

G. REITMAYR, München

"Die elektrische Leitfähigkeit im oberen Erdmantel unter dem Rheingraben, bestimmt mit Methoden der Magnetotellurik und der Erdmagnetischen Tiefensondierung"

Montag, den 11.3.1974

Im Gebiet des Rheingrabens wurdeⁿ in den letzten Jahren unter anderem auf einem senkrecht zur Grabenachse angelegten Profil R II, das den Graben etwa zwischen Freiburg und Straßburg quert (s. Abb. 1), an mehr als 20 Stationen die Horizontal-Komponenten des elektrischen Feldes (mit Elektrographen des Instituts für Angewandte Geophysik, München) und gleichzeitig an zwei die des magnetischen (mit Förstersonden) gemessen. Es wurde darüber und über erste Ergebnisse schon auf dem Kolloquium in Rothenberge berichtet. Die Auswertung erfolgte mit Methoden der Magnetotellurik. Auf dem östlichen Halbprofil konnten an sieben Stationen die drei Komponenten des erdmagnetischen Feldes registriert werden (mit Variographen der Fa. Askania). Diese Messungen wurden mit Methoden der Erdmagnetischen Tiefensondierung ausgewertet. An einigen der auf dem Profil gelegenen Stationen wurde versucht, mit Gleichstrom-Vierpunkt-Verfahren (nach Schlumberger) die spezifischen Widerstände in den obersten Schichten für die Modellrechnungen zu bestimmen. Nachfolgend werden die Erkenntnisse über die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund des untersuchten Gebietes zusammengefaßt:

Magnetotellurik

Die zunächst offensichtliche Zwei-Dimensionalität der Grabenstruktur scheint für die Stromsysteme im Untergrund doch nicht hinreichend gut gegeben zu sein, da eine für zwei-dimensionale Modelle nötige Trennung der elektromagnetischen Induktion in die zwei Modi der E- und der H-Polarisation anscheinend nicht ohne weiteres möglich ist. So gelang eine Anpassung

der aus den Messungen berechneten Übertragungsfunktionen, etwa des scheinbaren spezifischen Widerstandes als Funktion der Periode längs des Profils bisher nur relativ schlecht. An Meßstationen, die hinreichend weit von lateralen Inhomogenitäten, speziell der des Rheingrabens entfernt liegen, (in der Abb.1 mit Kreisen markiert) konnten hingegen bei der Berechnung von ein-dimensionalen Modellen nach Cagniard die dort bestimmten Übertragungsfunktionen (scheinbarer spezifischer Widerstand und Phasen zwischen E und H) ganz gut erklärt werden. Zwar sind die Möglichkeiten, die Parameter der Leitfähigkeits-Tiefen-Funktion zu wählen, dabei im allgemeinen sehr vielfältig. Man kann oft sehr von einander verschiedene Modelle finden, die - angesichts der Streuung - die aus den Messungen gewonnenen Werte einer Übertragungsfunktion gleich gut bzw. schlecht erklären (s. z.B. Abb.2 oben links, Modelle \perp und \pm). Um zu entscheiden, welches dasjenige Modell ist, das am wenigsten von den wirklichen Verhältnissen in der Natur abweicht, bedarf es zunächst oft einer unwissenschaftlichen Methode, nämlich der des Glaubens. (Allerdings gibt es auch Verfahren, bei denen nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate iterativ eine best mögliche Anpassung angestrebt wird; s. z.B. den Beitrag von MÜLLER in diesem Band.) Diese Verunsicherung kann aber nun abgebaut werden einmal durch die Tatsache, daß man für jede Station vier Übertragungsfunktionen zur Verfügung hat - zwei ρ_s - und zwei Phasen-Kurven, wobei jeweils die beiden entsprechenden Komponenten des elektrischen Feldes orthogonal zueinander sind (z.B. in unserem Fall parallel und senkrecht zur Vorzugsrichtung) - und zum anderen, wenn man noch mehrere benachbarte Stationen berücksichtigt: der Modelltypus, der am häufigsten in der großen Menge der zur Interpretation dieser Übertragungsfunktionen möglichen Modelle zu finden ist, repräsentiert mit der größten Wahrscheinlichkeit das eine Modell, das die wirklich existierenden Verhältnisse in der Natur am besten wiedergibt. In den beiden untersuchten Gebieten, in denen die Interpretation mit ein-dimensionalen Modellen überhaupt sinnvoll schien (etwa 45 km westlich und 120 km östlich des Rheingrabens, in der Abb.1 mit Kreisen gekennzeichnet),

zeichnet sich so sehr klar eine Leitfähigkeits-Tiefen-Funktion ab (s. Abb. 4): unter einer von Ort zu Ort wechselnden Sedimentbedeckung liegt ein schlechter Leiter (Widerstand >1000

Ohm.m, wohl das Kristallin). Erst in einer Tiefe um 80 km (74 - 95) beginnt eine gut leitende Schicht (10 - 100 Ohm.m) mit einer Mächtigkeit von ca. 20 km (14 - 25). Darunter liegt nochmal schlechter leitendes Material (um 1000 Ohm.m) bis in eine Tiefe von einigen hundert km, ehe die Leitfähigkeit wieder zunimmt, eventuell in Form eines zweiten Leitfähigkeits-Kanals. Eine andere Interpretations-Methode, das $\rho^{\times}(z^{\times})$ -Inversions-Verfahren nach SCHMUCKER ergibt sehr ähnliche Widerstands-Tiefen-Funktionen (Abb. 5). Solch eine Verteilung des elektrischen Widerstandes mit der Tiefe wird von vielen Autoren als normal, d.h. einem kontinentalen Standart entsprechend, angesehen. Nun waren aber auf Grund von Messungen der elektromagnetischen Felder hauptsächlich im und in unmittelbarer Umgebung des Grabens auf einem weiter nördlich gelegenen Profil, aber auch auf einem nahezu mit dem unseren identischen, (s. Abb. 1) schon in relativ geringer Tiefe von 20 bis 30 km beginnend ein guter Leiter (um 30 Ohm.m) mit der Mächtigkeit 20 bis 30 km (SCHEELKE, Magnetotellurik) bzw. 50 bis 90 km (WINTER, Tiefensondierung) gefunden worden. Diese Erkenntnisse waren gewonnen worden mit Modellen, bei denen laterale Leitfähigkeits-Änderungen nur in der obersten Schicht an der Erdoberfläche existieren, der tiefere Untergrund ist ein-dimensional geschichtet. Die Frage nach der lateralen Erstreckung dieser intermediären gut leitenden Schicht war somit nicht beantwortet worden. Nach unseren oben beschriebenen Ergebnissen aber kann sich diese Schicht - sofern sie auch unter diesem unserem südlichen Profil existiert - nicht weiter als 50 km nach Westen und 120 km nach Osten vom Graben aus gerechnet erstrecken. Die Berechnung des induktiven Verhaltens von zwei-dimensionalen Modellen zur Interpretation der nach der Methode der Erdmagnetischen Tiefensondierung auf dem östlichen Halbprofil bestimmten Übertragungsfunktionen war daher unter dem Aspekt der Frage nach Existenz bzw. lateraler Erstreckung dieser gut leitenden Schicht in relativ geringer Tiefe besonders interessant.

Tiefensondierung

Bei der Berechnung der Induktionspfeile, als der die elektromagnetische Induktion beschreibenden Übertragungsfunktionen, wurde - wie auch bei anderen Messungen im süddeutschen Raum - die Erfahrung gemacht, daß in der Vertikal-Komponente Z des Magnetfeldes ein großräumiger Anteil vorhanden ist, der sich in unserem Falle der Rheingraben-Anomalie überlagert. So wurde zunächst eine Separation der beiden Anteile, des normalen und des anomalen, versucht in der Weise, daß noch im Zeitbereich bzw. nach Filterung - die Frequenztrennung erfolgte hier mit Hilfe der zweifach angewendeten, elementaren numerischen Filter nach KERTZ (s. Abb.2) - jeweils von den Momentanwerten der Vertikal-Komponente an den verschiedenen Stationen die entsprechenden Werte, die an einer Basisstation gemessen worden waren, subtrahiert wurden. Vor dieser Subtraktion wurde allerdings noch eine (mittlere) Phase berücksichtigt (sie wurde berechnet mit Hilfe der Kovarianz-Funktion), um die die Variationen der jeweiligen Wanderstation gegen die zu subtrahierenden der Basisstation verschoben wurden. Als Basisstation wurde dabei die am östlichen Profilende gelegene (s. Abb.1) Station 20 Bolstern gewählt, die, 120 km vom Graben entfernt, wohl kaum mehr von dessen anomaler Induktionswirkung beeinflusst ist. (Von dieser Station wurden auch die φ_s - und Phasen-Kurven (Phasen zwischen E und H) verwendet für die oben erwähnte Interpretation mit ein-dimensionalen Modellen.) Die Wirkung der Abtrennung des großräumigen Anteils in Z wird in Abb.7 unten deutlich: Die Induktionspfeile, berechnet aus dem gesamten Z , zeigen in süd- bis süd-östliche Richtungen; sie liegen also offensichtlich nicht senkrecht zur Grabenrichtung, die von der Oberfläche her $N 15-25^\circ E$ sein müßte. Auch sind 0° - und 90° -Pfeil (nach SCHMUCKER) keineswegs parallel zueinander bzw. antiparallel (, da sie aus zeichentechnischen Gründen mit verschiedenem Vorzeichen definiert werden), wie sie es im Fall von zwei-dimensionalen Strukturen sein müssen. Nach Abtrennung des Anteils in Z , der nur noch die Wirkung des Grabens enthalten soll (ganz unten in Abb.7 mit $Z_{(an)}$ bezeichnet), sieht dies alles

"viel besser" aus. (Nur bei den kürzesten Perioden, bei dem hier analysierten Intervall von 15 Minuten, scheint das Trennverfahren - verständlicherweise - zu versagen.)

Nachdem die Berechnung der Übertragungsfunktionen (Induktionspfeile), die jetzt weitgehend nur noch die Wirkung der Rheingraben-Anomalie beschreiben, soweit erfolgreich war, konnte zur Interpretation mit der Berechnung von zwei-dimensionalen Modellen begonnen werden. Nach zwei Methoden wurde gerechnet:

- Methode der dünnen, lateral inhomogenen Schicht über ein-dimensionalem Substratum nach SCHMUCKER, der dabei Gedanken von PRICE aufgreift,
- Methode der "endlichen Differenzen" (finite difference method) in einer Weiterentwicklung der von JONES et al. veröffentlichten Rechenprogramme nach HAAK (s. dessen Beitrag in diesem Band).

Zunächst wurde versucht, die Variation der Übertragungsfunktionen längs des Profils in ihrer Abhängigkeit von der Periode zu erklären durch Variation der Leitfähigkeit in lateraler Richtung nur in der Deckschicht. Hauptsächlich wurde dabei die Länge des Induktionspfeils als das Verhältnis der Amplituden von anomaler Vertikal- zu normaler, sie induzierende Horizontal-Komponente (an der Basisstation) betrachtet. Ausgehend von den von SCHEELKE angegebenen Widerstandswerten konnten die Übertragungsfunktionen nur dann halbwegs gut erklärt werden, wenn eine gut leitende Schicht erst in einer Tiefe von etwa 80 km angenommen wurde, also dort, wo sie, wie oben behauptet, auch in einiger Entfernung vom Graben zu finden ist (s. Abb. 8). Bei diesen Rechnungen wurde erkannt, daß die lateralen Änderungen der Übertragungsfunktionen sehr empfindlich reagieren auf Veränderungen der Leitfähigkeiten in der Deckschicht an der Erdoberfläche. (Genaugenommen kommt es hauptsächlich auf die lateralen Gradienten an, die in der Natur in erster Linie durch die wechselnden Mächtigkeiten und die wechselnde petrographische Zusammensetzung der Sedimente verursacht wird.) Es schien dann auch bei den Modellrechnungen möglich zu sein, diesen guten Leiter weiter nach oben zu schieben, wie es die Ergebnisse von SCHEELKE und WINTER verlangten, wenn

man die Leitfähigkeiten in der ersten Schicht in geeigneter Weise verändert. Somit war eine Entscheidung, ab welcher Tiefe unter dem Rheingraben eine gute Leitfähigkeit zu erwarten ist, nicht leicht, da über die Leitfähigkeiten der obersten Schichten, vorallem außerhalb des Grabens, zu wenig bekannt ist. Die Ergebnisse von Schlumberger-Sondierungen konnten nicht sehr viel weiterhelfen; sie erfassen gewöhnlich nur die ersten paar hundert m, auch hat es den Anschein, als ob die Werte nicht unmittelbar für die Induktions-Verfahren verwertbar seien. Ein Effekt allerdings, und der scheint sehr wesentlich zu sein, konnte trotz vieler Versuche nicht durch laterale Variation der Leitfähigkeit in der Deckschicht allein erklärt werden: die Amplituden der vertikalen Magnetfeld-Komponente oder, was äquivalent ist, die Länge der Induktionspfeile haben auch noch in größerer Entfernung vom Graben so hohe Werte, wie sie von der Oberfläche her in den Rechnungen nicht erzeugt werden können, außer bei der Annahme von ganz unrealistischen Modellen. (Die Aussage gilt nur für den Ostteil des Profils, da ja nur dort gemessen worden war.) Erst als bei den Modellen auch laterale Änderungen der Leitfähigkeit im tieferen Untergrund angenommen wurde, konnte diese relativ langsame Abnahme der Z-Amplituden bei Entfernung vom Graben hinreichend erklärt werden. So wurde schließlich in den Modellen zusätzlich ein Körper guter Leitfähigkeit (30 Ohm.m) zwischen 25 und 45 km Tiefe unter dem Rheingraben und von nur wenigen zehner km Ausdehnung nach Osten und Westen eingeführt (Abb.10). Die Frage nach der genauen Geometrie, ob zum Beispiel die ursprünglich angenommene gutleitende Schicht in 80 km Tiefe auch unter diesem Körper durchgehend vorhanden ist, ob sie dicker, dünner oder ganz unterbrochen ist, oder ob vielleicht eine Verbindung zwischen beiden Schichten besteht, scheint aus unseren bisherigen Messungen und Auswertungen nicht klar beantwortet werden zu können. Die Auswirkung von Änderungen bei den Modellen im tieferen Untergrund sind dafür im Vergleich zur Wirkung von Änderungen in der Deckschicht zu gering (s.Abb.9).

Zusammenfassung

An der Existenz einer gut leitenden Schicht (10 bis 100 Ohm m, Mächtigkeit etwa 20 km) erst in einer Tiefe von 80 km etwa 50 km westlich und 100 km östlich des Rheingrabens besteht wenig Zweifel. Wahrscheinlich ist aber unmittelbar unter dem Graben eine Zone mit ähnlich guter Leitfähigkeit schon in etwa 25 km Tiefe anzutreffen. Ihre seitliche Begrenzung liegt nur wenige zehner km von den Grabenrändern entfernt.

Literatur

- HAAK, V.: Das zeitlich sich ändernde, erdelektrische Feld, beobachtet auf einem Profil über den Rheingraben; eine hiervon abgeleitete Methode der Auswertung mit dem Ziel die elektrische Leitfähigkeit im Untergrund zu bestimmen. Diss.Naturwiss.Fak.Univ.München, 1970.
- HAAK, V., K.-P. SENGPIEL, A. BERKTOLD, S. GREINWALD: The telluric method: Results of measurements along a profile across the Rhinegraben between Stuttgart and Kaiserslautern. In: Graben Problems. Edited by J.H. Illies and St. Müller. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 235-238, 1970.
- REITMAYR, G.: Räumliche Verteilung und Periodenabhängigkeit der Vorzugsrichtung des erdelektrischen Feldes und erste Ergebnisse von magnetotellurischen Messungen auf einem Profil über den Rheingraben. Prot.Erdmagn.Tiefens. Rothenberge, 155-177, 1971.
- SCHEELKE, I.: Magnetotellurische Messungen im Rheingraben und ihre Deutung mit zweidimensionalen Modellen. Gamma 20 Inst.Geophys.Meteorol.Tech.Univ.Braunschweig, 1972.
- SCHMUCKER, U.: Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. Bull.Scripps Inst.Oceanogr. Univ.Calif. 13, 1970.
- SCHMUCKER, U.: Interpretation of induction anomalies above nonuniform surface layers. Geophysics 36, 156-165, 1971.
- WINTER, R.: Der Oberrheingraben als Anomalie der elektrischen Leitfähigkeit, untersucht mit Methoden der Erdmagnetischen Tiefensondierung. Diss.Math.-Naturwiss.Fak.Univ.Göttingen, 1973.

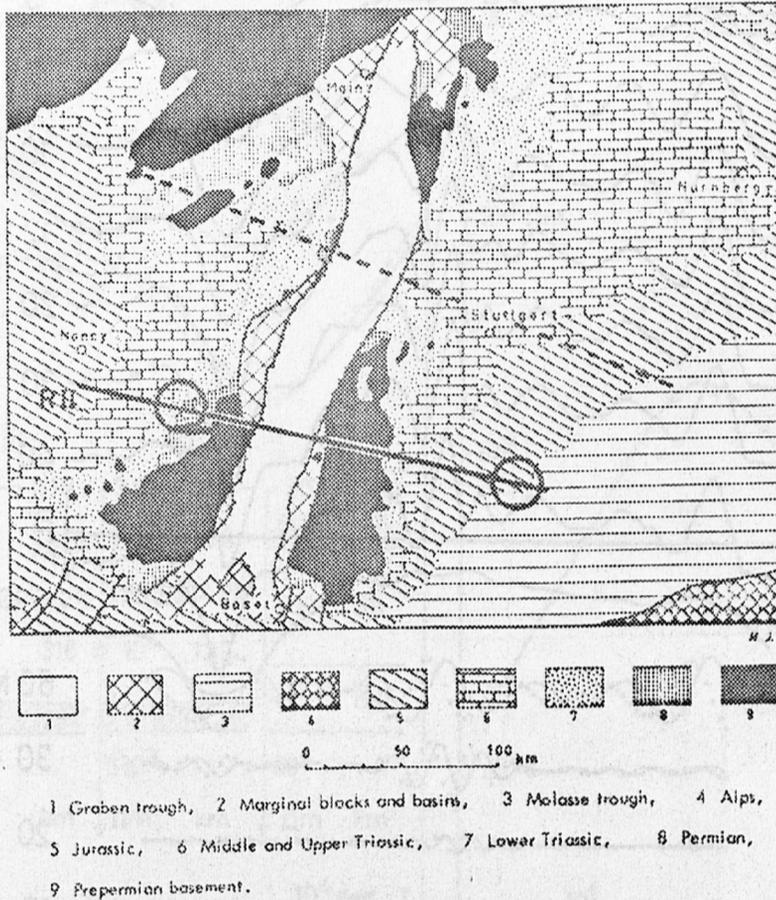


Abb.1: Schematisierte geologische Karte des Rheingraben-Gebiets nach ILLIES (1967). Mit R II ist das Profil bezeichnet, auf dem die Stationen liegen, an denen die Registrierungen für die hier vorgestellten Interpretationen erfolgten. Gebiete, in denen die Messungen mit ein-dimensionalen Modellen interpretiert werden konnten, sind mit Kreisen gekennzeichnet. Auf dem weiter nördlich liegenden Profil (strichliert) wurden von anderen Autoren sehr ähnliche Messungen durchgeführt (HAAK et al. 1970, WINTER 1973, SCHEELKE 1972).

Abb.2 Fortsetzung der Erläuterung: Rechts bei den gefilterten Kurven ist jeweils die Hauptperiode der Filter-Durchlaßfunktion angeschrieben. Links unten ist das Fourier-Spektrum der Originalvariation gezeichnet (40 Harmonische, g_{μ} sin-Term, f_{μ} cos-Term)

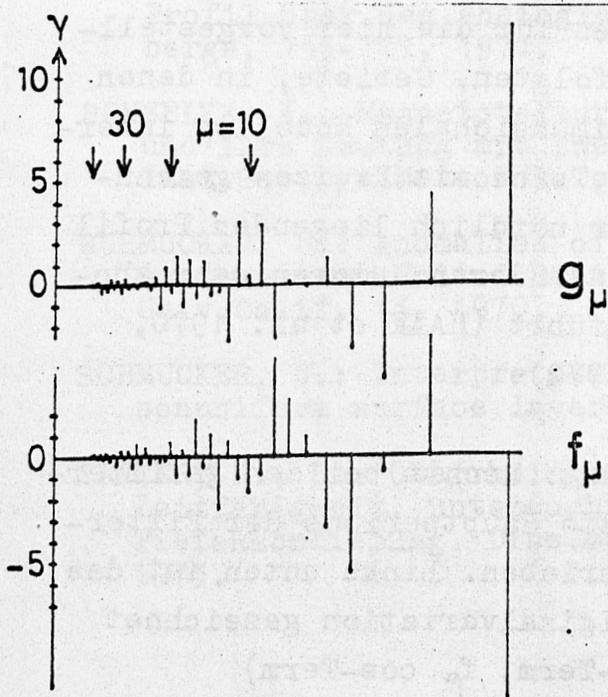
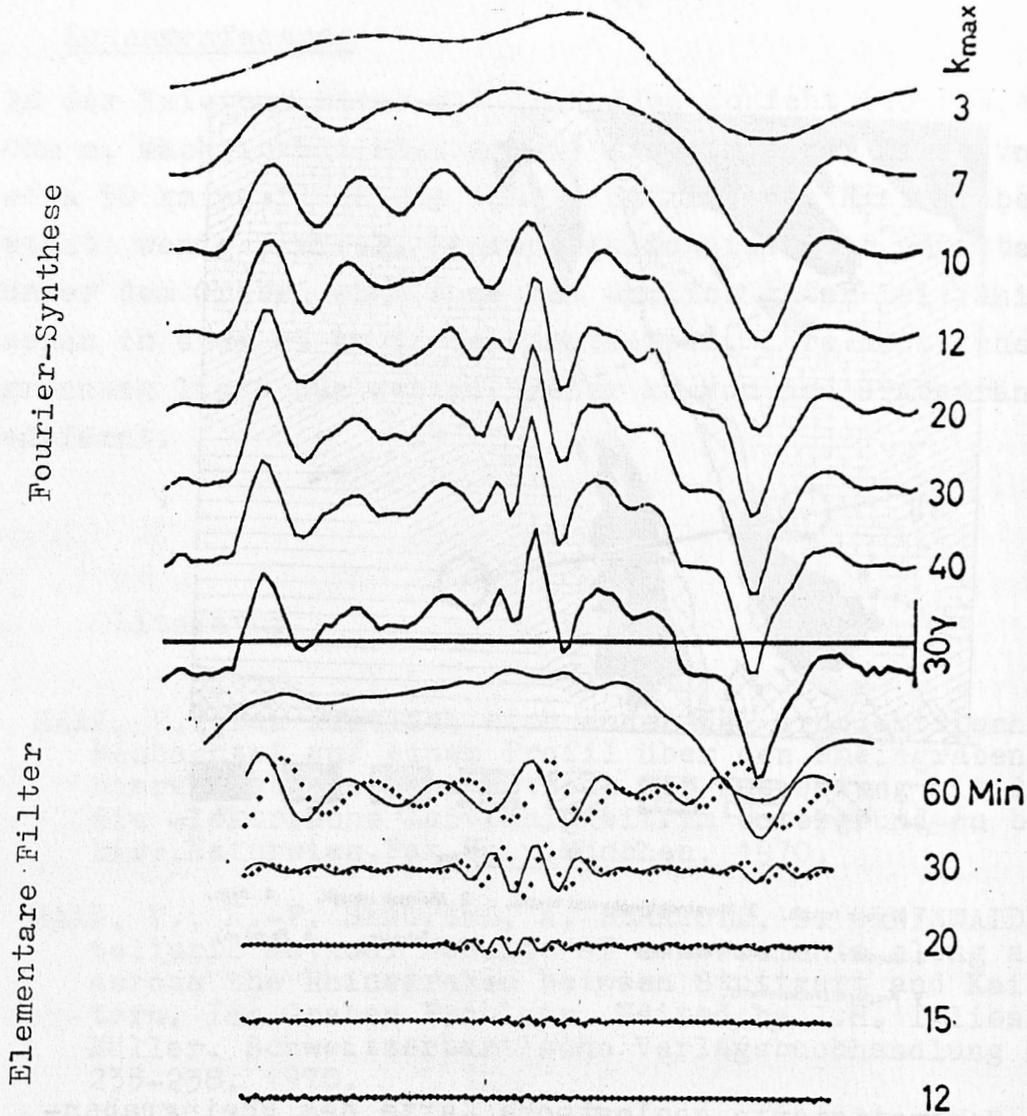


Abb.2: Untersuchung einer registrierten Variation nach ihrem Frequenz-Inhalt. In der Mitte dick gezeichnet die Originalregistrierung, darüber die nach Fourier-Analyse wieder synthetisierten Variationen mit verschiedener Maximalzahl k_{max} der berücksichtigten Harmonischen, darunter Ergebnisse nach numerischer Filterung (durchgezogen: phasentreues Filter, Kreuzchen: phasenverschiebendes (nach KERTZ)). Forts.s.S.vorher

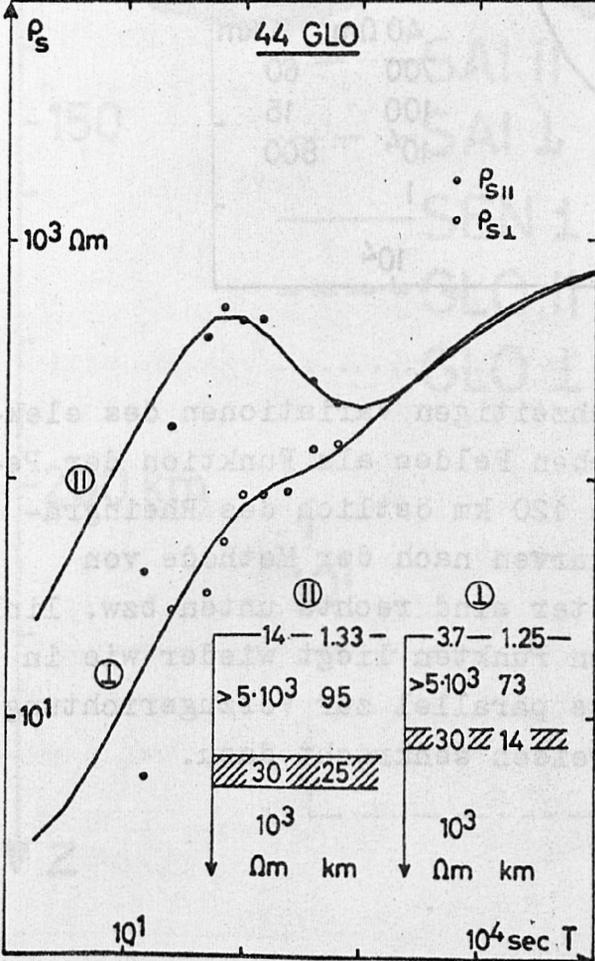
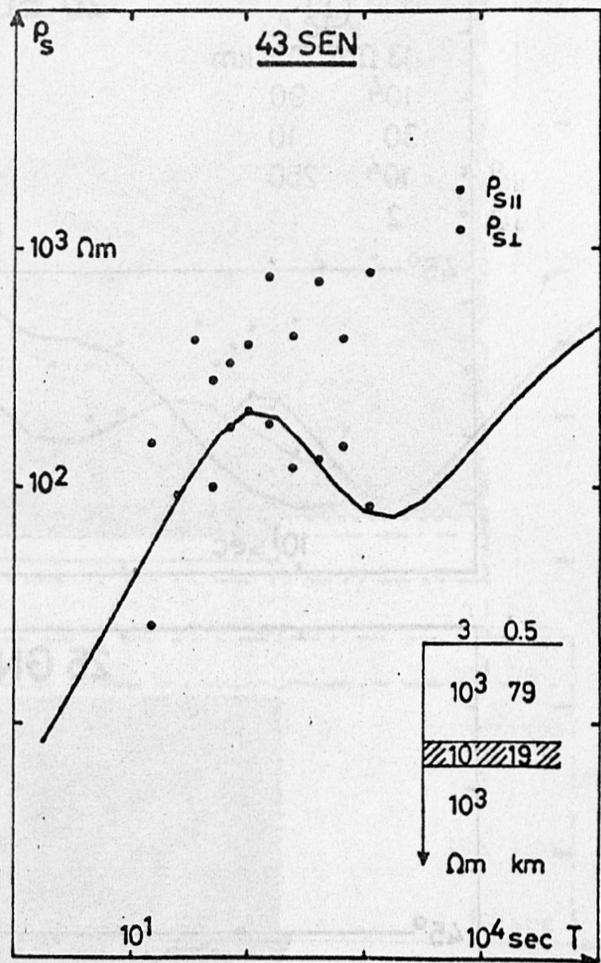
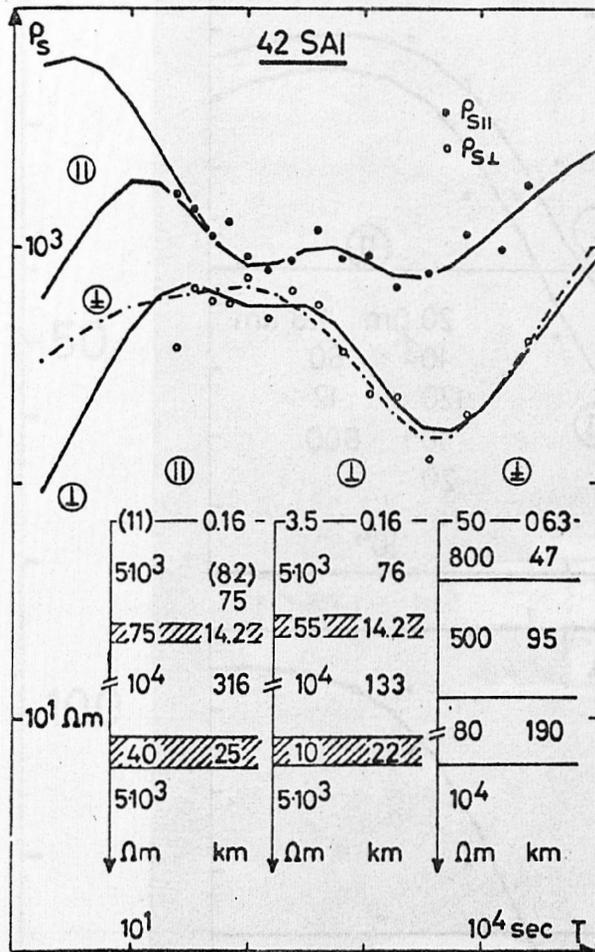


Abb.3: Werte des scheinbaren spezifischen Widerstandes als Funktion der Periode an drei Stationen westlich des Rheingrabens (s. Abb.1). Punkte repräsentieren ρ_s -Werte, bei denen die E-Feld-Komponente parallel zur Vorzugsrichtung liegt, kleine Kreise Werte, bei denen sie senkrecht dazu liegt. Die ausgezogenen Kurven sind die Ergebnisse von Modellrechnungen nach der Methode von Cagniard. Die Modellparameter sind jeweils unten angegeben.

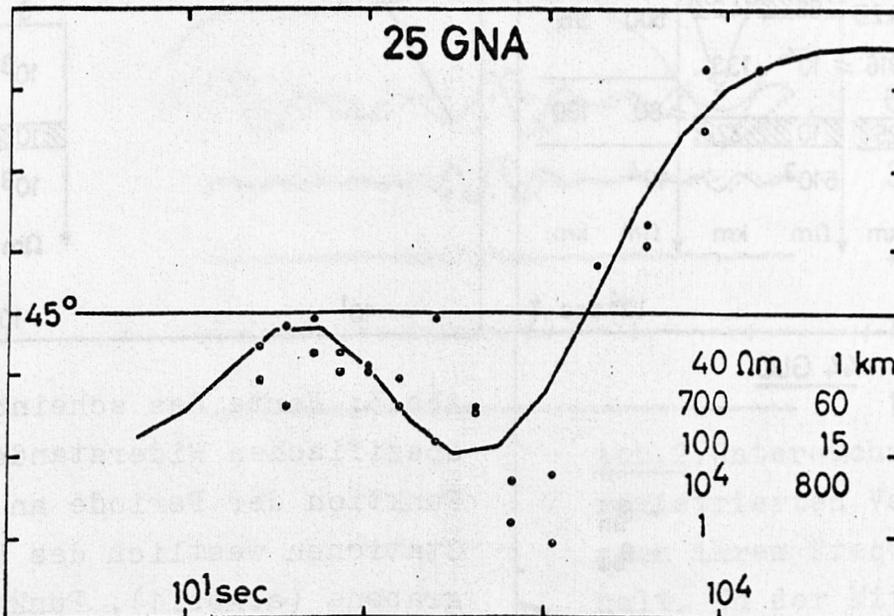
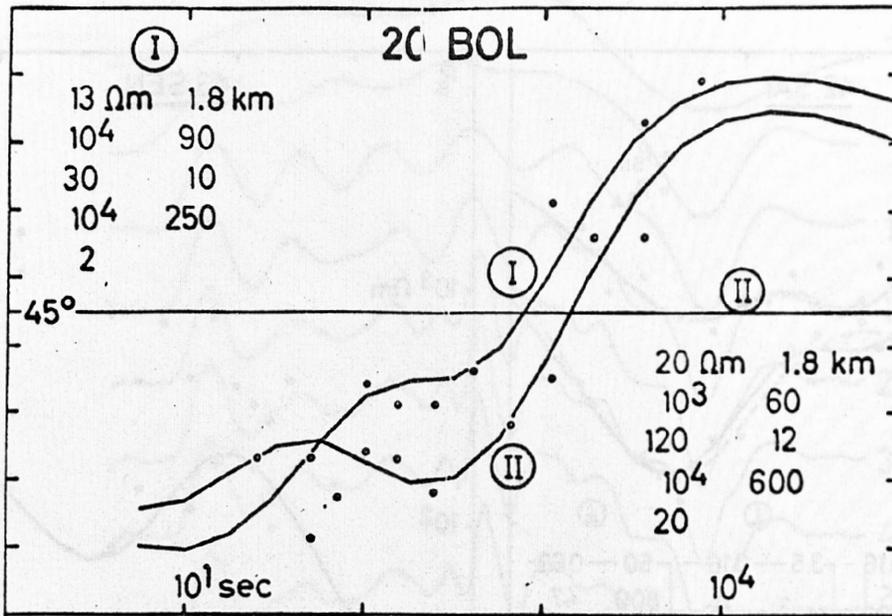


Abb.4: Phasen zwischen gleichzeitigen Variationen des elektrischen und des magnetischen Feldes als Funktion der Periode an Stationen 100 bis 120 km östlich des Rheingrabens (s. Abb.1) und Modellkurven nach der Methode von Cagniard. Die Modellparameter sind rechts unten bzw. links oben angeschrieben. Bei den Punkten liegt wieder wie in Abb.3 die E-feld-Komponente parallel zur Vorzugsrichtung, bei den kleinen offenen Kreisen senkrecht dazu.

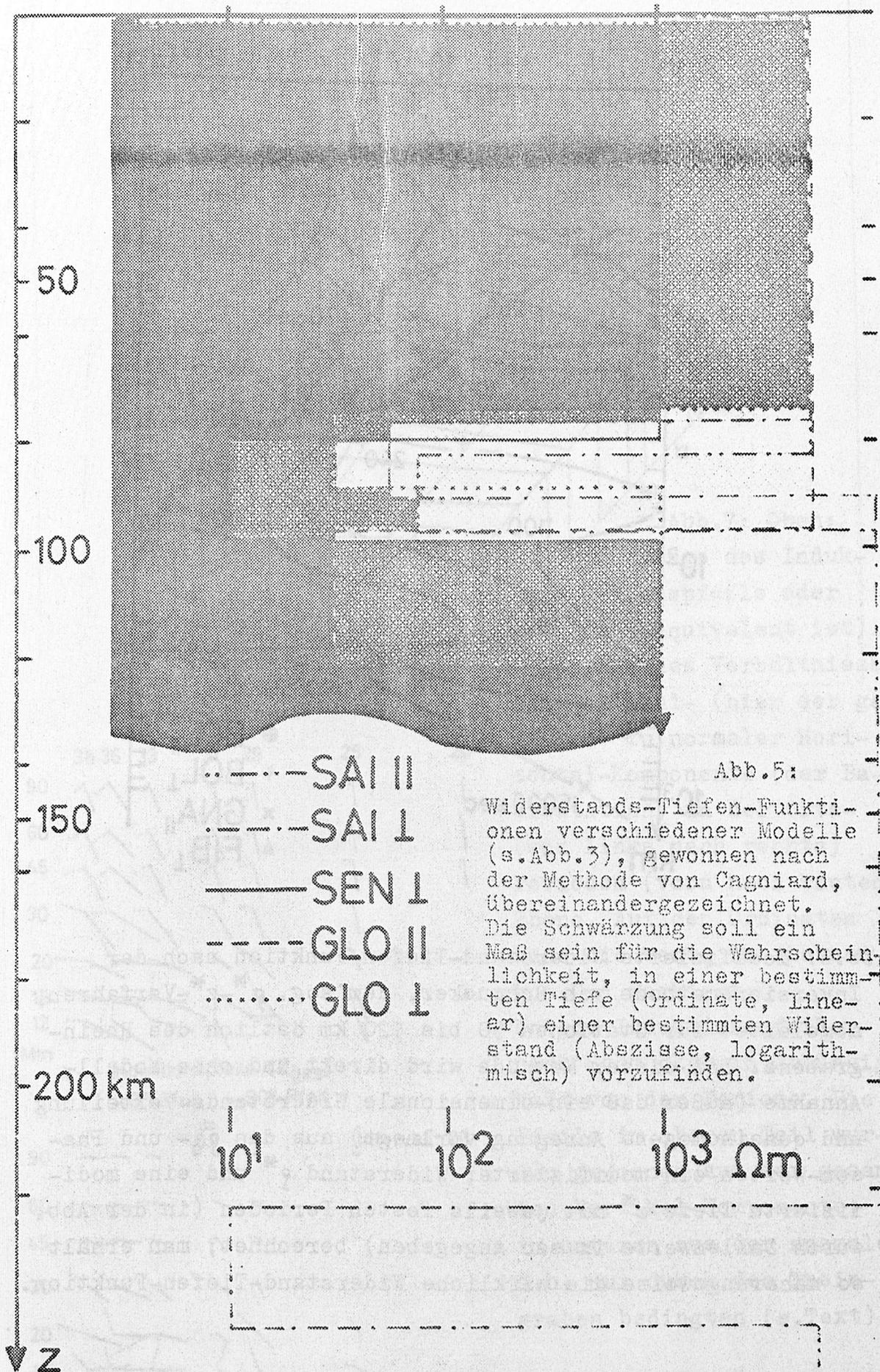


Abb.5:

Widerstands-Tiefen-Funktionen verschiedener Modelle (s. Abb.3), gewonnen nach der Methode von Cagniard, übereinandergezeichnet. Die Schwärzung soll ein Maß sein für die Wahrscheinlichkeit, in einer bestimmten Tiefe (Ordinate, linear) einer bestimmten Widerstand (Abszisse, logarithmisch) vorzufinden.

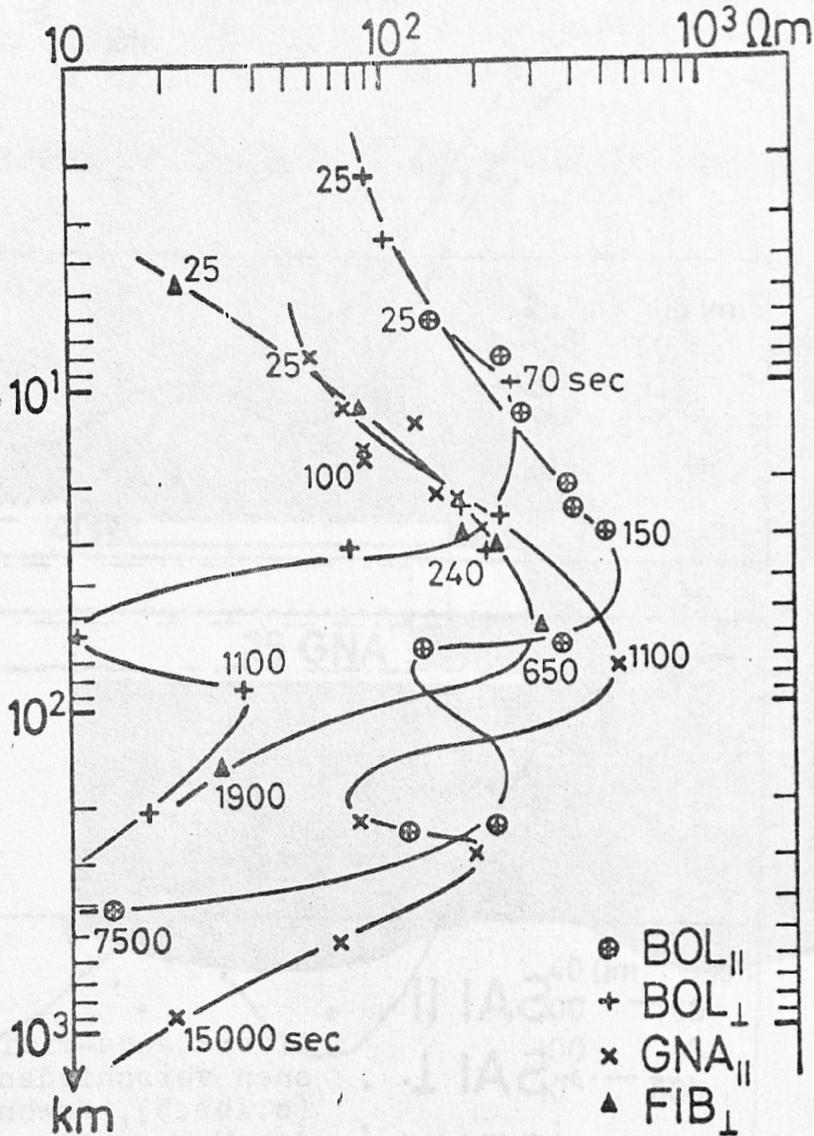


Abb.6: Modifizierte Widerstand-Tiefen-Funktion nach der Inversionsmethode von Schmucker, dem sog. ρ^*-z^* -Verfahren, abgeleitet für Stationen 50 bis 120 km östlich des Rheingrabens. Bei dieser Methode wird direkt und ohne Modellannahme (außer daß ein-dimensionale Widerstands-Verteilung und quasihomogene Anregung vorliegt) aus den ρ_s - und Phasen-Werten ein modifizierter Widerstand ρ^* und eine modifizierte Tiefe z^* mit jeweils festen Perioden (in der Abb. durch Zahlenwerte in sec angegeben) berechnet; man erhält so näherungsweise die wirkliche Widerstand-Tiefen-Funktion.

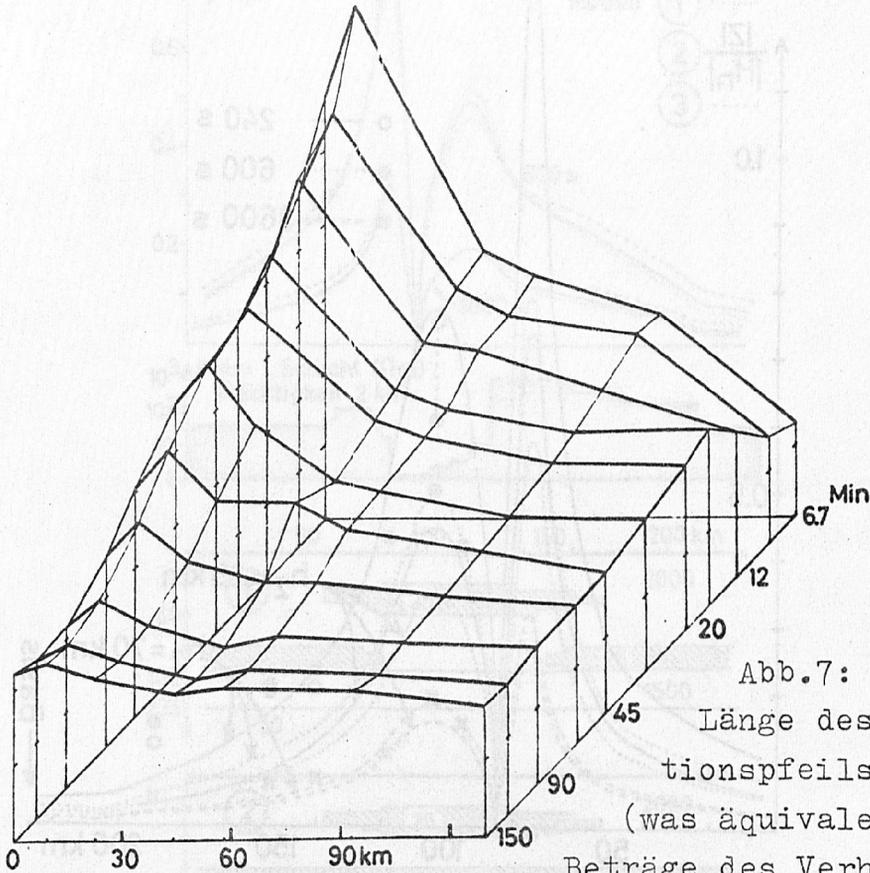
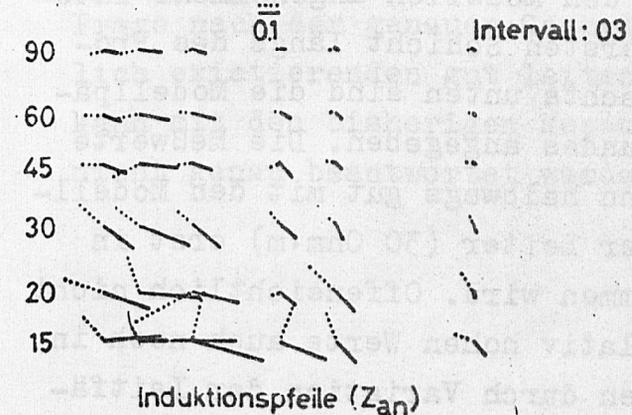
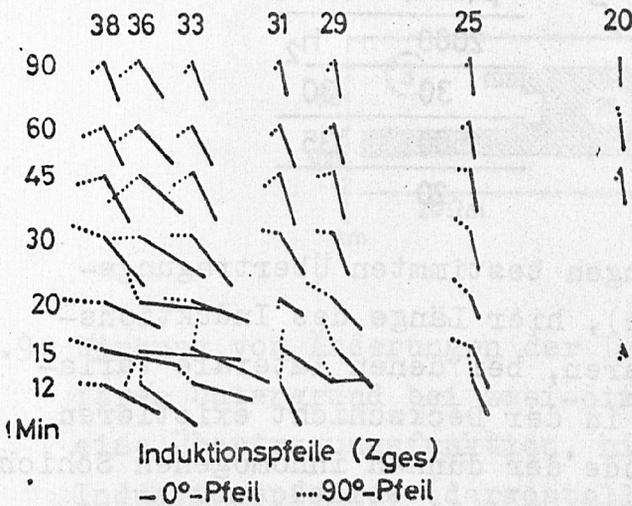


Abb.7: Oben: Länge des Induktionspfeils oder (was äquivalent ist) Beträge des Verhältnisses von Vertikal- (hier der gesamten) zu normaler Horizontal-Komponente (der Basisstation) in der Orts- (von links nach rechts) Perioden (vorn nach hinten)-Ebene. Auf den Ordinaten sind die Werte im Abstand von 0.1 markiert.



Unten: Induktionspfeile nach Schmucker in Abhängigkeit von der Periode. Die Pfeile im oberen Teil wurden gewonnen aus der gesamten Vertikal-Komponente, im unteren aus der anomalen, d.h. nur durch den Rhein-graben bedingten (s.Text).

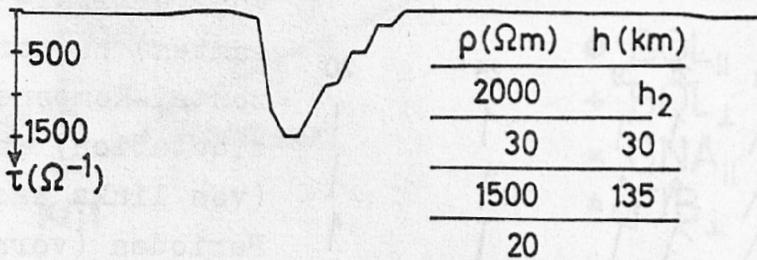
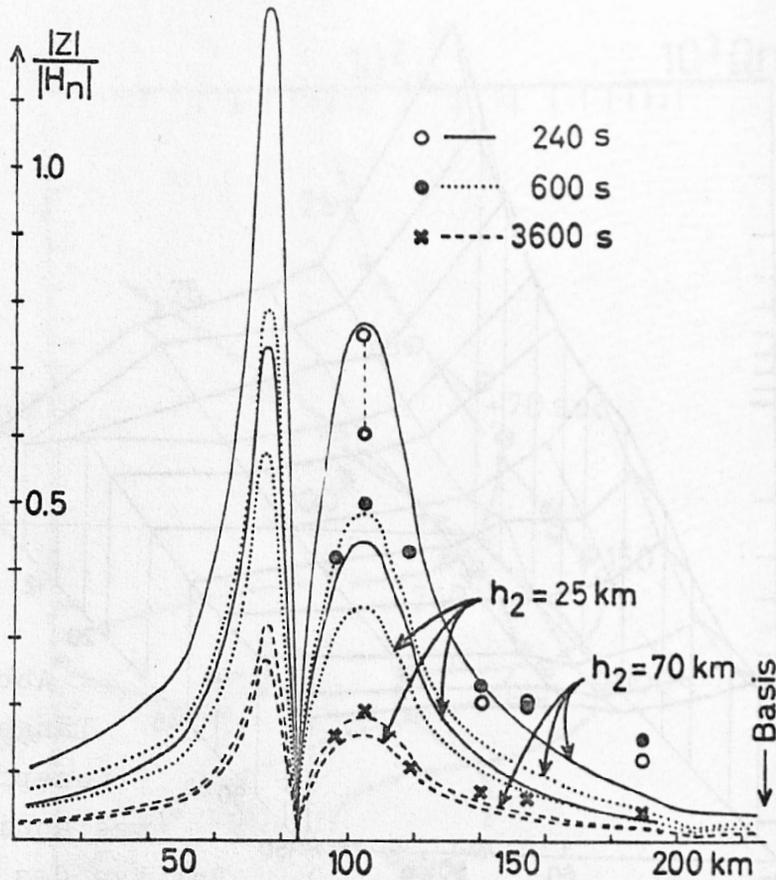


Abb.8: Versuch, die aus den Messungen bestimmten Übertragungsfunktionen (Punkte und Kreuze), hier Länge des Induktionspfeils, mit Modellen zu erklären, bei denen laterale Variationen der Leitfähigkeit nur in der Deckschicht existieren (durchgezogene Kurven) (Methode der dünnen inhomogenen Schichten nach SCHMUCKER). Die bei den Modellen angenommene integrierte Leitfähigkeit τ der ersten Schicht längs des Profils ist unten gezeichnet. Rechts unten sind die Modellparameter des tieferen Untergrundes angegeben. Die Meßwerte am Grabenrand stimmen nur dann halbwegs gut mit den Modellkurven überein, wenn ein guter Leiter (30 Ohm·m) erst in einer Tiefe von 70 km angenommen wird. Offensichtlich nicht erklärt werden können die relativ hohen Werte auch noch in größerer Entfernung vom Graben durch Variation der Leitfähigkeit in der Deckschicht allein.

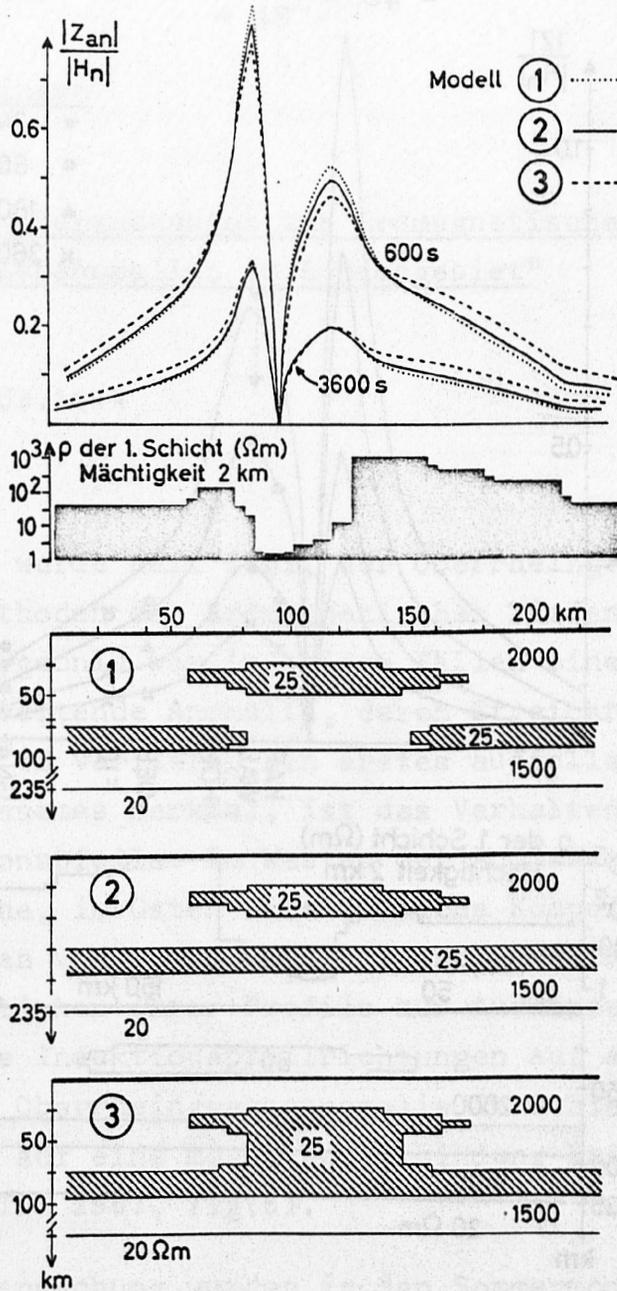


Abb.9: Wirkung von Änderungen der Leitfähigkeit nur im tieferen Untergrund bei zwei-dimensionalen Modellen auf eine Übertragungsfunktion, hier wieder der Länge des Induktionspfeiles (dargestellt für zwei Perioden). Die Frage nach der genauen Geometrie von sehr wahrscheinlich existierenden gut leitenden Zonen im Untergrund kann mit den bisherigen Messungen und Auswertungen nicht genau beantwortet werden.

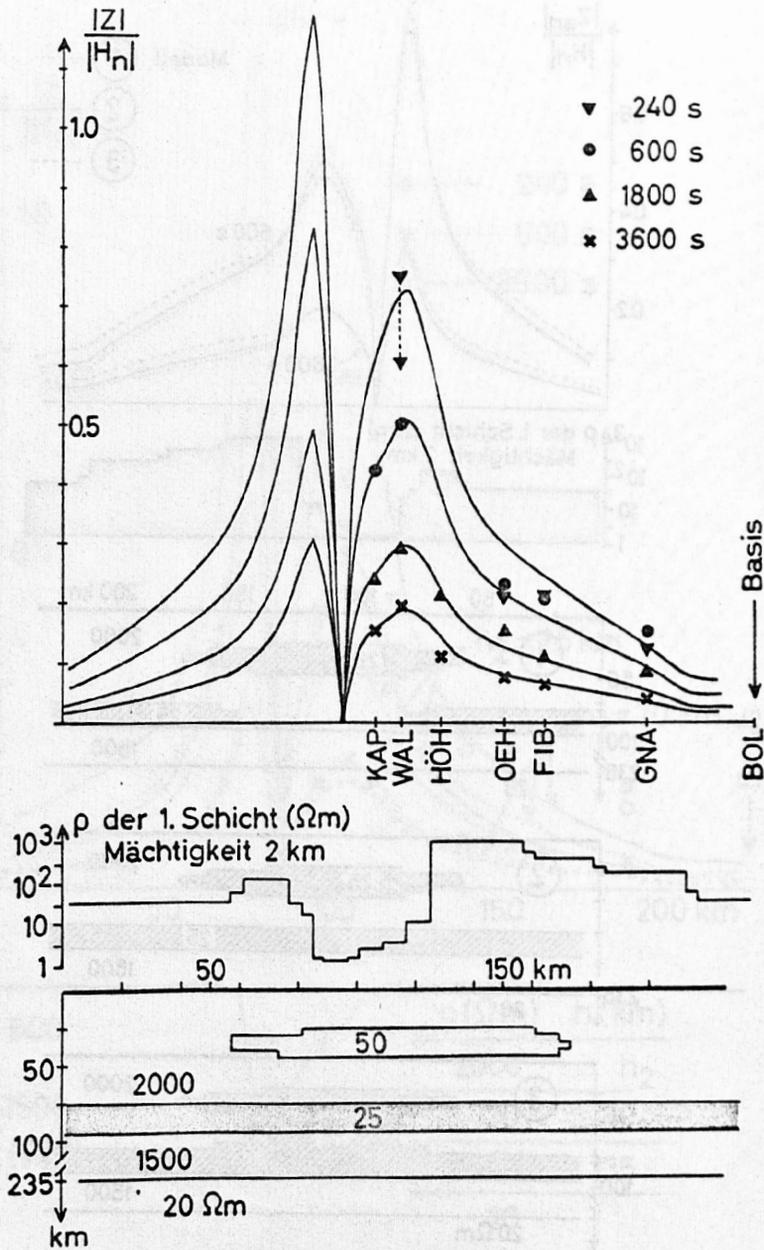


Abb.10: Länge des Induktionspfeils (Z bezogen auf das normale H) abgeleitet aus Messungen und ihre Erklärung durch ein zwei-dimensionales Modell. (Dargestellt sind 4 Perioden, die Meßwerte sind z.T. dieselben wie in Abb.8) Unten sind die Modellparameter angegeben: spezifischer Widerstand in der ersten Schicht (mit der Mächtigkeit 2 km) längs des Profils, darunter das Modell des tieferen Untergrundes. Es wurden zwei gutleitende Zonen angenommen: eine seitlich begrenzte zwischen 25 und 45 km unter dem Rheingraben mit $50 \Omega m$ und eine durchgehende zwischen 75 und 95 km mit $25 \Omega m$.