

U. SCHMUCKER und B. TEZKAN

"20 Jahre elektromagnetische Tiefenforschung im Rheingraben -
eine Zusammenfassung mit Ausblick auf neuere Ergebnisse"

1 EM Sondierungen 1970 bis 1983

Sie begannen vor 20 Jahren im Zusammenhang mit dem internationalen Forschungsprogramm "Oberer Erdmantel". In der Anfangsphase verliefen sie aus instrumentellen Gründen in zwei getrennten Richtungen: MT Sondierungen an Einzelstationen im Periodenbereich der Pulsationen und erdmagnetische Tiefenson- dierungen auf Profilen mit gleichzeitig registrierenden ASKANIA Variographen im Periodenbereich der Variationen. So endete der verlässliche Teil der ρ_a - und Phasenkurven der MT Gruppe (Lo- secke 1970 und Scheelke, 1972) bei 200 oder 300s, während die Bestimmung von ETS Übertragungsfunktionen erst von einigen Minuten an möglich war.

Eine aufeinander Bezug nehmende Auswertung magnetotelluri- scher Impedanzen und erdmagnetischer Übertragungsfunktionen ist daher unterblieben, auch ist damals aus Kalibrierungsgrün- den nicht versucht worden, die Verfügbarkeit gleichzeitiger magnetischer Registrierungen auszunutzen. Die ETS Arbeiten von Reitmayr (1975) und Winter (1974) beschränkten sich daher auf die Analyse und Interpretation der Z-Anomalie des Grabenran- des. Schließlich sei auf die erdelektrischen Rheingraben-Unter- suchungen von Haak (1970) verwiesen, die sich auf die wechseln- den "Vorzugsrichtungen" des erdelektrischen Feldes und ihre Aussagen über Streichrichtungen von Untergrundstrukturen kon- zentrierten.

Zur Orientierung über die Lage der Meßorte innerhalb des Rheingrabens dient Abb.1. Die erste MT Sondierung überhaupt wurde von Losecke in der Nähe von Speyer durchgeführt. Seine ρ_a Werte sind in Abb.5 zusammen mit den Ergebnissen einer spä- teren MT Sondierung am gleichen Ort gezeigt. Man erkennt deut- lich die Wirkung der gutleitenden Grabensedimente bei kurzen Perioden und den Anstieg des spez. Widerstandes beim Eindrin- gen in das hochohmige Grundgebirge. Doch es schien so, als ob

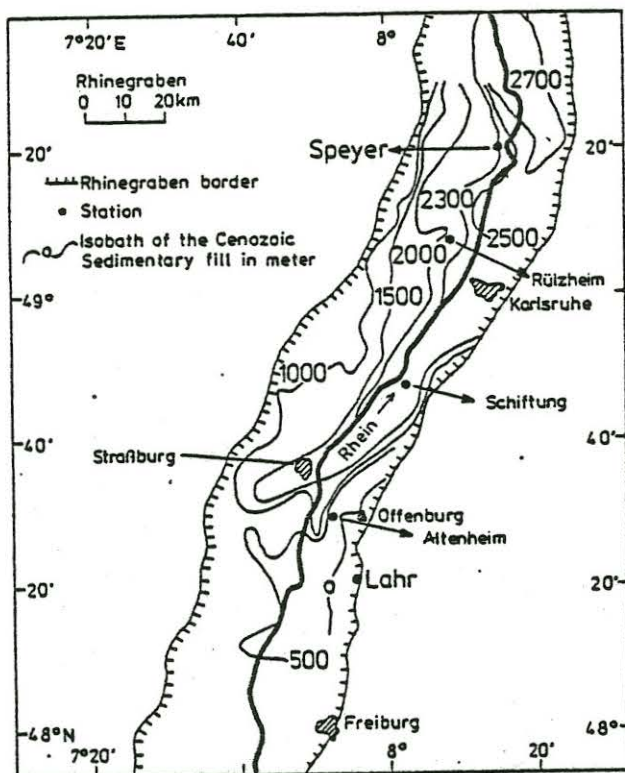


Abb.1: Stationen im Rheingraben 1969 bis 1983

dieser Anstieg von ρ_a bei 200s aufhört, was als Hinweis auf eine besser leitende untere Kruste gewertet wurde. Wiederholungsmessungen haben dies jedoch nicht bestätigt.

Scheelke vermaß dann im Anschluß ein mehr als 100 km langes Profil quer zum Graben mit vielen Einzelstationen. Rülzheim ist einer seiner im Rheingraben gelegenen Meßorte. Wiederum reichten die erfaßten Perioden nicht aus, um tiefer in die Kruste und den oberen Erdmantel im Bereich des Grabens einzudringen. Doch Scheelke konnte den Polarisierungseffekt der Grabensedimente sicher nachweisen, den Sprung von ρ_a an den Grabenrändern für B-Polarisation (E senkrecht zum Graben) und das kontinuierliche Verhalten von ρ_a bei E-Polarisation (E parallel zum Graben).

Außerdem verwandte Scheelke erstmals 2D Modellrechnungen zur Interpretation wie die aus seiner Arbeit kopierte Abb.2 zeigt.

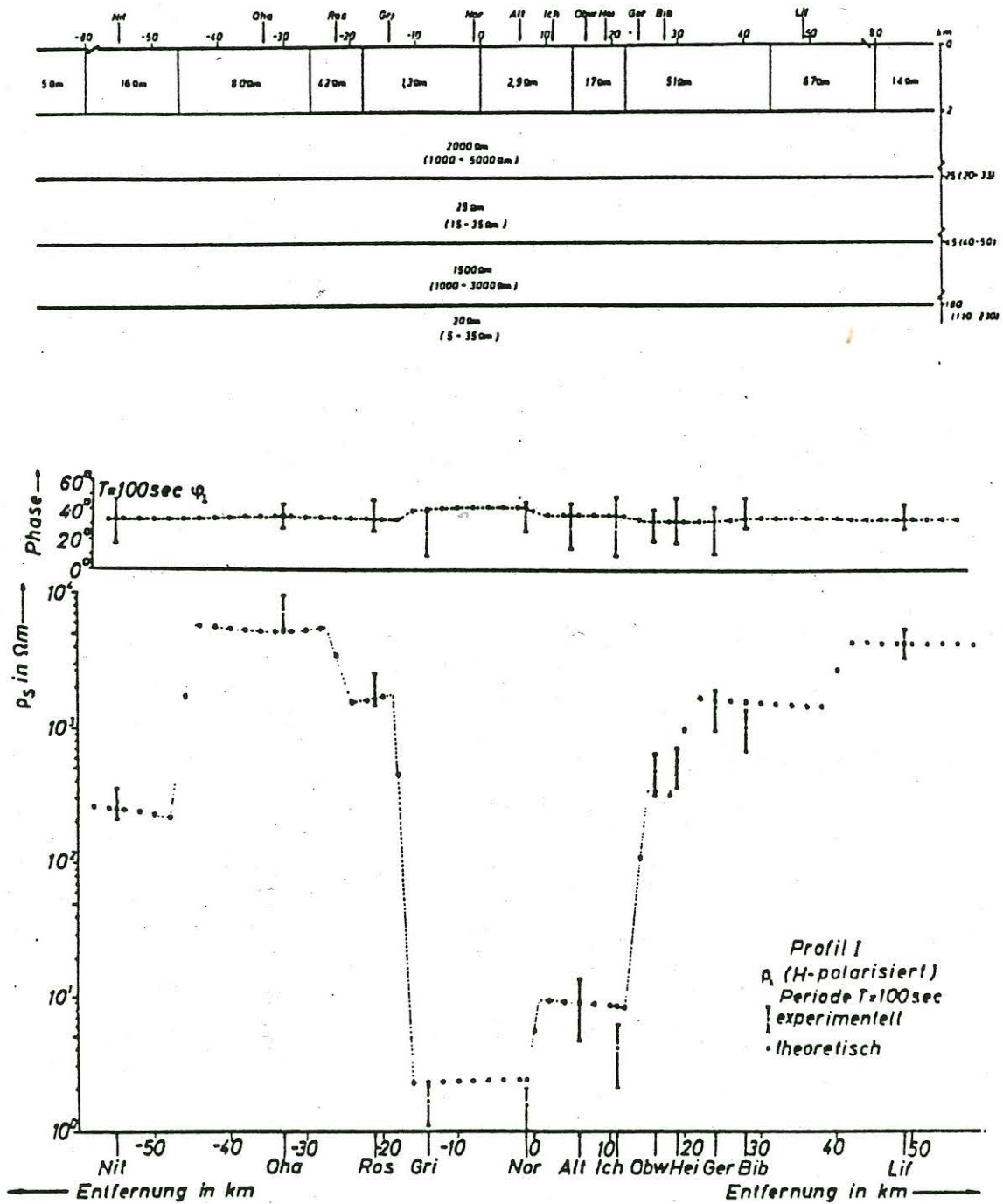
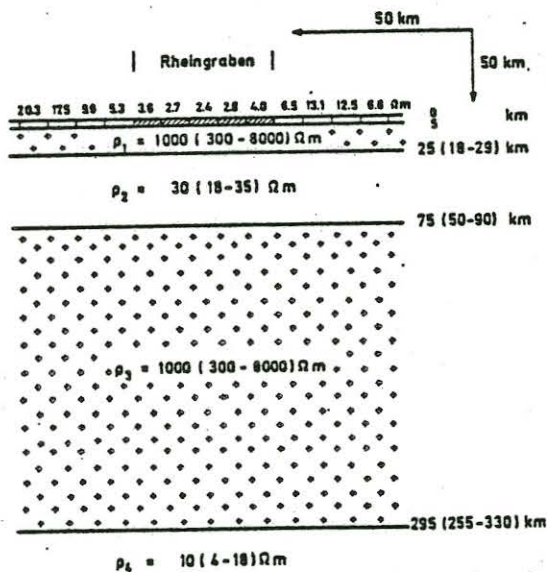


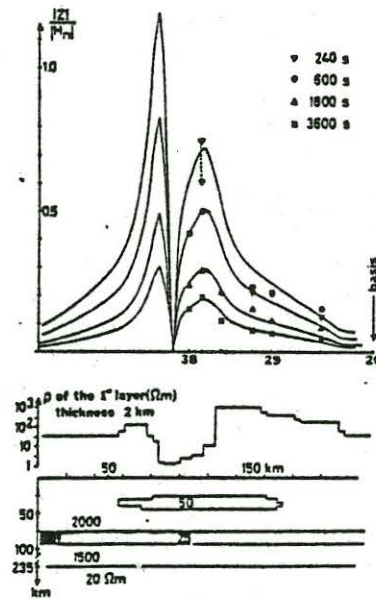
Abb. 2: MTS Rheingrabenmodell Scheelke 1972

Scheelke postulierte, wie schon Losecke, eine gutleitende Zwischenschicht im oberen Mantel (25 Ωm , 25-45 km), deren Existenz aber von seinen Daten nicht unbedingt gefordert wurde.

Die aus der erdmagnetischen Z-Anomalie des Grabens abgeleiteten Modelle sind in Abb.3 reproduziert. Das Wintersche Profil kreuzte den Graben nördlich von Karlsruhe, das Reitmayrsche Profil verlief parallel dazu südlich von Straßburg. Winter begründete seine Interpretation auf die z_D Übertragungsfunktionen zwischen 10 min und 2 h in Betrag und Phase. Reitmayrs Modellanpassung beschränkt sich auf den Betrag von z_D , beginnt aber schon bei 4 min. Beide fanden, daß die Pericdenabhängigkeit der Z-Anomalie nur dann erklärt werden kann, wenn eine gutleitende Mantelzone die Grabenanomalie bei langen Perioden abschwächt.



Winter (1974)

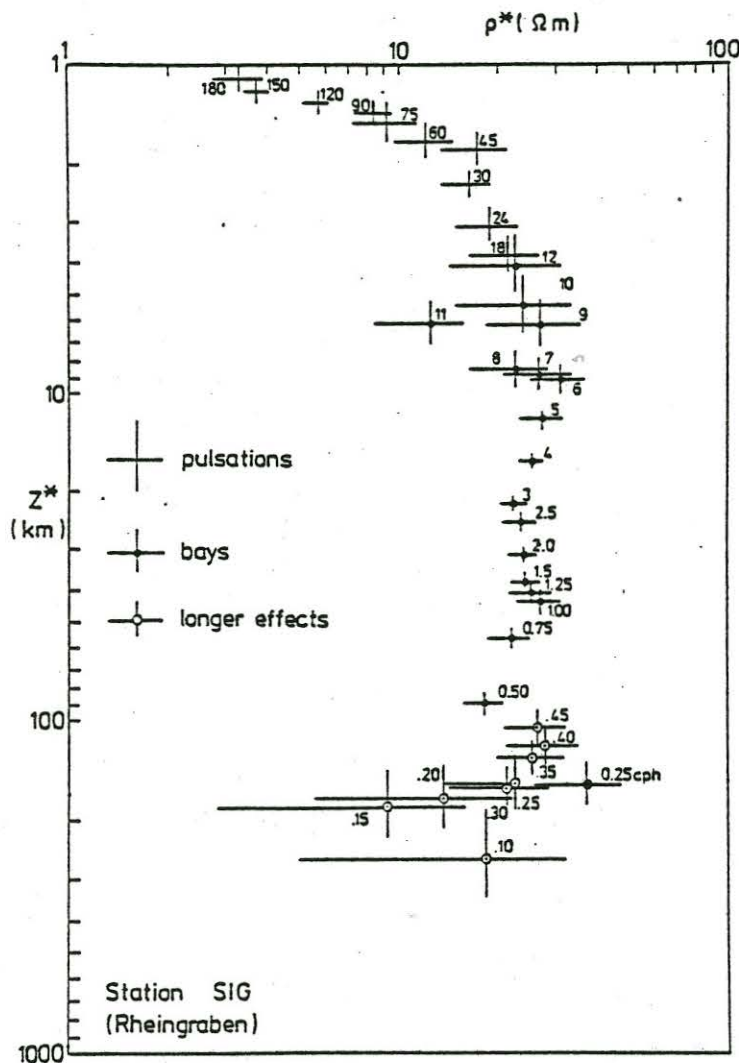


Reitmayr (1975)

Abb.3: ETS Rheingrabenmodelle

Winter benutzte für seine Rechnungen ein direktes Verfahren zur Bestimmung des Leitwertes der Grabensedimente und suchte dann ein 1D Substratum, das ihm die beste Anpassung im Real- und Imaginärteil von z_H für alle Stationen und für alle Perioden lieferte. Reitmayr bezog zusätzlich eine MT Sondierung öst-

lich des Grabens ein und postulierte eine seitliche Begrenzung des Mantelleiters. Die Beweggründe für die Einführung solcher Komplikationen sind nicht ganz klar, zumal die Phasen von z_H nicht berücksichtigt wurden. Insgesamt ist festzustellen, daß die in Abb. 3 gezeigten Modelle ohne Bezug zu MT Sondierungen im Rheingraben entwickelt worden sind.



Es ist außerdem anzumerken, daß in diesen und auch den späteren ETS Arbeiten ein deutlicher, mit H korrelierter Z-Anteil ignoriert wird. Zusätzlich zur Rheingraben-anomalie muß es also eine Ost-West streichende großräumige Struktur geben. Da z_H negativ ist, bedeutet dies, daß Kruste (und Mantel) im Norden durchweg besser leitend sind als im Süden.

Abb. 4: MT Sondierungskurve $\rho^*(z^*)$ der Rheingrabenstation Schiftung. Kurvenparameter ist die Frequenz in cph.

Mit neuen Instrumenten gelang es erst 1977 eine vollständige, bis tief in den Erdmantel reichende MT Sondierung im Rheingraben durchzuführen, und zwar in Schiftung bei Rastatt (Richards et al., 1981). Abb. 4 zeigt die zugehörige $\rho^*(z^*)$ -Kurve für E

parallel zum Grabenverlauf. Sie beginnt bei 30s und $\rho^* = 3\Omega m$ in den Grabensedimenten und zeigt einen stetigen Anstieg auf ein ab 6 min gleichbleibendes Niveau von $25\Omega m$. Als Hinweis für eine Strukturierung wäre allenfalls eine leichte Eindellung zwischen 12 min (5 cph) und 1 h für z^* -Tiefen zwischen 12 und 40 km anzusehen. Doch für 1D Modellrechnungen war sie für eine gutleitende Zwischenschicht nicht signifikant. So fehlte eine Bestätigung für die aus früheren Untersuchungen abgeleitete gutleitende Mantelzone. Zwischen $z^* = 40$ km und 100 km trat zwar eine zweite Eindellung zutage, doch wirklich gut belegt war eigentlich nur der Übergang zum gutleitenden tieferen Erdmantel mit Perioden von einigen Stunden.

Zur Überprüfung wurden von X.R. Kong 1983 zwei weitere MT Sondierungen unternommen, zum einen nocheinmal bei Speyer und dann im südlichen Rheingraben bei Lahr. Abb. 5 zeigt die zugehörigen ρ_a - und Phasenkurven. Diejenige für Speyer bestätigt im wesentlichen die aus der Sondierung Schiftung gezogenen Schlüsse,

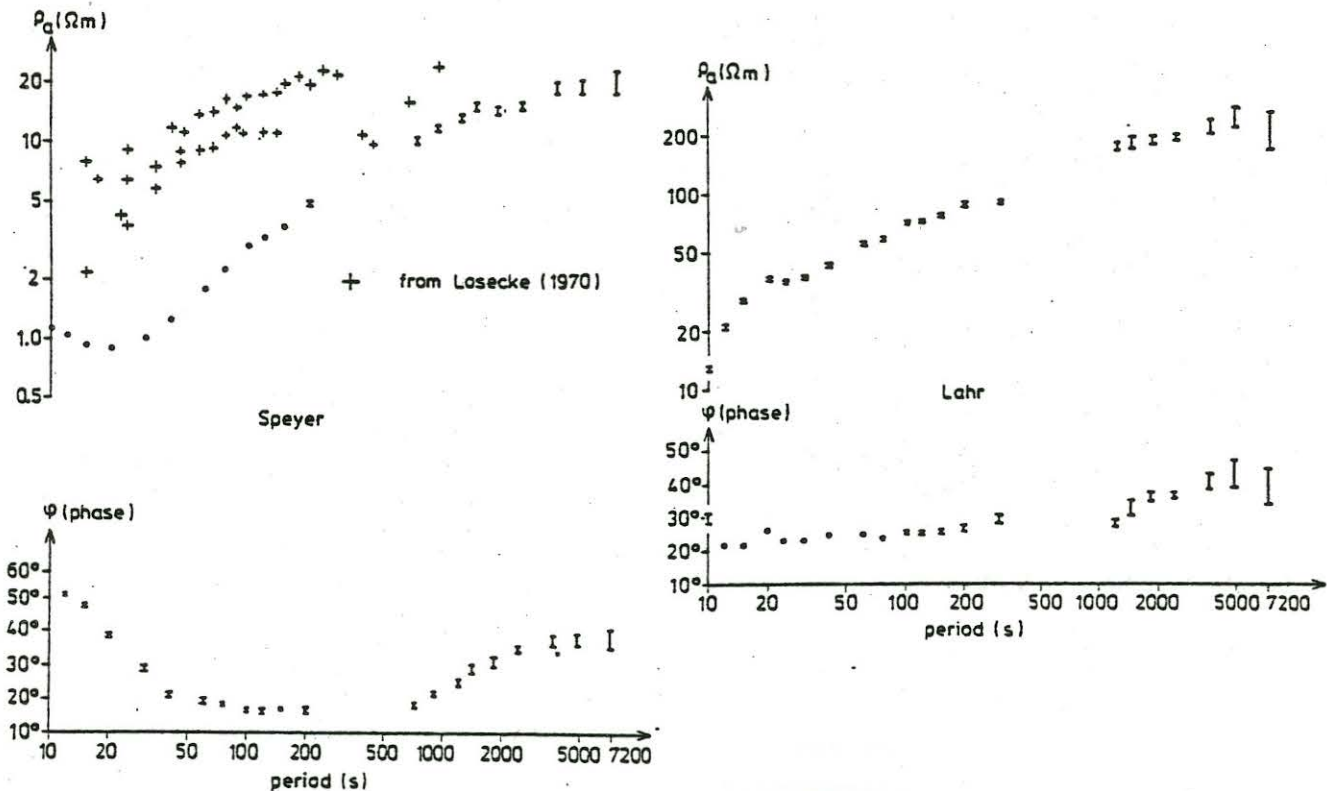


Abb. 5: MT ρ_a - und Phasenkurven für die Rheingrabenstationen Speyer und Lahr (X.R. Kong)

diejenige für Lahr war wegen der Randlage der Station schwierig zu interpretieren. Durch einen Vergleich der Pulsationen und Variationen in H und D an beiden Orten gelang es aber Kong erstmals, gesicherte Übertragungsfunktionen für die anomalen Horizontalkomponenten (h_H, h_D, \dots) abzuleiten. Über die Kongschen Arbeiten gibt es bisher nur einen DFG Bericht. Schließlich ist noch auf die zum Teil gleichzeitigen Untersuchungen von Mosnier und seinen Mitarbeitern auf französischer Seite zu verweisen, die sich ausschließlich auf die Grabenanomalie in H und D konzentrierten, jedoch keine Bestimmung von periodenabhängigen Übertragungsfunktionen im eigentlichen Sinne vornahmen (K. Babour und J. Mosnier, 1979).

2. Sondierungen im Rheingraben 1987

Sie wurden veranlaßt, um für die Interpretation neuer Schwarzwald- und Rheingraben-Stationen ein möglichst zutreffendes Modell des anschließenden südlichen Rheingrabens zu verwenden. Tezkan (1988) übernahm für eine erste Interpretation die Modellvorstellungen nach den unter 1. genannten Arbeiten von Reitmayr und Winter. Mit diesem Modell konnten sowohl die Phasenkurven der Impedanz der Schwarzwaldstationen als auch die Grabenrandanomalie in Z erklärt werden.

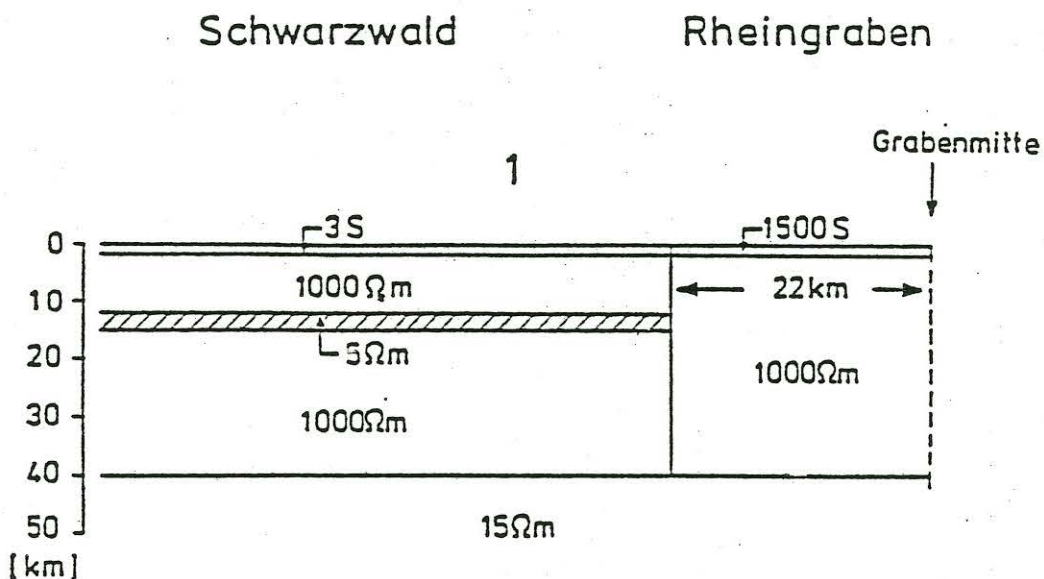


Abb. 6

Abb. 6 zeigt dieses Modell mit der Annahme, daß die unter dem Schwarzwaldkristallin mit Sicherheit existierende gutleitende Schicht sich nicht unter dem Rheingraben fortsetzt. Die Tiefenangabe für diesen Leiter mit 12 km ist aus der Z-Anomalie und ihrer Periodenabhängigkeit abgeleitet worden, da Phasen allein keine absolute Tiefenskalierung zulassen.

Beides sollte durch neue und diesmal gleichzeitige Beobachtungen im Rheingraben und Schwarzwald überprüft werden. Insbesondere sollte dabei die bisher auf deutscher Seite unbekannte D-Anomalie des Grabens in die Interpretation einbezogen werden.

Im Unterschied zur Z-Anomalie sollte sie weitaus weniger von Einzelheiten der Grabenrandstruktur abhängen.

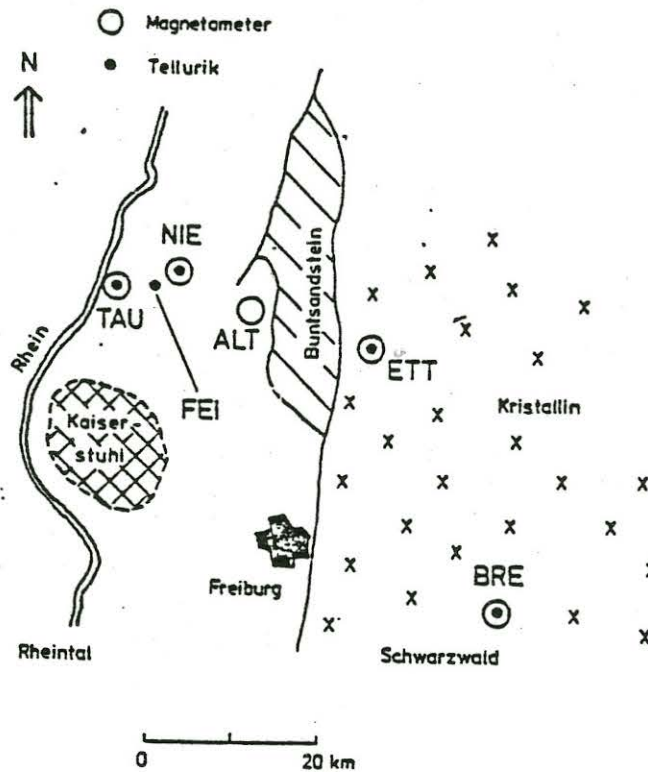


Abb. 7: Stationen 1987

Von Mai bis Juni 1987 wurden an den in Fig. 7 gezeigten Orten magnetische und tellurische Pulsationen mit $\Delta t=2s$ aufgezeichnet, zeitweise mit sechs gleichzeitig registrierenden Stationen. Daran schloß sich von Juli bis November 1987 ein

Beobachtungsprogramm der Variationen mit $\Delta t=30s$ an, wobei die Station TAU im Rheintal, BRE im Schwarzwald und die Station GRA im Odenwald (s. Bericht von K. Spitzer zu diesem Band) wiederbesetzt wurden. Die Analyse der Variation ist noch nicht abgeschlossen, so daß im Folgenden nur über diejenige der Pulsationen berichtet werden soll.

Als wesentliches neues Ergebnis seien zunächst die Übertragungsfunktionen für die anomalen magnetischen Horizontalkomponenten vorgestellt. Sie beziehen sich auf die Schwarzwaldstationen BRE als "normal" und sind definiert durch die Ansätze:

$$H_{stat} - H_{BRE} = h_H H_{BRE} + h_D D_{BRE}$$

$$D_{stat} - D_{BRE} = d_H H_{BRE} + d_D D_{BRE}$$

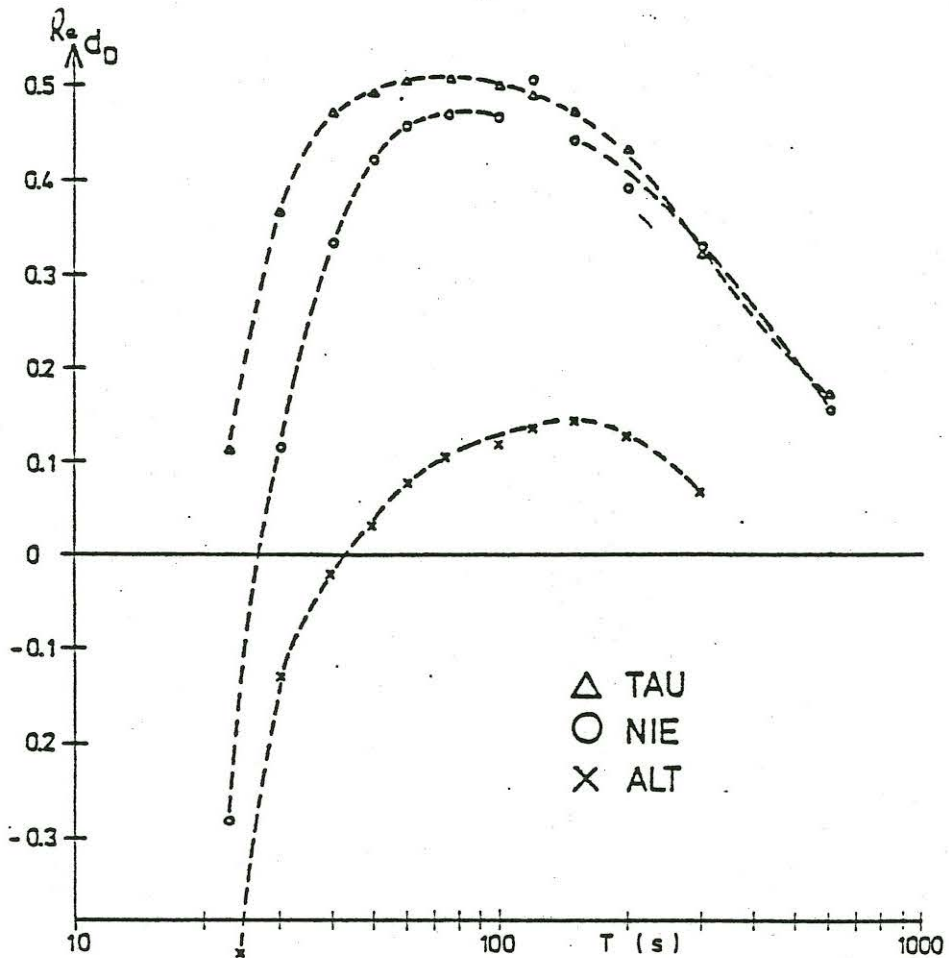


Abb. 8: D-Anomalie des Rheingabens, bezogen auf Schwarzwaldstation BRE als Normalstation

Wie aus dem Nordsüdverlauf des Grabens zu erwarten, dominiert die D-Anomalie d_D . Ihre ausgeprägte und in Abb. 8 gezeigte Periodenabhängigkeit in dem untersuchten Bereich von 24s bis 600s wird für die Festlegung der tieferen Grabenstruktur entscheidend sein, insbesondere das Maximum von $|d_D|$ in der Grabenmitte bei 70s.

Bei dieser Periode ist offensichtlich die Stromkonzentration im Rheingraben am stärksten. Für längere Perioden schwächt sich die D-Anomalie deutlich ab infolge zunehmender Tiefe der induzierten Ströme. Das schnelle Abklingen der D-Anomalie zu kürzeren Perioden hin und insbesondere der Vorzeichenwechsel im Realteil von d_D am Grabenrand sind noch unerklärt.

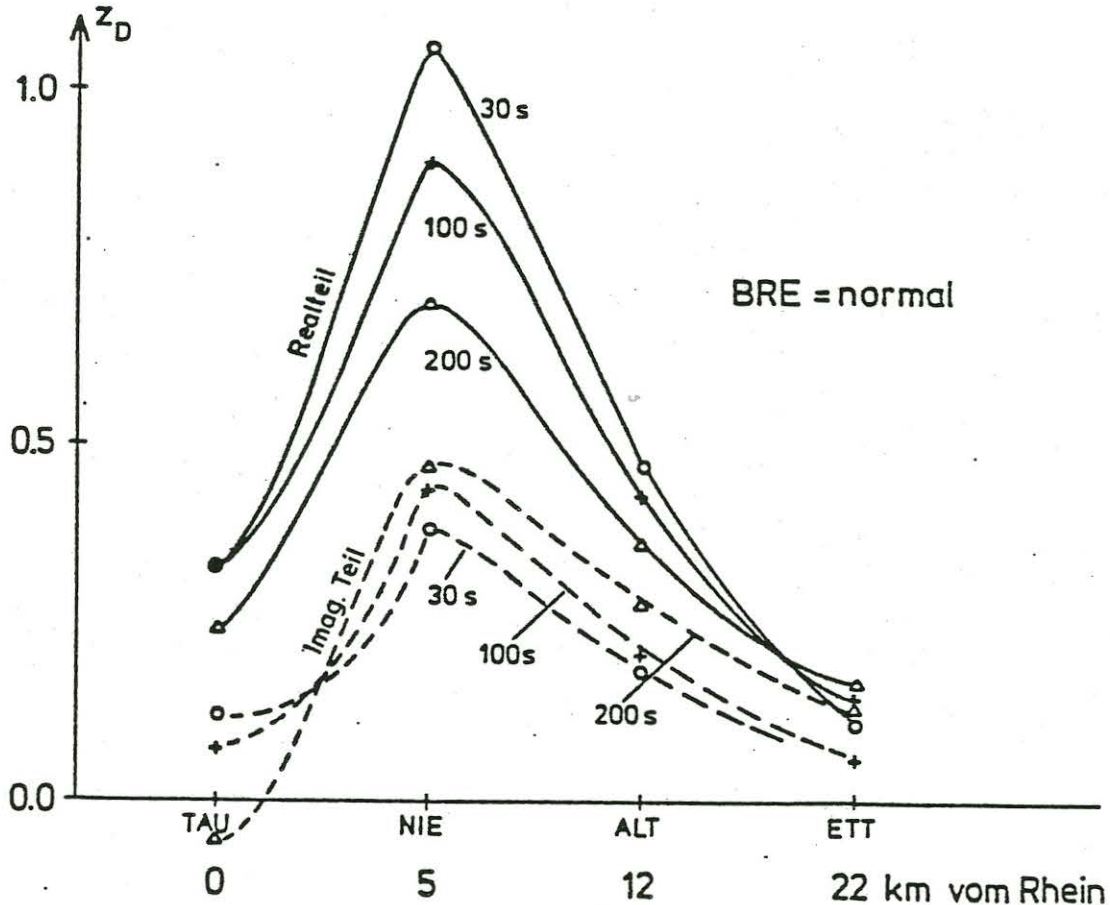


Abb. 9: Z-Anomalie des Rheingrabens

Abb. 9 zeigt die Z-Anomalie des Rheingrabens, ebenfalls im wesentlichen beschrieben durch die mit D korrelierende Z_D -

Übertragungsfunktion. Anders als im nördlichen Rheingraben gibt es hier bei Pulsationen kaum einen mit H korrelierten Z-Anteil wie die Ausrichtung der Induktionspfeile in Abb. 10 zeigt.

Bezüglich der Z-Anomalie ist bemerkenswert, daß das $|Z_D|$ Maximum nicht, wie zu erwarten, am sichtbaren Grabenrand auftritt (Station ALT), sondern 7km westlich davon (Station NIE) im Graben selbst. Offensichtlich ist die verursachende Grabenfüllung mit Sedimenten unsymmetrisch mit größeren Sedimentmächtigkeiten jenseits des Rheins.

Bekanntlich wird das tellurische Feld im Schwarzwald von einer extremen, vom Verlauf des Rheingrabens unabhängigen Richtungsabhängigkeit beherrscht. Sie ist einheitlich an allen Schwarzwaldstationen, mit ausgezeichneten Richtungen NE-SW ("E-Polarisation") und NW-SE ("B-Polarisation") und somit etwa unter 45° zum Grabenrand. Sie betrifft den gesamten Periodenbereich der Pulsationen und Variationen (Tezkan, 1983).

Im Gegensatz hierzu sind die ausgezeichneten tellurischen Richtungen im Rheingraben, wie zu erwarten, parallel ("E-Polarisation") und senkrecht ("B-Polarisation") zum mittleren Verlauf der Grabenränder. Diese unterschiedliche Ausrichtung der Koordinaten ist zu beachten, wenn in den folgenden Abbildungen MT Sondierungskurven aus dem Rheintal solchen aus dem Schwarzwald gegenübergestellt werden.

In Abb. 11 werden zunächst die Phasenkurven in den genannten Polarisationsrichtungen gezeigt, die sich wiederum durch eine bemerkenswerte Einheitlichkeit in den beiden Meßgebieten auszeichnen. Nur die Phasen der B-Polarisation im Rheingraben weisen ab 50s größere örtliche Schwankungen auf, wobei nichtgezeigte Phasen über 90° auftreten.

Die neue Schwarzwaldstation ETT bestätigt nocheinmal in ihrer E-Phasenkurve die Existenz des guten Leiters unter dem Schwarzwaldkristallin (h-Modell, $\phi > 45^\circ$), während die einheitlich bei $25-30^\circ$ liegenden E-Phasen im Rheingraben die gutleitenden Grabensedimente über eine schlechtleitende Kruste wiedergeben, aber ohne Anzeichen für einen guten Krustenleiter im

Induktionspfeile

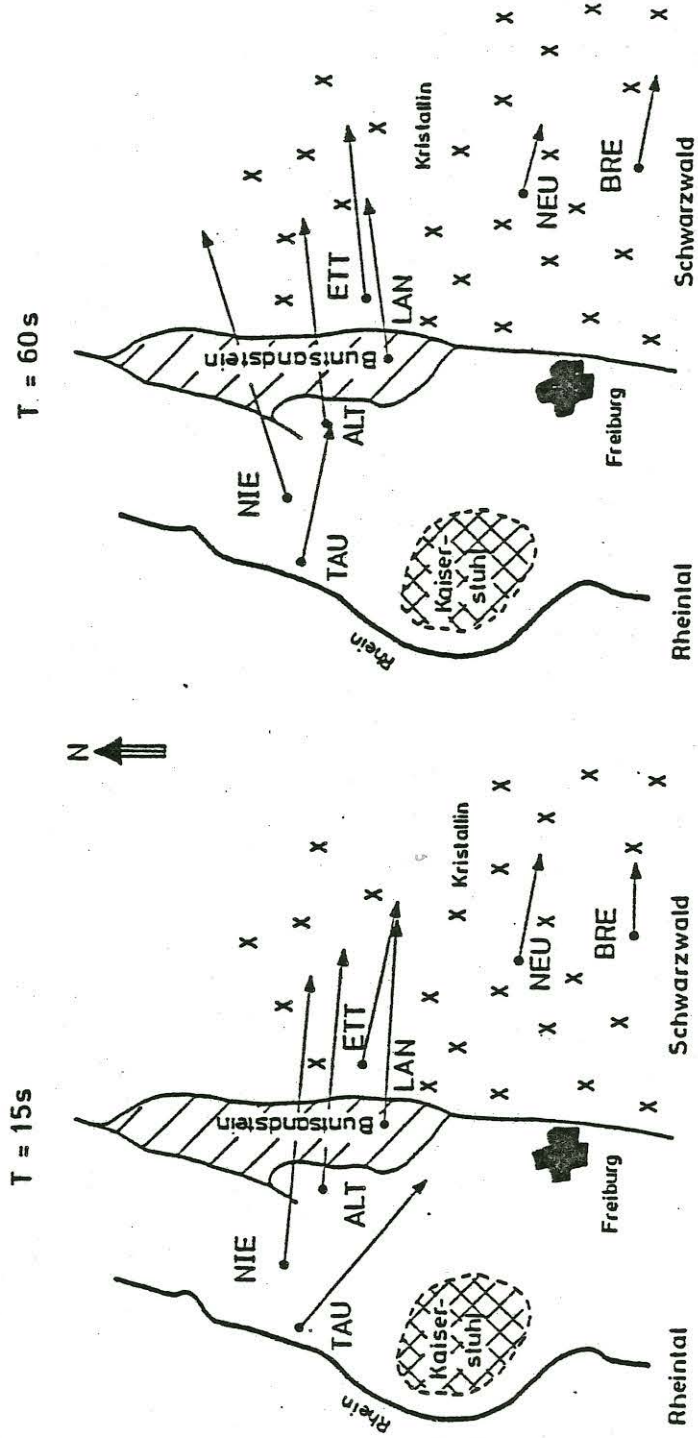


Abb. 10

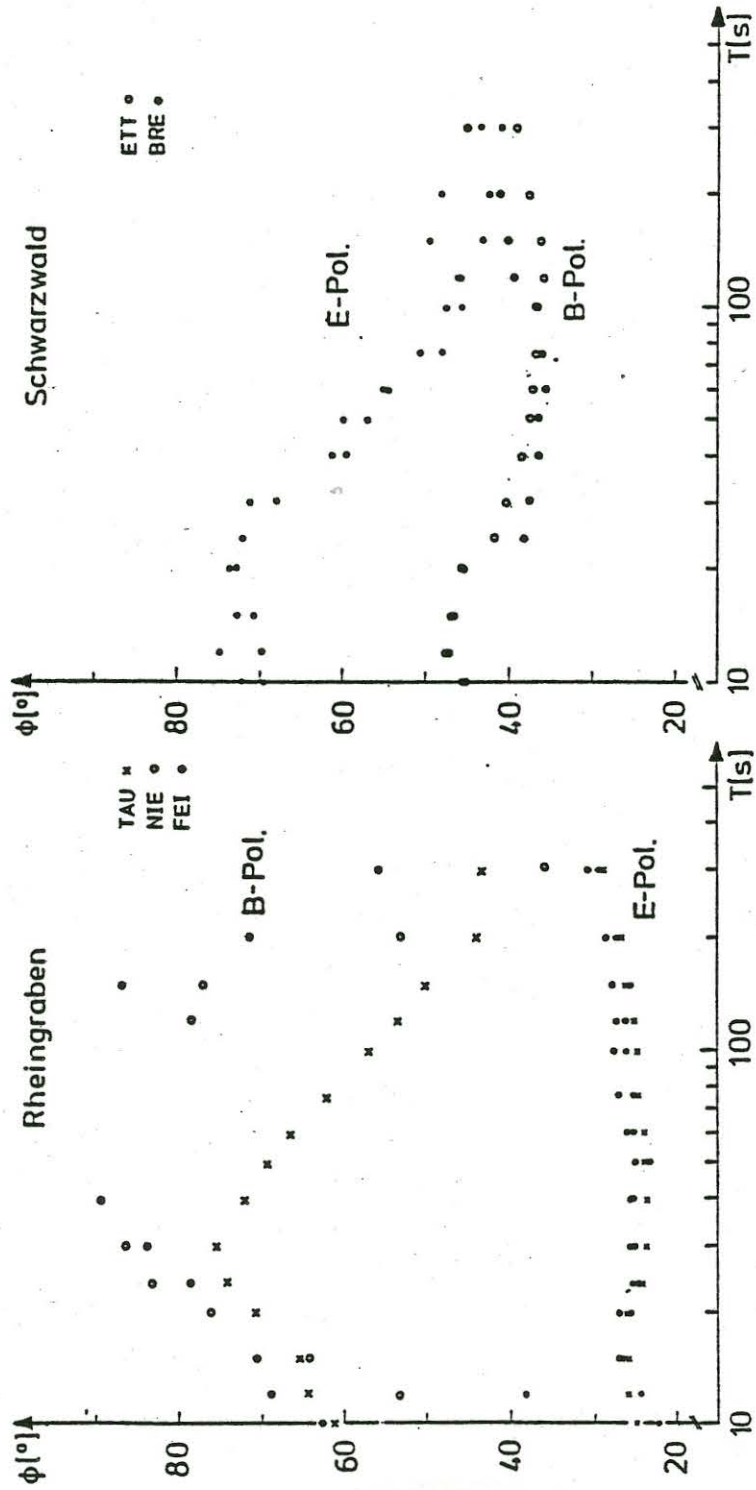


Abb. 11: Phasen-Kurven Rheingraben und Schwarzwald

untersuchten Periodenbereich (τ -Modell, $\phi < 45^\circ$). In Abb. 12

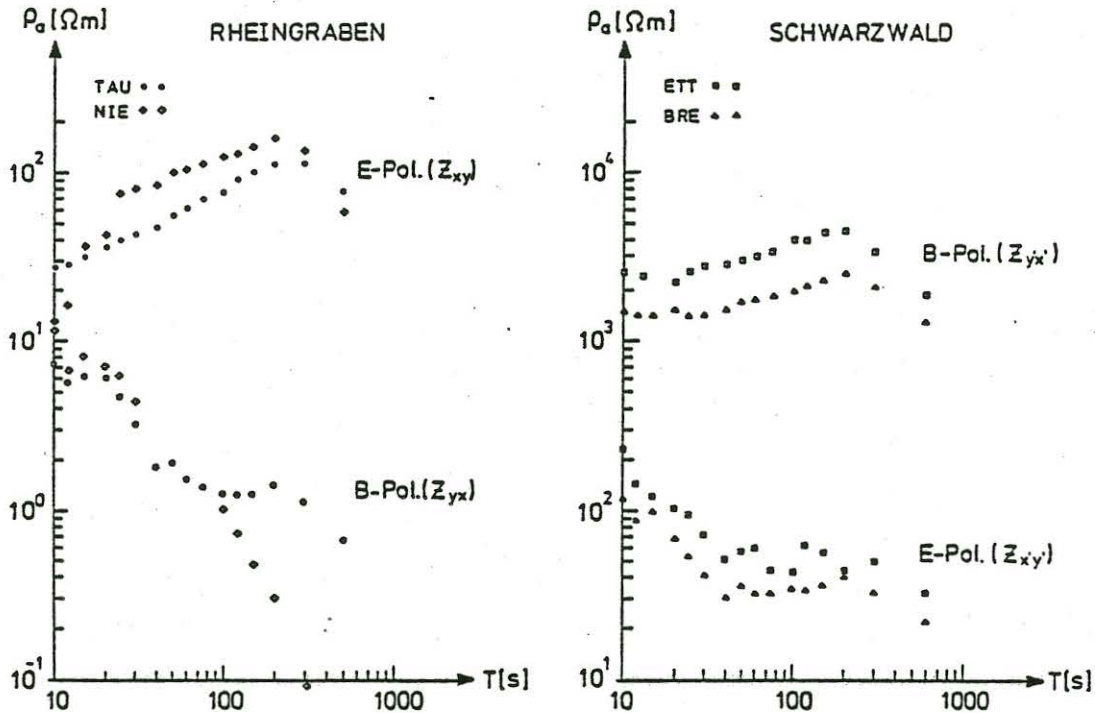


Abb. 12: ρ_a -Kurven Rheingraben und Schwarzwald

folgen die ρ_a -Kurven in entsprechender Darstellung. Wie zu erwarten gehen die E-Kurven am Rand stetig ineinander über, während die B-Kurven um zwei Zehnerpotenzen springen. Sie sind in ihren Verläufen einheitlich, weisen aber die üblichen verzerrungsbedingten Versätze auf. Zu beachten ist die stetige Zunahme von ρ_a für E-Polarisation im Rheingraben mit wachsender Periode, die das Eindringen in ein durchweg schlechtleitendes Substrat andeutet. Möglicherweise ist dieser Anstieg jedoch bei 200s unterbrochen, wie die reduzierten ρ_a Werte der letzten beiden Perioden zeigen.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, daß sich beide Meßgebiete durch einheitliche, ausgeprägte Anisotropien der Impedanz auszeichnen, und zwar gilt

$$\begin{array}{ll} \rho_a(E) \gg \rho_a(B) & \text{im Rheingraben} \\ \rho_a(B) \gg \rho_a(E) & \text{im Schwarzwald.} \end{array}$$

Für die Anisotropie im Schwarzwald bieten vertikale dyke-Modelle in der tieferen Kruste eine Erklärungsmöglichkeit, in der Art

wie sie auch für die Hessische Senke entwickelt worden sind. Siehe hierzu den Beitrag von B. Tezkan zu diesem Band. Möglicherweise kommt man im Rheingraben ohne solche dyke-Modelle aus, doch sind hierzu weitere Modellrechnungen notwendig.

Überträgt man die ρ_a und Phasenkurven der E-Polarisation in $\rho^*(z^*)$ Tiefenprofile, so ergibt sich folgendes Bild (Abb. 13):

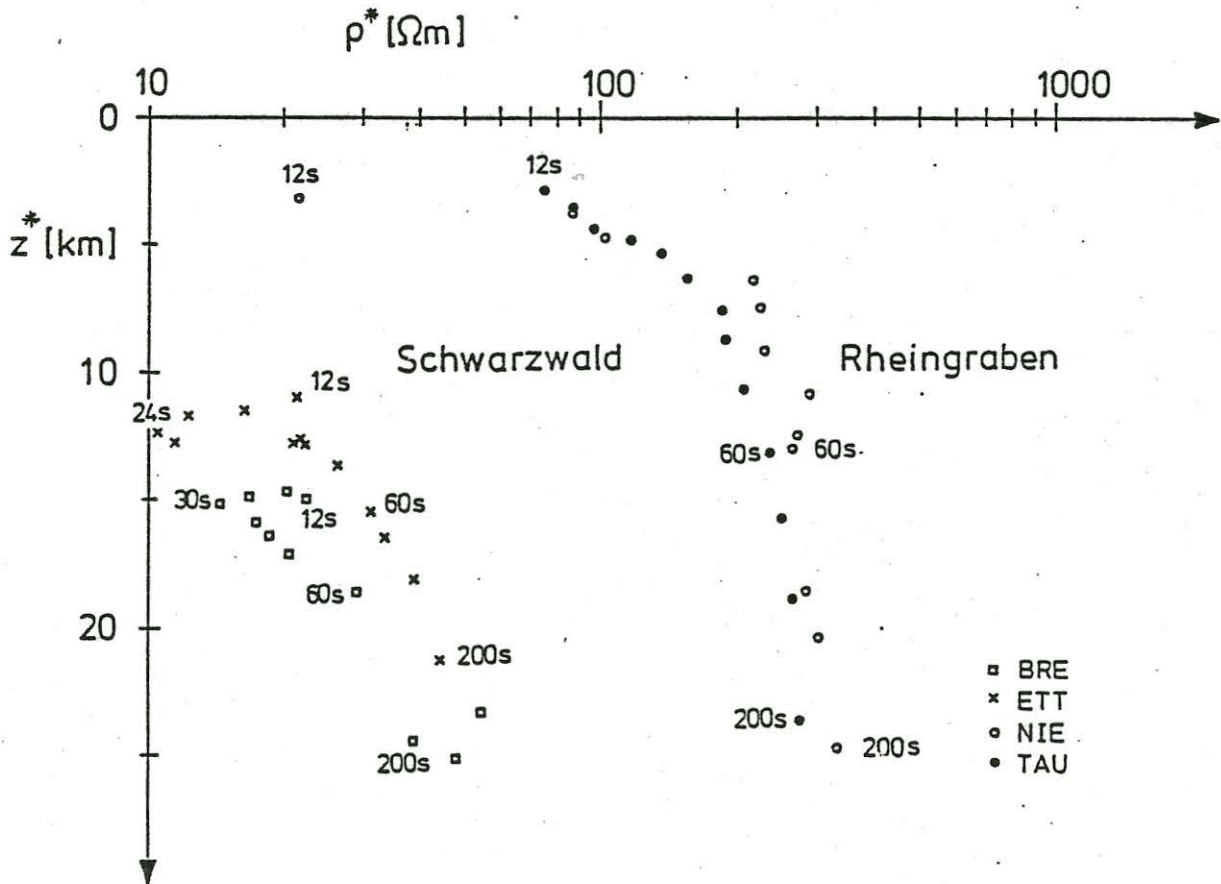


Abb. 13: $\rho^*(z^*)$ Tiefenprofile Rheingraben und Schwarzwald

Im Schwarzwald beginnen sie in 12 km Tiefe bei 12s und minimalem ρ^* -Widerständen von 10 Ωm bei 24s. Zu längeren Perioden hin ist ein Anstieg bis 50 Ωm zu beobachten. Im Rheingraben liegt die z^* -Tiefe für 12s bei 2 km mit τ -Werten von 200S für die überlagernden Sedimente. Die ρ^* -Widerstände vergrößern sich dann stetig mit wachsender Periode und erreichen Höchstwerte von 250 Ωm bei 25 km Tiefe und 200s. Die Existenz einer gutleitenden Zwischenschicht bei 12 km wie im Schwarzwald ist hiernach auszuschließen, über die tiefere Mantelstruktur unterhalb von 25 km müssen die noch auszuwertenden Variationsdaten Auskunft geben.

Die bisherige Auswertung beschränkt sich auf die Berechnung von 1D Modellen mit Hilfe des Ψ -Algorithmus. Eingegeben wurden die ρ_a -Werte und Phasen für 16 Frequenzen von 10s bis 600s, in den Schichten des Modells ist das Produkt $d/\sqrt{\rho}$ eine optimal angepasste Konstante (d , ρ : Schichtdicke und spez. Widerstand). Abb. 14 zeigt die errechneten Modelle für die neue Schwarzwaldstation ETT und die Rheingrabenstation TAU zusammen mit der jeweils erreichten Anpassung in der Phase (rechte Skala).

Wie zu erwarten, tritt die gutleitende Schicht unter dem Schwarzwaldkristallin auch im 1D Modell klar hervor, während die Kruste unter dem Rheingraben ab 10 km als hochohmiges homogenes Substratum erscheint. Die gestrichelten Linien beziehen sich auf die Fehler in der Widerstandsbestimmung.

Abschließend sei über 1D Modellstudien berichtet (Abb. 15), die sich mit dem Abschirmeffekt der Rheingrabensedimente bezüglich eines hypothetischen Krustenleiters von 650 S in 12-15 km Tiefe befassen. Modell 1 und 2 beziehen sich dabei auf den nördlichen, Modell 3 und 4 auf den südlichen Rheingraben entsprechend den Stationen SPE und TAU. In der unteren Bildhälfte sind die zugehörigen $\rho^*(z^*)$ -Modellprofile wiedergegeben.

Man sieht, daß sich die $\rho^*(z^*)$ Profile 1 und 2 kaum unterscheiden. Im nördlichen Graben wäre also ein solcher Krustenleiter kaum nachweisbar. Anders im südlichen Graben, wo die Profile 3 und 4 im Pulsationsbereich weit auseinander liegen, wobei die beobachteten $\rho^*(z^*)$ Werte eher dem Profil 4 folgen. Hier wäre also die Existenz eines Krustenleiters nicht verborgen

geblieben. Es steht zu vermuten, daß die noch ausstehenden 2D Rechnungen an dieser Aussage nichts wesentliches mehr ändern werden.

Literatur

- K. Babour and J. Mosnier: Differential geomagnetic sounding in the Rhinegraben. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 58, 135-144, 1979.
- Haak, V.: Das zeitlich sich ändernde, erdelektrische Feld, beobachtet auf einem Profil über dem Rheingraben; eine hiervon abgeleitete Methode der Auswertung mit dem Ziel, die elektrische Leitfähigkeit im Untergrund zu bestimmen. Diss. Nat.-Fak. Univ. München, 1970.
- Losecke, W.: Ergebnisse magnetotellurischer Messungen bei Speyer, in: *Graben Problems*, Schweitzerbartsche Verlagsbuchhand. 242--244, 1970.
- Reitmayr, G.: An Anomaly of the Upper Mantle below the Rhinegraben, studied by the inductive response of natural electromagnetic fields. *J. Geophys.* 41, 651-658, 1975.
- Richards, M.L., Schmucker, U., Steveling, E., Watermann, J.: Erdmagnetische und magnetotellurische Sondierungen im Gebiet des mitteleuropäischen Riftsystems. Forschungsbericht T81-111, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 1981.
- Scheelke, I.: Magnetotellurische Messungen im Rheingraben und ihre Deutung mit zweidimensionalen Modellen. *Gamma 2*, 1972.
- Tezkan, B.: Electromagnetic sounding experiments in the Schwarzwald Central Gneis massif. *J. Geophys.* 62, 109-118, 1988.
- Winter, R.: A model for the resistivity distribution from geomagnetic depth soundings, in: *Approaches to Taphrogenesis*, ed. J.H. Illies and K. Fuchs, 369-375, Schweizerbart, Stuttgart, 1974.

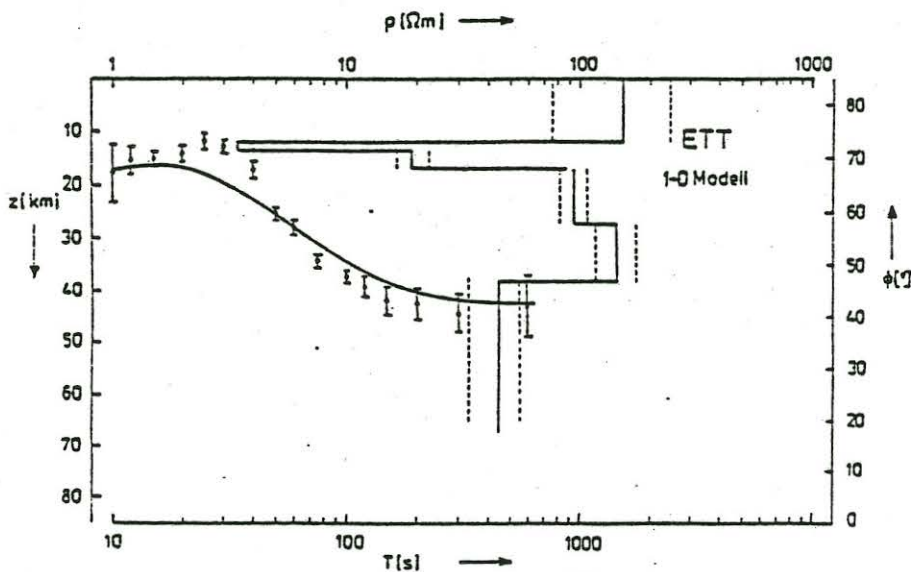


Abb. 14a

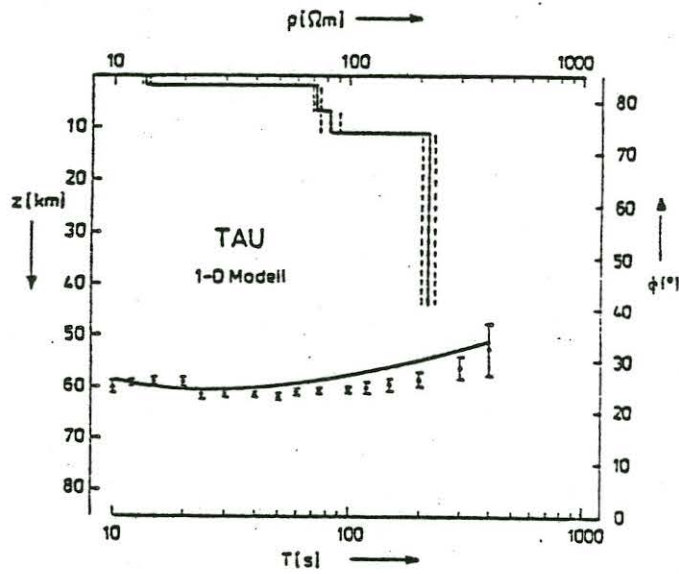


Abb. 14b: 1D Interpretation und Anpassung der Phasenkurve für Schwarzwald (ETT) und Rheingraben (TAU)

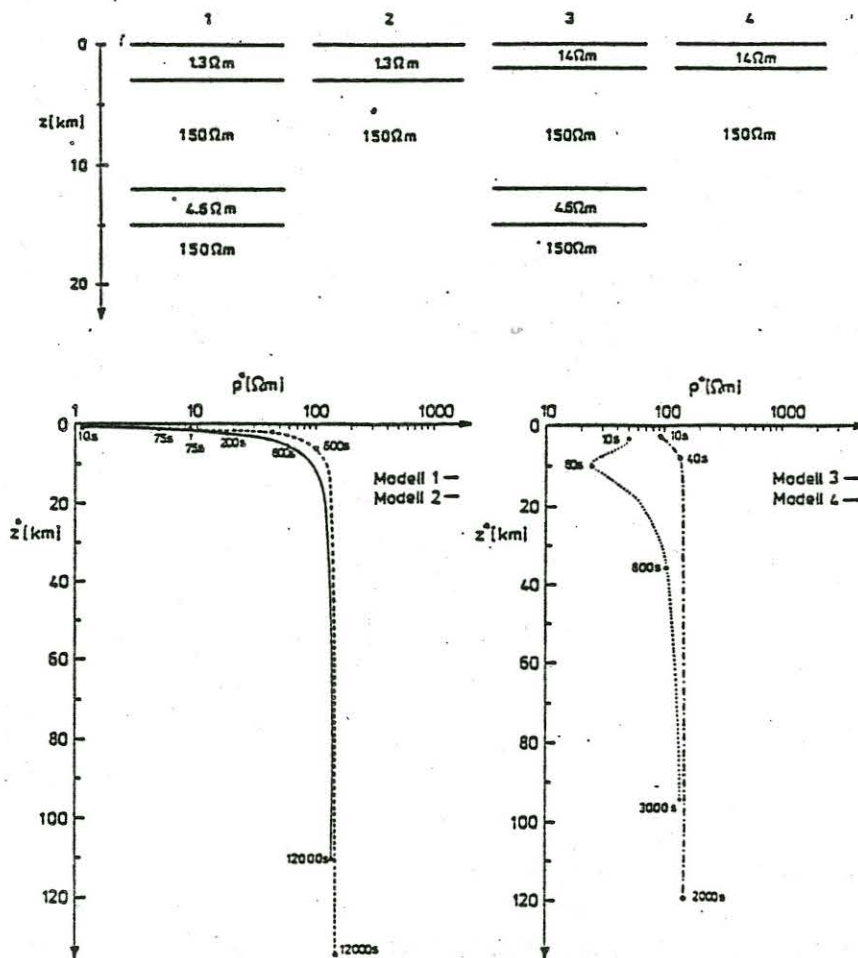


Abb. 15: 1D Modellstudie zur Erkennbarkeit eines Krustenleiters unter der abschirmenden Wirkung der Grabensedimente