

Grundlagen und Probleme der alpinen geophysikalischen Lagerstättenprospektion

Von FRANZ WEBER*)

Mit 6 Abbildungen

Herrn em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. O. M. FRIEDRICH
aus Anlaß der Vollendung seines 85. Lebensjahres
zugeeignet

*Lagerstättenkunde
Prospektion
Geophysik
Petrophysik*

Inhalt

Zusammenfassung	183
Abstract	183
1. Einleitung	183
2. Aufstellung eines lagerstättenkundlich-petrophysikalischen Modells	184
3. Prospektionsstrategie	185
4. Die Rolle der Petrophysik	185
5. Wesentliche Störfaktoren	185
6. Die für alpine Gegebenheiten wichtigsten Aufschlußverfahren	186
7. Anwendungen bei der Erzprospektion	187
7.1. Bleiglanz-Zinkblende-Vorkommen im Grazer Paläozoikum	187
7.2. Pyrit-Buntmetall-Sulfide	188
7.2.1. Antimonit Schlaining	189
8. Ausblick	189
Literatur	192

Zusammenfassung

Die geophysikalische Lagerstättensuche im alpinen Raum wird von Faktoren wie Topographie, unregelmäßige Lagerstättengeometrie, Tiefenlage, komplexe petrophysikalische Verhältnisse erschwert oder unmöglich gemacht. Die Ausarbeitung eines gut durchdachten Prospektionskonzeptes, das Kenntnisse der lokalen Geologie, Petrophysik und Modellrechnungen einbezieht, ist eine entscheidende Voraussetzung.

Für Übersichtsmessungen haben sich Magnetik, Eigenpotential- und VLF-Messungen bewährt. Der Einsatzbereich der Gravimetrie ist nur für eine Tiefe von 50 m gegeben. Elektromagnetische Verfahren (Slingram- und Turammethode) werden bei der Messung durch eine elektrisch gut leitende Verwitterungsschicht, bei der Auswertung durch das Auftreten von Graphitschiefern und Pyrit beeinträchtigt. Vielversprechend ist die Methode der Induzierten Polarisation, insbesondere der Spektral-IP, die bei der Prospektion nach Erzen, Steinen, Erden und Kohle angewendet wird. Hochfrequenzreflexionsseismik kann bei der Untersuchung von flächenhaften Strukturelementen und Verzerrungen begrenzte Anwendung finden.

Abstract

Geophysical prospecting for raw materials and ores in the alpine area might be difficult or even impossible due to fac-

tors as topography, depth, irregular shape of deposits, complex petrophysical relations.

A crucial prerequisite is the elaboration of a well-prepared concept including knowledge of local geology, petrophysics and modelling. Proved methods for regional investigations are magnetic, self potential and very low frequency measurements. Depth of investigation of the gravity method is in the range of about 50 m. In field work electromagnetic methods (Slingram, Turam) are impaired by a weathered layer of good conductivity, the interpretation might be erroneous because of the presence of graphitic shales and pyrite. Very promising is the Induced Polarisation Method, especially the Spectral IP, which is used for the prospecting of ores, raw materials and lignite. The high frequency reflection seismic method can be used for the investigation of aerial structures and ore deposits only in a limited range.

1. Einleitung

Die geophysikalische Lagerstättensuche im alpinen Raum zählt zweifellos zu den schwierigsten Problemen, die der Angewandten Geophysik als Prospektionsmethode gestellt werden. Es ist daher kein Zufall, daß die meisten Aufschlußverfahren auf Erz in außeralpinem Gebiet, vor allem in den alten Grundgebirgen, ihren Ursprung haben. Neben dem weitgehenden Fehlen einer entsprechenden Industrie, was sich wiederum in einer

*) Anschrift des Verfassers: Univ.-Prof. Dr. FRANZ WEBER, Institut für Geophysik, Montanuniversität Leoben, A-8700 Leoben.

geringen geophysikalischen Prospektionstätigkeit niederschlägt, sind es vor allem die extremen Randbedingungen, die die Geophysik theoretisch und praktisch beeinträchtigen. Nicht wenige Verfahren wurden erst Jahre oder Jahrzehnte (Aerogeophysik!) in den Ostalpen eingesetzt, nachdem sie sich in anderen Ländern bereits bestens bewährt hatten. Wenn man weiters noch eine Eindringtiefe von mehreren 100 m erreichen will und auch noch eine wirtschaftliche Meßleistung unerlässlich ist, dann bleiben von der breiten Palette der geophysikalischen Methoden nur wenige als für die alpine Problemstellung geeignet übrig.

Dennoch lassen sich, aus der Sicht der Problemlösungskapazität gesehen, langfristig Gründe für eine optimistische Prognose anführen. Die Fortschritte in der Meßtechnik und bei der Einführung neuer Meßverfahren sind zwar nicht so spektakulär wie bei der Kohlenwasserstoffsuche, aber stetig vorhanden. Ebenso wird die Auswertung ständig verbessert, so sind Modellexperimente und die computerunterstützte Auswertung Hilfsmittel, die ein realistisches, den Verhältnissen in der Natur immer besser angepaßtes Bild von den geologischen und lagerstättenkundlichen Verhältnissen liefern.

Würden nur die Gegebenheiten des eigenen Fachs eine Rolle spielen, dann müßte die alpine Problematik eine zentrale Rolle in der montangeophysikalischen Forschung spielen. In Anbetracht der Fülle von Störfaktoren und der komplexen geologischen und lithologischen Rahmenbedingungen haben wir hier einen Prüfstein für die praktische Anwendbarkeit der einzelnen Aufschlußverfahren und ein breit gefächertes Testgebiet für Instrumente und Meßverfahren vor uns, das für den Fortschritt in unserem Fach von größtem Nutzen ist.

2. Aufstellung eines lagerstättenkundlich-petrophysikalischen Modells

Eine wesentliche Einflußgröße bei jeder geophysikalischen Methode ist die Geometrie der gesuchten Mineralisation. Ein Idealfall wäre daher dann gegeben, wenn die Genese der Lagerstätten und deren Mineralisation bereits vorab geklärt wären. Dadurch kann das Meßprogramm optimal gestaltet werden, wobei die Auswahl der Methoden, Profil- und Meßpunktabstand besonders zu berücksichtigende Faktoren bilden. Vor dem Einzug der EDV in die Auswertung trachtete man gezwungenermaßen mit einfachen geometrischen Körpern wie Kugel, Zylinder, Prisma, Platte, die Lagerstätten zu simulieren. Diese Notwendigkeit fällt bei der computergestützten Auswertung weg, was besonders deutlich bei den Potentialverfahren zum Ausdruck kommt. Bei elektromagnetischen Verfahren stehen in der Praxis die einfachen Modelle nach wie vor im Vordergrund.

Eine wichtige Frage ist die nach der Längserstreckung der Lagerstätte; ist diese groß, dann kann bei Vorlage der Profile senkrecht zum Streichen die Annahme einer unendlichen Erstreckung in y-Richtung in der Praxis gemacht werden und es ist eine 2-dimensionale Störkörperberechnung berechtigt. Bei Mineralisationen, die ein begrenztes Streichen aufweisen, ist eine 3-dimensionale Auswertung vonnöten, die einen ungleich höheren Meß- und Rechenaufwand erfordert.

Die Beurteilung der geophysikalischen Tiefenberechnung bezieht sich primär auf die Oberkante des Vorkommens, deren Tiefenlage beim Test durch eine Bohrung möglichst genau angegeben werden soll. Die Bestimmung der Unterkante bereitet naturgemäß größere Schwierigkeiten. Besonders deutlich tritt dies bei den

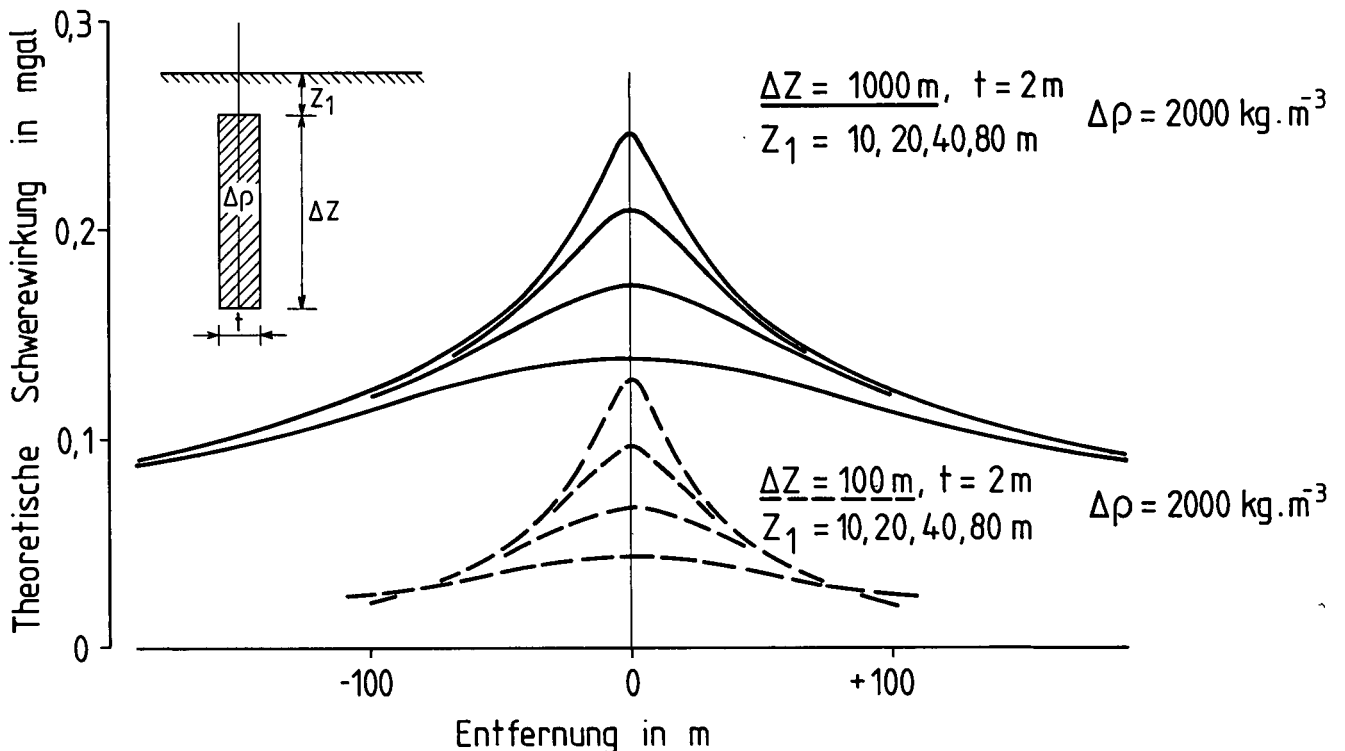


Abb. 1. Gravimetrische Störkörperberechnung, Plattenmodell.

Potentialverfahren in Erscheinung, wie ein theoretisches Beispiel aus der Gravimetrie erkennen läßt, das unter Zugrundelegung von realistischen Lagerstättenkundlichen und gesteinsphysikalischen Kennwerten berechnet wurde (Abb. 1). Wenn man dann noch die unvermeidlichen Störeffekte betrachtet, die auch die Anomalie einer geometrisch einfachen Lagerstätte nie in reiner Form erscheinen lassen, dann werden die Grenzen der Interpretation deutlich sichtbar.

3. Prospektionsstrategie

Wenn die Frage geklärt ist, welche Aufschlußverfahren prinzipiell für die Suche nach dem ins Auge gefaßten Rohstoff in Frage kommen, ist der nächste Schritt die Ausarbeitung einer auch ökonomisch vertretbaren Prospektionsstrategie. Hierbei zeigt sich bereits sehr deutlich, daß zum Unterschied von der Arbeit im außeralpinen Bereich von der Vielzahl geophysikalischer Verfahren nur eine sehr begrenzte Zahl in Frage kommt. In einem flächenmäßig großen Untersuchungsgebiet wäre es angebracht, die Prospektion in eine Phase der großräumigen Übersichtsmessungen, gefolgt von einer der Detailmessungen, zu unterteilen. Diese Vorgangsweise läßt sich nicht immer konsequent durchziehen, da wichtige Ergebnisse, z. B. über die aus der Anomalie abzuleitende Lagerstättengeometrie, eine bestimmte Meßpunktdichte bedingen.

Günstige Voraussetzungen sind gegeben, wenn solche Meßverfahren zu Übersichtsmessungen eingesetzt werden können, die einen besonders großen Meßfortschritt gestatten, z. B. Magnetik, VLF-Verfahren, Eigenpotentialmessung und Widerstandskartierung. Auch die Aerogeophysik mit der üblichen Kombination von Magnetik, Elektromagnetik und Szintillometrie kann als eine höchst effiziente Übersichtsmethode eingesetzt werden.

Ein bezeichnendes Licht auf die methodische Breite der alpinen Prospektion wirft der Umstand, daß auch sonst eher weniger gebräuchliche Verfahren wie die Paläomagnetik Anwendung finden. Gerade in Gebieten mit Deckenbau ist die Rekonstruktion der paläogeographischen Ausgangssituation wesentlich für die Klärung der Genese und Abgrenzung der Hoffungsgebiete. Bei unseren alpinen Vererzungen bieten sich vor allem die schichtgebundenen Vererzungen für solche Überlegungen an, als deren wichtigster Vertreter die Blei-Zink-Vorkommen in der Trias der Südlichen und Nördlichen Kalkalpen sowie im Grazer Paläozoikum gelten. Die Paläomagnetik gestattet es, Parallelisierungen in Zeit und Raum unabhängig von lokalen Faziesentwicklungen anzustellen (H. MAURITSCH, 1978, 1987).

Eine Sonderstellung nehmen Prospektionsstrategien mit untertägigen geophysikalischen Messungen ein. Nachdem derzeit die obertägige Prospektion praktisch zum Erliegen gekommen ist, haben die im Gefolge von bestehenden Abbauen getätigten Untertagemessungen besondere Bedeutung. Der Vorteil dieser Methodik liegt darin, daß die Aussage des bergmännischen Untertageaufschlusses bedeutend erweitert wird, Störeinflüsse wegfallen; weiters rückt hier die Meßebeane näher an das Untersuchungsobjekt heran, woraus sich dem Betrag nach größere Anomalien ergeben bzw. es können kleinere Vererzungen aufgefunden werden als bei der Messung von obertage aus.

Einen festen Platz in jedem Prospektionskonzept müßten auch geophysikalische Bohrlochmessungen einnehmen, deren vielfältige Methoden heute jede gewünschte qualitative und quantitative Aussage über wichtige lithologische und lagerstättenkundliche Kennwerte ermöglichen.

4. Die Rolle der Petrophysik

Gesteinsphysikalische Untersuchungen, gestützt auf solide geologische Unterlagen über das Meßgebiet, sind ein unerläßlicher Bestandteil eines jeden geophysikalischen Erkundungsprogramms auf mineralische Rohstoffe. Dadurch ist erst eine quantitative Interpretation möglich und kann auch eine Mehrdeutigkeit in der Interpretation der Anomalien aufgezeigt und eventuell durch einen Methodenpluralismus beseitigt werden.

Langjährige Erfahrungen haben gezeigt, daß die in den Textbüchern genannten Kennwerte der einzelnen Gesteinstypen in einem alpinen Meßgebiet nur mit Einschränkungen verwendet werden können. Tektonik und Metamorphose können zu erheblichen Streuungen führen, so daß die Herstellung von Querverbindungen mit der lokalen Geologie und auch eine statistische Analyse zum Standardrüstzeug gehören.

Die wichtigsten, an vorbehandelten, repräsentativen Gesteinsproben oder Bohrkernen ermittelten Parameter sind Dichte, magnetische Suszeptibilität, Remanenz, spezifischer elektrischer Widerstand, Polarisation, Longitudinal- und Transversalgeschwindigkeit, seltener Wärmeleitfähigkeit, Dielektrizitätskonstante, Porosität und Permeabilität.

Die Inhomogenität der Gesteine bei tektonisch beanspruchten Komplexen führt auch dazu, daß erhebliche Unterschiede zwischen der Labormessung petrophysikalischer Daten und der in situ-Bestimmung auftreten können. Anisotropieeffekte wurden in geschichteten Gesteinen und Metamorphiten nachgewiesen, sind jedoch quantitativ oftmals schwierig zu erfassen.

5. Wesentliche Störfaktoren

Bei allen geophysikalischen Aufschlußverfahren werden in der Theorie ideale Verhältnisse vorausgesetzt: ebene Grenzflächen, horizontale Oberflächen, homogenes Medium usw. Diese sind bei den Strukturen und Gesteinen der Ostalpen meist nicht gegeben, so daß mehr oder weniger große Schematisierungen gemacht werden müssen und manche Einflußgrößen unberücksichtigt bleiben. Zum Zwecke einer Systematik kann eine grobe Einteilung in externe und interne Störfaktoren getroffen werden. Der augenscheinlichste Vertreter der ersten Gruppe ist die Topographie. Bei entsprechend rauhem Gelände sinkt nicht nur die Meßleistung, sondern es werden ansonsten bewährte Verfahren so stark und in nicht quantifizierbarer Weise beeinflusst, daß deren Anwendung unterbleiben muß. Besonders augenscheinlich ist die Wirkung der Topographie bei der Gravimetrie. Bei der Freiluftkorrektur erfolgt im alpinen Raum eine Reduktion auf ein Bezugsniveau über hunderte von Höhenmetern, auch die topographische Korrektur hat ihre Tücken, wenn man die unterschiedlichen Dichtewerte der Gesteinskomplexe im Bereich des Meßgebietes bedenkt.

Sekundär in Zusammenhang mit der Topographie stehen in der Magnetik Blitzschlaganomalien, die bevorzugt an exponierten Stellen auftreten und Anomalien von mehr als 1000 nT verursachen können. Ähnliches gilt für Eigenpotentialanomalien in der Größenordnung von mehreren 10er Millivolt und negativem Vorzeichen, für die keine mineralogische Ursache gefunden werden kann. Das Gebundensein an Rinnen in steilem Gelände läßt eine Entstehung als elektrokinetische Potentiale vermuten.

Bei den elektromagnetischen Methoden sind vor allem die Verfahren mit beweglicher Sender-Empfängeranordnung von der Topographie stark betroffen. So wird bei der Slingrammethode eine maximal zulässige Geländeneigung von nur wenigen Grad toleriert. Die seismischen Verfahren spielen zwar bei der Suche nach Erzen, Steinen und Erden eine gewisse Rolle. Durch die großen Korrekturbeträge bei der Reduktion auf ein Bezugsniveau und große Mächtigkeiten quartärer Lockerschichten ergeben sich auch hier oft große Schwierigkeiten bei der Auswertung.

Bei den internen Störfaktoren ist zunächst generell die komplizierte alpine Tektonik zu nennen. Diese macht es oft enorm schwierig, die lagerstättenkundlichen Verhältnisse in Form eines physikalischen Modells zu formulieren, das den komplexen geologischen und petrophysikalischen Gegebenheiten entspricht. Auch beim Einsatz hochleistungsfähiger Rechner ist die 3-dimensionale Störkörperberechnung limitiert. Wichtige Verfahren wie die geoelektrische Tiefensondierung fallen aus, da als Prämisse horizontale bzw. flach (bis 10°) einfallende Schichten sind.

6. Die für alpine Gegebenheiten wichtigsten Aufschlußverfahren

Für Übersichtsmessungen stehen je nach der physikalischen Charakteristik von Mineralisation und Nebengestein mehrere Verfahren zur Verfügung. Die Magnetik ist eine häufig angewandte Methode, wenn die Mineralisation Magnetit oder Magnetkies als Nebengemengteile enthält. Für die mit Leitfähigkeitsanomalien einhergehenden Rohstoffe ist die VLF (very low frequency)-Methode ein bewährtes Verfahren, das auch im Gebirge einen guten Meßfortschritt gewährleistet. Dieses hat die Widerstandskartierung, die stark integrierend wirkt, in vielen Fällen abgelöst. Bei der Suche nach Sulfidieren und Graphit hat auch die Eigenpotentialmethode ihre Berechtigung.

Für die alpine Lagerstättenprospektion besonders wichtig ist der Zusammenhang von Eindringtiefe und Auflösungsvermögen. Die Eindringtiefe der Potentialverfahren ist theoretisch groß, unter dem Gesichtspunkt des erforderlichen Auflösungsvermögens stößt man jedoch in der Praxis rasch an eine Grenze. So dürfte die Gravimetrie bei den alpinen Vererzungen kaum über den Tiefenbereich von 50 m hinaus aussichtsreich sein.

Es bleibt somit von den geoelektrischen Aufschlußverfahren nur eine sehr begrenzte Zahl von Methoden im alpinen Bereich übrig. Dabei hat sich die IP (Induzierte Polarisation)-Methode als ein vielseitig verwend-

bares Verfahren bewährt. Ursprünglich nur für die Untersuchung disseminierter Vererzungen eingesetzt, läßt sich diese Methode auch für andere Vererzungen, Steine und Erden und Kohle anwenden.

Von den bisher erprobten elektromagnetischen Verfahren hat sich am ehesten noch die Turammessung als geeignet erwiesen, wobei sich allerdings im Gebirge erhebliche Schwierigkeiten beim Auslegen der Sendeschleife ergeben. Wir müssen uns allerdings dessen bewußt sein, daß unsere bisherigen Erfahrungen nur einen Teil der Möglichkeiten der Elektromagnetik überblicken, werden doch nach McCracken (1986) in der westlichen Hemisphäre allein im Zeitbereich 160 verschiedene Verfahrensarten angegeben. Für tief gelegene Vererzungen, insbesondere schichtgebundene, könnten vor allem die elektromagnetischen Transientverfahren in Frage kommen. Diese haben den Vorteil, daß die Messung des elektromagnetischen Feldes erst nach Abschalten des Primärstroms erfolgt, wodurch gewichtige Störfaktoren wegfallen. Für größere Eindringtiefen sind allerdings hohe Transmitterleistungen von mehreren 100 kW erforderlich. Weite Verbreitung bei der Prospektion nach elektrisch gut leitenden Sulfidieren haben weltweit die Slingram oder HLEM (horizontal-loop electromagnetic)-Verfahren, bei denen Sender- und Empfangsspule sich in einer horizontalen Ebene befinden. Die maximale Eindringtiefe beträgt die Hälfte des Sender-Empfängerabstandes, das ist bei unseren Meßbedingungen 30 m. Die bei der Auswertung gemachten Annahmen betreffen die Geometrie und Leitfähigkeit von Erz und Nebengestein; man rechnet – zumindest in einer ersten Phase der Auswertung – meist mit dem Modell der leitenden Halbebene im freien Raum (Abb. 2). Das bedeutet, daß Längs-(Streichen) und Tiefenerstreckung unendlich und die Schichtdecke gering sind, weiters daß der Widerstand des umgebenden Gesteins unendlich ist. Die graphische Auswertung ergibt als wichtigen Kennwert das Leitfähigkeits-Mächtigkeitsprodukt (σt) der Vererzung. Die Schwierigkeit bei der alpinen Prospektion – abgesehen von den meßtechnischen Problemen – besteht darin, daß für tiefe Vererzungen die Prämissen des Modells nicht erfüllt sind. Dies betrifft insbesondere das Streichen und die Tiefenerstreckung des plattenförmigen Erzlagers in Relation zu der maximal in der Praxis möglichen Sender-Empfänger-Entfernung von 60 m. In einer kürzlich erschienenen Arbeit NEGI, GUPTA & JOSHI (1987) wurden diese Abweichungen vom theoretischen

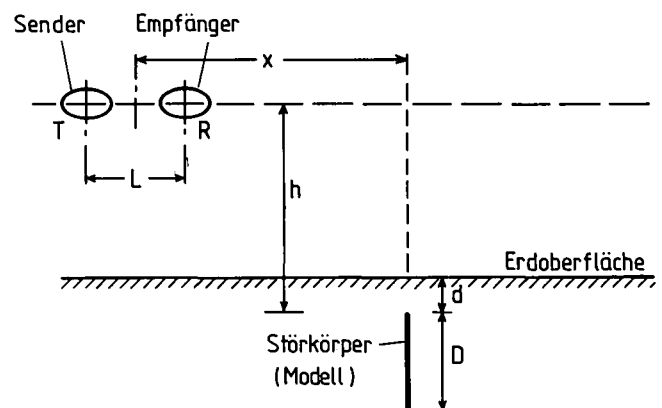


Abb. 2. Prinzip der Slingram-Messung; plattenförmiger, saiger stehender Störkörper.

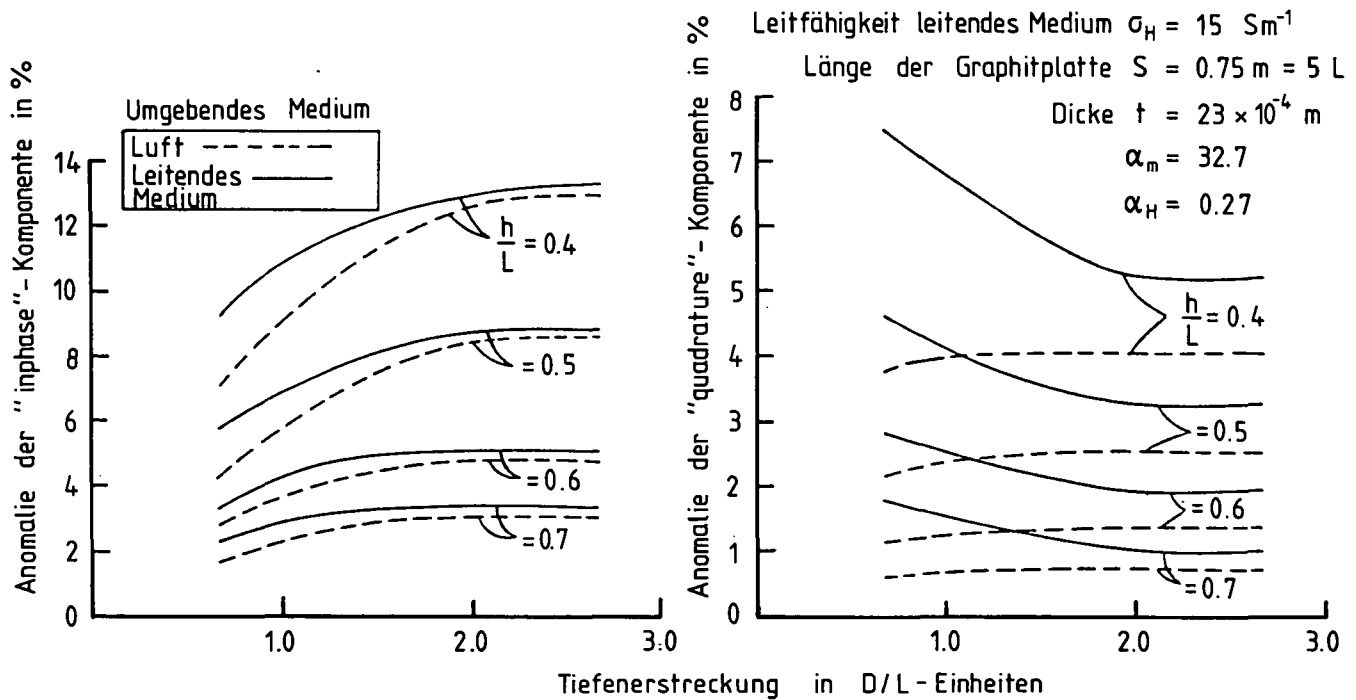


Abb. 3. Darstellung der negativen Anomalie (Maximum) für verschiedene vertikale Tiefenerstreckungen; Graphit in Luft und leitendem Medium. Nach NEGI, GUPTA & JOSHI (1987).

Modell quantifiziert. Dabei wurde auch der Einfluß einer Gesteinsleitfähigkeit, wie sie auf jeden Fall bei einer im Einflußbereich der Verwitterung gelegenen Vererzung gegeben ist, einbezogen. Bei den Modellexperimenten ergaben sich 2 für die Praxis wichtige Feststellungen (Abb. 3):

- 1) Ein Leiter (Vererzung) mit einer endlichen Tiefenausdehnung (DL 2,5) oder endlichem Streichen (SL 5,0) in einem elektrisch nicht leitenden Gestein ergibt einen niedrigeren Wert der Leitfähigkeit (und damit der Mineralisation) und eine größere Tiefe als tatsächlich.
- 2) Ein Gestein mäßiger Leitfähigkeit, das die Vererzung umgibt, verstärkt die EM-Anomalie und rotiert die Phase, sodaß der Leiter d. i. die Vererzung scheinbar einen höheren Widerstand aufweist (und damit weniger mineralisiert erscheint) und in zu geringer Tiefe liegt.

Am Beispiel einer Graphitschicht ist zu ersehen, daß vor allem die Anomalie imaginärer Komponenten durch ein leitfähiges Umgebungsgestein beeinflusst wird. Wenn man bedenkt, daß die EM-Anomalie in der Praxis infolge meist auftretender Störeffekte nicht in so reiner Form vorliegt, dann kommt man zu dem Schluß, daß die Bestimmung der Tiefenerstreckung der Vererzung nicht sehr genau ist.

Bei den Verfahren großer Eindringtiefe muß unbedingt auch die Reflexionsseismik genannt werden, die im Bereich höherer Frequenzen auch ein gutes Auflösungsvermögen besitzt. Aufgefunden werden können damit vor allem flächenhafte Strukturelemente und Vererzungen. In den Ostalpen verfügen wir über Erfahrungen nur aus dem Raum des Blei-Zink-Bergbaus Bleiberg-Kreuth.

7. Anwendung bei der Erzprospektion

7.1. Bleiglanz-Zinkblendevorkommen im Grazer Paläozoikum

Die Voraussetzungen für die erfolgversprechende Anwendung der Geophysik sind vor allem bei den bleiglanzhaltigen Vererzungen gegeben. Reine Zinkblende gehört zu den wenigen Sulfidmineralien mit hohem elektrischen Widerstand, nach PARASNIS (1956), so daß alle geoelektrischen Verfahren entfallen. Erste Untersuchungen, nämlich magnetische Messungen wurden bereits 1949 von M. TOPERZER ausgeführt, wobei eine magnetitführende Bleiglanzvererzung im Arzwaldgraben bestätigt wurde. Die in den Jahren 1975–1977 westlich und östlich der Mur vom Institut für Geophysik durchgeführte Meßserie betraf vornehmlich Übersichtsmessungen, um den Aussagewert der konventionellen Verfahren zu testen. Aus der Genese der Vererzung konnte als für die Prospektionsmethodik positives Moment die Erkenntnis übernommen werden, daß die Vererzung schichtgebunden, allerdings von nur wenigen m Mächtigkeit ist. Daraus leitet sich ab, daß die Vererzung durch das Modell einer Platte mit praktisch unendlicher Längserstreckung angenähert werden kann.

Ein hilfreiches Kriterium für die Interpretation der integrierten Messungen war die stratigraphische Position der Vererzungen, die fast immer im Grenzbereich lithologisch charakteristischer Gesteine auftreten. Allerdings streuen die physikalischen Eigenschaften der Erze oftmals in einem weiten Bereich, da diese meist nicht als kompakte Derberze auftreten, sondern als dünne Lagen oder linsenförmige Wechsellagerungen mit Gesteinsmatrix.

Für die flächendeckenden Übersichtsmessungen wurden Magnetik, Eigenpotentialmessungen und Widerstandskartierung angewandt. In der Magnetik waren als Leitgesteine vor allem Grünschiefer bedeutungsvoll,

die Suszeptibilitäten bis ca. $4000 \cdot 10^{-6}$ SI aufwiesen. Unter der Annahme plattenförmiger Modelle konnten über die Störkörperberechnung zutreffende Aussagen über die Lagerungsverhältnisse der Schichten bis in größere Tiefen gemacht werden. Auch die Vererzung selbst wies – allerdings nicht im ganzen Untersuchungsgebiet – hohe Suszeptibilitäten infolge des Auftretens von Magnetit oder Magnetkies als Nebengemengteil auf. Die Unterscheidung von den Grünschieferanomalien der Magnetik erfolgte durch den Umstand, daß die Vererzung in der Regel kaum mehr als 2 m mächtig war sowie durch den Methodenpluralismus. Die geoelektrischen Meßverfahren waren durch spezifische Störfaktoren weitgehend beeinträchtigt. Dabei ist zunächst das häufige Auftreten von fein verteiltem Pyrit in verschiedenen Gesteinskomplexen zu nennen. Dadurch zeigen z. B. die Eigenpotentialmessungen oftmals große und ausgedehnte Anomalien von mehr als -50 mV, die aber lagerstättenkundlich völlig uninteressant sind. Die elektromagnetischen Messungen wiederum wurden durch die weite Verbreitung von Schwarzschiefern (Graphitschiefer) sowie deren Verwitterungsprodukte behindert oder überhaupt unmöglich gemacht.

Die elektromagnetischen Messungen erfolgten vornehmlich mit dem Slingram-Verfahren (EM-Gun), einer Zweirahmenmethode, bei der die Sende- und Empfangsspule in einem fixen gegenseitigen Abstand von 60 m gehalten wurden. Die Eindringtiefe betrug maximal 30 m. Die verwendeten Meßfrequenzen waren 880 Hz und 3520 Hz.

Die Turammethode hat zwar eine größere Eindringtiefe als die Slingram-Messung, ist jedoch wie diese von denselben Störfaktoren beeinflusst. Es wurden zwar große und ausgedehnte Anomalien im Amplitudenverhältnis und in der Phase aufgefunden, die jedoch meist lithologiebedingt waren und in keinem einzigen Fall ge-

lang es, mit dieser Methode alleine eine Vererzung sicher nachzuweisen.

Ein Beispiel für die Aussagemöglichkeiten sulfiderzspezifischer Methoden, nämlich der Eigenpotential- und der EM-Gunmessung, wird aus dem Grazer Paläozoikum östlich der Mur (Schönberg bei Haufenreith) gegeben (Abb. 4). Bei der Interpretation ist allerdings zu beachten, daß das Profil die aus Schwarzschiefern und Karbonatphylliten bestehende Schichtfolge unter schieferem Winkel schneidet. Es fallen 2 EM-Anomalien auf, wobei die kräftigere nördliche in der Amplitude Werte von -20% , in der Phase 60% erreicht. Signifikant und ein Erzhinweis ist die geologische Position jeweils im Kontaktbereich der Karbonatphyllite zu den liegenden Schwarzschiefern.

Eine vordringliche Aufgabe einer zukünftigen Prospektion wäre die Beurteilung der Aussagemöglichkeiten der Induzierten Polarisation, insbesondere der spektralen IP. Nach ersten Vorversuchen ist mit Anomalien von den Vererzungen zu rechnen. Das grundlegende Problem ist jedoch die Unterscheidung der Sulfiderzanomalien von den durch Graphitschiefer verursachten. Auch der in bestimmten Gesteinen auftretende Pyrit ist ein erheblicher Störfaktor. Transiente elektromagnetische Messungen wären vor allem zur genaueren Abgrenzung einer schon durch andere Verfahren wahrscheinlich gemachten Vererzung zu empfehlen.

7.2. Pyrit-Buntmetallsulfide

Buntmetallsulfide haben in der Grauwackenzone und in Einheiten des Altkristallins eine weite Verbreitung. Meist handelt es sich um Pyritvererzungen mit einem variablen Gehalt an Buntmetallen. Es können daher meist die klassischen geophysikalischen Verfahren zur

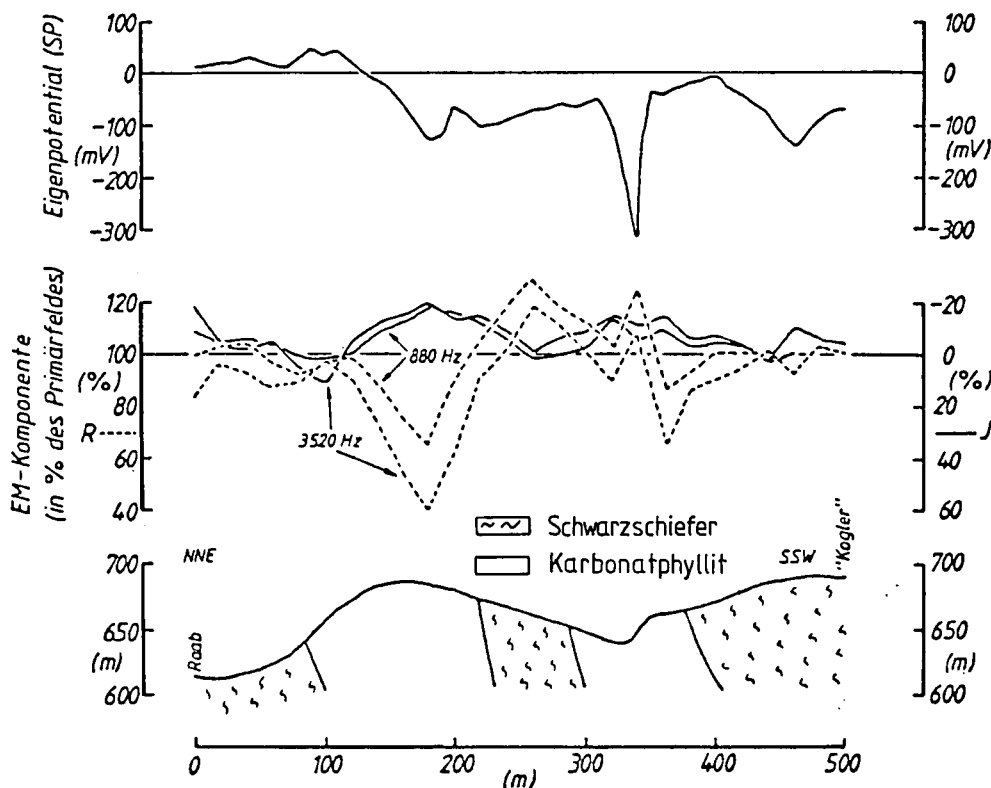


Abb. 4.
SP- und EM-(Slingram)-Messung aus dem Raum Haufenreith.
R = reale Komponente; J = imaginäre Komponente.
Nach SCHMID, SCHMÖLLER & WEBER (1979).

Aufsuchung von elektrisch leitenden Mineralisationen angewandt werden, also mit Schwerpunkt auf elektromagnetische Methoden. In ihrer Anwendung werden diese jedoch gebietsweise drastisch durch das Vorkommen von Schwarz- bzw. Graphitschiefern beeinträchtigt, die ebenfalls große Leitfähigkeitsanomalien hervorrufen. Da diese jedoch horizontgebunden sind, kann oftmals auf Grund der Geometrie der Anomalien eine Unterscheidung getroffen werden. Ein Methodenpluralismus erleichtert die Interpretation, weiters ist natürlich eine genaue Kenntnis der petrophysikalischen Daten wichtig. Ein großes, bisher kaum genutztes Potential ist in der Methode der Induzierten Polarisation, insbesondere der Spektral-IP enthalten. Dies soll an einem Beispiel einer Versuchsmessung an einer Vererzung im Raum der Saualpe erläutert werden. Die Vererzung besteht hauptsächlich aus Kupferkies, ist geometrisch anscheinend lagen-linsenförmig ausgebildet, das Nebengestein besteht aus Gneisen und Silikatgesteinen. Bereits in den gemessenen Widerstandskurven ist ein deutliches Minimum des elektrischen Widerstandes zu erkennen, das ausgezeichnet zu der Lage des bekannten Ausbisses der Vererzung paßt. Dagegen sind die Kurven des prozentuellen Frequenzeffekts (PFE) schwieriger zu interpretieren (E. NIESNER, 1987). Dies ist eine Erkenntnis, die besonders bei der 2-Frequenz-IP oftmals gemacht werden mußte. In den Meßkurven sind nämlich noch geometrische Elektrodeneffekte enthalten, die allerdings durch die Anwendung spezieller Filter weitgehend korrigiert werden könnten (Abb. 5a-d). Die dadurch erzielten Verbesserungen beziehen sich auch auf die Widerstandskurven. Aus diesen gefilterten Pseudosektionen läßt sich die Form des Erzkörpers durch Verwendung einfacher geometrischer Körper befriedigend rekonstruieren. Neben dieser Annäherung an die tatsächlichen Lagerstättenformen ist auch zu erkennen, daß die Frequenzeffekte nicht einheitlich sind, sondern sektorweise beträchtliche Unterschiede aufweisen. Die wahrscheinlichste Ursache dürfte in analogen Änderungen des Erzgehalts liegen, wobei auch Änderungen der Korngröße und der Textur eine Rolle spielen können. Es ist dann noch eine rechnerische Inversion mittels Modellrechnung möglich, wobei das dabei meist verwendete Cole-Cole Modell Parameter liefert, aus denen man unter anderem Schlüsse auf die Mineralogie zu ziehen versucht.

7.2.1. Antimonit Schlaining

Antimoniterz vom Typ Schlaining zählt zu jenen Mineralisationen, die für die geophysikalische Prospektion einen Grenzfall darstellen. Das Erz hat keine erhöhte Suszeptibilität ($k = <1 \cdot 10^{-6}$ SI) und die elektrische Leitfähigkeit ist – als Ausnahme unter den Sulfid-erzen – schlecht (elektrischer Widerstand >10.000 Ohm-m); dadurch fallen Magnetik, Geoelektrik und Elektromagnetik als geophysikalische Aufschlußverfahren aus. Bei der Dichte von $3,1 \text{ g/cm}^3$ Derberz ist zwar ein Unterschied von ca. $0,5 \text{ g/cm}^3$ zum Nebengestein gegeben, auf Grund der geringen Mächtigkeit, der zu großen Tiefenlage und verschiedener Störeinflüsse ist jedoch auch die Gravimetrie überfordert. Für die elektromagnetischen Messungen sind auch noch mineralogisch-lithologische Störfaktoren äußerst nachteilig: das

Vorhandsein einer mächtigen, elektrisch gut leitenden Verwitterungsschicht, das Auftreten von niederohmigen Pyritschiefern und das Vorkommen von Pyrit in manchen Schichtgliedern. Die Vererzung selbst zeigt hinsichtlich ihrer Geometrie eine beachtliche Variabilität: von Gangspalten bis zu lagerförmiger Ausbildung (KOSTELKA & WEBER, 1972). Einen Sonderfall bildet für die Prospektion das Auftreten von erzführenden Kluffmyloniten, wobei die Gangspalten nach der Geologie als Störungen mit Sprunghöhen von 5–10 m verstanden wurden und auch eine Mylonitisierung des Nebengesteins verbunden war. Da der tonige, weiche Kluffmylonit niederohmig war (10–30 Ohm-m), wurden im Rahmen eines Testprogramms im Jahre 1968 im Kurtrevier Turammessungen durchgeführt. Dabei sollten wenigstens die Spalten ohne Rücksicht auf deren eventuelle Erzführung aufgefunden werden. Es wurden zwar Anomalien im Amplitudenverhältnis und in der Phase gefunden, deren Ursache jedoch größtenteils in der Verwitterungsschicht lag, eine Korrelation mit der Tektonik konnte nicht festgestellt werden.

Es wurde sodann versucht, mittels refraktionsseismischer Detailmessungen mit kurzem Geophonabstand die Spalten aufzufinden. Als seismische Leithorizonte wurden die erzführenden Kalke und Kalkschiefer mit Geschwindigkeiten von 4500–5000 m/s und quarzreiche Phyllite im Geschwindigkeitsbereich von 4000–4500 m/s ermittelt.

Im Revier Neustift wurde eine tiefgründige Gesteinszersetzung festgestellt, aus der niedrige Geschwindigkeiten resultieren (Abb. 6).

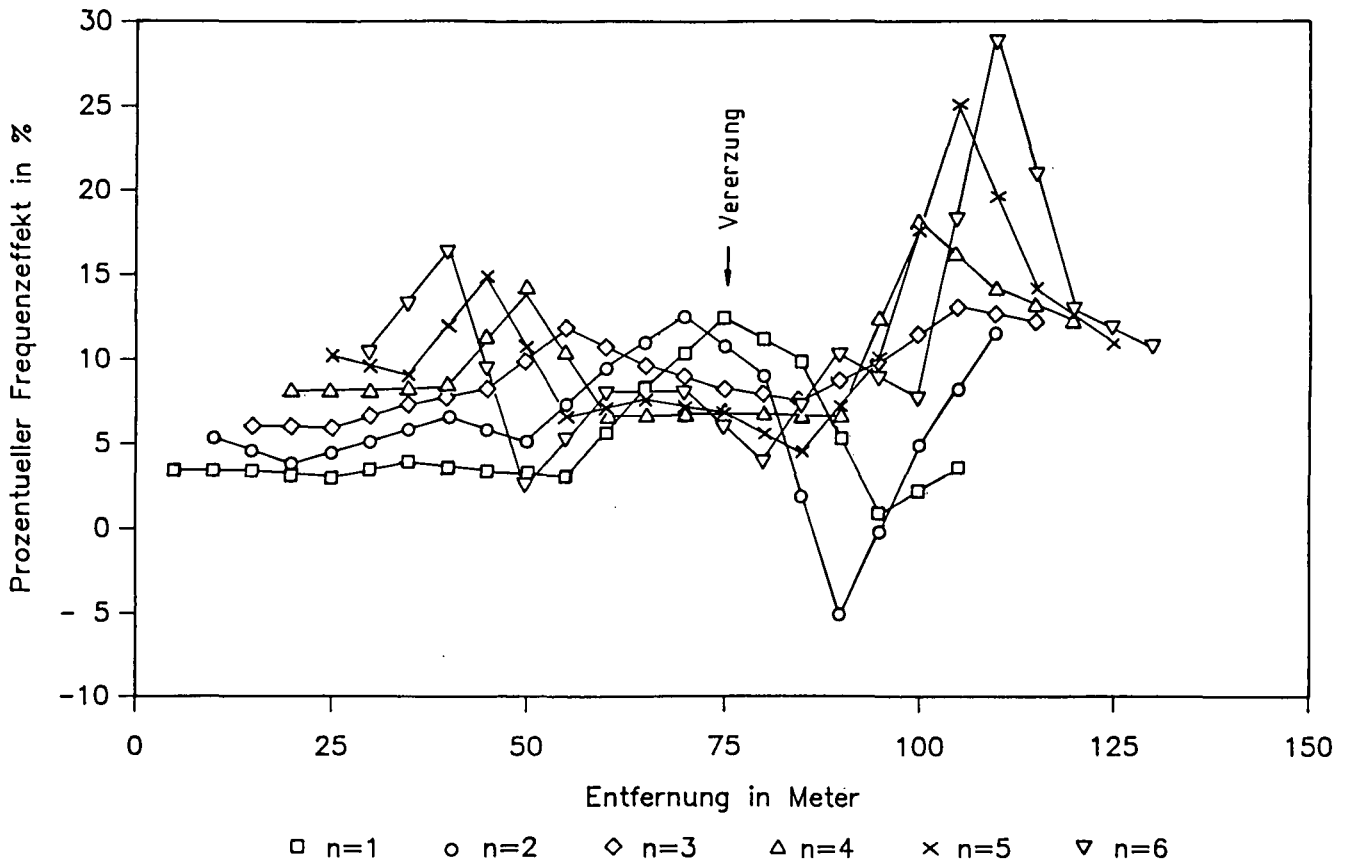
Als Kriterien für das Vorhandensein von Spalten wurden Brüche mit geringer Sprunghöhe als Versetzungen der Leithorizonte, Neigungsänderungen, abrupte Geschwindigkeitsänderungen und relative Amplitudenänderungen angenommen. In einem Teil des Meßgebietes konnte auf Grund dieser Kriterien ein Zusammenhang mit dem Verlauf der Spalten wahrscheinlich gemacht werden und Hinweise für eine neue, bisher nicht bekannte Vererzungszone gefunden werden. Als Routineverfahren zum Nachweis von Spalten, insbesondere solcher mit keiner nennenswerten vertikalen Verstellung, war jedoch auch die Refraktionsseismik nicht zu betrachten und an dieser Feststellung würde sich auch kaum etwas ändern, wenn die Messungen heute mit einer moderneren Ausrüstung wiederholt werden würden. Geoelektrische Tiefensondierungen waren zur Unterstützung der Refraktionsseismik durchgeführt worden. Es zeigte sich jedoch, daß die Interpretation durch laterale Widerstandsänderungen innerhalb der Horizonte bzw. eine Verzahnung einzelner geoelektrischer Schichten sehr erschwert war.

Zu prüfen wäre, ob mittels spektraler IP-Messungen über die Nebengemengteile der Vererzung Anomalien hervorgerufen werden können. So weit es die Tektonik alleine betrifft, könnten auch hochfrequente, reflexionsseismische Messungen zur Auffindung der Spalten eine gewisse Chance haben.

8. Ausblick

Gemessen an einer 3000-jährigen Such- und Schürftätigkeit in den Ostalpen, ist der Zeitabschnitt, in dem man sich auch der Methoden der Angewandten Geo-

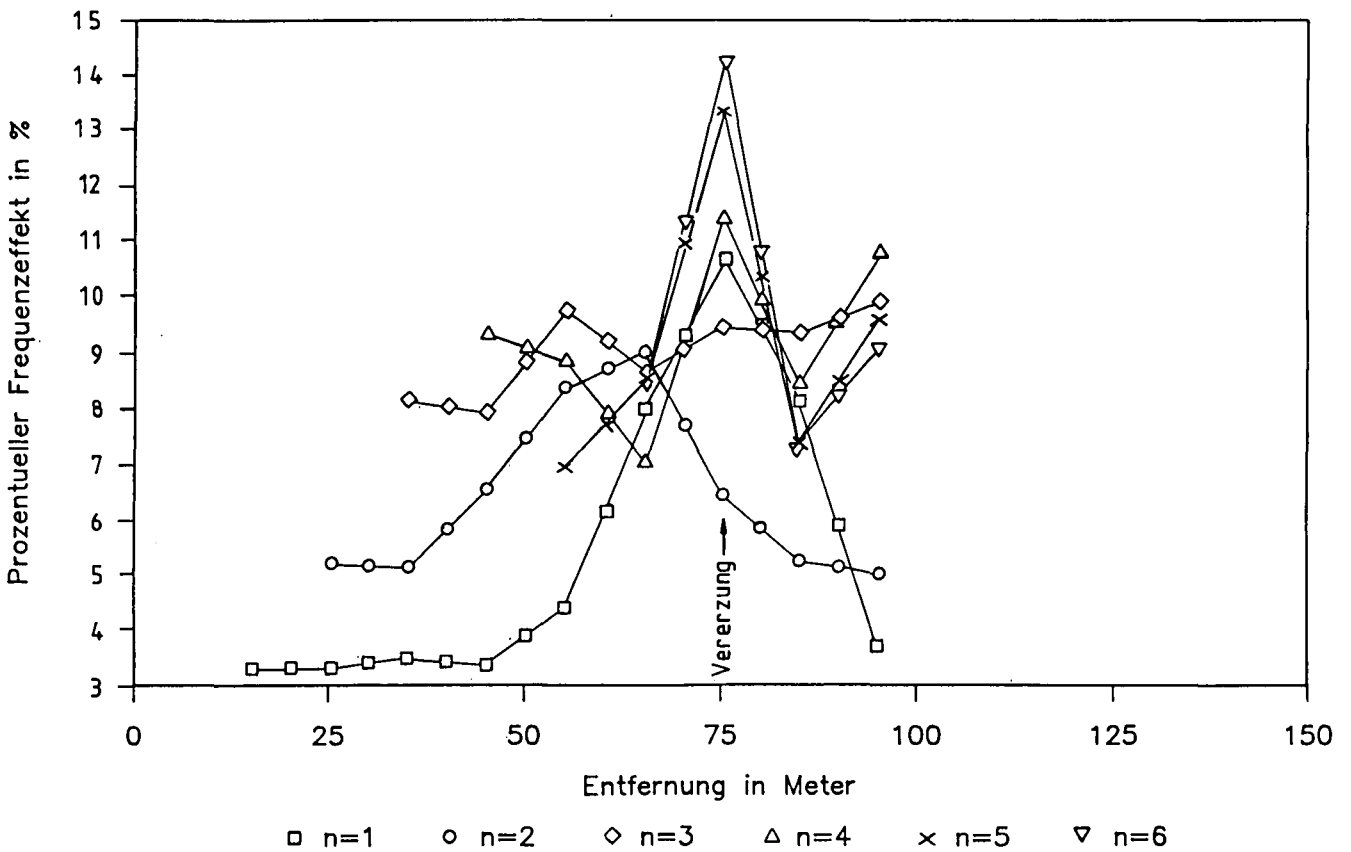
gemessene PFE - Kurven



▲ a

b ▼

gefilterte PFE - Kurven



gefiltrert

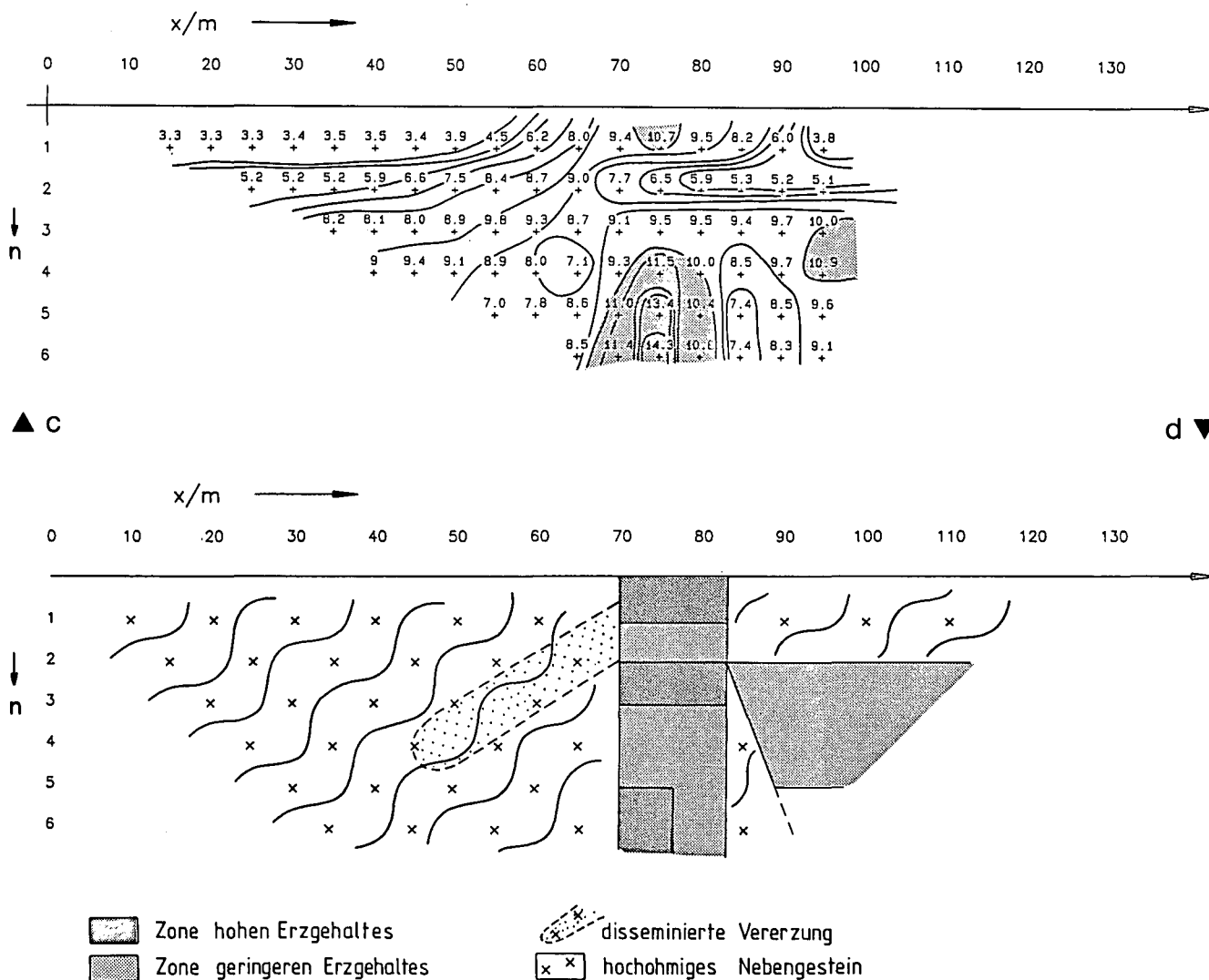


Abb. 5.
a) SIP-Messungen Kliening.
Gemessene PFE-Kurven (E. NIESNER, 1986).
b) SIP-Messungen Kliening.
Gefilterte PFE-Kurven (E. NIESNER, 1986).
c) SIP-Messungen Kliening.
Gefilterte PFE-Pseudosektion (E. NIESNER, 1986).
d) Nach SIP-Messungen konstruierter geologischer Aufbau.
Approximation durch einfache geometrische Körper &E. NIESNER, 1986).

physik bei der Erkundung nach mineralischen Rohstoffen bediente, verschwindend klein. Abgesehen von vereinzelten Untersuchungen hauptsächlich innerhalb oder in der nächsten Umgebung bestehender Abbaue, begann erst etwa ab der Mitte der 70er-Jahre eine systematische geophysikalische Forschungstätigkeit auf feste mineralische Rohstoffe. Diese wurde hauptsächlich von Bund und Ländern initiiert, die damals noch ganz unter dem Eindruck der Rohstoffkrise und der daraus abgeleiteten pessimistischen Prognosen standen. Diese kaum ein Jahrzehnt dauernde „Blütezeit“ der Geophysik wurde nunmehr von gegenteiligen Tendenzen

abgelöst, die etwa in dem Grundsatz gipfeln: Rohstoffe kauft man.

Neben zahlreichen anderen Überlegungen sollte der Umstand berücksichtigt werden, daß der Aufbau eines montangeophysikalischen Fachpotentials Jahre dauert, weiters, daß die Forschung beachtliche Fortschritte mit immer wirkungsvolleren Verfahren größerer Eindringtiefe und besseren Auflösungsvermögens macht. Dies berechtigt zum Schluß, daß die alpine Lagerstättenprospektion durchaus noch Chancen hat, was die vorliegenden Ausführungen unterstreichen sollten.

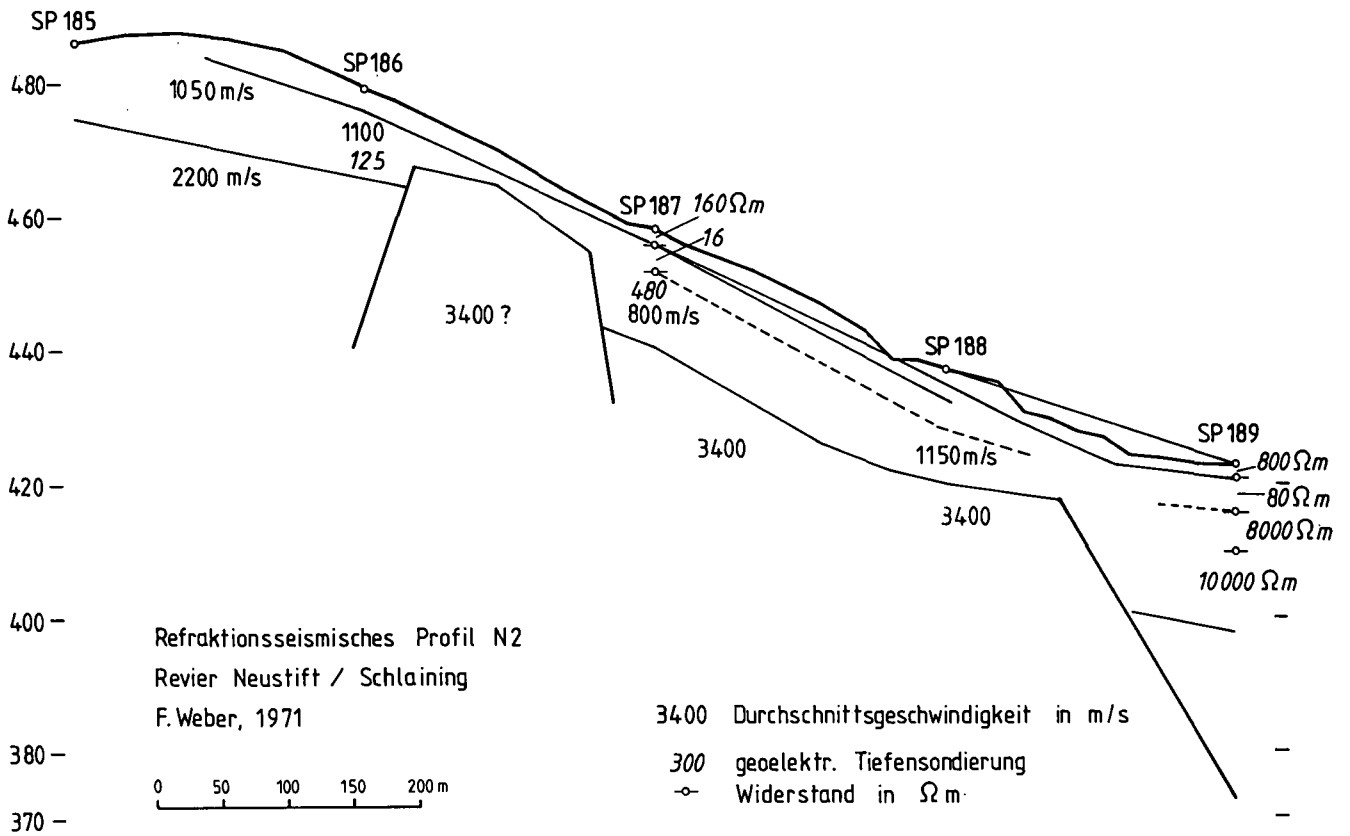


Abb. 6.
 Refraktionsseismisches Profil N2, Revier Neustift/Schlaining.

Literatur

- KOSTELKA, L. & WEBER, F.: Geophysikalische Prospektion auf Antimonit bei Schlaining im Burgenland (Ostösterreich). – Schriften der Ges. Deutscher Metallhütten- und Bergleute e. V. Heft 24, 115–136, 1972.
- MAURITSCH, H. J. & FRISCH, W.: Paleomagnetic Data from the Central Part of the Northern Calcareous Alps, Austria. – Journal of Geophysics, 44, 623–637, 1978.
- MAURITSCH, H. J.: Bodengeophysikalische Untersuchungen in den Schladminger Tauern. Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 1987. – 104–105, Wien 1987.
- NEGI, J. G., GUPTA, O. P. & JOSHI, M. S.: Corrections for conductivity Estimates in induction prospecting of sulphide dykes in a layered environment. – Geophys. Prosp., vol. 35, 718–734, 1987.
- NIESNER, E. & WEBER, F.: Untersuchung einer geometrisch und geophysikalisch inhomogenen Sulfidvererzung mittels der spektralen IP-Methode. – Archiv f. Lagerst.forsch. 1987, in Druck.
- PARASNIS, D. S.: Analysis of some multifrequency, multiseperation electromagnetic surveys. – Geoph. Prosp. vol. 191, 163–179, 1971.
- SCHMID, Ch., SCHMÖLLER, R. & WEBER, F.: Geophysikalische Untersuchungen von Erzvorkommen im Grazer Paläozoikum. – Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 124. Jg, 12, 594–611, 1979.
- TOPERCZER, M.: Magnetische Untersuchung des Glückauf-Stollens und seiner Umgebung im Arzwaldgraben (Stmk.). – Unveröff. Gutachten, 1949.