Mitt. POLLICHIA	73	49 – 71	12 Abb.	4 Tab.	Bad Dürkheim/Pfalz 1985/86
					ISSN 0341-9665

Andrea M. THOM

Schwermetallverteilungen in den Böden des Seelberges bei Obermoschel (Moschellandsberg-Vulkankomplex/Pfalz, Saar-Nahe-Becken)

Kurzfassung

THOM, A. M. (1985/86): Schwermetallverteilungen in den Böden des Seelberges bei Obermoschel (Moschellandsberg-Vulkankomplex/Pfalz, Saar-Nahe-Becken). – Mitt. POLLICHIA, 73: 49 – 71, Bad Dürkheim/Pfalz.

Anhand systematischer Bodenanlysen wurde am Seelberg/Obermoschel (Pfalz) – ca. 50 km südwestlich Mainz – eine geochemische Schwermetallprospektion durchgeführt. Die hydrothermal entstandene, mit einem intrusiven Andesitkörper assoziierte Buntmetallvererzung des Seelberges ist Teil des Moschellandsberg-Vulkankomplexes. Die Erze treten teils gangähnlich auf Verwerfungen, teils als Imprägnationen in Breccien oder Sedimentgesteinsschollen auf. Sowohl die pH/Eh-Bedingungen (pH: 3.6 – 8.0, Eh: 0.368 – 0.645 V) als auch der residuale Braunerdeboden im Arbeitsgebiet begünstigen die Ausbildung von sekundären Dispersionshöfen der in den Erzen angereicherten Metalle im Boden über der Vererzung. Deshalb war es möglich, durch Bodenprobenanalysen die mineralisierten Zentren und deren Ausdehnung genauer zu erfassen sowie systematische Anomalien einzelner Metalle nachzuweisen.

Hierfür wurden 259 Bodenproben aus dem B-Horizont auf die Elemente Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg, Ni, Mo, Fe, Mn und Ca analysiert. Deren mit heißem Königswasser ($HCl:HNO_3 = 3:1$ (Vol. %)) extrahierbare Anteile wurden mit einem Emissionsspektrometer gemessen, das als Anregung ein induktiv gekoppeltes Plasma aufwies.

Cu, As, Sb, Pb und Zn zeichnen sich am Seelberg durch flächenhafte, räumlich kohärente und beinahe deckungsgleiche Anomalien in dem die Vererzung überlagernden Boden aus. Abseits dieser Hauptmineralisationszone und nicht signifikant mit den übrigen analysierten Metallen assoziiert treten sowohl anomale As- als auch Cu-Anreicherungen in den Böden auf. Vermutlich zeigen diese separate Mineralisationszentren an, in denen As- bzw. Cu-Erze dominieren.

Die Metalle Ni, Hg und Mo sind nicht signifikant anomal angereichert.

Die Vererzungen führen nicht nur zu den genannten Anomalien, sondern auch zu um den Faktor 2.5 – 4.5 gegenüber Referenzwerten erhöhten Background-Konzentrationen von As, Sb und Mo. Dadurch ist die erhöhte Schwermetallbelastung in den Böden am Seelberg nicht nur auf die Bereiche direkt über den Mineralisationen beschränkt. Es ist fraglich, ob dies ohne nachteilige Auswirkungen auf die gesundheitliche Unbedenklichkeit der Ackerbauprodukte dieses Gebietes bleiben kann.

Abstract

THOM, A. M. (1985/86): Schwermetallverteilungen in den Böden des Seelberges bei Obermoschel (Moschellandsberg-Vulkankomplex/Pfalz, Saar-Nahe-Becken) [Distribution of heavy metals in soils of the Seelberg (Moschellandsberg Volcanic Complex/Palatinate, Saar-Nahe Basin)]. – Mitt. POLLICHIA, 73: 49 – 71, Bad Dürkheim/Pfalz.

A detailed geochemical investigation was carried out at Seelberg/Obermoschel (Palatinate) (ca. 50 km SW of Mainz), by systematic sampling of residual soil. The hydrothermal Cu-As-Sb-Pb-Zn-mineralization of the Seelberg, which is associated with an andesite complex, is part of the Moschellandsberg volcanic area. The ores occur as replacements along veins, as disseminated sulphides in breccias and in areas of tectonically disrupted sedimentary rocks.

Both the pH/Eh-conditions (pH: 3.6 – 8.0, Eh: 0.368 – 0.645 V) and the residual braunerde in the study area favoured the formation of secondary dispersion patterns of ore metals in the soil overlying the mineralized areas. It was therefore possible by analysing soil samples to define both the centres of mineralisation and their extensions. Using this method anomalies characteristic of individual metals could be identified.

259 soil samples from the B-horizon were analysed for Cu, Zn, Pb, As, Sb, Ni, Hg, Mo, Fe, Mn and Ca. The samples were leached with a mixture of 3:1 HCl and HNO_3, and the concentrations of soluble components were measured with an inductive coupled plasma spectrometer (ICP).

Cu, As, Sb, Pb and Zn are characterized by extensive, spatially coherent and nearly congruent anomalies in the soil overlying the deposit. Outside the main ore zone and essentially independant of the other metals are found abnormaly high As and Cu soil anomalies indicating additional mineralization sources, one dominated by As, the other by Cu.

In contrast, Ni, Hg and Mo do not have significant anomalies.

The ore deposit not only causes the above mentioned anomalies, but also increases background concentrations of As, Sb and Mo by factors about 2.5 – 4.5 compared with reference values. Consequently, the high heavy metal concentrations of the Seelberg soils are not restricted to areas directly overlying the mineralization. Wether this may have a deleterious effect on the agricultural products of this region is questionable.

Résumé

THOM, A. M. (1985/86): Schwermetallverteilungen in den Böden des Seelberges bei Obermoschel (Moschellandsberg-Vulkankomplex/Pfalz, Saar-Nahe-Becken).

[Répartition des métaux lourds dans les sols de Seelberg (complexe volcanique du Moschellandsberg/Palatinat, Bassin du Sarre-Nahe)]. – Mitt. POLLICHIA, 73:49 – 71, Bad Dürkheim/Pfalz.

On a entrepris des analyses systématiques du sol dans le Seelberg/Obermoschel (Palatinat) à environ 50 km au sud de Mayence. Corrélativement à ces analyses, on a mené une prospection géochimique des métaux lourds. La minéralisation des métaux, d'origine hydrothermale du Seelberg, associée à une andésite intrusive, fait partie du complexe volcanique du Moschellandsberg. Les minerais se trouvent d'une part en filons sur des failles, d'autre part en imprégnations dans des brèches ou dans des blocs sédimentaires. De telle sorte que les conditions pH-Eh et les sols de terre brune résiduels dans la zone de travail favorisent la formation de zones de dispersion secondaires. Ces zones de dispersion secondaires se forment dans les minerais à teneur enrichie en métal contenu dans le sol, au-dessus de la minéralisation. Cela a permis, par des analyses du sol, de concevoir exactement les zones minéralisées et leur répartition, ainsi que d'apporter la preuve d'isolignes chimiques («anomalies») systématiques de métaux isolés. On a analysé 259 échantillons de sol provenant de l'horizon B, pour trouver les éléments Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg, Ni, Mo, Fe, Mn et Ca. On a relevé ces éléments dans des parties extractibles grâce à un spectromètre d'émission, à l'aide de l'acide HCl : $HNO_3 = 3:1$ (ce spectromètre d'émission a un plasma couplé inductivement qui donne des impulsions). Dans le Seelberg, on trouve les éléments Cu, As, Sb, Pb et Zn dans le sol situé au-dessus de la minéralisation. Ces éléments sont caractérisés par des «anomalies» superficielles, cohérentes par endroits, et presque identiques. Il y a des zones anormales d'arsenic ainsi que d'autres zones de minéralisations dans lesquelles dominent des minerais d'arsenic ou de cuivre. Elles se trouvent à côté de la zone de minéralisation principale, mais pas associées de manière significative avec les autres métaux analysés. La concentration des métaux tels que Ni, Hg et Mo augmente anormalement mais pas de manière significative. Les minéralisations ne conduisent pas seulement aux «anomalies» connues, mais également à des concentrations «background» d'As, Sb et Mo, de 2,5 à 4,5 fois plus élevées que les contenus référentiels.

De ce fait, cette concentration en métaux lourds dans le sol du Seelberg n'est pas seulement limitée aux zones directement situées au-dessus des minéralisations. On peut se demander si cette concentration va rester, dans cette région, sans conséquences néfastes en ce qui concerne l'agriculture pour la santé de l'homme.

1. Einführung

Bei der geochemischen Lagerstättenexploration spielt die Untersuchung von Böden eine große Rolle. Die Eigenschaften dieser Verwitterungsprodukte werden außer durch Klimabedingungen, organische Substanzen o. ä. auch vom im Untergrund anstehenden Gestein

bestimmt, wenn ein günstiges Relief eine hinreichend lange Wechselwirkung zwischen Boden und Ausgangsgestein ermöglicht. Deshalb zeichnen sich an Störungen, Klüfte oder Gesteine gebundene Vererzungen durch entsprechend anomal hohe Metallkonzentrationen in den darüber lagernden Residualböden ab. Man spricht in diesem Zusammenhang von sekundären Dispersionshöfen der Metalle im Boden, weil deren Verteilung nicht durch primäre Prozesse während der Erzbildung, sondern durch sekundäre Prozesse wie Verwitterung, Migration und Oberflächenadsorption gesteuert wird. Aus diesem Grund lassen sich aus systematischen Bodenanalysen Rückschlüsse auf mögliche Lagerstätten im Untergrund ziehen.

In dieser Arbeit soll über eine geochemische Erkundung der Seelbergvererzung berichtet werden. Das Untersuchungsgebiet liegt im Nordpfälzer Bergland, ca. 50 km südwestlich von Mainz und 8 km östlich von Meisenheim (Abb. 1). Es ist Teil des Moschellandsberg-Vulkan-

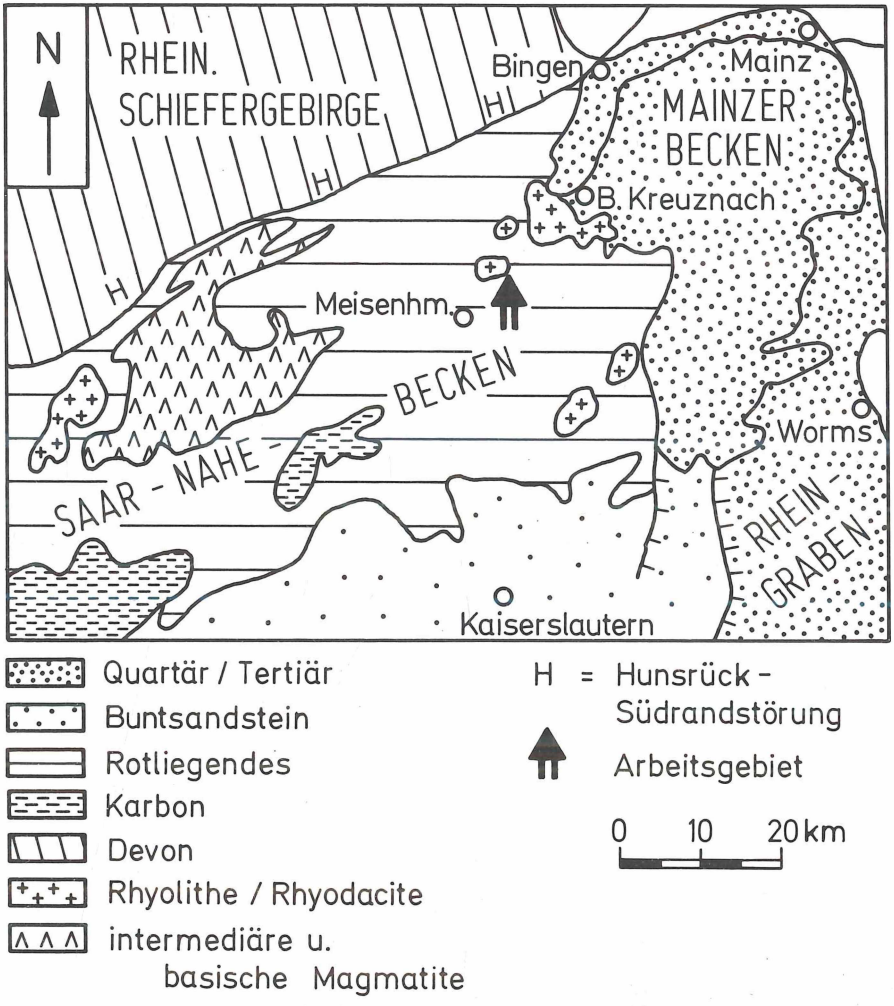


Abb. 1: Geologische und geographische Lage der Moschellandsbergcaldera.

komplexes, dessen Geologie von KRUPP (1981) und HABICHT (1952) beschrieben wurde. Die Untersuchung der Bodenproben (auf die Elemente Cu, Pb, Zn, As, Sb, Ni, Hg, Mo, Fe, Mn und Ca) hatte außer einer möglichst genauen Erfassung der Vererzungszentren und der Ausdehnung dieser bereits bekannten Cu-As-Sb-Pb-Zn-Mineralisation auch das Ziel, zu prüfen, ob Anomalien einzelner Elemente untereinander räumlich kohärent sind.

1.1 Geologischer Überblick

Das Moschellandsberggebiet liegt in der Saar-Nahe-Senke, die ein NE/SW-streichendes, permokarbones Becken mit einer mächtigen, fluvio-lakustrin und alluvial abgelagerten Sedimentfüllung darstellt (Abb. 1). Zahlreiche Effusionen und Intrusionen basaltisch/andesitischer und rhyolithischer Magmen wie auch pyroklastisches Material zeugen von einer lebhaften vulkanischen Tätigkeit während der Sedimentationsvorgänge, die auf ein tiefreichendes Bruchsystem zurückzuführen ist. Das Moschellandsberggebiet befindet sich in der Pfälzer Sattelzone. Sein geologischer Aufbau wird von einer flachen domartigen, vulkanotektonischen Aufwölbung der Schichten der mittleren und oberen Kusel-Gruppe bestimmt – der Moschellandsbergkuppel.

Ein Entstehungsmodell für den Moschellandsbergkomplex nach KRUPP (1981) geht von der Annahme einer andesitischen Magmakammer aus und erklärt die Kuppelstruktur durch die Intrusion dieses Magmas in Form eines Lakkoliths. Im Anschluß an die Aufwölbung brach, begleitet von pyroklastischen Eruptionen, die Kuppel im NE-Teil calderaartig ein. Dies führte zu einer starken tektonischen Störung des Gesteinsverbandes und zu einer durchschnittlichen Absenkung der Gesteinsschollen um ca. 100 m. Bei diesen Vorgängen wurden insgesamt etwa 0.25 km^3 Andesitmagma gefördert.

1.2. Die Erzvorkommen in der Moschellandsbergcaldera

Die Erzvorkommen des Moschellandsbergkomplexes befinden sich ausnahmslos innerhalb der Caldera. Hier sind die Quecksilbermineralisationen des Landsberges im Südteil der Caldera und die Buntmetallvererzungen des Seelberges im Nordteil zu unterscheiden (Abb. 2). In beiden Fällen handelt es sich um hydrothermal entstandene Mineralisationen (KRUPP 1981). Durch den calderaartigen Einbruch des Daches der Andesitintrusion entstand ein mikrotektonisches Bruchsystem innerhalb der Caldera. Im Anschluß an die Intrusion des Andesitkörpers zirkulierten auf diesen reaktivierten oder neugebildeten Verwerfungen hydrothermale Lösungen und führten unter anderem auch zur Bildung der Erzvorkommen des Seelberges und des Landsberges (KRUPP 1981).

Die durchgeführte geochemische Erkundung bezieht sich auf die Seelbergvererzung, die in der Literatur bisher nur ungenau beschrieben ist. KRUPP (1981) vermutet, daß die Erze teils gangähnlich auf Verwerfungen, teils als Imprägnationen in Breccien und Sedimentgesteinsschollen auftreten. Die Haupterzminerale sind Kupferkies (Hochtemperaturmodifikation), Zinkblende, Bleiglanz und Ag-haltige Fahlerze (z. B. Tetraedrit). Lokal sind Bournonit ($CuPbSbS_3$) und Löllingit ($FeAs_2$) in größeren Mengen zu finden. Außerdem treten als Gangfüllungen Fluorit, Turmalin und Calcit auf. Schon GÜMBEL (1888) beschrieb einige steil nach Osten einfallende Klüfte (ohne genaue Angabe der Streichrichtung), die die am Seelberg beobachteten Haupterzminerale führen. Weiter nennt er zwei 1.30–1.60 m mächtige Verwerfungsklüfte, an deren liegenden und hangenden Kluftgrenzen sich die Erzabscheidungsfolge in folgender Gangstruktur wiederspiegelt:

Begrenzendes Gestein – Fahlerz + Kupferkies – Bleiglanz (0.5–1.5 cm) – Kupferkies + silberhaltiges Fahlerz – silberhaltiges Fahlerz (0.2–1.0 cm) – silberhaltiges Fahlerz + Kupferkies – Breccie als Gangfüllung.

Die Erze des Seelbergs wurden zwischen 1429–1790 mit Unterbrechungen abgebaut. Nachdem man anfangs nur nach Silbererzen suchte, verlagerte sich von 1432 an das Haupt-

interesse auf Kupfererze. Einen Überblick über die Bergbaugeschichte vom Seelberg gibt ERMANN (1958).

Aufgrund der vielfältigen Wegsamkeiten des mikrotektonischen Bruchsystems, auf dem die erzbildenden Lösungen zirkulierten, ist zunächst die Frage offen, ob eine Hauptvererzungszone mit einer ausgedehnten, flächenhaften Anomalie oder viele kleinere Vererzungszentren mit räumlich nicht kohärenten Anomalien im darüber lagernden Residualboden existieren. Da die in der Seelbergvererzung angereicherten Metalle teils miteinander in

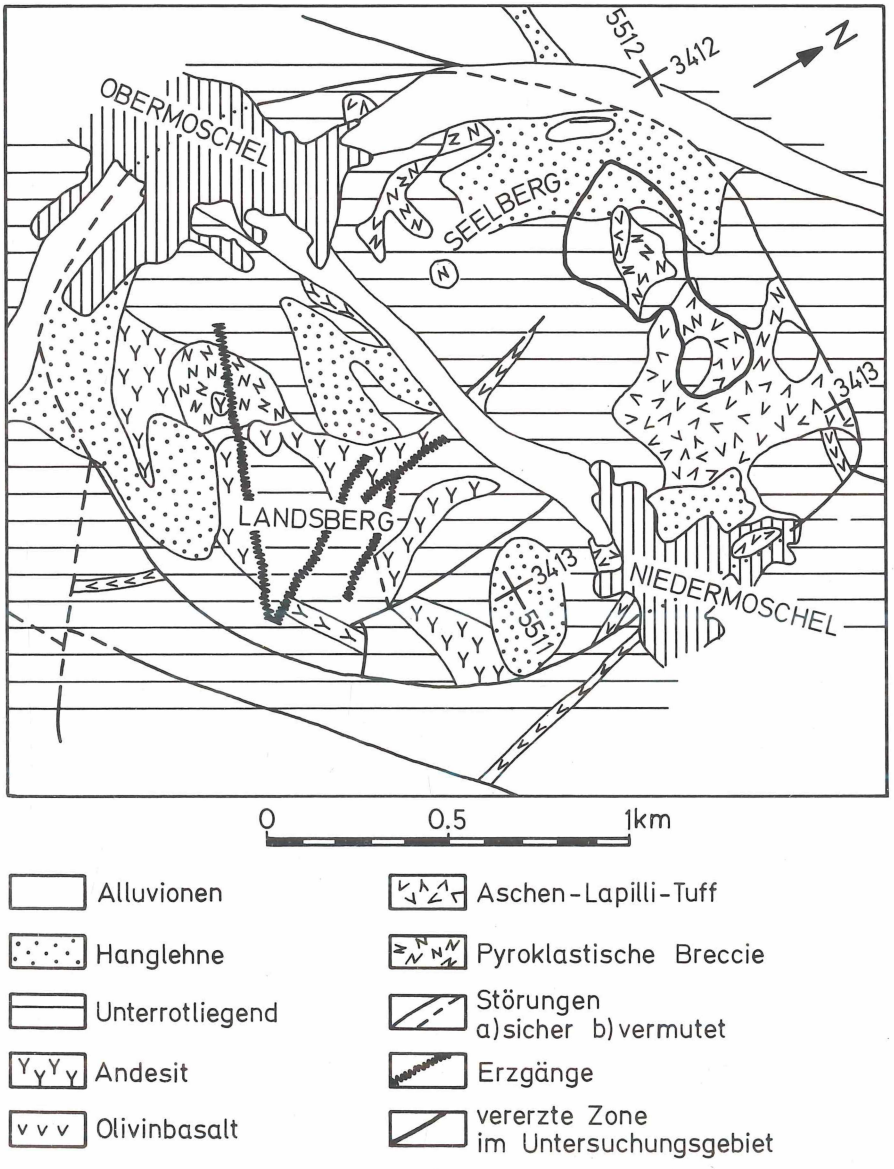


Abb. 2: Geologische Karte der Moschellandsbergcaldera (nach KRUPP 1981: 10).

denselben Erzmineralen (Fahlerze, $CuPbSbS_3$), teils getrennt in verschiedenen Mineralen ($CuFeS$, PbS, ZnS, $FeAs_2$) vorkommen, sind von vornherein sowohl kongruente Metallverteilungen als auch nicht deckungsgleiche Anreicherungszonen einzelner Metalle im Boden zu erwarten.

1.3 Probenahme

Im Bereich des Seelbergs wurden in einem quadratischen Beprobungsnetz 259 Bodenproben jeweils in einem Abstand von 50 m entnommen. Jeder Probeentnahmepunkt ist mit einer XY-Koordinate benannt.

Die Böden im Bereich des Seelbergs können fast ausschließlich als residuale Braunerden oder z. T. als Parabraunerden mit verlehmten B-Horizonten angesprochen werden, deren Entwicklungstiefe sich je nach Morphologie, Bewuchs und Ausgangsgestein unterscheidet.

Die untersuchten Proben stammen aus dem B-Horizont. Dieser erschien am geeignetsten, da hier die Akkumulation von Tonmineralen und Fe- u. Mn-Oxiden, von denen die Metalle fixiert werden, in der Regel am größten ist. Außerdem steigt der pH-Wert im B-Horizont gegenüber dem A_h-Horizont an (LEVINSON 1974) und führt so i. a. zu einer Mobilitätsabnahme der Metallionen (mit Ausnahme von Mo). Daher tritt der Kontrast zwischen Anomalie und Background im B-Horizont allgemein stärker hervor als in den übrigen Bodenhorizonten (LEVINSON 1974). GOLSCHANI-JAVADI (1977) bestätigte dies für Cu, Zn, Pb und Hg auch für den Boden am Seelberg.

1.4 Hinweise zur Aufbereitung und Analytik

Die Analysen wurden mit einem Emissionsspektrometer durchgeführt, das als Anregung ein induktiv gekoppeltes Plasma aufwies (ICP). Für eine bodengeochemische Erkundung möglicher Vererzungen im Untergrund sind vor allem die adsorptiv an die Bodenpartikel gebundenen Metalle von Interesse. Aus analytischen und gerätespezifischen Gründen wurde als Extraktionsmittel ein HCl/HNO_3-Gemisch im Volumenverhältnis 3 : 1 (Königswasser) verwendet. Mit diesem Extraktionsverfahren wurden in 259 Bodenproben die in heißem Königswasser löslichen Anteile an den Metallen Zn, Cu, Ni, Hg, Sb, As, Pb, Mo, Fe, Mn und Ca in der zuvor abgetrennten Siebfraktion zwischen 63 und 125 µm Korngröße analytisch bestimmt. Fe, Mn und Ca wurden deshalb mit in die Untersuchungen einbezogen, weil sie im Boden in relativ hohen Konzentrationen auftreten und die Analysenlinien der übrigen Metalle durch Linienspektrenüberlagerungen stören. Die Messungen dieser drei Elemente ermöglichen eine Korrektur der verursachten Linienstörungen. Außerdem ließen sich damit Rückschlüsse auf die im Arbeitsgebiet wirksamen und für die analysierten Elemente wichtigen Fixierungsprozesse im Boden ziehen. Neben derartigen Matrixeffekten können Fehler bei der Probenvorbereitung (Aufbereitung der Bodenproben, Weiterverarbeitung der Probenextrakte), der Atomanregung, der optischen Abbildung sowie der Registrierung weitere Ungenauigkeiten in die Analyse einbringen.

Die Meßwerte der untersuchten Proben sind mit einem maximalen Fehler von relativ 10–15 % behaftet. Dieser relativ hohe Fehler ist vermutlich hauptsächlich auf die in Bodenproben meist stark störenden Matrixeffekte zurückzuführen.

1.5 Geochemisches Verhalten der untersuchten Metalle

Vor der Darstellung und Diskussion der Analysedaten ist es notwendig, das geochemische Verhalten der Elemente wie Mobilität und Fixierung eingehender zu betrachten. Die Ausdehnung des sekundären Dispersionshofes eines Elementes hängt entscheidend von dessen Mobilität ab. Rückschlüsse von den Konzentrationsverteilungen der Metalle im Boden auf vermutete Vererzungen im Untergrund sind deshalb nur unter Berücksichtigung der Mobilität dieser Elemente möglich. Besonders große Bedeutung für die Mobilität der Metallionen im Oberflächenmilieu haben die drei Faktoren Ionenpotential (= Ladung Z/Ionenradius r), Oberflächenadsorption und Ionenaustausch an Kolloidpartikeln (Fe- und Mn-

Oxide bzw. -Hydroxide, organisches Material, Tone und Kieselerde) sowie Komplexbildung.

Elemente mit niedrigem Ladung/Ionenradius-Verhältnis ($Z/r < 3$) sind als einfache Kationen löslich, während solche mit einem hohen Wert ($Z/r > 12$) lösliche Oxidanionen (z. B. PO_4^{3-}, SO_4^{2-}, MoO_4^{2-}) bilden. Ionen mit einem mittleren Ionenpotential (z. B. Al^{3+}, Fe^{3+}, Mn^{4+}) dagegen sind wegen ihrer geringen Löslichkeit relativ immobil, ein Effekt, der durch Oberflächenadsorptionsprozesse an Kolloidpartikeln noch verstärkt werden kann (s. u.).

Abb. 3 stellt die Mobilität der wichtigsten Elemente als Funktion des Ionenradius und der Ionenladung graphisch dar (nach GORDON et al. 1958 (zitiert in LEVINSON 1974: 149)).

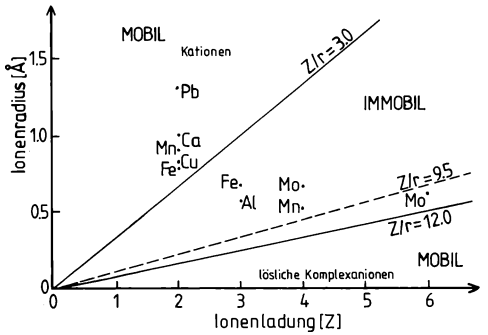


Abb. 3: Mobilität einiger Elemente in Abhängigkeit von Ionenradius und Ionenladung. (nach GORDON et al. 1958 (zitiert in LEVINSON 1974: 149))

Bei der durch Kolloidpartikel gesteuerten Fixierung von Metallionen im Boden beeinflußt die Ladung der Kolloidoberflächen entscheidend die Adsorptionskapazität. Unter niedrigen pH-Bedingungen tritt in der Lösung ein Wasserstoffionenüberschuß auf, der zu einer Anlagerung der H^+-Ionen an der Oberfläche von Kolloidpartikeln und zu einer positiven Ladung führt. Die Abhängigkeit zwischen Oberflächenladung und pH-Wert ist bei den verschiedenen Kolloidtypen unterschiedlich. So ist für die meisten kolloidalen Mn-Oxide bei einem pH-Wert von 7 eine starke negative Oberflächenladung charakteristisch, während bei pH kleiner 3 die von der Kolloidoberfläche absorbierten Wasserstoffionen eine positive Ladung bedingen. Bei pH 3 ist die Oberfläche ungeladen. Demgegenüber stehen die kolloidalen Fe-Oxidpartikel, deren Oberfläche bereits bei pH-Werten kleiner 8.5 positiv geladen ist. Abb. 4 stellt diese Abhängigkeit der Oberflächenladungen vom pH-Wert für Mn- und Fe-Oxide schematisch dar.

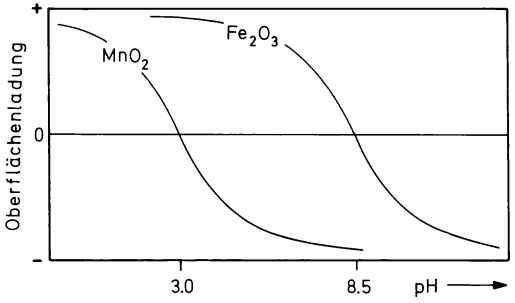


Abb. 4: Schematische Darstellung der Oberflächenladung von Mn- und Fe-Oxiden als Funktion vom pH-Wert (nach ROSE et al. 1979: 198).

Schließlich nimmt die Komplexbildung metallischer Elemente Einfluß auf deren Mobilität. Mit steigendem pH-Wert erreichen die meisten Metallkationen ihren Hydrolysepunkt und fallen als Oxide oder Hydroxide aus. In Tab. 1 sind die kritischen pH-Werte für die Hydrolyse einiger für diese Arbeit wichtiger Elemente zusammengestellt.

1.6 pH- und Eh-Bedingungen im Arbeitsgebiet

Die meisten Prozesse, die die Elementmobilität und somit die Löslichkeit der metallischen Elemente beeinflussen, sind pH-abhängig. Der Eh-Wert hat ebenfalls eine Bedeutung für das Mobilitätsverhalten, weil viele Elemente in mehr als einer Wertigkeitsstufe auftreten und die Elementeigenschaften sich in Abhängigkeit von der Valenz ändern. Das Verhältnis dieser beiden Größen – Wasserstoffionenkonzentration (pH) und Oxidationspotential (EH) – in der Lösung ist es, welches in erster Linie das Löslichkeitsverhalten eines Elementes bestimmt. Deshalb war es notwendig, die im Arbeitsgebiet herrschenden pH/Eh-Bedingungen zu bestimmen. Dies erfolgte an einer Auswahl von 25 Proben. Die gemessenen pH-Werte liegen in einem Schwankungsbereich von pH 3.6 bis pH 8.0 (Tab. 2). Bis auf einige Ausnahmen (s. u.) sind dies typische Werte für ein humides Verwitterungsmilieu mit gut drainierten Böden. Die pH-Werte schließen die Hydrolysepunkte der meisten in Tab. 1 aufgeführten Metallionen ein. Bei den sauren bis neutralen pH-Bedingungen im Arbeitsgebiet ist zwar eine Adsorption der Metalle durch Tonminerale und organische Substanzen möglich, jedoch steigt deren Adsorptionskapazität erst im alkalischen Milieu erheblich an. Dagegen spricht das vorliegende pH-Milieu für eine relativ starke Adsorption der Metallkationen an kolloidalen Mn-Oxiden. Die Fixierung durch kolloidale Fe-Oxide ist im Arbeitsgebiet von geringerer Bedeutung, da unter den gegebenen pH-Bedingungen deren Oberflächen postiv geladen oder neutral sind. Später diskutierte Korrelationen zwischen den Konzentrationen der Metalle und den Mn- bzw. Fe-Gehalten der Böden bestätigen diese Vermutungen.

Tab. 1: pH der Hydrolyse einiger Elemente (in verdünnten Lösungen) nach BRITTON 1955 (zitiert in LEVINSON 1974: 128))

Kation	pH	Kation	pH
Fe^{3+}	2.0	Ni^{2+}	6.7
Hg^{1+}	3.0	Zn^{2+}	7.0
Cu^{2+}	5.3	Hg^{2+}	7.3
Fe^{2+}	5.5	Ag^{1+}	7.5 – 8.0
Pb^{2+}	6.0	Mn^{2+}	8.5 – 8.8

Im Arbeitsgebiet besteht eine Abhängigkeit des pH-Wertes vom Ausgangsgestein der Böden sowie dem Oberflächenbewuchs. Das Arbeitsgebiet liegt im Nordteil der Moschellandsbergcaldera. Als Schlotfüllung treten hier neben eingesunkenen Sedimentgesteinsschollen des Unterrotliegenden (mit vereinzelten Olivinbasaltgängen) und quartären Hanglehmablagerungen pyroklastische Breccien und Tuffe auf (Abb. 2). In den Komponenten der Breccien und Tuffe sind nach KRUPP 1981 alle in der Umgebung vorkommenden Nebengesteinstypen vertreten (Sedimentgesteine des Unterrotliegenden, Andesit- und Olivinbasaltbruchstücke).

In den Böden, die sich auf den pyroklastischen Breccien oder Tuffen entwickelten, wurden allgemein höhere pH-Werte gemessen als in denjenigen mit Hanglehm oder Unterrotliegend-Sedimentgesteinen als Ausgangssubstrat. Da sich die Ausgangsgesteine der Böden in ihrer Zusammensetzung jedoch nur geringfügig unterscheiden (s. o.), können diese nicht die alleinige Ursache für die gesamte Schwankungsbreite der pH-Werte darstellen. Im Verwitterungsmilieu prägen außer dem Ausgangsmaterial der Böden auch die in den oberen Erdschichten zirkulierenden Regen- und Flußwässer die pH-Bedingungen. Typische Werte dieser Wässer bewegen sich zwischen pH 5.5 – 7.5. Ein Teil der Proben ist jedoch deutlich durch saurere pH-Bedingungen gekennzeichnet, die für dieses Oberflächenmilieu nicht charakteristisch sind (pH 3.5 – 4.5). Diese Proben stammen ausnahmslos aus Böden mit Laubwaldbe-

wuchs, während in Böden mit Wiesenbewuchs pH-Werte zwischen 4.5 – 6.5 dominieren. Proben mit höheren pH-Werten ist keine bevorzugte Vegetation zuzuordnen.

Die anomal niedrigen pH-Werte sind vermutlich auf anthropogene Einflüsse (saure Deposition) zurückzuführen.

Die an den gleichen Proben bestimmten Eh-Werte liegen zwischen 0.368 – 0.645 Volt (Tab. 2). Wie die pH-Werte sind auch diese typisch für ein den Verwitterungsprozessen ausgesetztes Milieu.

Abb. 5 stellt die Position der 25 ausgewählten Proben im pH-Eh-Diagramm dar. Mit Ausnahme von vier Proben fallen diese in den oberen, relativ stark oxidierenden Teil des für das Verwitterungsmilieu typischen Bereiches. Die starke negative lineare Korrelation der pH- und Eh-Werte ist ebenfalls charakteristisch für dieses Milieu.

Tab. 2: pH/Eh-Werte von 25 repräsentativen Proben.

Geländekoordinate der Probe	pH	Eh (V)
2/3	7.51	0.418
2/0	3.59	0.569
6/1	3.81	0.645
11/0	3.87	0.626
12/4	5.50	0.473
13/5	6.20	0.459
13/3	5.74	0.498
13/2	6.93	0.416
13/1	4.65	0.544
13/-3	5.14	0.509
13/-4	6.22	0.496
13/-11	7.50	0.428
15/5	6.11	0.464
15/2	4.00	0.614
16/-1	4.58	0.529
16/-6	5.81	0.471
17/3	5.27	0.500
17/-4	7.49	0.368
17/-9	7.98	0.398
18/-2	5.54	0.486
19/-9	7.10	0.416
20/2	5.70	0.508
21/-7	7.47	0.428
22/-2	7.01	0.449
23/-4	7.78	0.440

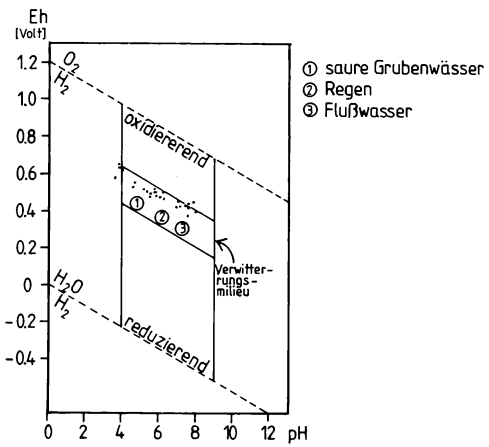


Abb. 5: Position der 25 Proben im pH-Eh-Diagramm (nach LEVINSON 1974: 130).

2. Diskussion

2.1 Darstellung der Daten mittels Isolinien- und Anomalienkarten

Die Häufigkeitsverteilungen der Analysendaten zeichnen sich durch polymodale, positiv asymmetrische Normalverteilungen aus (Modus > Median > Mittelwert). Durch eine Logarithmierung (Dekadischer Logarithmus) der Daten wurden diese einer Normalverteilung angenähert und so für weitere statistische Untersuchungen an konsistentem Datenmaterial zugänglich gemacht.

Eine Anomalie wird nicht allein durch die absolute Höhe des Meßwertes charakterisiert, sondern vielmehr durch das Verhältnis des erhöhten Wertes zur gemessenen Konzentration in der Umgebung, da die Background-Werte regional variieren sowie vom Nebengestein abhängig sind. Deshalb ist zur Definition der für das Arbeitsgebiet gültigen Background-, Threshold-(= Grenzwert) und Anomaliebereiche eine Klassifikation der Daten notwendig. Dieser Arbeit liegt ein Klassifikationsschema nach BOLVIKEN (1967) zugrunde. Hierfür wurde jeweils die logarithmisch transformierte Summenkurve (Abszisse mit arithmetischer Skaleneinteilung: Elementkonzentrationen (log ppm); Ordinate logarithmisch verzerrt: kumulative Häufigkeit (%)) eines Elementes graphisch in sechs verschiedene Konzentrationsbereiche untergliedert und der entsprechende Bereich als Background, Threshold, mögliche Anomalie, Anomalie oder hohe Anomalie definiert. Diese Einteilung beruht darauf, daß bestimmten Häufigkeitsspannen (mit denen die jeweiligen Elementkonzentrationen auftreten) klassifizierte Bereiche zugeordnet werden. In Tab. 3 ist das Klassifikationsschema aufgeführt.

Tab. 3: Klassifikationsschema nach BOLVIKEN (1967).

Gruppe	%	Kum. %	Symbol	Klassifikation
1	50.0	0 - 50.0	.	niedriger Background
2	24.99	50.01 - 75.00	.	erhöhter Background
3	12.49	75.01 - 87.50	○	Threshold
4	6.24	87.51 - 93.75	⊕	mögliche Anomalie
5	3.12	93.76 - 96.88	◒	Anomalie
6	3.11	96.89 - 100.0	●	hohe Anomalie

Die Identifikation und Einstufung anormaler Elementanreicherungen gegenüber nicht signifikant erhöhten Konzentrationen beruht auf dem Verhältnis Anomalie/Background (A/B), dem jeweils die arithmetischen Mittel des Background- und des hohen Anomaliebereiches (berechnet nach BOLVIKEN, s. o.) zugrunde liegen.

Ni, Hg, Mo:

Unter Anwendung dieser Berechnungen ließen sich im Arbeitsgebiet für Ni, Hg und Mo keine signifikant anomalen Konzentrationen feststellen (A/B_{Ni} : 3.1, A/B_{Hg} : 3.9, A/B_{Mo} : 3.3). Im Gegensatz zu den übrigen analysierten Metallen ist Mo unter den hier vorliegenden oxidierenden Bedingungen bei pH 5 - 8 hoch mobil. Dadurch wird eine Mo-Akkumulation im Boden behindert. Dies könnte eine Ursache für die niedrigen Mo-Gehalte sein. Die Mo-Verteilung wird unten eingehender diskutiert.

Zn, Pb, Cu, Sb, As:

Zn, Pb, Cu, Sb und As zeichnen sich dagegen durch signifikante Anomalien aus, deren Form und Ausdehnung mittels Isolinienkarten (Abb. 6a - 10a) wiedergegeben werden. Die

Einteilung der XY-Achsen in den Karten entspricht den Koordinaten der Probeentnahmepunkte im Gelände. Die Lokalisierung der anomalen Konzentrationen auf den Karten wird durch eine eingezeichnete Bezugsisolinie erleichtert, deren Wert einer Konzentration des oberen Threshold-Bereiches (berechnet nach BOLVIKEN, s. o.) entspricht und jeweils angegeben ist.

Die Konzentrationen der Metalle Zn, Pb, Cu, Sb und As sind außer auf den Isolinienkarten auch auf geochemischen Anomalienkarten dargestellt. Hierfür wurden die Konzentrationsspannen von fünf der nach BOLVIKEN (s. o.) ermittelten Klassen (die beiden Background-Bereiche wurden für die Darstellung zusammengefaßt) mittels der aus Tab. 3 zu ersehenden Symbole auf den entsprechenden geochemischen Karten eingetragen (Abb. 6b–10b). Die Abszissen- und Ordinateneinteilungen in diesen Darstellungen geben die Geländekoordinaten wieder. An jedem Probeentnahmepunkt ist jeweils für jedes Element gekennzeichnet, in welchem Konzentrationsbereich der Klassifikation die direkt an dem jeweiligen Punkt gemessene Metallkonzentration fällt.

Sowohl in den Isolinien- als auch in den Anomalienkarten zeichnen sich die Konzentrationsverteilungen der fünf Metalle/Metalloide Zn, Pb, Cu, Sb und As durch flächenhafte Anomalien aus. In den Abb. 11a u. b sind die anomalen Konzentrationsbereiche der Elemente Cu, Zn, Pb bzw. Sb, As, Ag jeweils gemeinsam in einer Karte dargestellt. Eingezeichnet sind jeweils die Bezugsisolinien des oberen Threshold-Bereiches (Cu: 75, Pb: 200, As: 150, Sb: 25, Zn: 35 ppm), die bereits in den Einzelkarten markiert sind.

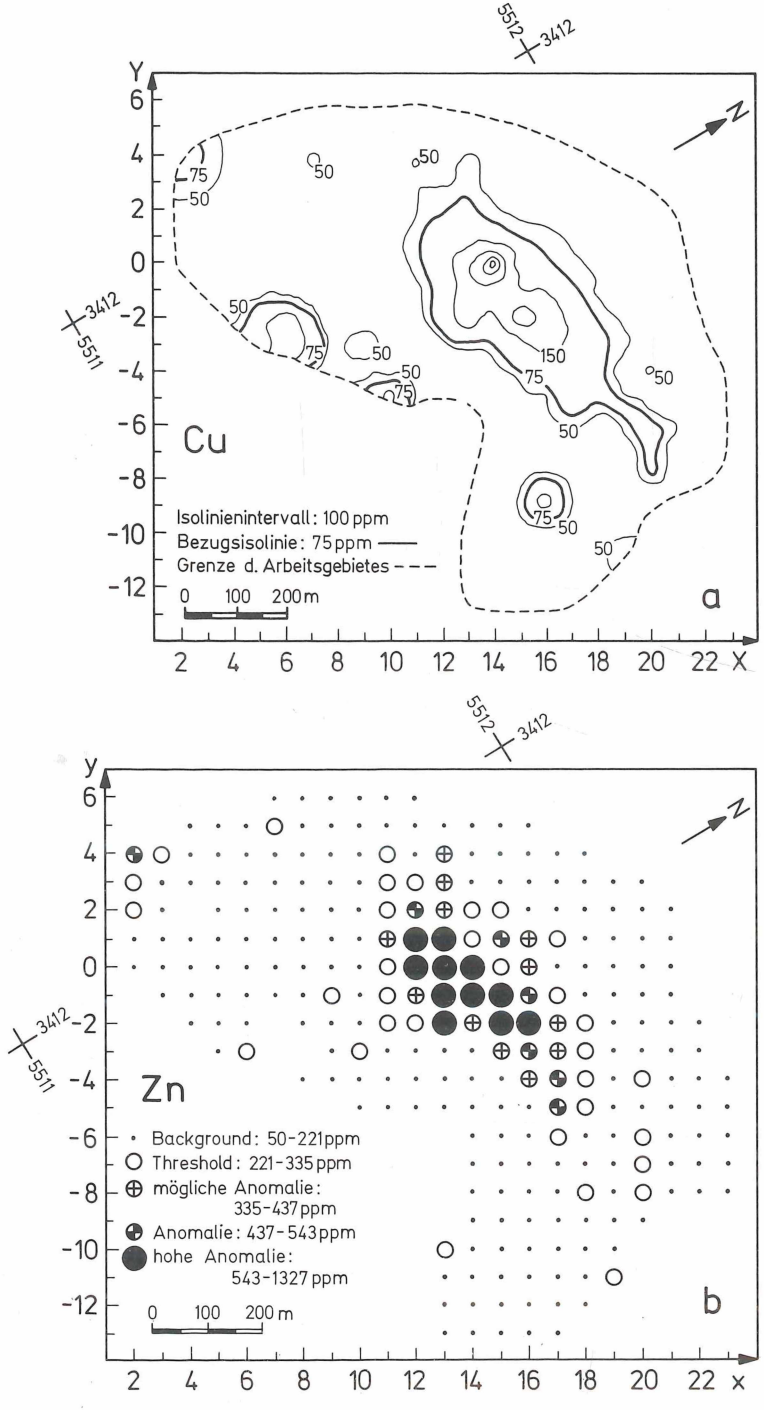


Abb. 6: Isolinien- (a) und Anomalienkarten (b) von Zn.

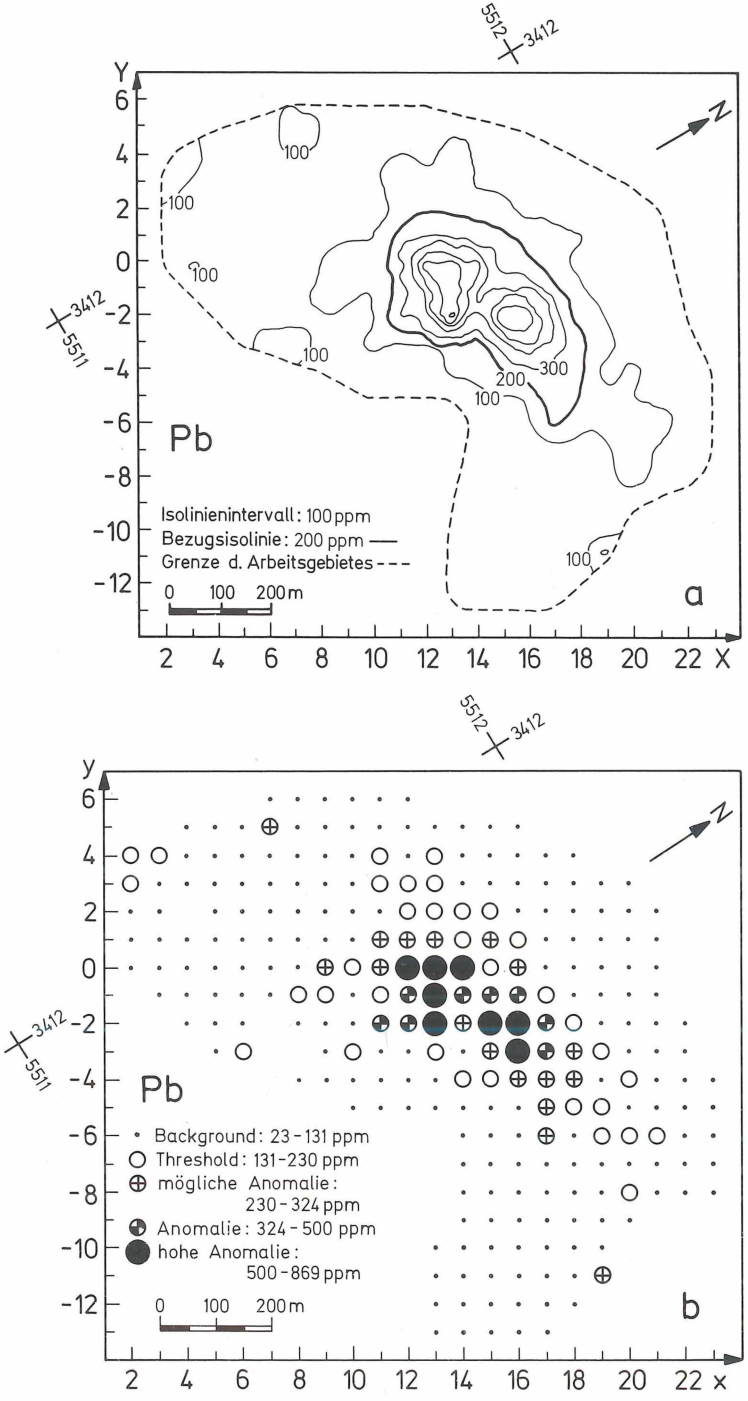


Abb. 7: Isolinien- (a) und Anomalienkarten (b) von Pb.

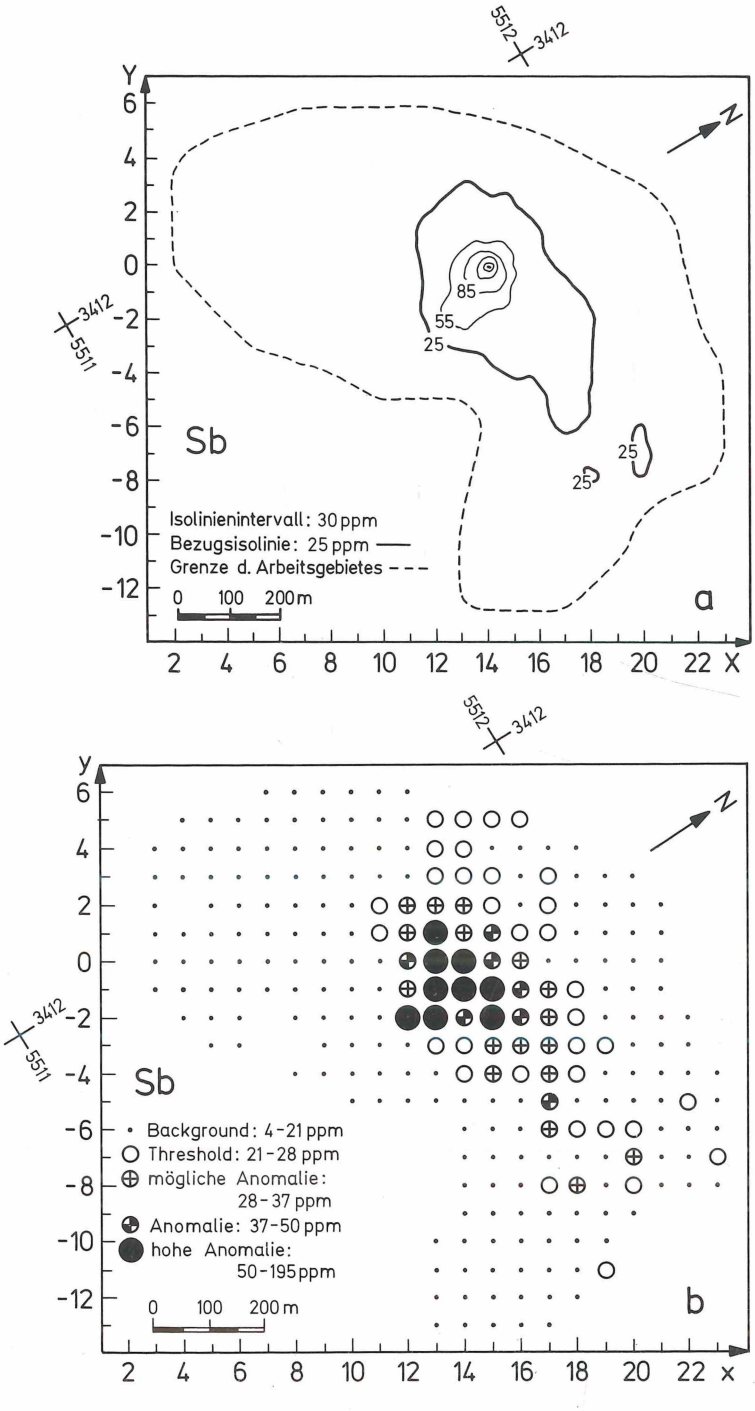


Abb. 8: Isolinien- (a) und Anomalienkarten (b) von Sb.

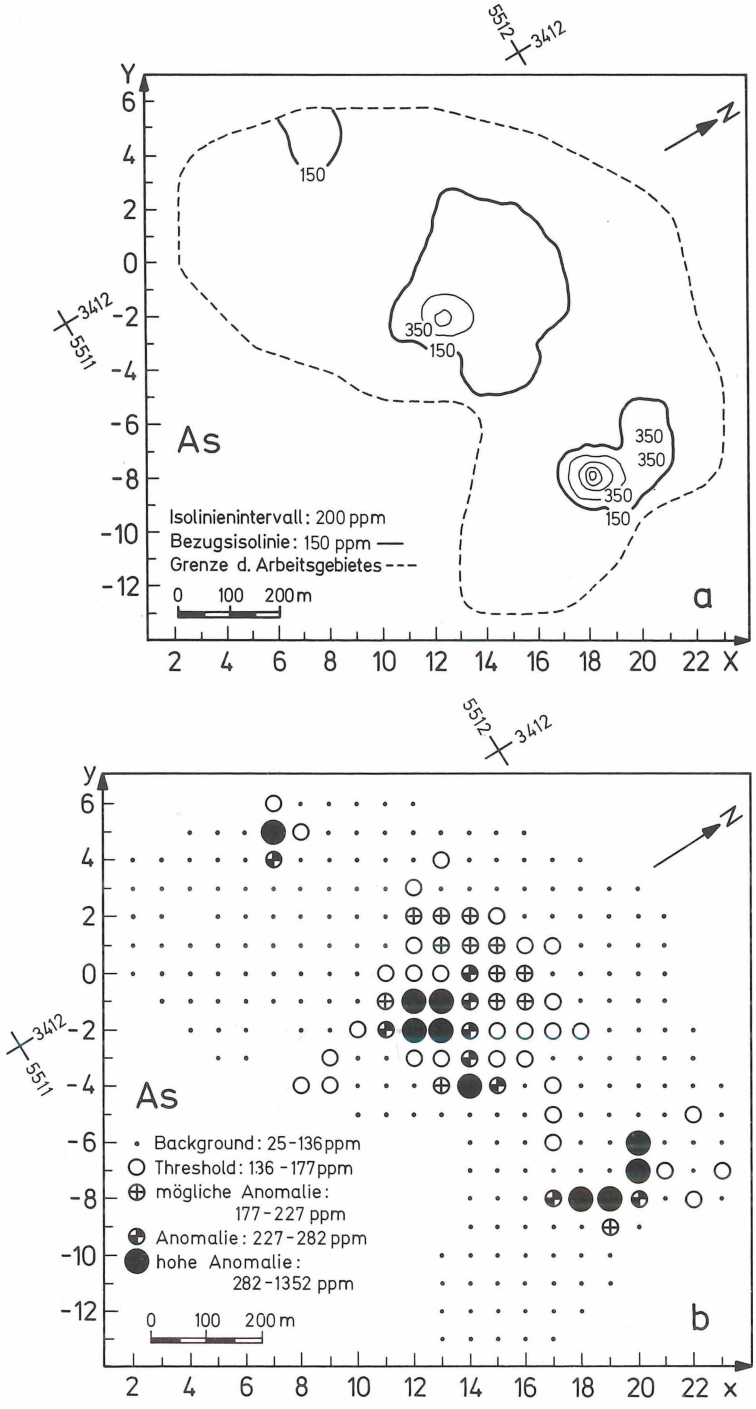


Abb. 9: Isolinien- (a) und Anomalienkarten (b) von As.

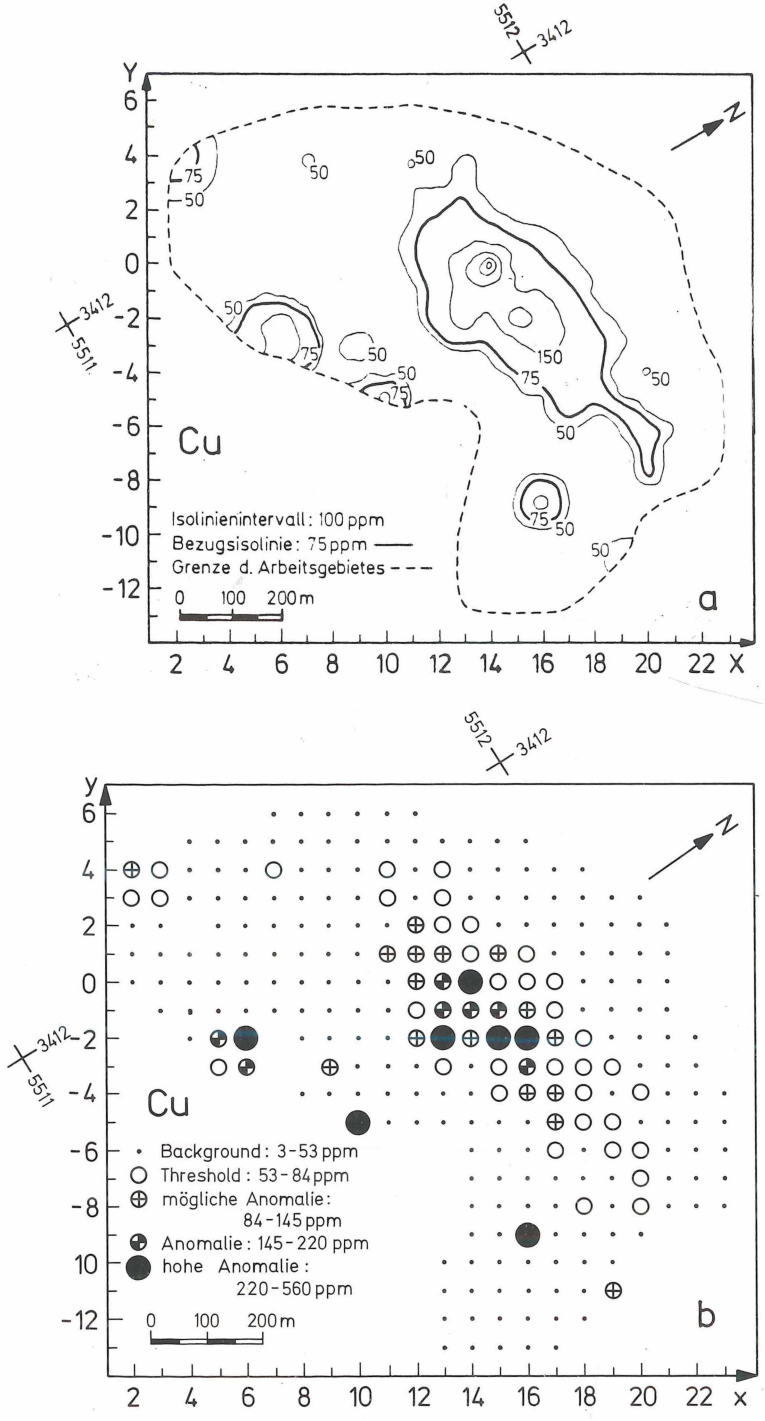


Abb. 10: Isolinien- (a) und Anomalienkarten (b) von Cu.

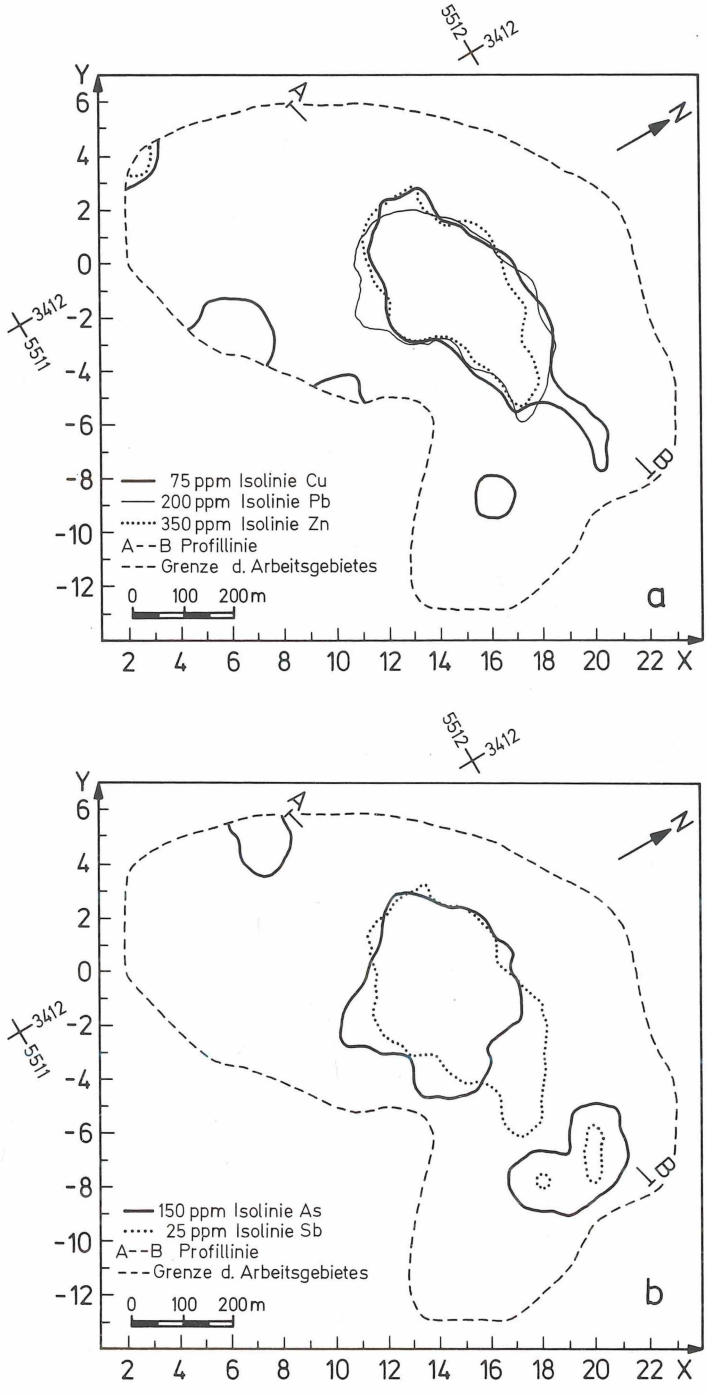


Abb. 11: Isolinienkarten mit anomalen Cu-, Pb-, Zn-Konzentrationen (a) und As-, Sb-, Ag-Konzentrationen (b).

Pb, Zn, Sb:

Aus Abb. 11 ist zu ersehen, daß die anomalen Hauptanreicherungszonen von Pb, Zn und Sb beinahe vollständig deckungsgleich sind. Die Anomalie/Background-Verhältnisse bewegen sich ebenfalls in der gleichen Größenordnung: $A/B_{Zn}=6.9$, $A/B_{Pb}=8.9$, $A/B_{Sb}=9.6$). Derartige Übereinstimmungen werden durch ähnliche chemische Eigenschaften begünstigt. Abb. 3 zeigt, daß Zn^{2+} und Pb^{2+} beide relativ niedrige Ladung/Ionenradius-Verhältnisse ($Z/r_{Zn}: 2.4$, $Z/r_{Pb}: 1.6$) aufweisen und daher als einfache Ionen löslich sind. Der Hydrolysepunkt für Pb^{2+} liegt bei pH 6.0, der für Zn^{2+} bei pH 7.0. Unter den im Arbeitsgebiet herrschenden pH-Bedingungen (pH: 3.6 – 8.0) wird dieser Punkt für beide Elemente stellenweise überschritten, so daß dadurch deren Löslichkeit herabgesetzt und eine Fixierung begünstigt wird. Während die nach BOLVIKEN (1967) berechneten Background-Werte für Zn und Pb den normalen Konzentrationen in Böden nicht mineralisierter Gebiete (Zn: 50 – 221 ppm, Referenz (s. u.): 10 – 400 ppm; Pb: 23 – 131 ppm, Referenz: 3 – 250 ppm) entsprechen, ist der Sb-Background im Arbeitsgebiet etwa um den Faktor 2.5 höher als der Referenzwert (Sb: 4.2 – 21.4 ppm, Referenz: 2 – 9 ppm). Diese und die folgenden Referenzwerte stammen aus einer Arbeit von ANDREWS-JONES (zitiert in LEVINSON 1974: 121). Nach MURRAY (1975a) und KINNIBURGH et al. (1976) ist die relative Adsorptionsaffinität für Sb bezogen auf Mn- und Fe-Oxide im Gegensatz zu Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+} sehr gering. Dies könnte neben einer größeren Löslichkeit der Sb- bzw. Pb- und Zn-Ionen eine Erklärung für den hohen Sb-Background sein. Die etwas höhere Mobilität der Sb-Ionen (gegenüber Pb- bzw. Zn-Ionen) bewirkt eine verstärkte Dispersion und dadurch eine Erhöhung des Backgrounds. Auf diese Weise wird das Anomalie/Background-Verhältnis erniedrigt. Man könnte daher eine höhere Sb-Anreicherung in der Vererzung vermuten als das gemessene A/B-Verhältnis widerspiegelt.

As:

In Abb. 9a + b heben sich drei räumlich voneinander getrennte flächenhafte As-Anomalien hervor, von denen die am breitesten dispergierte mit den Zentren der Pb-, Zn- und Sb-Anomalien zusammenfällt (Abb. 11). Die Konzentrationsverteilungen von As und Sb sind durch zwei weitere Gemeinsamkeiten gekennzeichnet. Wie die relativ ähnlichen A/B-Verhältnisse ($A/B=10.2$, $A/B=9.6$) ausdrücken, tritt im Arbeitsgebiet ein vergleichbarer Anreicherungsgrad dieser beiden Metalle auf. Außerdem sind ähnlich wie bei Sb die As-Background-Werte erheblich höher (um den Faktor 4.5) als die Referenzkonzentrationen (As: 25 – 136 ppm, Referenz: 0.9 – 30.0). Auch hier können als mögliche Ursachen das Mobilitätsverhalten allgemein und eine geringe Adsorptionsaffinität der As-Ionen bezogen auf Mn- und Fe-Oxide (MURRAY 1975a; KINNIBURGH et al. 1976) gesehen werden, so daß das in den Böden gemessene A/B-Verhältnis einen zu geringen As-Anreicherungsgrad in der Vererzung vortäuscht.

Cu:

Auch die Cu-Konzentrationsverteilung zeichnet sich durch mehrere, räumlich voneinander getrennte anomale Bereiche aus (Abb. 10a + b). Die in der Höhe der Konzentration sowie ihrer räumlichen Ausdehnung stärkste Cu-Anomalie deckt sich flächenmäßig beinahe vollständig mit den anomalen Pb-, Zn-, Sb- und As-Hauptbereichen. Vier kleinere Cu-Anomalien treten ca. 115 m südlich der Hauptanomalie auf. Von diesen ist nur eine mit einer unbedeutenden Zn-Anomalie assoziiert. Abgesehen davon treten keine Überdeckungen mit Dispersionshöfen auf (Abb. 11). Möglicherweise könnte es sich hier um die sekundären Dispersionshöfe kleinerer Kupfersulfidanreicherungen handeln. Cu zeigt das höchste im Arbeitsgebiet beobachtete A/B-Verhältnis (14). Wie auch bei Zn^{2+} und Pb^{2+} ist das Ionenpotential für Cu^{2+} (und Cu^{+}) kleiner 3, wodurch diese Elemente als einfache Kationen löslich sind. Der Punkt der Hydrolyse liegt für Cu^{2+} bereits bei pH 5.3 (Tab.1) und wird unter den Bedingungen im Arbeitsgebiet häufig überschritten. Cu^{2+} wird bevorzugt durch Adsorption

an kolloidale Fe- und Mn-Oxide gebunden (MURRAY 1975a; KINNIBURGH et al. 1976). Dies fördert die Cu-Akkumulation im Boden. Im Gegensatz zu Sb und As liegt vermutlich daher der gemessene Cu-Background (3.3 – 53.0 ppm) im Bereich der Referenzwerte nach ANDREWS-JONES (3 – 70 ppm; zitiert in LEVINSON 1974: 121). Dadurch hebt sich die Anomalie besonders scharf vom Untergrund ab. Die hohe Immobilität und Adsorptionsaffinität der Cu-Ionen schränkt deren Dispersion sehr stark ein und isoliert daher die anomale Zone. Dadurch können sich auch kleinere, weniger bedeutende Vererzungszentren (s. o.) durch erhöhte Cu-Konzentrationen im darüber lagernden Residualboden abzeichnen.

Mo:

Im Arbeitsgebiet treten keine signifikanten Mo-Anomalien auf. Aus den Background-Werten von bis zu 24.4 ppm hebt sich die gemessene maximale Mo-Konzentration von 47.9 ppm nur schwach heraus (= A/B = 3.3). Im Gegensatz zu den diffusen Konzentrationsverteilungen der ebenfalls nicht anomal angereicherten Metalle Ni und Hg existieren aber systematische flächenhafte Mo-Zonen mit erhöhten Konzentrationen.

Die Mobilität von Mo steigt etwa ab pH 6 mit zunehmendem pH-Wert drastisch an (HANSULD 1967). In einigen Teilen des Arbeitsgebietes (wie im Bereich der Hauptanomalie) ist daher von vornherein mit einer hohen Mo-Mobilität und einem geringen Akkumulationsgrad im Boden zu rechnen. Dies ist die Ursache für die verglichen mit einem Referenzwert (7 ppm) für Gebiete ohne Mineralisation (um den Faktor 3.5) erhöhte Mo-Background-Schwelle (24.4 ppm) im Arbeitsgebiet. Die Bereiche mit erhöhten Mo-Werten sind jeweils 100 – 200 m gegenüber den kongruenten Cu-, As-, Sb-, Pb-, Zn-Hauptanomalien hangabwärts versetzt. Im Hauptbereich der erhöhten Mo-Konzentrationen schwanken die pH-Werte zwischen 4.0 – 6.2, während in den Zonen anomaler Cu-, As-, Sb-, Pb-, Zn-Gehalte z. T. ein pH bis zu 7.8 gemessen wurde. Wie bereits in einem früheren Abschnitt erwähnt, ist für die aus verschiedenen geologischen Einheiten stammenden Meßdaten eine polymodale, positiv asymmetrische Häufigkeitsverteilung charakteristisch. Für Mo zeichnet sich dagegen annähernd eine Normalverteilung der Analysedaten ab. Diese i. a. durch analytische Fehler verursachte Datenstreuung ist ein weiterer Hinweis auf stark durch äußere Prozesse – in diesem Fall durch die intensive Mobilisierung der Mo-Ionen – veränderte Mo-Konzentrationen. Aufgrund dieser Anzeichen einer hohen Mo-Mobilität und der geographischen Lage der Mo-Zonen (s. o.) lassen sich die erhöhten Konzentrationsbereiche als „Sekundär-Anomalien" interpretieren, deren Konzentrationen eine zu geringe Mo-Anreicherung in der Vererzung vortäuschen. Möglicherweise überlagerten sich ursprünglich die Mo- und die Cu-, As-, Sb-, Pb-, Zn-Hauptanomalien und sind als Indikatoren für dieselbe mineralisierte Zone anzusehen.

2.2 Geochemisches Querprofil

Ergänzend zu den Isolinienkarten und den geochemischen Anomalienkarten sind in einem Querprofil A-B die Konzentrationsverteilungen der Metalle Zn, Cu, Ni, Sb und Pb im Arbeitsgebiet dargestellt (Abb. 12). Die Lage des Profils ist durch die Endpunkte A (Koordinaten X = 8, Y = 6) und B (X = 22, Y = – 8) festgelegt. Es verläuft in Erstreckungsrichtung der Zn-, As-, Sb-, Cu- und Pb-Anomalien und erfaßt deren zentralen Bereich (Abb. 11). Entlang der Profillinie wurden die an dem jeweiligen Punkt gemessenen Konzentrationen gegen die Geländekoordinaten aufgetragen. Für die Berechnung der angegebenen Maximum/Background (= M/B)-Verhältnisse wurde die jeweils direkt an der Lokalität gemessene Metallkonzentration in Relation zu einem Wert des oberen Background gesetzt (dem Anomalie/Background (A/B)-Verhältnis liegen dagegen, neben den Background-Werten, mittlere Werte des hochanomalen Konzentrationsbereiches zugrunde).

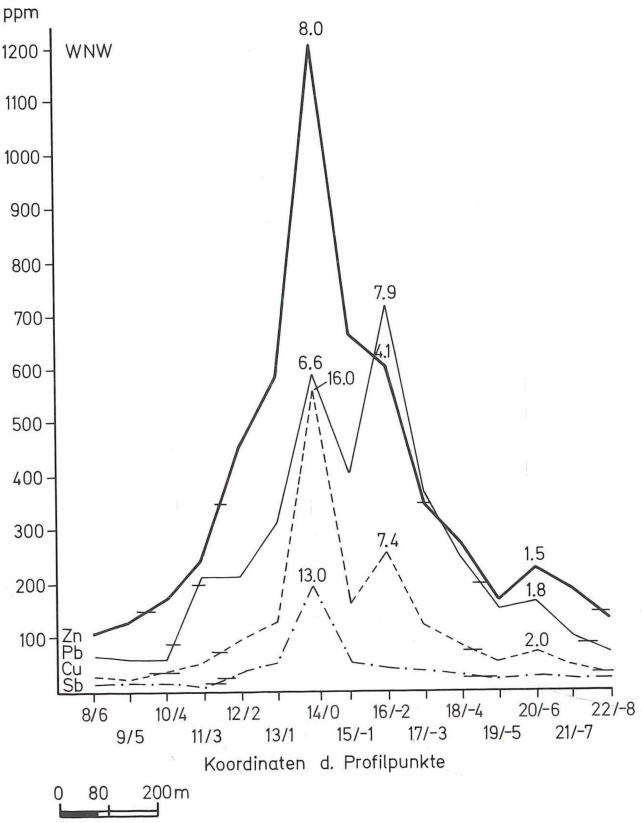


Abb. 12: Geochemisches Querprofil durch das Zentrum der flächenhaften Anomalien von Zn, Pb, Cu und Sb (in Streichrichtung). Auf den Kurven sind die Grenzen der jeweiligen Threshold-Bereiche mit horizontalen Strichen gekennzeichnet. Die Zahlen über einzelnen Peaks der Kurven geben die jeweiligen Maximum/Background-Verhältnisse wieder.

In dem Profil äußert sich die Signifikanz der Pb-, Zn-, Cu- und Sb-Anomalien sehr anschaulich im Grad der Anhebung der anomalen Metallanreicherung über den jeweils eingezeichneten Threshold-Wert. Die im Gegensatz zu Pb und Zn sehr hohen M/B-Verhältnisse von Cu und Sb ($M/B_{Cu}=16$, $M/B_{Sb}=13$) bestätigen die zuvor geschilderten Ergebnisse und sind für die Metallassoziation am Seelberg kennzeichnend. Die As-Anomalien werden von der Profillinie ungünstig erfaßt und deshalb in dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Das realistische A/B-Verhältnis von 10.2 jedoch weist As neben Cu und Sb ebenfalls als dominierendes Element der Erzassoziation aus, gefolgt von Pb, Zn und Ag.

2.3 Korrelative Beziehungen zwischen den analysierten Elementen

Die Korrelation der Schwermetallgehalte untereinander (Pearson'sche Korrelationsmatrix, Tab. 4) stellt sehr prägnant die in den beiden vorangegangenen Abschnitten diskutierten metallogenetischen Zusammenhänge im Arbeitsgebiet dar. Für die Probenanzahl von 259 ist bei einem Korrelationskoeffizienten $K = 0.123$ zu 95%, bei $K = 0.234$ zu 99% eine lineare Korrelation wahrscheinlich.

Die Metalle Cu, As, Sb, Pb und Zn zeichnen sich durch die stärksten Korrelationen untereinander aus ($K > |0.65|$). Die wenig ausgeprägte Korrelation zwischen Mo und den übrigen

Metallen ist auf die Verlagerung des Dispersionshofes von Mo („Sekundäranomalie") zurückzuführen.

Betrachtet man die zwischen den Schwermetallen Zn, Cu, Ni, Hg, As, Sb, Pb und den Elementen Fe, Ca und Mn bestehenden Beziehungen, so sind die Korrelationen mit Mn am stärksten, gefolgt von Fe und schließlich von Ca (Tab. 4). Außerdem ist im Vergleich zu Ni und Hg mit nichtanomalen Konzentrationen die Assoziation Cu-As-Sb-Pb-Zn stärker von den Mn-Gehalten abhängig (s. Tab. 4). Dies könnte ein Zeichen für eine signifikante Oberflächenadsorption an kolloidalen Mn-Oxiden bzw. -oxidhydraten sein. Die Zugehörigkeit von Mn zur Erzparagenese ist aufgrund der gemessenen niedrigen Konzentrationen (bis zu 3167 ppm; in Böden nicht mineralisierter Gebiete werden nach ANDREWS-JONES (zitiert in LEVINSON 1974:121) bereits Background-Werte von bis zu 7500 ppm Mn erreicht) unwahrscheinlich.

Tab. 4: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten.

	log(Cu)	log(Ni)	log(Hg)	log(As)	log(Sb)	log(Pb)	log(Mo)	log(Fe)	log(Ca)	log(Mn)
log(Zn)	0.756	0.119	0.259	0.577	0.685	0.949	−0.033	0.241	−0.025	0.722
log(Cu)		0.362	0.202	0.527	0.699	0.726	0.118	0.415	0.252	0.520
log(Ni)			0.136	0.391	0.510	0.032	0.566	0.884	0.545	0.227
log(Hg)				0.227	0.212	0.210	−0.019	0.185	−0.187	0.222
log(As)					0.780	0.571	0.294	0.399	0.250	0.585
log(Sb)						0.657	0.484	0.543	0.296	0.561
log(Pb)							−0.032	0.147	−0.079	0.741
log(Mo)								0.477	0.438	0
log(Fe)									0.337	0.301
log(Ca)										0.116

3. Schlußfolgerungen

Die Untersuchung der Bodenproben ergab flächenhafte, räumlich kohärente und beinahe deckungsgleiche Anomalien der Elemente Cu, As, Sb, Pb und Zn in den die Vererzung überlagernden Residualböden. Diese zeigen signifikante Cu-As-Sb-Pb-Zn-Erzanreicherungen im Untergrund an. Für As trifft dies allerdings nur auf die zweithöchste Anomalie zu, denn die Hauptanomalie liegt weiter östlich und fällt lediglich mit kleineren Sb-Zonen sowie einem schmalen Ausläufer der Cu-Anomalie zusammen. Eine weitere, weniger signifikante As-Anomalie liegt im Westen des Arbeitsgebietes und ist mit keinem der anderen Metalle assoziiert (Ab. 11). An diesen Stellen sind Vererzungszentren zu erwarten, in denen As-führende Minerale dominieren. Nach KRUPP (1981) tritt am Seelberg lokal Löllingit in größeren Mengen auf. Demnach könnte es sich in diesen beiden Fällen um Löllingitanreicherungen handeln.

Außer As tritt auch Cu abseits der kongruenten sekundären Dispersionshöfe der Hauptvererzung in anomalen Konzentrationen im Boden auf und ist dort mit den übrigen Metallen (Zn, Pb, As, Sb) nicht assoziiert (nur eine dieser kleineren Cu-Zonen fällt mit einer unbedeutenden Zn-Anreicherung zusammen). Es könnte sich in diesen Fällen um sekundäre Dispersionshöfe kleinerer Cu-Sulfid-Anreicherungen handeln.

Demgegenüber sind die Metalle Ni, Hg und Mo nicht signifikant anomal angereichert. In Teilen des Arbeitsgebietes (wie der Hauptanomalien von Cu, As, Sb, Pb, Zn) dominieren pH-Werte zwischen 5.5 – 8.0. Die unter diesen Bedingungen hohe Mo-Mobilität führt dazu, daß sich eine mögliche Mo-Vererzung in diesen Bereichen im Boden nicht abzeichnen

konnte. Stattdessen verlagerte sich der Dispersionshof hangabwärts und täuscht vermutlich zu geringe Mo-Gehalte in der Vererzung vor.

Es ist bemerkenswert, daß Hg in der Seelbergvererzung nicht signifikant angereichert ist, während in der nur wenige 100 m entfernten und ebenfalls in der Caldera gelegenen Landsbergmineralisation Quecksilbererze dominieren. KRUPP (1981) erklärt dies durch hydrothermale Lösungen unterschiedlicher Temperatur und führt das Auftreten von Niedrigtemperatur-Sulfiden in den Quecksilbererzen und Hochtemperatur-Kupferkiesen in der Seelbergvererzung als Indiz dafür an.

An denselben Proben ebenfalls mit der ICP-Spektrometrie durchgeführte Übersichtsanalysen auf Au und Ag deuten die Möglichkeit an, daß die Erze des Seelberges z. T. Ag und Au führen. Die vom Seelberg bekannten Ag-haltigen Fahlerze und die Ag-Erzsuche um 1500 (ERMANN 1958) erhärten die Vermutung einer möglicherweise signifikanten Ag-Anreicherung in den Erzen des Seelberges. In diesem Zusammenhang wären genauere Analysen auf Ag und Au an ausgewählten Proben sinnvoll.

Die Vererzungen führen nicht nur zu den genannten Anomalien, sondern auch zu (um den Faktor 2.5 – 4.5) erhöhten Background-Konzentrationen von As, Sb und Mo im Vergleich zu Referenzwerten in Gebieten ohne Mineralisation. Dies ist auf eine vergleichsweise hohe Mobilität von diesen Metallen gegenüber Cu, Pb und Zn zurückzuführen. Dadurch ist die erhöhte Schwermetallbelastung in den Böden am Seelberg nicht nur auf Bereiche direkt über den Mineralisationen beschränkt. Es ist fraglich, ob dies ohne nachteilige Auswirkungen auf die gesundheitliche Unbedenklichkeit der Ackerbauprodukte dieses Gebietes bleiben kann. Auch in diesem Zusammenhang wären weitere Untersuchungen erforderlich.

Danksagung

Für die freundliche Durchsicht des Manuskriptes und konstruktive Kritik danke ich herzlich Herrn Prof. Dr. H. J. Tobschall, Herrn Dipl.-Min. M. Landmesser und Herrn Dr. N. T. Arndt, der mir auch bei der Übersetzung der Kurzfassung ins Englische half. Herrn Dr. R. Krupp danke ich sehr herzlich für die ermutigende Unterstützung und Betreuung der Arbeit, sowie für die hilfreichen Diskussionen und die zur Verfügung gestellten Computerprogramme. Herrn Dr. G. Drews und Herrn T. Kost, die mir mit Hinweisen zur Analytik zur Seite standen, möchte ich hier ebenfalls herzlich danken.

4. Literaturverzeichnis

BØLVIKEN, B. (1967): Recent geochemical prospecting in Norway. – In: KVALHEIM, A. (Ed.): Geochemical Prospecting in Fennoscandia. – New York.

ERMANN, O. (1958): Zur Geschichte der Blei-Zink-Erzlagerstätten der Pfalz. – Der Aufschluß, **9**: 277 – 283, Göttingen.

GOLSCHANI-JAVADI, F. (1977): Geochemische Testprofile an Böden über Erzmineralisationen. – Diplomarbeit, 89 S., Mainz.

GÜMBEL, C. W. v. (1888): Erläuterungen zu Blatt Speyer der geognost. Karte von Bayern.

HABICHT, H. (1952): Stratigraphische und fazielle Untersuchungen im Bereich der Lemberg- und Obermoscheler Kuppeln (Nordost-Pfalz). – Z. dt. geol. Ges., **104**: 379 – 421; Hannover.

HANSULD, J. A. (1967): Eh and pH in geochemical prospecting. – Geol. Survey Canada Paper, 66 – 54: 172 – 187.

KINNIBURGH, D. G., JACKSON, M. L., SYERS, J. K. (1976): Adsorption of alkaline earth, transition and heavy metal cations by hydrous oxide gels of iron and aluminium. – Soil Sci. Soc. Am. J., **40**: 796 – 799.

KRUPP, R. (1981): Die Geologie des Moschellandsberg-Vulkankomplexes (Pfalz) und seiner Erzvorkommen. – Mitt. POLLICHIA, **69**:6 – 26; Bad Dürkheim/Pfalz.

LEVINSON, A. A. (1974): Introduction to Exploration Geochemistry. – 614 S., Wilmette/Illinois.

MURRAY, J. W. (1975a): The interaction of metal ions at the manganese dioxide-solution interface. – Geochim. Cosmochim. Acta, **39**: 505 – 520.

ROSE, A. W., HAWKES, H. E., WEBB, J. S. (1979): Geochemistry in Mineral Exploration. – 2. Aufl., 657 S., London.

Anschrift der Verfasserin:
Dipl.-Geol. Andrea M. THOM, Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität, Saarstraße 21, D-6500 Mainz
und
Max Planck-Institut für Chemie, Abt. Geochemie, Postfach 3060, D-6500 Mainz

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Mitteilungen der POLLICHIA

Jahr/Year: 1986

Band/Volume: 73

Autor(en)/Author(s): Thom Andrea M.

Artikel/Article: Schwermetallverteilungen in den Böden des Seelberges bei Obermoschel (Moschellandsberg-Vulkankomplex/Pfalz, Saar-Nahe-Becken) 49-71