

G. REITMAYR

"Die VLF-Größen: Scheinbare Sender-Richtung und maximale horizontale Magnetfeldstärke"

Bei der VLF-Methode nützt man die elektromagnetischen Signale von entfernten Radiosendern im Very-Low-Frequenz-(VLF)-Bereich (15 bis 25 kHz) aus. Diese Sender haben vertikale Antennen und solcher Art erzeugte primäre Magnetfelder sind harmonische Wechselfelder, die im Fernfeld linear polarisiert sind in der Horizontalen und senkrecht zur Richtung auf den Sender zu. Bei Anwesenheit von leitfähigem Material werden in diesem Wirbelströme induziert, welche wiederum sekundäre Magnetfelder erzeugen. Primäre und sekundäre Felder überlagern sich, wir messen im allgemeinen ein elliptisch polarisiertes Gesamtfeld.

Ein wichtiger Aspekt bei VLF-Untersuchungen sind die Orientierungen zwischen dem linear polarisierten Primärfeld und der Streichrichtung der Störkörper. In einer dünnen vertikalen Platte, etwa, werden nur dann Ströme induziert, wenn eine anregende Magnetfeldkomponente senkrecht zu dieser Platte existiert. Man wird somit immer versuchen, einen Sender zu benutzen, der möglichst gut in Richtung des Streichens der zu untersuchenden Struktur liegt.

Im wesentlichen zwei Arten von VLF-Messungen sind gebräuchlich. Die eine Größe, die bei beiden Methoden gemessen wird, ist der Neigungswinkel der großen Achse der Polarisationsellipse. Die zweite Größe ist bei der einen Methode (Geonics) das Achsenverhältnis, bei der anderen Methode (Crone, Phoenix, Scintrex) die Länge einer oder mehrerer Achsen oder irgendwelcher Projektionen davon. Die Messungen werden konventionellerweise in der Ebene senkrecht zum geologischen Streichen durchgeführt.

Bei der Interpretation von Feldmessungen werden diskrete Leiter lokalisiert, indem man nach Nulldurchgängen des Neigungswinkels oder - gegebenenfalls - nach Maxima der Feldstärke sucht. Eine einfache Tiefenabschätzung gelingt mit Hilfe des Minimum-Maximum-Abstandes des Neigungswinkels oder der Halbwertsbreite der Feldstärke. Für die vertikale dünne Leiterplatte oder exakt für einen äquivalenten Linienstrom ist die Tiefe gleich der Hälfte dieser

Längen. Bessere Interpretationsmöglichkeiten bieten sich vor allem bei Verwendung von Modelldaten (etwa: Madden & Vozoff, 1970; Frischknecht, 1973; Coney, 1977; Baker & Myers, 1979; Kaikkonen, 1979). Eine interessante Technik wurde von Karous & Hjelt (1977) vorgeschlagen. Sie berechnen aus den VLF-Messungen scheinbare Stromdichten im Untergrund. Dies ist offensichtlich etwas Ähnliches, aber physikalisch anschaulicher als Fraser's (1969) Filter-Methode.

In diesem Artikel wird über eine zunächst scheinbar erstaunliche Beobachtung bei VLF-Messungen berichtet; sodann wird der Vorschlag gemacht, im Hinblick auf bessere Interpretationsmöglichkeiten neue Meßgrößen zu verwenden: die scheinbare Senderrichtung und die horizontale Magnetfeldkomponente senkrecht zu dieser Richtung.

### Beobachtungen

Im Zusammenhang mit Experimenten mit der VLF-R-Methode, einer Modifikation, die ein hochfrequentes Pendant der Magnetotellurik mit künstlichen Sendern ist, wurden Messungen im geophysikalischen Testgebiet von Cavendish durchgeführt. Die Cavendish Sulfidkörper, in Süd-Ontario (Kanada) gelegen, wurden seit mehr als 15 Jahren intensiv mit allen denkbaren Methoden der angewandten Geophysik untersucht (McPhar, 1967; Crone, 1969; Paterson, 1970; Smith et al., 1972; Tilsley, 1973; Ward et al., 1974; Strangway et al., 1979; Phoenix, no date; Geonics, no date) und auch durch Bohrungen überprüft (Williams et al., 1975). Die Lage des Meßgebietes und die Geologie ist in der Abb. 1 skizziert.

Die Mineralisation besteht aus zwei steil einfallenden dünnen, massiven sulfidischen Zonen A und B, die etwa parallel zueinander und nahezu 200 m auseinander sind. Das umgebende Gestein sind hochohmige Granite und Gneise, an der östlichen Zone liegt ein Kontakt zu Kalk. Die glaziale Überdeckung hat eine Mächtigkeit von 1.5 bis 5 m längs der Linie C des eingerichteten Meßnetzes, auf der die Beobachtungen, über die berichtet wird, durchgeführt wurden.

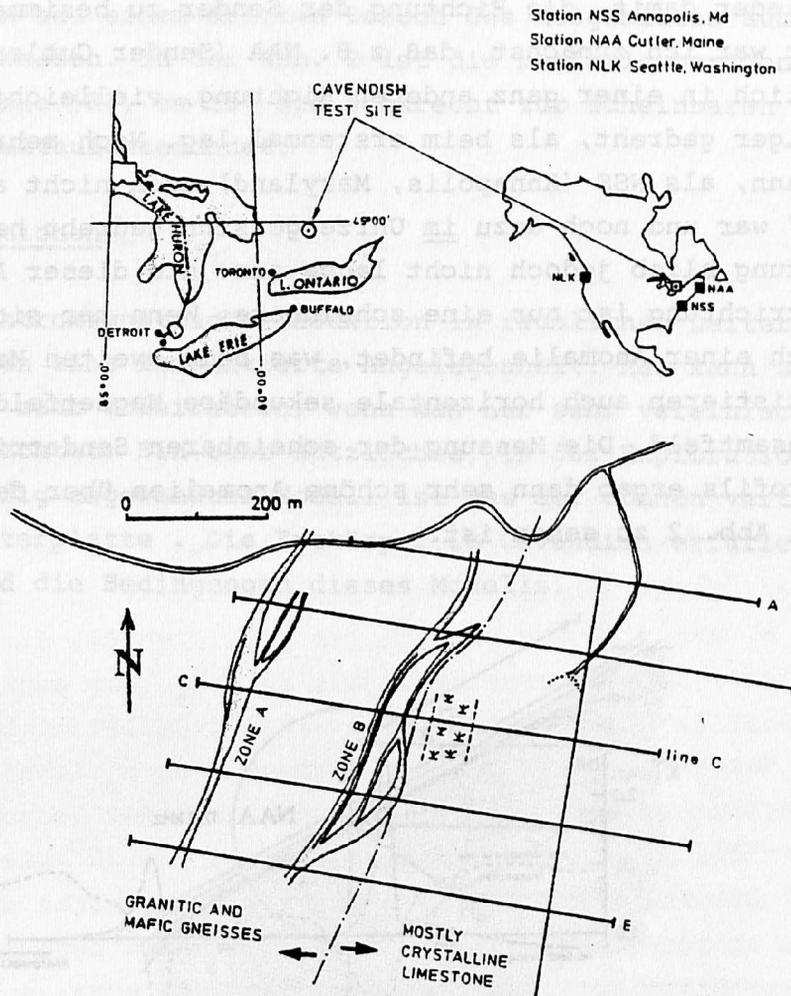


Abb. 1 Lage und Geologie des Meßgebietes. Oben rechts ist die Position der drei benützten Sender angegeben.

Für die Messungen wurden die Signale von drei verschiedenen Sendern benutzt, deren Positionen ebenfalls in Abb. 1 angegeben sind. Um beurteilen zu können, wie gut die Anregung durch die verschiedenen Sender ist, hatte ich die Senderrichtungen gemessen. Das ist sehr einfach durchzuführen durch Drehen der Induktionsspule in der Horizontalen, bis ein Minimum des Signals gefunden ist; mit dem Kompaß wird dann das Azimut der Spulenachse bestimmt. Nach Auswertung der VLF-R-Messungen war der Wunsch aufgekommen, einige Messungen zu wiederholen und vor allem im Bereich der Anomalien die Punktdichte zu erhöhen.

Beim zweiten Besuch des Testgeländes begann ich dann erst einmal wieder damit, die Richtung der Sender zu bestimmen. Recht erstaunt war ich zunächst, daß z.B. NAA (Sender Cutler, Maine) offensichtlich in einer ganz anderen Richtung, vielleicht  $20^{\circ}$  gegen den Uhrzeiger gedreht, als beim erstenmal lag. Noch mehr erstaunt war ich dann, als NSS (Annapolis, Maryland) auch nicht an "seinem Platz" war und noch dazu im Uhrzeigersinn gedreht hatte. Die Erleuchtung blieb jedoch nicht lange aus: die dieser Art bestimmte Senderrichtung ist nur eine scheinbare. Wenn man sich im Einflußbereich einer Anomalie befindet, was beim zweiten Mal der Fall war, existieren auch horizontale sekundäre Magnetfelder, man mißt ein Gesamtfeld. Die Messung der scheinbaren Senderrichtungen längs des Profils ergab dann sehr schöne Anomalien über den Erzkörper, wie in Abb. 2 zu sehen ist.

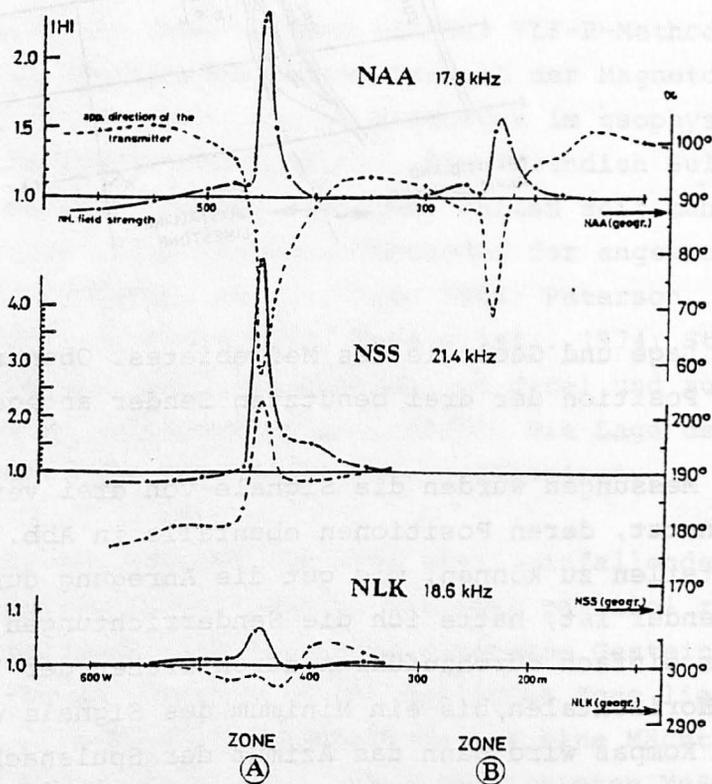


Abb. 2 Gemessene Werte auf Profil C: scheinbare Senderrichtung und maximale horizontale Magnetfeldstärke.

Da mit Richtungen allein wenig Quantitatives anzufangen ist, wurden dann bei einem dritten Besuch des Meßgebietes auch Feldstärken gemessen. In der Abb. 2 ist die maximale horizontale Magnetfeldstärke  $|H|$ , es ist die senkrecht zur scheinbaren Senderichtung, mitaufgezeichnet.

### Interpretationen

Die elektromagnetische Induktion in räumlichen Leitern ist bekanntermaßen eine komplizierte Angelegenheit. Man kann sich das Leben aber sehr erleichtern, wenn man nur sehr vereinfachte Modelle betrachtet. Ein sehr nützlich, in der Explorationsgeophysik häufig angewandtes Modell ist das der dünnen vertikalstehenden Leiterplatte. Die Erzkörper in Cavendish erfüllen wohl hinreichend die Bedingungen dieses Modells.

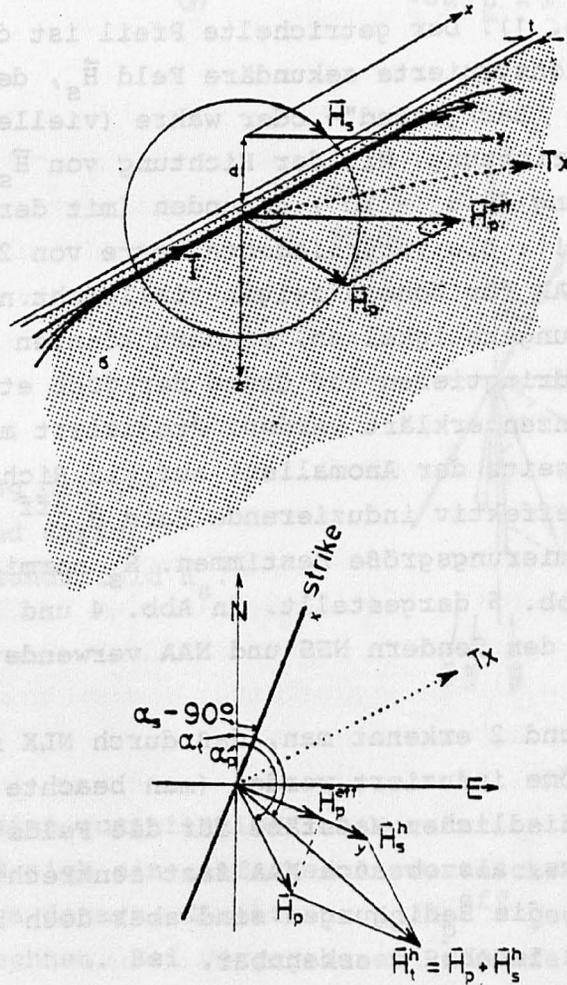
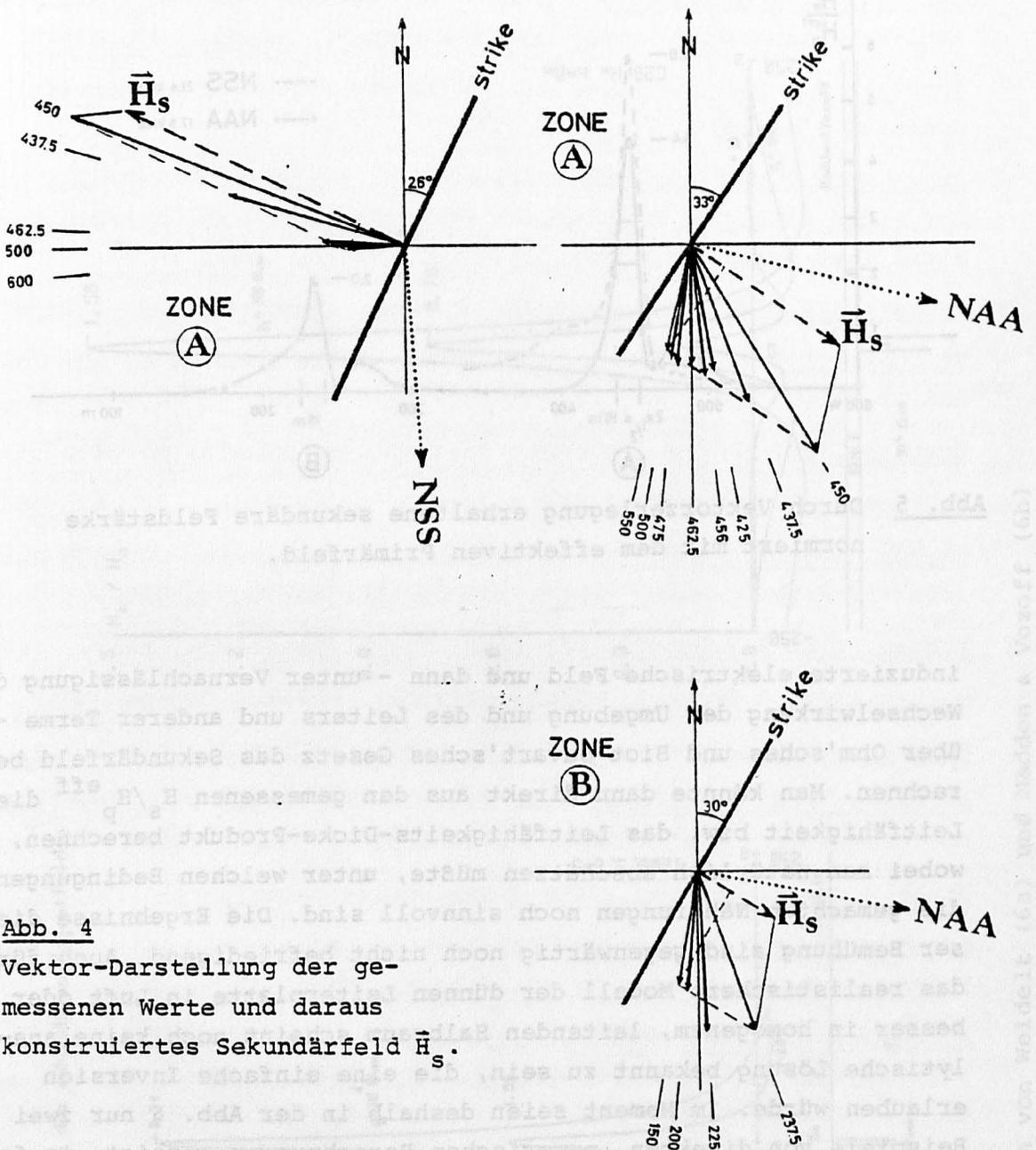


Abb. 3 Elektromagnetische Induktion in einer dünnen, vertikalen Leiterplatte.

Das Induktionsgeschehen soll in der Abb. 3 veranschaulicht werden. Das primäre Magnetfeld  $\vec{H}_p$  - gemessen außerhalb des Einflußbereiches der Anomalie - ist senkrecht zur (wirklichen) Richtung des Senders Tx orientiert. Induzieren kann nur die Komponente  $\vec{H}_p^{eff}$  davon, die senkrecht zur Streichrichtung der Leiterplatte steht. Der in der Platte induzierte Strom, etwa idealisiert durch einen Linienstrom nahe der Oberkante der Platte, erzeugt ein sekundäres Magnetfeld  $\vec{H}_s$ , dessen horizontale Komponente  $\vec{H}_s^h$  (in den Abb. nur  $H_s$ ) vektoriell zum Primärfeld  $\vec{H}_p$  addiert wird und so die meßbare horizontale Gesamtfeldstärke  $\vec{H}_t^h$  ergibt.

Aus den auf der Linie C gemessenen Werten von Richtung und Feldstärke wurden nach dem skizzierten Verfahren die Vektorplots in Abb. 4 als durchgezogene Pfeile gezeichnet. Die Zahlen in Richtung der Pfeile bezeichnen die Stationsnummer (m von der Basislinie, s. Abb. 1). Der getrichelte Pfeil ist das durch Vektorsubtraktion konstruierte sekundäre Feld  $\vec{H}_s$ , der punktierte ist die jeweilige "Background"- oder wahre (vielleicht besser quasi-wahre) Senderrichtung. Mit der Richtung von  $\vec{H}_s$  haben wir auch die Streichrichtung ( $= \alpha_s - 90^\circ$ ) gefunden (mit der Messung auf nur einem Profil!). Die verschiedenen Werte von  $26^\circ$  mit Sender NSS und  $33^\circ$  mit NAA für Zone A zeigen vielleicht nicht nur Meß- bzw. Konstruktionsungenauigkeiten, sondern könnten auch durch verschiedene Eindringtiefen auf Grund der doch etwas unterschiedlichen Frequenzen erklärt werden. Projiziert man  $\vec{H}_p$  (dem gemessenen Wert abseits der Anomalien) auf die Richtung von  $\vec{H}_s$ , kann man auch das effektiv induzierende Feld  $\vec{H}_p^{eff}$  als eine sehr sinnvolle Normierungsgröße bestimmen.  $\vec{H}_s$  normiert eben mit  $\vec{H}_p^{eff}$  ist dann in Abb. 5 dargestellt. In Abb. 4 und 5 sind nur die Messungen mit den Sendern NSS und NAA verwendet worden.

In Abb. 1 und 2 erkennt man, daß durch NLK nur in sehr geringer Weise Ströme induziert werden (man beachte in Abb. 2 die recht unterschiedlichen Maßstäbe für die Feldstärke). In Abb. 1 sieht es so aus, als ob auch NAA fast senkrecht zur Streichrichtung läge, die Bedingungen sind aber doch nicht zu ungünstig, wie auch in Abb. 4 erkennbar.



**Abb. 4**  
 Vektor-Darstellung der gemessenen Werte und daraus konstruiertes Sekundärfeld  $\vec{H}_s$ .

Im Hinblick auf eine quantitative Interpretation bestand zunächst die Hoffnung, daß sich ein einfaches Auswerteschema entwickeln lassen müßte, etwa derart, direkt aus  $H_s/H_p^{eff}$  geeignete Modellparameter zu berechnen. Bei vorgegebenem Primärfeld, unserem  $H_p^{eff}$ , könnte man z.B. aus der 1. Maxwell-Gleichung das in einem, im homogenen Halbraum eingebetteten, äquivalenten Linienleiter

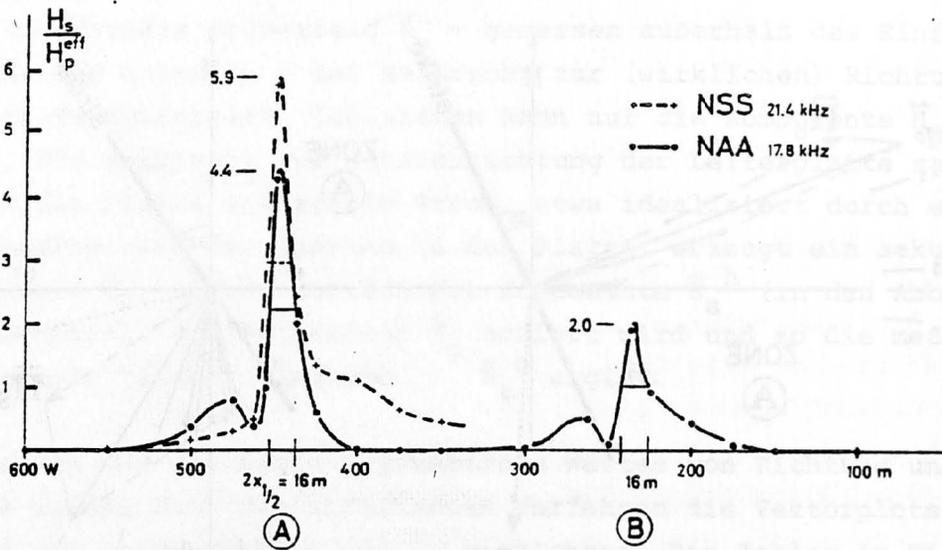


Abb. 5 Durch Vektorzerlegung erhaltene sekundäre Feldstärke normiert mit dem effektiven Primärfeld.

induzierte elektrische Feld und dann - unter Vernachlässigung der Wechselwirkung der Umgebung und des Leiters und anderer Terme - über Ohm'sches und Biot-Savart'sches Gesetz das Sekundärfeld berechnen. Man könnte dann direkt aus den gemessenen  $H_s/H_p^{eff}$  die Leitfähigkeit bzw. das Leitfähigkeits-Dicke-Produkt berechnen, wobei man natürlich abschätzen müßte, unter welchen Bedingungen die gemachten Näherungen noch sinnvoll sind. Die Ergebnisse dieser Bemühung sind gegenwärtig noch nicht befriedigend. Auch für das realistischere Modell der dünnen Leiterplatte in Luft oder besser in homogenem, leitenden Halbraum scheint noch keine analytische Lösung bekannt zu sein, die eine einfache Inversion erlauben würde. Im Moment seien deshalb in der Abb. 6 nur zwei Beispiele von direkten, numerischen Berechnungen gezeigt: in 6a Modelle, die dankenswerterweise von Herrn Weidelt gerechnet wurden, in 6b Modelle aus dem Atlas von Madden & Vozoff (1970). (Auch Herrn W. Müller möchte ich für die - hier nicht gezeigten - Modellrechnungen danken.) 6a zeigt, daß die Amplituden der Übertragungsfunktionen durchaus in der durch die Messung gefundenen Größenordnung liegen können. Eine leitende Überdeckung (6b) wirkt sofort sehr stark dämpfend.

Horizontale Komponente des sekundären Magnetfeldes

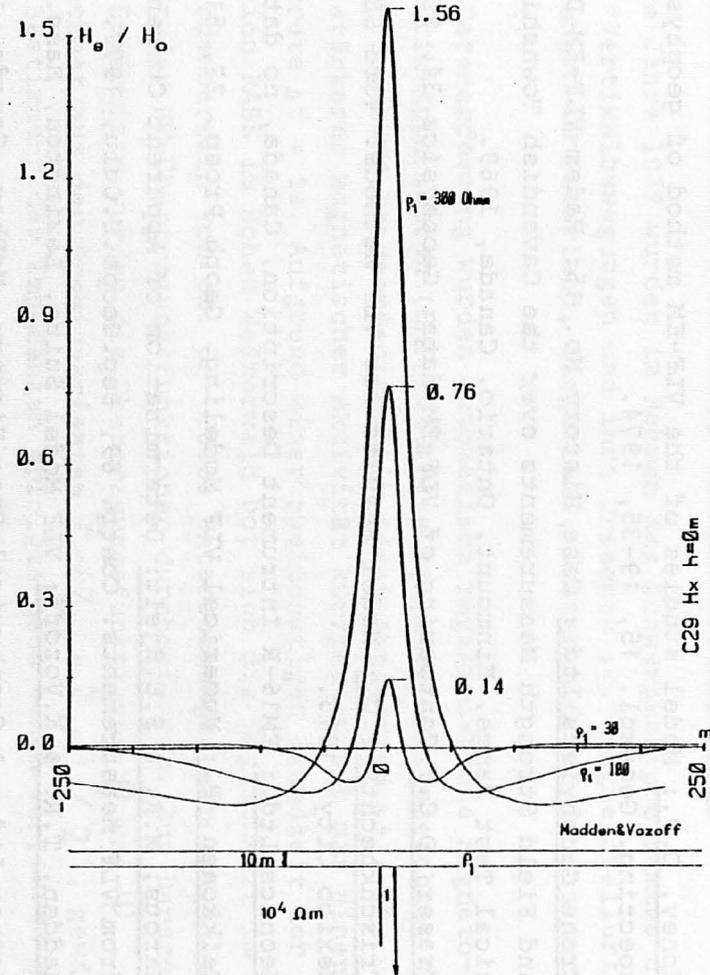
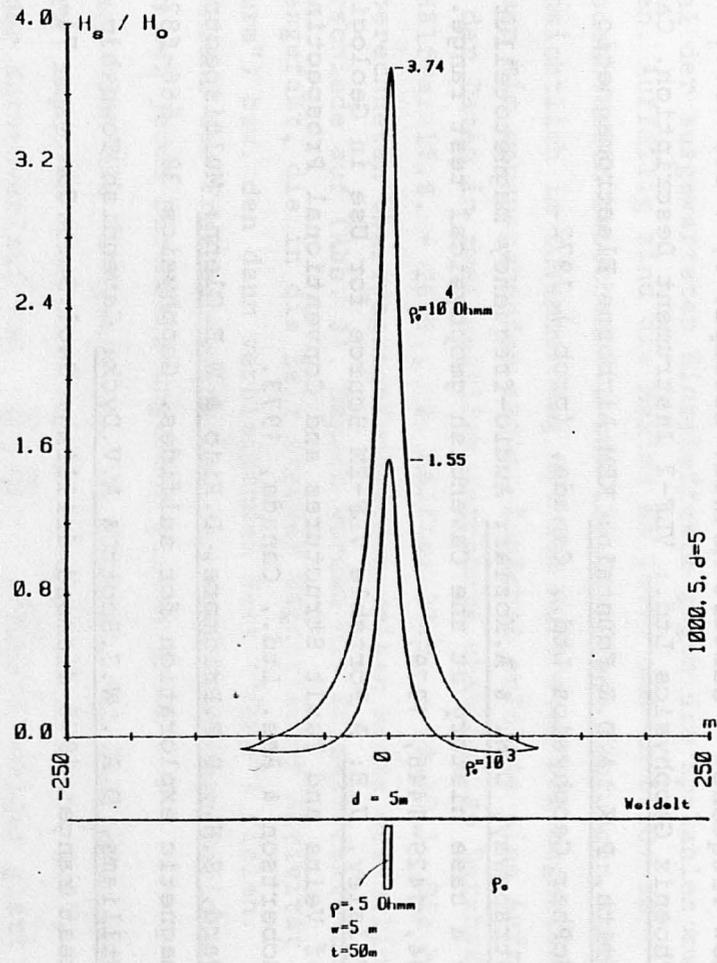


Abb. 6 Modellrechnungen von Weidelt (6a) und Madden & Vozoff (6b)

Literatur:

- Baker, H.A. & J.O.Myers: Vlf-EM Model studies and some simple quantitative applications to field measurements. *Geoexpl.* 17, 55-63, 1979.
- Coney, D.P.: Model studies of the VLF-EM method of geophysical prospecting. *Geoexpl.* 15, 19-35, 1974.
- Crone Geophysics Ltd.: Case History No. 15: Radem-VLF-EM Dip Angle and Field Strength Measurements over the Cavendish Township Geophysical Test Range, Kinmount, Ontario, Canada, 1969.
- Fraser, D.C.: Contouring of VLF-EM data. *Geophysics* 34, 958-967, 1969.
- Frischknecht, F.C.: Model Results for VLF Methods. 43rd SEG Meeting, Mexico City, 1973.
- Geonics Ltd.: EM16-R Instrument Description, Canada, no date.
- Kaikkonen, P.: Numerical VLF Modeling. *Geoph.Prosp.* 27, 815-834, 1979
- Karous, M.R. & S.E.Hjelt: Determination of Apparent Current Density from VLF Measurements. *Contr.* 89, *Dep.Geoph.U.Oulu*, 1977.
- Madden, T.R. & K.Vozoff: VLF Model Suite. Lexington, Mass., 1970.
- McPhar Ltd.: A Geophysical Case History. McPhar, Canada, 1967.
- Paterson, N.R.: Airborne VLF-E.M. Test. *Can.Min.J.*, Nov. 1970.
- Paterson, N.R. & V.Ronka: Five Years of Surveying with the Very Low Frequency - Electro Method. *Geoexpl.* 9, 7-26, 1971.
- Phoenix Geophysics Ltd.: VLF-2 Instrument Description. Canada, no date.
- Smith, P.K. & D.K.Fountain: KEM Airborne Electromagnetic System. McPhar Geophysics Ltd., Canada, (prob.) 1972.
- Strangway, D.W. & A.Koziar: Audio-frequency magnetotelluric sounding - a case history at the Cavendish geophysical test range. *Geophysics* 44, 1429-1446, 1979.
- Tilsley, J.E.: A Portable VLF-EM Source for Use in Geological Mapping of Veins and Fault Structures and Conventional Prospecting. D.S. Robertson & Ass. Ltd., Canada, 1973.
- Ward, S.H., D.F.Pridmore, L.Rijo & W.E.Glenn: Multispectral electromagnetic exploration for sulfides. *Geophysics* 39, 666-682, 1974.
- Williams, D.A., W.J.Scott & A.V.Dyck: Cavendish Township geophysical test range; 1975 diamond drilling. *Geol.Surv.Can. Paper* 74-62, 1975.