei schwanken zwischen weniger als 0,04 und 8,23 mg/l, für Zink zwischen 0,11 und 7,19 mg/l. Die Prozentanteile von ionargelöstem Schwermetall liegen bei Blei zwischen 0 und 13,8, bei Zink zwischen 18,6 und 93,5 %.

Bei diesen Unterschieden in der Bindungsform und ihrer physiologischen Bedeutung ist die Frage nach Toxizitätsgrenzen nicht leicht zu beantworten. Der osmotische Druck ionargelöster Schwermetalle ist um das mehrfache größer als der in organischer Komplexbildung vorhandenen Schwermetallmengen. Die in den Nährlösungsversuchen von ERNST (1974) nachgewiesene Abhängigkeit der Schwermetallaufnahme von der Art der Bindung dürfte von großer Bedeutung sein, um die Toxizitätsgrenzen von Mischkonzentrationen zu bestimmen, wie sie in Mechernich gefunden wurden.

7. Gibt es andere Ursachen für die Schwierigkeiten bei der Rekultivierung beziehungsweise für das Auftreten von Vegetationsschäden?

Vegetationsschäden an den Meßstationen, die sich mit den Schwermetallgehalten der Bodenlösung nicht parallelisieren lassen, sind zweifellos vorhanden. Vegetationsschäden sind sogar bei gänzlichem Fehlen von Schwermetallen in der Bodenlösung aufgetreten.

Es wurde vermutet, daß die Schwierigkeiten bei der Rekultivierung mit der geringen Wasserkapazität der Böden oder aber mit Nährstoffmangel zusammenhängen können (THOME 1954). Nach den bodenphysikalischen Untersuchungen liegt die nutzbare Wasserkapazität bis 10 dm Tiefe zwischen 80 – 160 mm, meist also im Bereich gering bis mittel. Das heißt, die Böden sind nicht so wasserarm, wie gelegentlich vermutet wurde. Darüber hinaus gibt es Flächen mit optimaler Wasserversorgung aus dem Grundwasser, bei denen

Wasser als Minimumfaktor der Vegetationsentwicklung mit Sicherheit auszuschließen ist. Doch auch dort treten Vegetationsschäden auf.

Auf der Suche nach der Art des Nährstoffmangels waren die praktischen Erfahrungen bei der Rekultivierung von Nutzen, daß die Vegetationsschäden einmal in Trockenperioden verstärkt auftreten und zum anderen durch Abdeckung der Böden mit organischer Substanz zu überwinden sind.

Bei der Überprüfung der Bodenlösung ergaben sich große Unterschiede im Mangangehalt, wie die Übersicht der Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerte in Tabelle 2 erkennen läßt. Es zeigt sich, daß in 50 cm Bodentiefe die Manganwerte der Podsole im Mittel bei 1,6 und 3,3 mg/l und damit in dem zum Beispiel auch von MAYER (1981) gefundenen Bereich liegen, die der Stationen 3 und 4 dagegen bei nur 0,16 mg/l und bei den übrigen Böden zwischen weniger als 0,01 – 0,09 mg/l. Größtenteils liegen sie also auf einem ungewöhnlich niedrigen Niveau.

Tabelle 2
Mangangehalte in der Bodenlösung der Meßstationen von Mechernich

Station	Bodentiefe (cm)	pH	min. (mg/l)	Mn in Bodenlösung max. (mg/l)	\bar{x} (mg/l)	s
1	50	5,6	<0,001	17,500	1,6109	233
	200	6,1	<0,001	7,600	2,3019	93
2	50	4,9	<0,001	10,890	3,5508	103
	200	5,2	<0,001	5,900	3,2634	66
3	50	7,0	<0,001	1,080	0,1584	199
	200	7,3	<0,001	0,600	0,0698	260
4	50	7,0	<0,001	1,600	0,1609	314
	50	6,2	<0,001	0,620	0,0819	250
5	200	6,6	<0,001	0,670	0,0883	267
6	50	7,6	<0,001	< 0,001	<0,0010	
	200	8,8	<0,001	< 0,001	<0,0010	
7	50	7,3	<0,001	0,900	0,0883	280
	200	7,4	<0,001	0,350	0,0816	147
8	50	8,0	<0,001	0,160	0,0478	158
	200	8,1	<0,010	0,020	0,0167	35
9	50	8,2	<0,010	0,120	0,0360	131
10	50	7,7	<0,020	0,030	0,0250	28

\bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung

Die Mangangehalte sind zwar vom pH-Wert abhängig, aber es gibt offensichtlich auch andere Einflußfaktoren. Überall kommen als Minimumwerte Gehalte unter der Nachweisgrenze vor, und auf allen Böden, in denen Mangan nachgewiesen werden konnte, besteht eine enorme Streuung der Werte. Wenn man den zeitlichen Verlauf der Mangangehalte in der Bodenlösung verfolgt (Abb. 9), dann zeigt sich, daß die niedrigen Gehalte bei den Podsohlen (Station 1 u. 2) im Juli und August aufgetreten sind, also in den Zeiten der größten Austrocknung der Böden. Die übrigen Böden reagieren bis auf eine Ausnahme ebenso. Demnach könnte neben den hohen Schwermetallgehalten Manganmangel für die Vegetationsschäden durchaus verantwortlich sein.

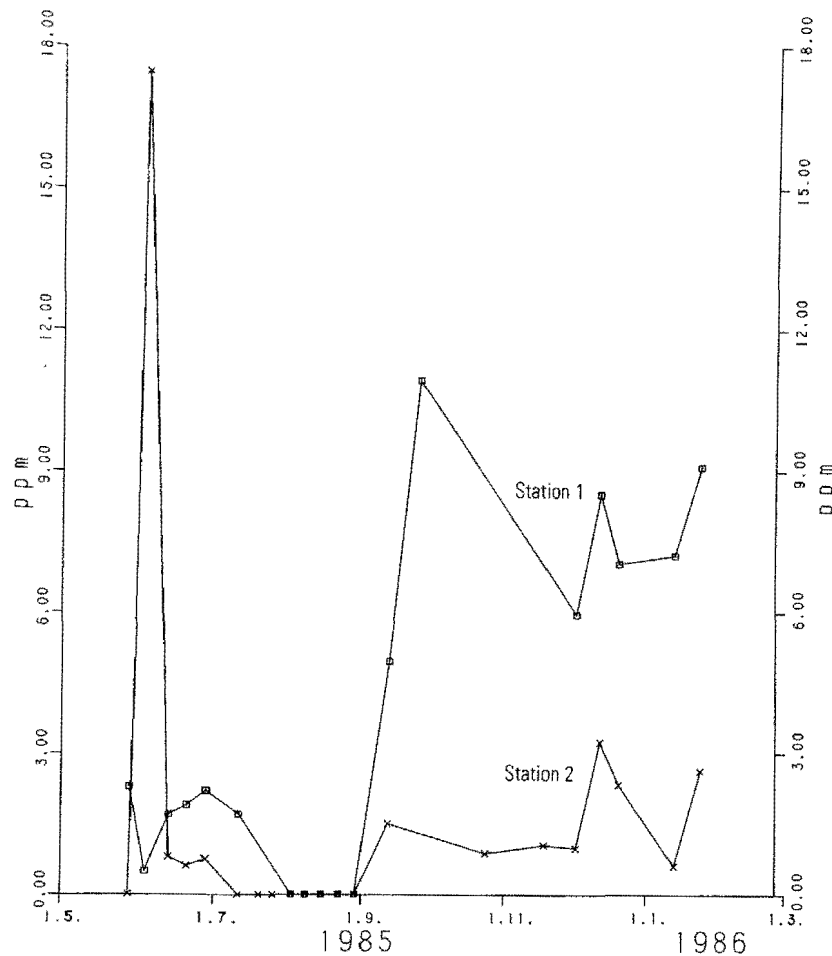


Abb. 9 Mangangehalt der Bodenlösung in 50cm Bodentiefe der Stationen 1 und 2

Fig. 9 Manganese content of soil solution in a depth of 50cm at field sites 1 and 2

Sandige, kalkhaltige und humusfreie Böden, wie sie im Bergbaurevier Mechernich weitverbreitet vorliegen, sind allerdings für Manganmangel geradezu prädestiniert. Teilweise sind auch typische Manganmangelsymptome zu beobachten wie Chlorose der Blattspreiten bei kräftig grüner Ausbildung der Blattadern oder graubrauner Verfärbung der jungen Blätter (KUNTZE et al. 1981). Das vorzeitige Absterben älterer Nadeljahrgänge, und das Auftreten von Chlorosen bei der Kiefer könnte ebenfalls auf Manganmangel beruhen. Es sind Düngungsversuche angelaufen, um die Wirkung einer Manganzufuhr auf diesen Standorten zu prüfen. Möglicherweise kann Manganmangel auf den Böden des Bergbaureviers Mechernich die Schwierigkeiten der Vegetationsentwicklung besser erklären, als die nur teilweise zu hohe Konzentration der schädlichen Schwermetalle.

8. Bestehen Gefahren der Kontamination des Grundwassers durch Schwermetalle?

Man kann die Bodenlösung aufteilen in einen Anteil, der von der Vegetation aufgenommen wird und einen Anteil, der als Sickerwasser dem Grundwasser zufließt. Die Bodenlösung ist also potentiell Grundwasser. Da weniger schwermetallreiche und mehr schwermetallarme Sickerwässer vorhanden sind, läßt ihre Vermischung im Grundwasser eine niedrigere Konzentration erwarten als sie teilweise in der Bodenlösung angetroffen worden ist. Doch können auch im tieferen Bodenbereich Schwermetalle zusätzlich in Lösung gehen und die Konzentration erhöhen. Aus den Analysen geht jedoch hervor, daß der Bleigehalt in der Bodenlösung zur Tiefe hin abnimmt. Bereits von 50 auf 100 und mehr noch auf 200 cm gehen die Bleiwerte deutlich zurück. Nur bei Zink werden auch in 200 cm Bodentiefe örtlich Werte oberhalb der Toxizitätsgrenze erreicht.

Eine Kontrolle der Blei- und Zinkverteilung in drei Podsolprofilen ließ zudem erkennen, daß es in den Böden horizontspezifische Lösungs- und Sorptionsmechanismen geben muß, die zumindest das Blei (Grenz- und Richtwert für Trinkwasser bei 0,04 mg/l) auffangen. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen, daß die Bleigehalte in den Bhs-Horizonten überall erheblich zunehmen. Daß im Profil des Podsols auf Station 2 auch im Oberboden der Bleigehalt zunimmt, erklärt sich aus der starken Immissionsbelastung durch die Nähe des früheren Schmelzbetriebes. Zink dagegen reichert sich nur schwach in den Bhs-Horizonten an und geht offenbar leicht ins Grundwasser ab. Entsprechend werden im Ausfluß des Burgfeyer Stollens, der die Mechernicher Lagerstätte entwässert, Zn-Konzentrationen von 2–4 mg/l gefunden, während Blei nicht nachgewiesen werden konnte. Wo allerdings stark bleihaltige Flotationssande im Grundwasser liegen, ist eine begrenzte Kontamination auch mit Blei möglich. So wurden in Grundwasserböden in der Nähe der Station 5 Bleigehalte bis 25 mg/l gefunden, was die früheren Beobachtungen über Bleivergiftung von

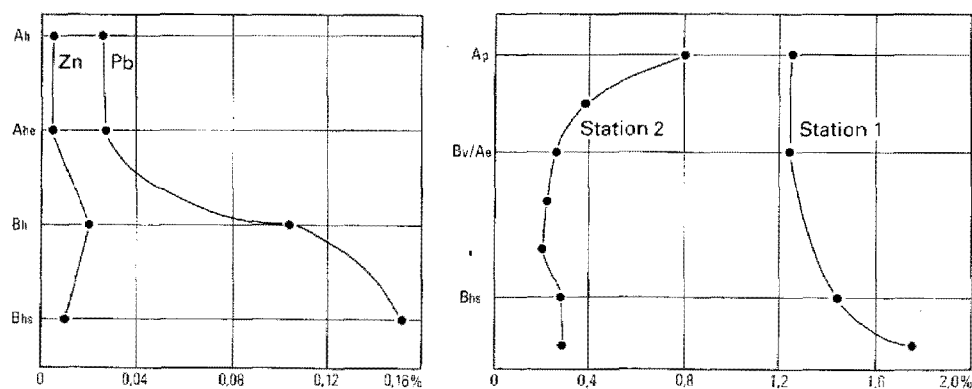


Abb. 10 (links) Blei- und Zinkverteilung im Profil eines Podsols vom Bleiberg

Fig. 10 (left) Concentration patterns of lead and zinc in a podzol profile from Bleiberg

Abb. 11 (rechts) Bleiverteilung in den Podsolprofilen der Stationen 1 und 2

Fig. 11 (right) Concentration patterns of lead in the podzol profiles of the field sites 1 and 2

Fisch und Vieh durch kontaminiertes Wasser gut erklären kann. Unter den Mechernicher Verhältnissen ist also die Analyse des Grundwassers bei Trinkwassernutzung besonders wichtig.

9. Diskussion der Ergebnisse

Mit den Fragen der Rekultivierung des ehemaligen Bergbaureviers Mechernich hat sich das Geologische Landesamt Nordrhein-Westfalen wiederholt befassen müssen. Als die erste geologisch-bodenkundliche Untersuchung über das Mechernicher Haldengelände vorgelegt wurde (THOME 1954), war das Gebiet noch wie eine Wüste. BUTZKE (1970) fand bereits wesentliche Veränderungen vor und konnte die Forstverwaltung bezüglich der Auswahl geeigneter Gehölze für die Haldenbegrünung beraten. Ausdrücklich aber vermerkt er, „das Ziel der geplanten Rekultivierungsmaßnahmen ist nicht eine land- oder forstwirtschaftliche Nutzung, sondern eine den Erfordernissen der Landschaftspflege genügende Begrünung des Geländes“. Daß diese bescheiden anmutende Formulierung in Wirklichkeit ein großes und wichtiges Anliegen war, wird verständlich, wenn man bedenkt, daß die ungeschützten Halden die Quelle der Umweltbelastung durch Emission und Erosion schwermetallreicher Stoffe darstellten, die mit der Begrünung zu fließen aufhörte.

Insofern kann die Rekultivierung im Mechernicher Revier für den größten Teil der Flächen als erfolgreich abgeschlossen betrachtet werden. Die Frage ist, ob sich das Niveau der Rekultivierung auch heute noch mit den Bedürfnissen der Landschaftspflege zufrieden geben muß. In Wirklichkeit ist der Grund für den Verzicht auf eine land- oder forstwirtschaftliche Nutzung des doch insgesamt 160 ha großen Gebietes (PHILIPPI 1964) nie angegeben worden. Wahrscheinlich gibt es keinen anderen als die großen Schwierigkeiten, das Gelände überhaupt zu begrünen.

Nun gibt es in Mechernich Böden mit hohem Bleigehalt, die forstwirtschaftlich genutzt werden. So hat der Podsol von Station 1 höchste Bleimengen sowohl im Gesamtgehalt wie in der Bodenlösung. Trotzdem wird er forstlich genutzt. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Nutzung der betroffenen Flächen dadurch zwar beeinträchtigt ist, aber der aufstockende Kiefernwald ist zweifellos ein Nutzwald und mehr als Landschaftspflege. Die Forderung nach forstlicher Nutzung der aufgelassenen Bergwerksflächen ist also keineswegs Utopie.

Mit der Überdeckung der Flächen mit kulturfähigem Bodenmaterial ist sicher auch schon ein Schritt hin zur forstlichen Nutzung getan worden, und auch die Abdeckung mit organischen Rückständen des Holzeinschlags zielt in die gleiche Richtung. Beide Maßnahmen können als Hilfe zur Standortverbesserung sowohl im Hinblick auf eine bessere Pflanzenernährung wie auch im Hinblick auf eine bessere Wasserversorgung interpretiert werden. Wenn der Engpaß der Vegetationsentwicklung durch einen Faktor der Nährstoffversorgung bedingt ist, muß und kann diesem Minimumfaktor aber gezielt begegnet werden. Manganmangel zum Beispiel, der nach Zusammensetzung der Bodenlösung weitverbreitet vorliegt, läßt sich auch auf anderem Wege und effektiver beseitigen als es nach dem derzeitigen Rekultivierungsverfahren geschieht. Düngungsversuche mit Mangan sind bereits von der Forstverwaltung begonnen worden.

Die vorliegenden Beobachtungen sind aber nicht nur für die Rekultivierung von Bergbaugebieten wie Mechernich interessant, sie bieten sich zur Auswertung von Untersuchungen auch in nicht bergbaulich genutzten Gebieten an. In Mechernich wurden solch hohe Werte für Blei und Zink in der Bodenlösung gefunden, wie sie in Deutschland bisher noch nicht festgestellt worden sind. In bezug auf die schwerwiegenden Befürchtungen, mit denen gelegentlich schon niedrigere Werte zur Kenntnis gegeben werden, sind die Mechernicher Ergebnisse einigermaßen beruhigend: Die Vegetation scheint mit höheren Schwermetallmengen fertig zu werden, als bisher angenommen wurde.

Andererseits ist darauf hinzuweisen, daß in Mechernich immer wieder Vegetationsschäden zu beobachten waren, wie sie von SCHÜTT et al. (1983) und SCHÜTT (1984) als Phänomene des Waldsterbens beschrieben worden sind. Als Ursache aber kommen hier nicht Luftverunreinigungen, sondern Faktoren der Pflanzenernährung in Frage.

Ein anderer Aspekt der Schwermetallbelastung ergibt sich für die Produktion von Kulturpflanzen, die als Nahrungsmittel verwendet werden (KÖNIG & KRÄMER 1985). Zum Schutz des Bodens und der Pflanzenproduktion sind von KLOKE (1980) Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte in Kulturböden vorgechlagen worden. SCHNEIDER (1982) hat aufgrund seiner Untersuchungen im Raum Stolberg festgestellt, daß die Frage, welche Schwermetallgehalte im Boden schädigend auf die Vegetation und über die Pflanzen auch auf Menschen und Tiere wirken, noch nicht eindeutig zu beantworten sei. Selbst die Untersuchung der Schwermetallgehalte der Bodenlösung scheint noch nicht auszureichen, obschon diese für den Transfer der Schwermetalle in die Pflanze von größerer Bedeutung sind als die Bodengehalte (JAWORSKI et al. 1984). Wenn die physiologische Wirkung der Schwermetalle in so starkem Maße von der Lösungsform abhängig ist, wie die Untersuchungen von ERNST (1974) zeigen, und wenn solch große Unterschiede auftreten, wie wir sie feststellen konnten, kann auf eine zusätzliche Information auch über die Lösungsform in Zukunft nicht mehr verzichtet werden.

Die Untersuchung der Bodenlösung kann als Einstieg dienen, aktuelle Probleme der Vegetationsbelastung mit der Genauigkeit zu klären, die heute erforderlich ist. Mit ergänzenden Untersuchungen über die Zusammensetzung und den Schwermetallgehalt der Pflanzensubstanz wurde begonnen. Sie sind ebenfalls notwendig, um die Chancen der Bodenanalytik für die Lösung der bestehenden Umweltprobleme zu verbessern. Mechernich und auch andere Bergbaugebiete mit ähnlich hohen Schwermetallbelastungen können als Teststrecken für solche Untersuchungen von großem Nutzen sein.

10. Schriftenverzeichnis

- Bundesminister für Forschung und Technologie [Hrsg.] (1985): Umweltforschung zu Waldschäden. – 134 S., 5 Tab., 3 Anl.; Bonn.
- BUTZKE, H. (1970): Gutachten des Geologischen Landesamtes Nordrhein-Westfalen über die Bodenverhältnisse des Haldengeländes am Westschacht der Gewerkschaft Mechernicher Werke, Kreis Schleiden, für die geplanten Begrünungsmaßnahmen. – 19 S., 19 Abb., 4 Tab., 1 Kt.; Krefeld (Geol. L.-Amt Nordrh.-Westf.). – [Unveröff.]
- ERNST, W. (1974): Schwermetallvegetation der Erde. – 194 S., 45 Abb., 100 Tab.; Stuttgart (G. Fischer).

- GODBOLD, D. L., & HÜTTERMANN, A. (1985): The Uptake and Toxicity of Mercury and Lead to Spruce (*Picea abies* KARST.) Seedlings. – Exk.-Führer Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben: 205–210, 2 Abb., 3 Tab.; Göttingen.
- FRÜCHTENICHT, K., & VETTER, H. (1982): Charakterisierung der Schwermetallbelastung durch Messung der Schwermetallgehalte in Pflanzen. – Landwirtschaftl. Forsch., Sonderh., **39**: 154–163, 5 Abb., 2 Tab.; Frankfurt/M.
- HERMANN, R. (1979): Untersuchungen zur Bestimmung von Pb, Cu, Zn, As, Se und Sb in Böden und deren Ausgangsgesteinen mit ausgewählten Beispielen aus der nördlichen Eifel. – Diss. RWTH Aachen: 124 S., 12 Abb., 34 Tab.; Aachen.
- JAWORSKI, J. F., & BALDI, F., & BERNHARD, M., & BRINCKMAN, F. E., & HECHT, H. P., & KLOKE, A., & LEGOVIC, T., & MCKENZIE, I. M., & NRIAGU, I. O., & PAGE, A. L., & SAUERBECK, D. R., & WASSERMAN, K. J. (1984): Routes of Exposure to Humans and Bioavailability. Group Report. – In: Changing Metal Cycles and Human Health. Report of the Dahlem Workshop on Changing Metal Cycles and Human Health, Berlin 1983: 375–388, 1 Abb., 2 Tab.; Berlin, Heidelberg, New York, Tokio (Springer).
- KLOKE, A. (1980): Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden. – Mitt. VDLUFA, 1980 (1–3): 9–11, 1 Tab.; Darmstadt.
- KÖNIG, W., & KRÄMER, F. (1985): Schwermetallbelastung von Böden und Kulturpflanzen in Nordrhein-Westfalen. – Schr.-R. L.-Anst. Ökol., Landschaftsentw. u. Forstplan. Nordrh.-Westf., **10**: 156 S., 54 Abb., 63 Tab., 1 Übersichtskt.; Recklinghausen.
- KUNTZE, H., & NIEMANN, J., & ROESCHMANN, G., & SCHWERTFEGER, G. (1981): Bodenkunde. – 407 S., 130 Abb., 101 Tab.; (Ulmer Verl.); Stuttgart.
- MAYER, R. (1981): Natürliche und anthropogene Komponenten des Schwermetallhaushalts von Waldökosystemen. – Göttinger bodenkdl. Ber., **70**: 292 S., 15 Abb., 26 Tab.; Göttingen.
- Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen [Hrsg.] (1975): Umweltprobleme durch Schwermetalle im Raum Stolberg. – 47 S., 14 Abb., 5 Tab.; Düsseldorf.
- PHILIPPI, R. O. (1964): Die Bemühungen um die Wiederherstellung der Landschaft im Bleiabbaugebiet Mechernich, Kreis Schleiden. Ein Beitrag zum Problem der Rekultivierung von Halden. – In: Zehn Jahre Landschaftspflege im Rheinland 1953–1963. – Schr.-R. Minister Landesplan., Wohnungs- u. öffentl. Arb. Land Nordrh.-Westf.: 42–49, 12 Abb.; Düsseldorf.
- PLUQUET, E. (1983): Die Bedeutung des Tongehalts und des pH-Wertes für die Schwermetallaufnahme einiger Kulturpflanzen aus kontaminierten Böden. – Forsch.-Ber. 103 01210 UB – FB 82–035 Umweltbundesamt Berlin: 114 S., 20 Abb., 43 Tab.; Berlin.
- RIETZ, E., & SÖCHTIG, H. (1981): Extraktionsverhalten und Bindung von Schwermetallen in Böden unterschiedlichen Belastungsgrades. – Landwirtschaftl. Forsch., Sonderh., **38**: (Kongr.-Bd. Trier 1981): 382–391, 7 Abb., 2 Tab.; Frankfurt.
- RÖSLER, H. J., & LANGE, H. (1976): Geochemische Tabellen. – 328 S., 112 Abb., 166 Tab.; Leipzig (VEB Dt. Verl. Grundstoffindustrie).
- SCHALICH, J., & SCHNEIDER, F. K., & STADLER, G. (1986): Die Bleierzlagerstätte Mechernich – Grundlage des Wohlstandes, Belastung für den Boden. – Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., **34**: 11–91, 25 Abb., 5 Tab., 2 Taf.; Krefeld.
- SCHAEFFER, F., & SCHACHTSCHABEL, P. (1982): Lehrbuch der Bodenkunde. – 442 S., 186 Abb., 97 Tab., 1 Farbtaf.; Stuttgart (Enke).
- SCHLICHTING, E., & BLUME, H. P. (1966): Bodenkundliches Praktikum. – 209 S., 35 Abb., 38 Tab., 1 Farbtaf.; Hamburg, Berlin (P. Parey).
- SCHNEIDER, F. K. (1982): Untersuchungen über den Gehalt an Blei und anderen Schwermetallen in den Böden und Halden des Raumes Stolberg (Rheinland) – Geol. Jb., **D53**: 43 S., 8 Abb., 2 Tab., 1 Taf.; Hannover.
- SCHÜTT, P. (1984), unter Mitarb. von BLASCHKE, H., & HOLDENRIEDER, O., & KOCH, W., & LANG, K. J., & SCHUCK, H. J., & STIMM, B., & SUMMERER, H. (1984): Der Wald stirbt an Streß. – 162 S., 28 Abb., 9 Tab.; München (C. Bertelsmann).
- SCHÜTT, P., & KOCH, W., & BLASCHKE, H., & LANG, K. J., & SCHUCK, H. J., & SUMMERER, H. (1983): So stirbt der Wald. – 95 S., 57 Abb.; München (BLV-Verl.).

- SEEKAMP, G. (1977): Umsatz von Schwermetallen in Waldökosystemen. – Gött. bodenkdl. Ber., **46**: 1 – 129, 14 Abb., 33 Tab.; Göttingen.
- THOME, K. (1954): Gutachten des Amtes für Bodenforschung Landesstelle Nordrhein-Westfalen über die geologisch-bodenkundlichen Untersuchungen von Halden der Gewerkschaft Mechnicher Werke. – 26 S., 10 Abb., 1 Tab., 6 Kt.; Krefeld (Geol. L.-Amt Nordrh.-Westf.). – [Unveröff.]

Eingang des Manuskriptes: 4. 7. 1986