

B. TEZKAN

Über die Interpretation gutleitender Schichten im oberen Mantel und in der Unterkruste von Grabenstrukturen mit der Methode der Magnetotellurik und der erdmagnetischen Tiefensondierung

1 Einleitung

Es ist bekannt, daß die Magnetotellurik eine sichere Aussage über die integrierte Leitfähigkeit einer gutleitenden Schicht unter dem Kristallin liefern kann. Unter dem Graben jedoch sind solche Aussagen wegen des Abschirmeffektes der Grabensedimente nur mit gewissen Beschränkungen möglich. Die unter dem Schwarzwaldkristallin gefundenen gutleitenden Schichten in 12 und 120 km Tiefe (Schmucker und Tezkan, 1989) war ein Ausgangspunkt dieser Studie. Da die Interpretation der Übertragungsfunktionen für die E-Polarisation von den benachbarten Rheingrabenstationen keinen Hinweis auf das Vorhandensein solcher gutleitenden Zonen gibt, sollte mit umfangreichen 2D-Modellstudien untersucht werden, ob gutleitende Schichten unter dem Schwarzwaldkristallin sich auch unter dem Rheingraben fortsetzen. Ziel war es außerdem, nach den gewonnenen Erfahrungen mit den 2D-Modellstudien ein allgemeines Konzept für die Interpretation solcher gutleitenden Zonen unter dem Graben abzuleiten.

2 Übertragungsfunktionen im Pulsationsbereich - 2D-Modellrechnungen

Zunächst sei in Abb.1 die Lage der sechs Stationen im südlichen Rheingraben und im Schwarzwald gezeigt, an denen Pulsationen beobachtet wurden. Bekanntlich wird das tellurische Feld im Schwarzwald von einer extremen Richtungsabhängigkeit beherrscht. Sie ist einheitlich an allen Schwarzwaldstationen mit ausgezeichneten Richtungen NE-SW und NW-SE

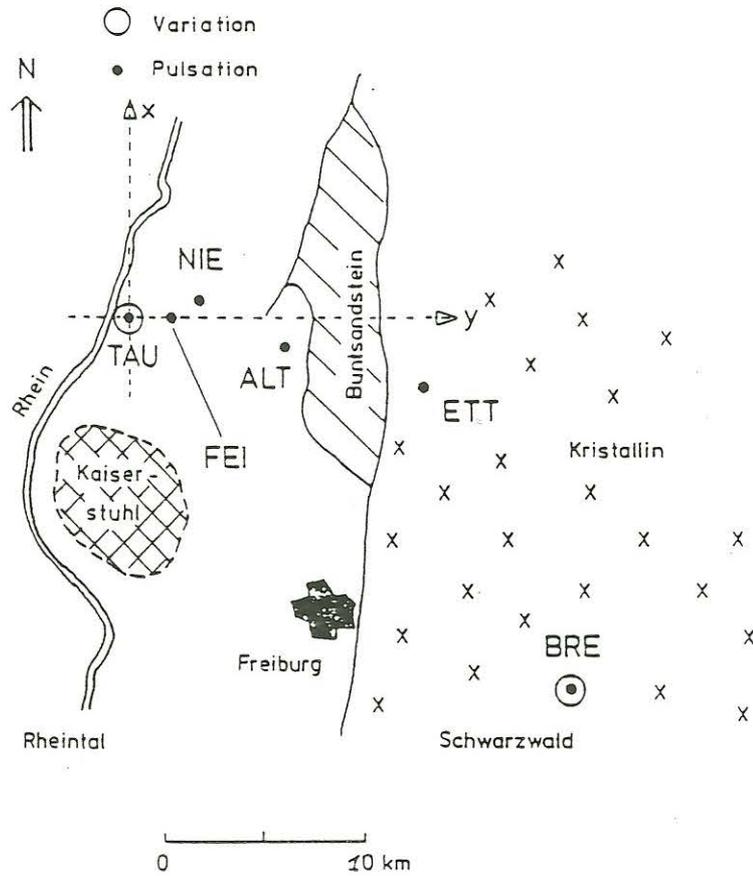


Abb.1: Pulsationsstationen

und betrifft den gesamten Periodenbereich der Pulsationen und Variationen (Tezkan, 1988). Im Gegensatz hierzu sind die ausgezeichneten Richtungen im Rheingraben parallel (E-Pol.) und senkrecht (B-Pol.) zum Grabenrand. Diese unterschiedliche Ausrichtung der Koordinaten ist zu beachten, wenn in den folgenden 2D-Modellanpassungen Übertragungsfunktionen aus dem Rheintal und von den Schwarzwaldstationen zusammen benutzt werden.

Bezüglich der Z-Anomalie der magnetischen Vertikalkomponente ist bemerkenswert, daß das $|z_D|$ Maximum nicht am Grabenrand auftritt (Station ALT) sondern 7 km westlich davon (Station NIE) im Graben selbst. Offensichtlich ist die verursachende Grabenfüllung mit Sedimenten unsymmetrisch. Sie

wird dann bei der 2D-Modellrechnung als dünne Schicht mit variabler integrierter Leitfähigkeit modelliert. Nicht zu übersehen sind auch die mit H- korrelierten Z-Variationen. Eine großräumige Ost-West streichende Leitfähigkeitsstruktur ist dem Variationsfeld zuzuordnen. Hier kreuzen also 2 Anomalien, die z_D Anomalie des Rheingrabens und die z_H Anomalie eine den Graben kreuzenden Struktur.

Die Übertragungsfunktionen der anomalen magnetischen Horizontalkomponente beziehen sich auf die Schwarzwaldstation BRE als normal und zeigen eine ausgeprägte Periodenabhängigkeit in dem untersuchten Periodenbereich von 10s bis 600s mit Maximum-Werten von 0.5 bei 70s an der Station TAU mitten im Rheingraben.

Die ausführliche Beschreibung und Interpretation der gewonnenen Übertragungsfunktionen geben Schmucker und Tezkan (1988). Ihre Auswertung mit 2D-Modellen ist das Thema dieses Beitrages. Doch zuvor sollten typische $\rho^*(z^*)$ Kurven

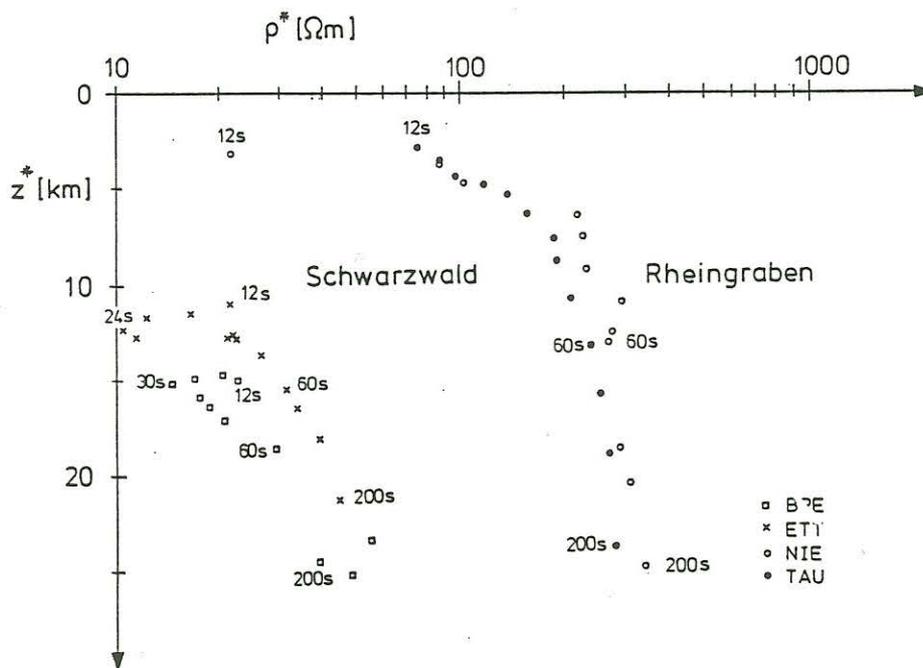


Abb.2: $\rho^*(z^*)$ Tiefenprofile Rheingraben und Schwarzwald

aus dem Rheingraben und Schwarzwald gezeigt werden, um die schwierige Interpretation eines möglichen Krustenleiters unter dem Rheingraben besser darzustellen. Man sieht auf der Abb.2, daß diese Kurven im Schwarzwald (Stationen BRE, ETT) in 12 km Tiefe bei 12s beginnen mit minimalen ρ^* -Widerständen von $10 \Omega\text{m}$ bei 24s. Im Rheingraben liegen die z^* -Werte bei 2 km Tiefe und die ρ^* -Widerstände vergrößern sich dann stetig mit wachsender Periode und erreichen Höchstwerte von $250 \Omega\text{m}$ bei 25 km Tiefe und 200s. Die Existenz einer gutleitenden Zwischenschicht wie im Schwarzwald ist hiernach auszuschließen.

Das Ziel der 2D-Modellrechnungen war es, ein Modell zu finden, welches sowohl die tellurischen Übertragungsfunktionen - also die Impedanzen für eine so festgelegte E-Polarisation und Z_{yx} für B-Polarisation - als auch die magnetischen Übertragungsfunktionen (z_D, d_D) als Funktion der Periode möglichst gut erklärt. Abb.1 zeigt die gewählten horizontalen Koordinatenrichtungen für den (y,z) Modellschnitt. Koordinatenursprung ist die westlichste Station TAU im Rheingraben.

Die folgende 2D Interpretation setzt voraus, daß das tellurische Feld durch einen anisotropen Leiter unter dem Schwarzwaldkristallin eine östliche Drehung um 45° erfährt und daß die magnetische Grabenanomalie in Z unabhängig von einer kreuzenden Ostweststruktur größerer Ausdehnung betrachtet werden darf.

Abb.3 zeigt das gewonnene 2D-Modell. Um die großen Z-Amplituden zu erklären, wurden die Deckschichten als "dünne Schicht" variabler integrierter Leitfähigkeit modelliert. Auf der Schwarzwaldseite ist die Tiefe des guten Leiters unverändert übernommen worden (Tezkan, 1988), allerdings jetzt mit einer dyke Struktur zur Erklärung der beobachteten Anisotropie. Der unter dem Rheingraben in 6 km Tiefe erscheinende gute Leiter beruht nur auf den B-Polarisationsphasen,

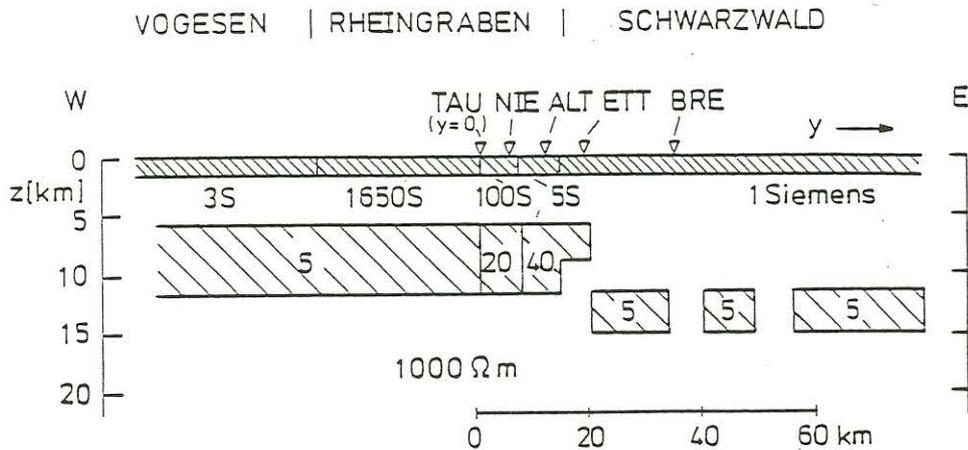
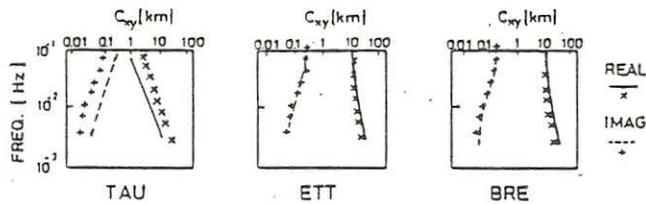


Abb.3: Pulsationsmodell

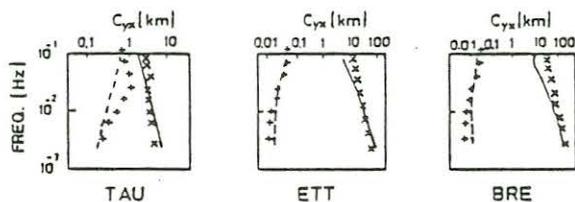
wie weiter unten begründet wird. Seine Existenz hat keine Bedeutung für die Anpassung der tellurischen und magnetischen Übertragungsfunktionen an die Modelldaten, Ausnahmen sind, wie oben erwähnt, die Phasen der B-Polarisation der Rheingrabenstationen. Für die Anpassung der Übertragungsfunktionen reicht im Modell ein homogener Halbraum mit 1000Ω m ab 15 km Tiefe. Die Analyse der Variationsdaten und das zugehörige 2D-Modell werden aber zeigen, daß dieser Bereich auch strukturiert ist.

Die Abbildungen 4-6 zeigen, daß das 2D-Modell sowohl die tellurischen als auch die magnetischen Übertragungsfunktionen als Funktion der Periode sehr gut erklären kann. Aus der Abb.4 ist ersichtlich, daß es mit der Segmentierung des guten Leiters auf der Schwarzwaldseite gelungen ist, die Impedanzen beider Polarisierungen sowohl im Real- als auch im Imaginärteil wiederzugeben, wobei sich die Anpassung für die Rheingrabenstation TAU schwieriger erwies. Zusätzlich zu den Impedanzen erklärt auch das Modell in Abb.3 die magnetische Z-Anomalie. Besonders hervorzuheben ist hier das Ergebnis, daß mit der dünnen Schicht variabler integrierter Leitfähigkeit die größten Z-Variationen im Rheingraben gut erklärt werden können. Ausschlaggebend für die gute

E-Polarisation



B-Polarisation



E-Polarisation

B-Polarisation

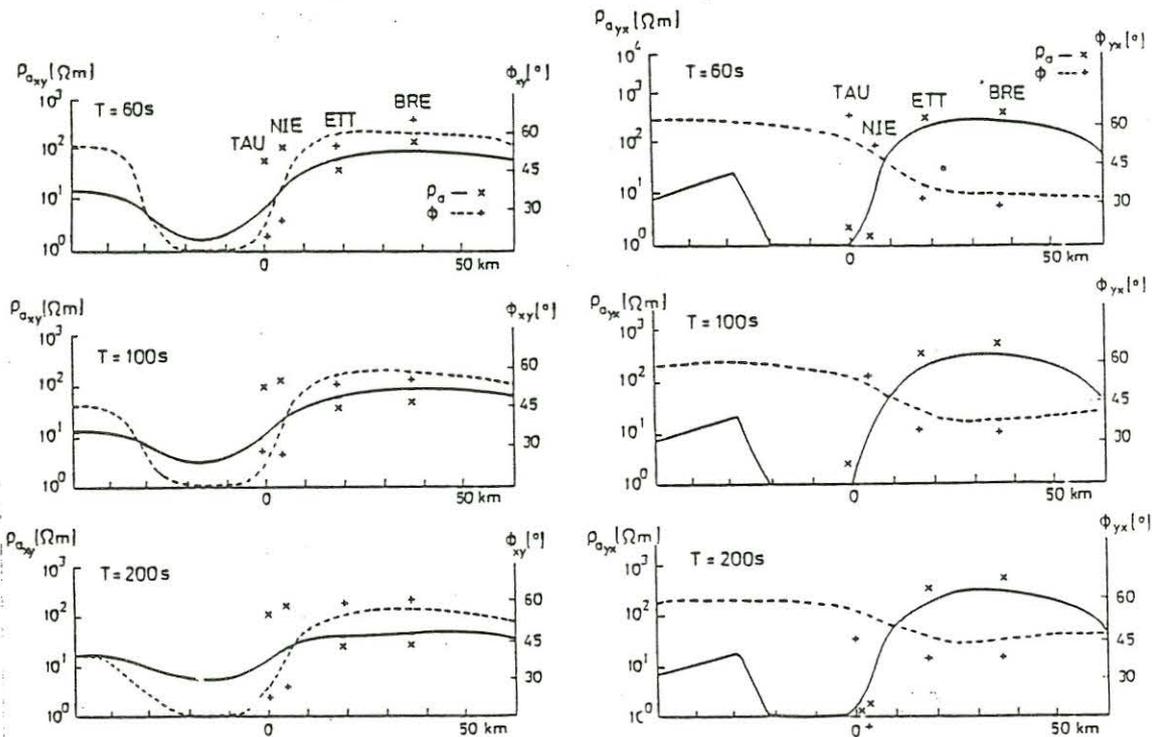


Abb.4: Modellanpassung MT-Impedanzen

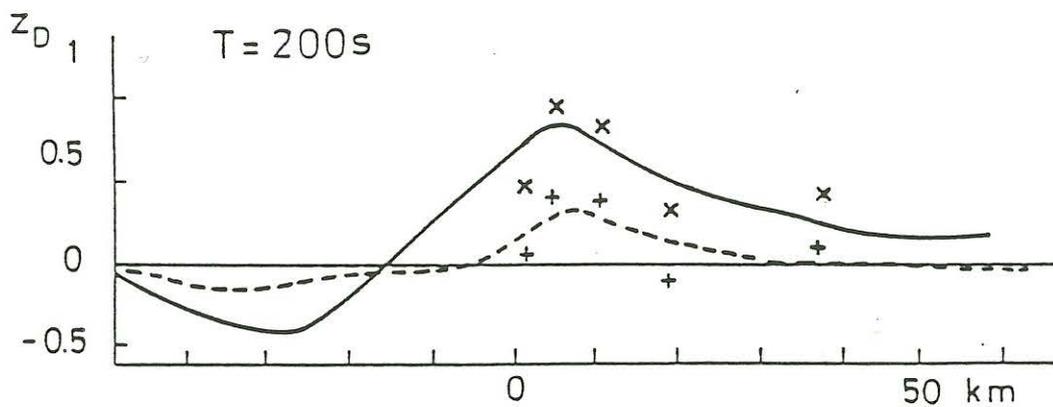
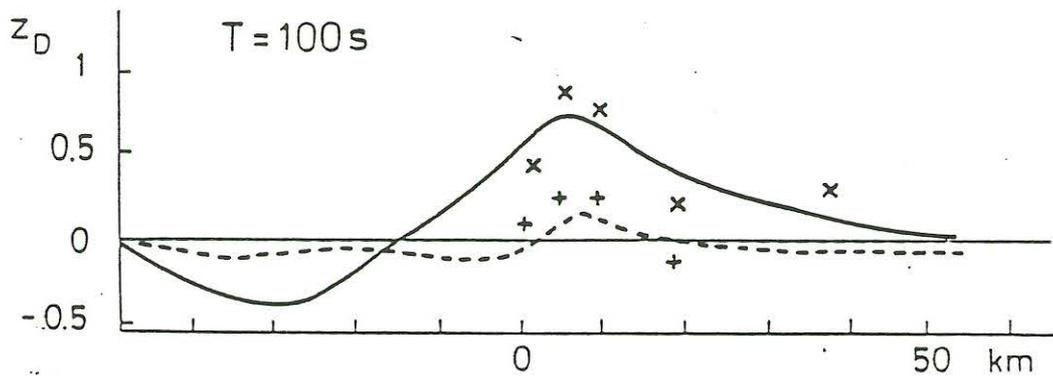
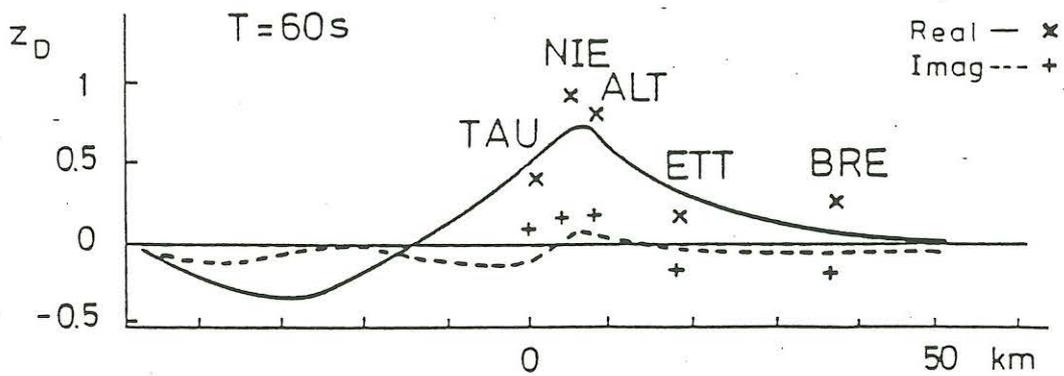


Abb.5: Modellanpassung z_D -Anomalie

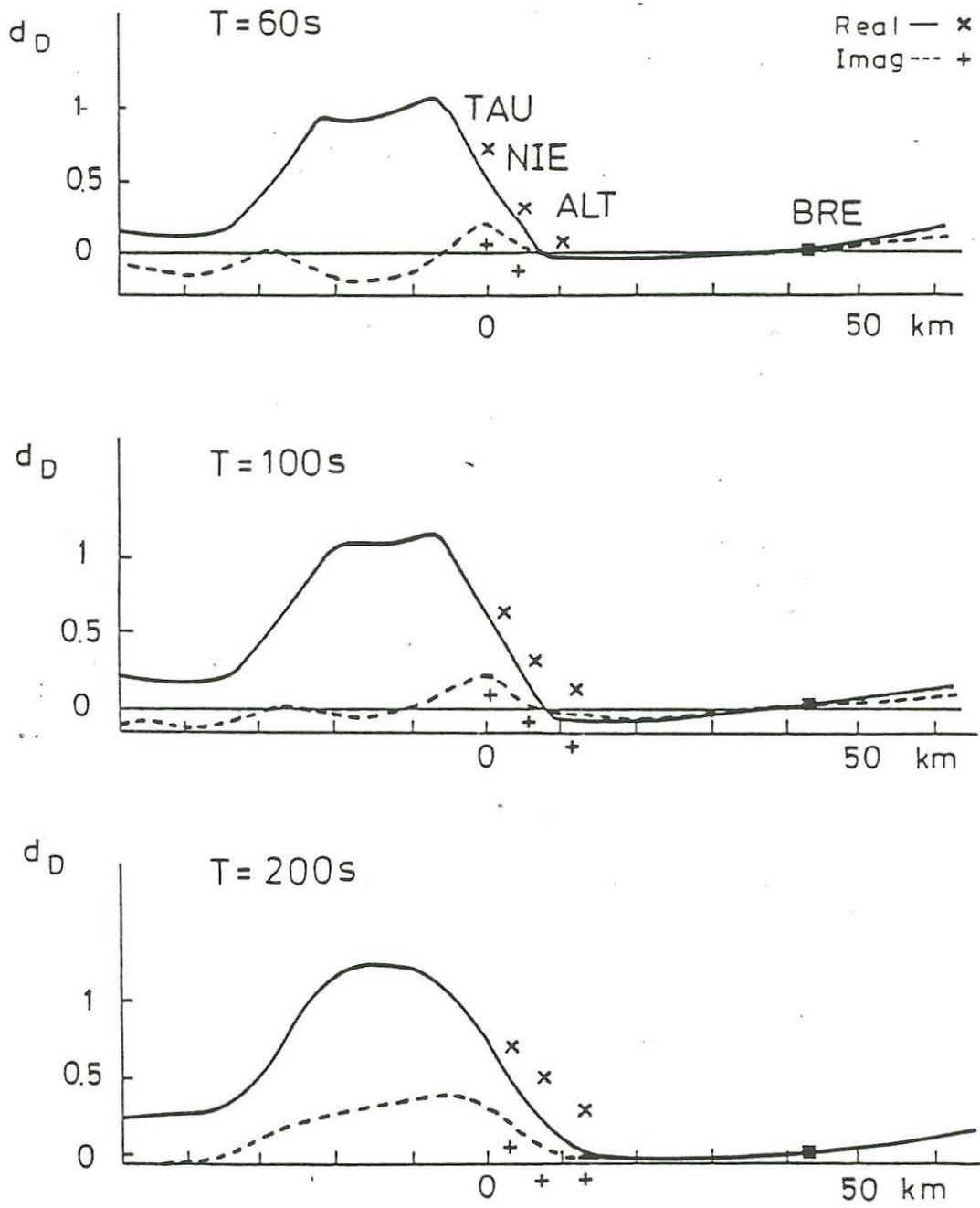


Abb.6: Modellanpassung d_D -Anomalie

Anpassung sind die gewählten Übergänge von 1650 S auf 100 S und 5 S in der Deckschicht zum östlichen Grabenrand hin. Die Krustenleitfähigkeit unterhalb des Grabens spielt dabei eine geringe Rolle für die Anpassung. Dies wird in der Abb.5 für die 3 ausgewählten Perioden demonstriert. Abb.6 zeigt dann die Anpassung der Grabenanomalie der magnetischen Horizontalkomponente für dieselben 3 ausgewählten Perioden. Man sieht, daß das Modell den Anstieg der d_D Werte von ALT über NIE bis TAU richtig wiedergibt. Nach den Modellwerten erwartet man also maximale d_D Werte auf der französischen Seite mit $d_D \approx 1$.

Aus den Abb.4-6 geht also hervor, daß das 2D-Modell im Pulsationsbereich alle beobachteten Übertragungsfunktionen erklären kann. Es muß aber hier erwähnt werden, daß die Datensätze der E-Polarisation keine definitive Aussage für einen guten Leiter unter dem Rheingraben zulassen. Dies ist ganz anders für den guten Leiter unter dem Schwarzwaldkristallin, dessen Existenz mit dem Abklingen der z_D -Anomalie und der Periodenabhängigkeit der tellurischen Phasen sehr gut bestimmt wird. Die mögliche Fortsetzung dieses guten Leiters unter dem Rheingraben konnte nur mit Einbeziehung der B-Polarisationsphasen der Rheingrabenstationen entschieden werden. Dies wird in Abb.7 erläutert. Dargestellt sind für eine feste Periode von 60s die beobachteten Phasen der Rheingrabenstationen und die der Schwarzwaldstationen. Die Station SIG (Richards et al., 1981) und die Station HAS (Spitzer, 1987) sind auch mit eingezeichnet, da sich die B-Polarisationsphasen im nördlichen Rheingraben als Funktion der Periode kaum voneinander unterscheiden. Ausgangspunkt war das in Abb.2 dargestellte Modell. Hier werden alle Modellparameter konstant gehalten und nur die Tiefe des guten Leiters unter dem Rheingraben schrittweise variiert (3, 6, 12 km). Als Alternativmodell wurde auch ein Modell ohne guten Leiter unter dem Rheingraben gewählt. Man sieht, daß eine solche Modellstudie für die Schwarzwaldseite ohne Bedeutung ist.

Hingegen erzielt man die beste Anpassung zwischen den Modell- und beobachteten Polarisations-Phasen auf der Rheingraben-seite, wenn man eine Tiefe von 6 km für den guten Leiter zuläßt. Es sei aber hier noch einmal betont, daß so eine Modellstudie für die Anpassung der E-Polarisationsdaten keine Aussage über den guten Leiter unter dem Rheingraben zuläßt.

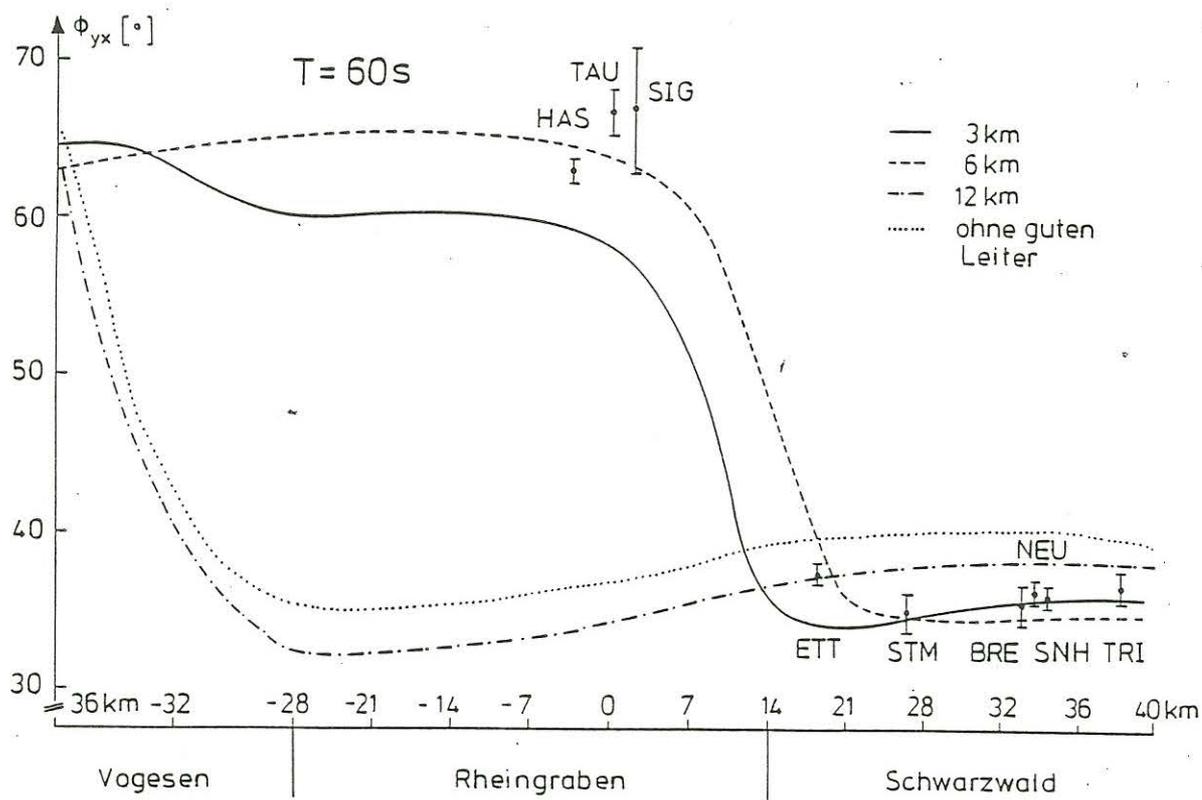


Abb.7: Modellstudie mit den Phasen der B-Polarisation

3 Zusammenfassende Ergebnisse für die Erkundung gutleitender Zonen in der Unterkruste

Aus den oben genannten Erfahrungen sollen jetzt die Ergebnisse zusammengefaßt und eine allgemeine Aussage für die Krustenleiter unter den Grabenstrukturen abgeleitet werden.

3.1 Krustenleiter unter dem Graben:

Über die Existenz solcher Leiter erhält man

- a) keine Information von den beobachteten $\rho^*(z^*)$ -Kurven
- b) " " " " daraus abgeleiteten 1D-Modellen
- c) " " " " 2D-Modellen und 2D-Modellstudien mit der Benutzung der 3 Datensätze der E-Polarisation (Z_{xy} , z_D , d_D) .

Das einzige Hilfsmittel für eine Entscheidung ist dann eine Modellstudie mit den Phasen der B-Polarisation. Nachteilig ist aber, daß man senkrecht zur Streichrichtung des Grabens mit sehr kleinen E-Feld Amplituden arbeiten muß.

3.2 Krustenleiter unter dem angrenzenden Kristallin eines Grabens.

Die Existenz solcher Leiter ist abgesichert

- a) durch die z_D -Anomalie und
- b) durch die Periodenabhängigkeit der tellurischen Phasen. Ihre Tiefe kann mit 2D-Modellstudien relativ genau bestimmt werden.

4 Übertragungsfunktionen im Variationsbereich - 2D Modellrechnungen

Abb.8 zeigt die Lage der vier Variometerstationen (BRE, TAU, GRA und GTT) aus dem Feldprogramm 1987 zusammen mit anderen langperiodischen Sondierungen in diesem Gebiet. Wie bei den Pulsationen wurden die Übertragungsfunktionen der Horizontalkomponente auf die Schwarzwaldstation BRE als "normal"

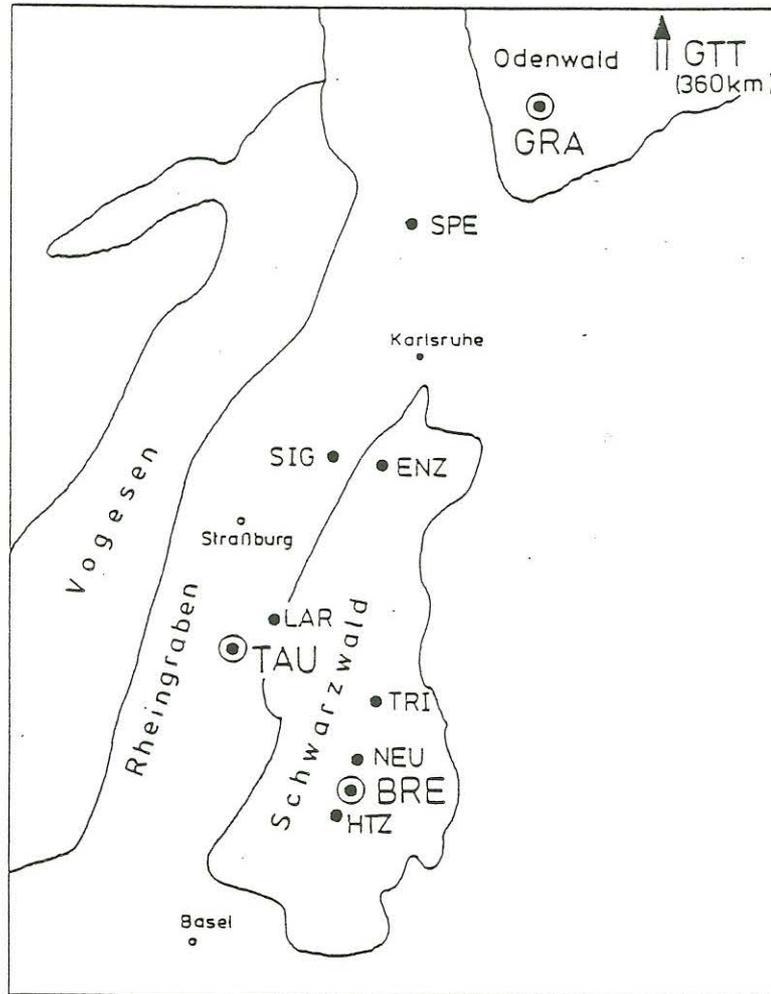


Abb.8: Variometerstationen 1987 (⊙) und aus früheren Feldprogrammen (•)

bezogen. Wie erwartet, sinkt die d_D -Anomalie innerhalb des Grabens in TAU auf Null, wobei sich die Phase mit zunehmender Periode um 45° annähert (Abb.9). Ganz entsprechend verhält es sich mit der Grabenanomalie in Z. Dabei hat z_D sowohl im Rheingraben als auch im Schwarzwald ein deutliches Maximum zwischen 20s und 50s, gleichzeitig ein Vorzeichenwechsel im Imaginärteil und ein Zusammenlaufen von Real- und Imaginärteil ab 1000s (Abb.10). Die deutlich geringeren Maximalwerte im Realteil sind nur zu verstehen, wenn man

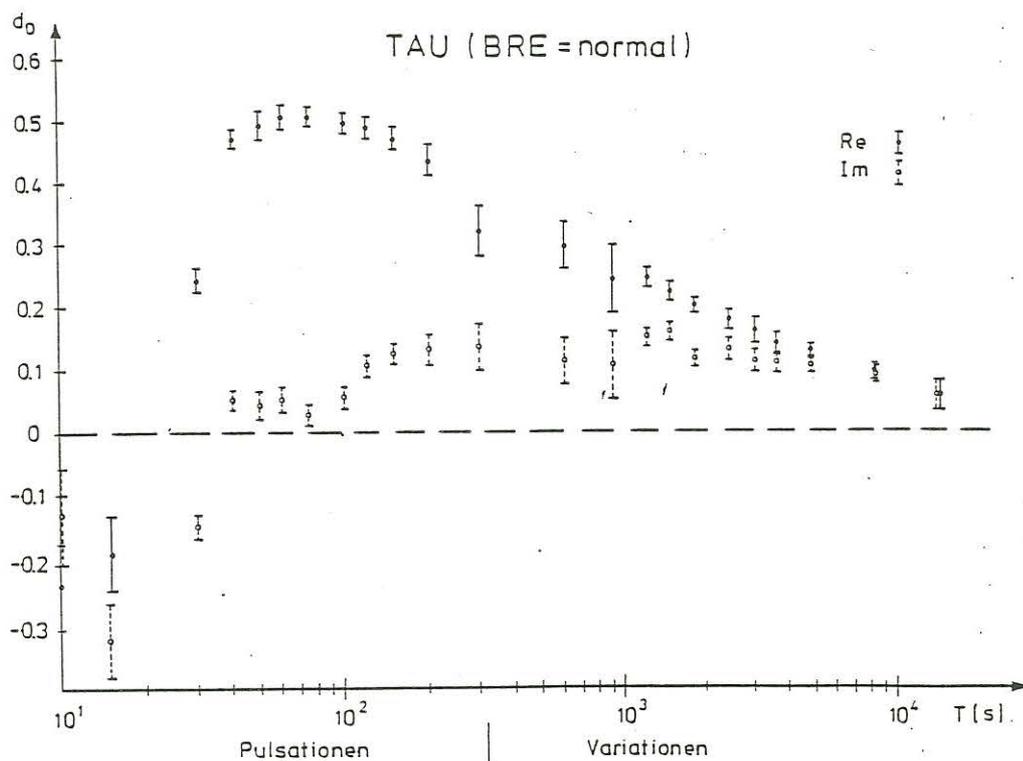


Abb. 9: D-Anomalie des Rheingrabens bezogen auf die Schwarzwaldstation BRE

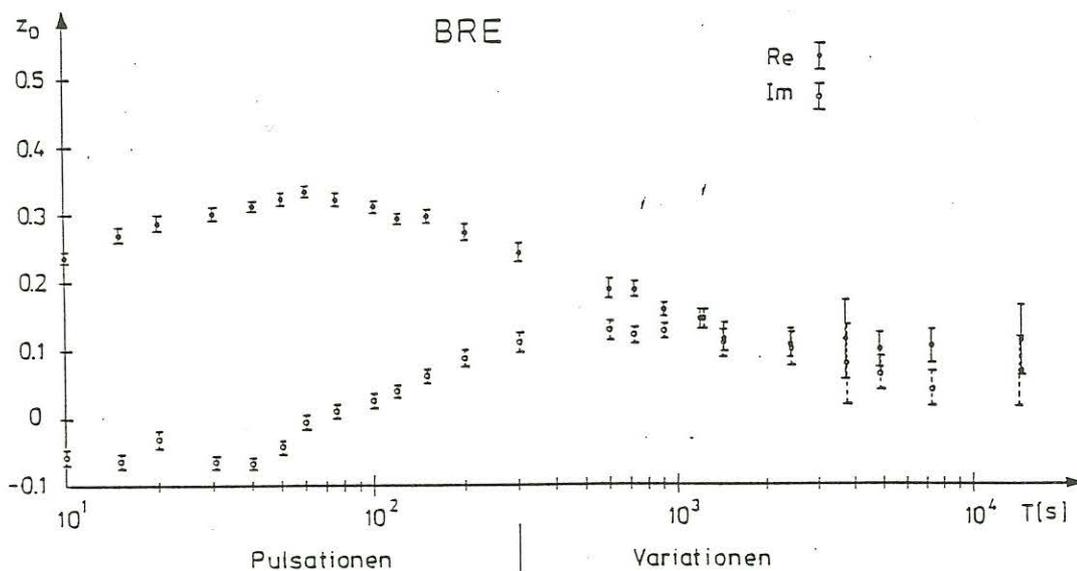


Abb.10: Z-Anomalie der Schwarzwaldstation BRE

die dämpfende Wirkung des Krustenleiters unter dem Schwarzwald einbezieht. Abb.9 und 10 zeigen auch, daß sich die Periodenbereiche der Pulsationen und Variationen ohne Versätze aneinander anschließen lassen. Ausführliche Darstellungen und Diskussionen der magnetischen Übertragungsfunktionen der Rheingraben- und Schwarzwaldstationen geben Schmucker und Tezkan (1989). Auch die tellurischen Übertragungsfunktionen im Pulsations- und Variationsbereich ließen sich gut aneinanderschließen. Dies wird als Beispiel in Form von $\rho^*(z^*)$ -Kurven für die Rheingrabenstationen TAU und SIG dargestellt (Abb.11). Im Rheingraben wird so für TAU bei 900s und $z^* = 70$ km eine gutleitende Schicht im oberen Mantel sichtbar, an die sich ein nahezu inhomogener, relativ hochohmiger oberer Mantel anschließt. Zum Vergleich wird die Sondierungskurve von SIG im nördlichen Graben gezeigt. Sie beginnt entsprechend der sehr viel größeren Mächtigkeit der Grabenfüllung mit viel geringeren Eindringtiefen. Hier erscheint das Zwischenminimum von ρ^* schon in 20 km Tiefe bei 1440s mit einem deutlichen Abfall der tieferen Mantelwiderstände ab 600s. Im Schwarzwald wird durch Hinzufügen der Variationswerte unterhalb des Krustenleiters ab 720s und $z^* = 40$ km Tiefe ein schwaches ρ^* angetroffen.

Bevor eine 2D-Modellierung durchgeführt wird, ist es üblich, aus den Impedanzen der E-Polarisation 1D-Modelle abzuleiten. Sie werden dann als Startmodelle für die 2D-Modellrechnung benutzt. Hier hat die Erfahrung gezeigt, daß es günstiger ist, wenn die 1D-Interpretation getrennt für Pulsationen und Variationen erfolgt, ansonsten geht die Information des guten Leiters besonders unter dem Graben verloren. Da hohe Frequenzen fehlen und damit eine Auflösung von Deckschichten, repräsentieren diese 1D-Variationsmodelle in ihrer jeweiligen ersten Schicht sowohl die Grabensedimente als auch das Grundgebirge. Wird also die 1D-Modellrechnung nur mit den Übertragungsfunktionen der E-Polarisation im Variationsbereich durchgeführt, so erscheint

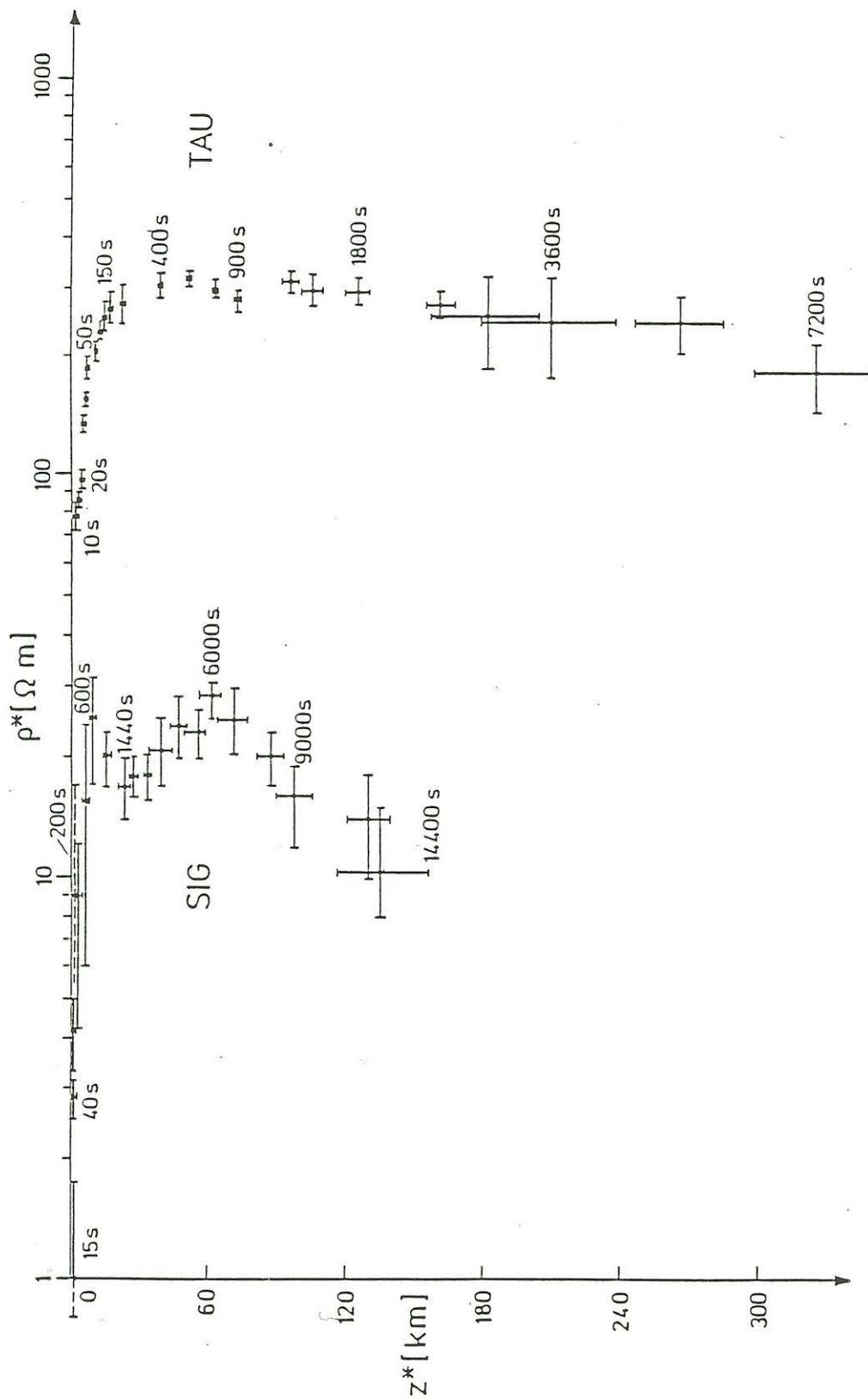


Abb. 11: $\rho^*(z^*)$ -Kurven Rheingraben

deutlich ein guter Leiter unter dem Rheingraben - allerdings mit deutlichen Tiefenunterschieden: 80 km bei SIG im Norden und 150 km Tiefe bei TAU im Süden. Dies wird bei den Schwarzwaldstationen noch einheitlicher, denn da erscheint eine gutleitende Mantelzone in 100 bis 150 km Tiefe.

Eine zweidimensionale Anpassung erwies sich dann bei den Variationen viel einfacher als bei den Pulsationen, weil bei längeren Perioden die Phasen beider Polarisierungen ähnlicher werden und die Induktionsanomalie des Rheingrabens allmählich verschwindet. Die Modellanpassung beschränkt sich diesmal auf die Datensätze von TAU im Rheingraben und BRE im Schwarzwald - letztere mit Impedanzen in gedrehten Koordinaten ($\alpha=45^\circ$), Abb.12 zeigt das 2D-Modell bester Anpassung. Aus programmtechnischen Gründen wurde der gestrichelt eingezeichnete Krustenleiter in der Modellrechnung weglassen.

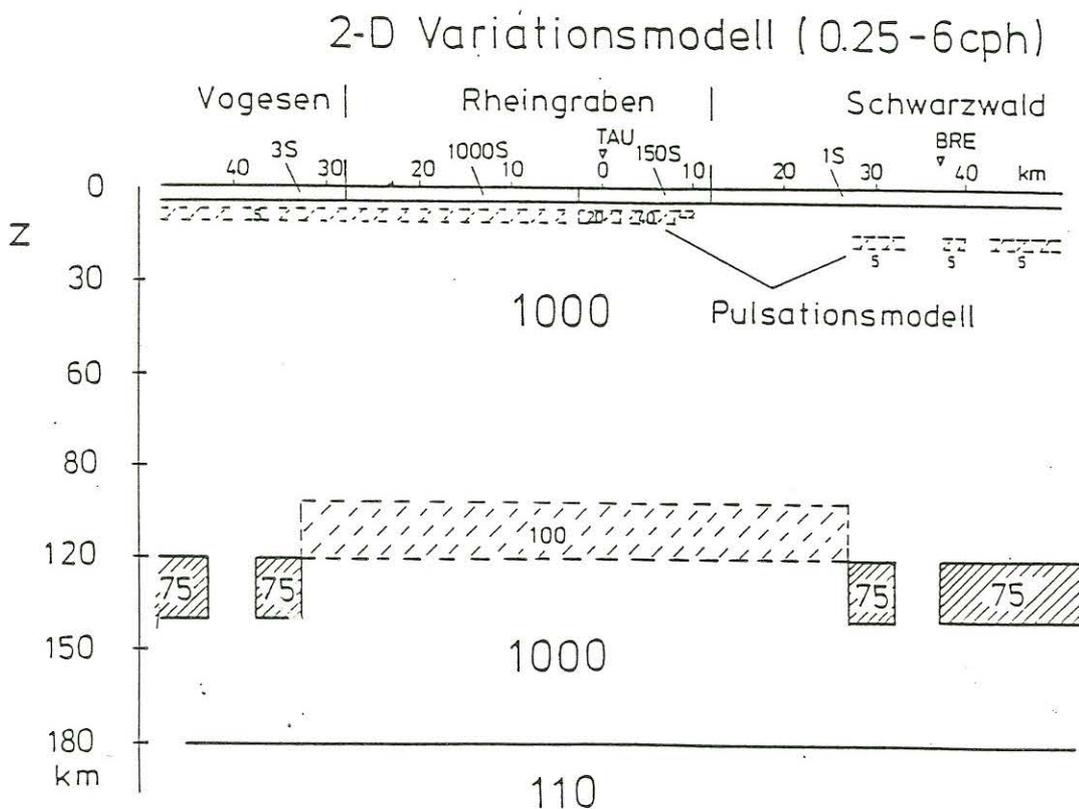


Abb.12: Variationsmodell

Der Einfluß dieses guten Leiters beschränkt sich sowieso auf die kürzeren Perioden und hat kaum Wirkung auf die Variationsdaten. Die dünne Schicht aus dem Pulsationsmodell in Abb.3 wurde hier mit einer Änderung der Deckschicht übernommen. Das 2D-Modell erklärt alle beobachteten magnetischen und tellurischen Übertragungsfunktionen als Funktion der Periode. Als Beispiel dafür ist die gute Anpassung der Phasen für beide Polarisierungen in Abb.13 dargestellt. Hier ist die Existenz des Mantelleiters entscheidend, um E-Polarisationsphasen oberhalb von 45° zu erreichen.

Ähnlich wie bei den Pulsationen geht es hier auch darum, ob sich der Mantelleiter unter dem Schwarzwald auch fortsetzt oder nicht. Hier fehlt allerdings die entscheidende Aussage der B-Polarisationsphasen, da die Wirkung des guten Leiters aus zu großen Tiefen kommt. Mit Hilfe der in Abb.14 gezeigten Modellstudie soll dann abschließend über die optimale Tiefe des Mantelleiters und über seine mögliche Fortsetzung unter dem Rheingraben eine bessere Aussage gemacht werden. In den Modellen A bis C wird die Tiefe des Mantelleiters bei gleichbleibenden Leitwerten von 530 S variiert. Modell D ist zum Vergleich ohne einen solchen Leiter; in den gestrichelten Modellen A' bis C' ist er nur unter dem Rheingraben zugelassen. Abb.15 faßt die Modellanpassung für eine ausgewählte Periode von 1200s vergleichend zusammen, oben die magnetische Anomalie in Z, unten für die Phasen der Impedanz. Die Ergebnisse der Modelle A' bis C' sind nicht eingezeichnet, da sie sehr nahe an den Modellen A bis C liegen. Man sieht, daß die z_D -Anomalie ohne Mantelleiter signifikant größer als beobachtet wäre, (Modell D) und keine sichere Aussage über die Tiefe des Mantelleiters zuließe. Hingegen reagieren die tellurischen Phasen viel empfindlicher auf diese Tiefen. Modell A mit einer maximalen Tiefe von 120 km ergibt die am besten passenden Phasen. Dieses Modell ist daher in Abb.12 als Variationsmodell demonstriert worden.

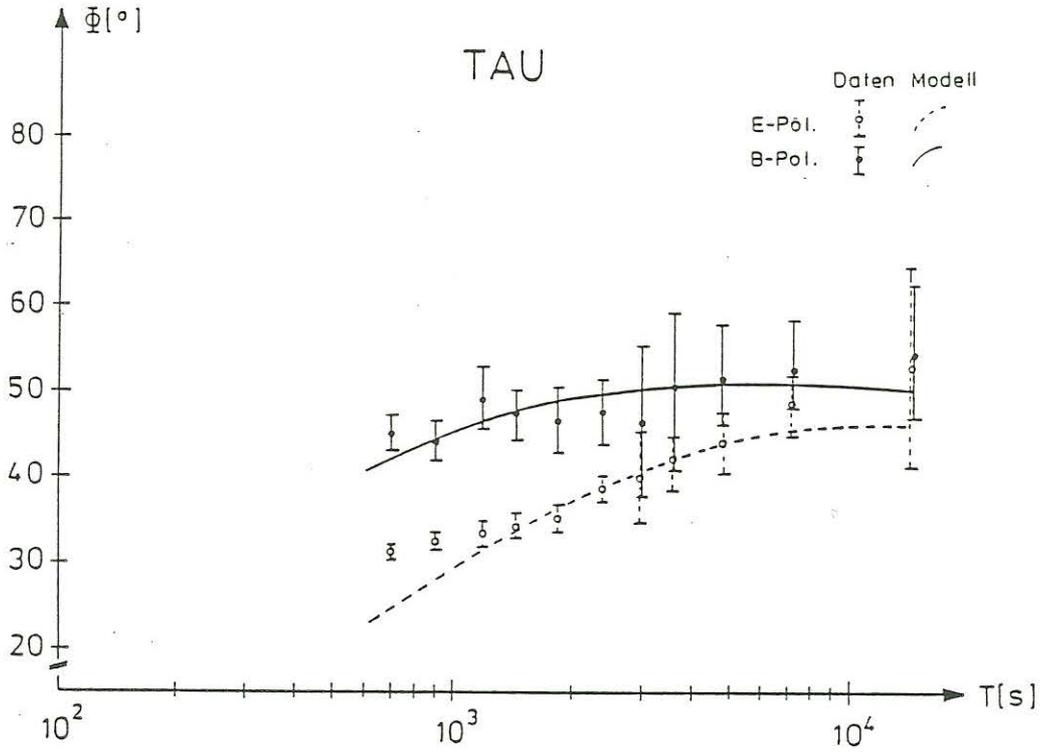


Abb. 31

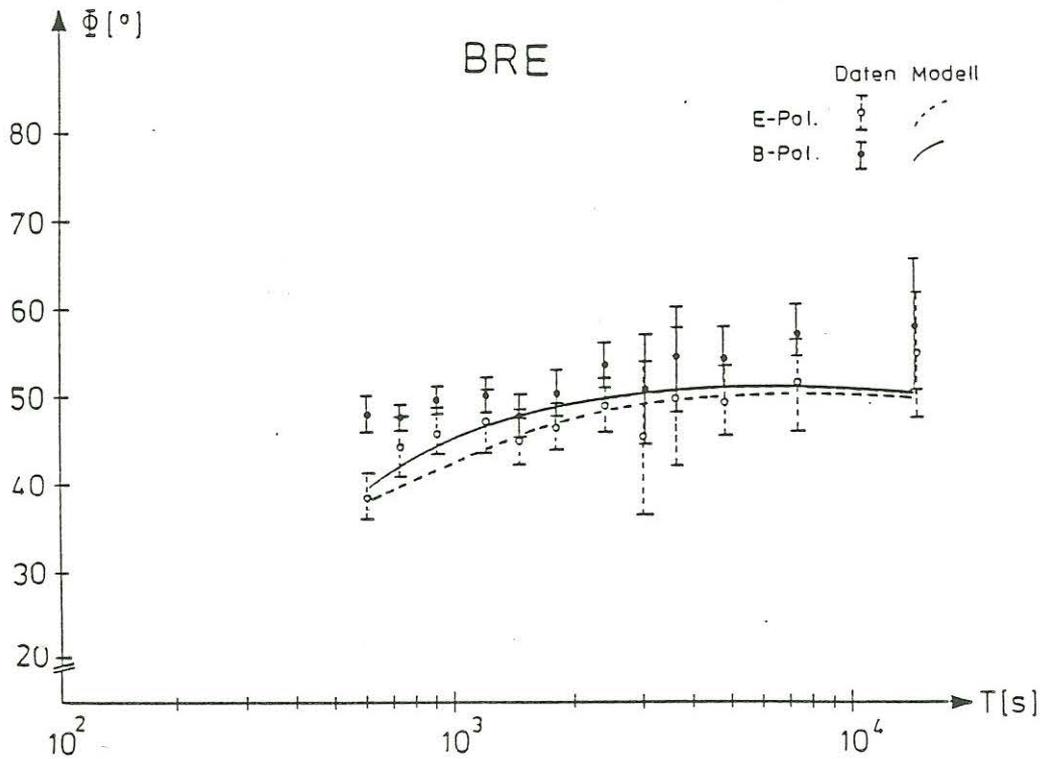


Abb.13: Modellanpassung Variationsphasen der MT-Impedanzen

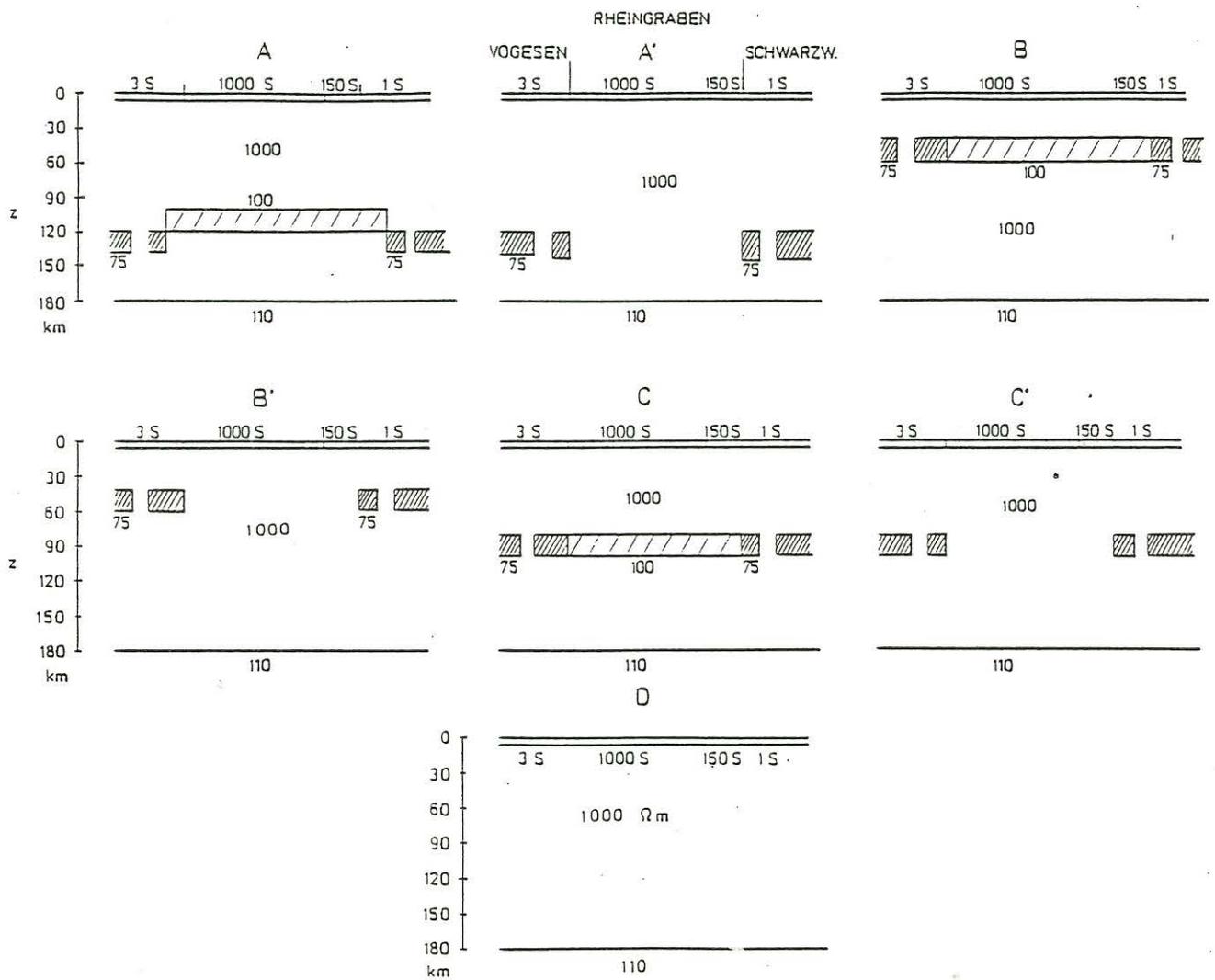


Abb.14: Variationsmodelle

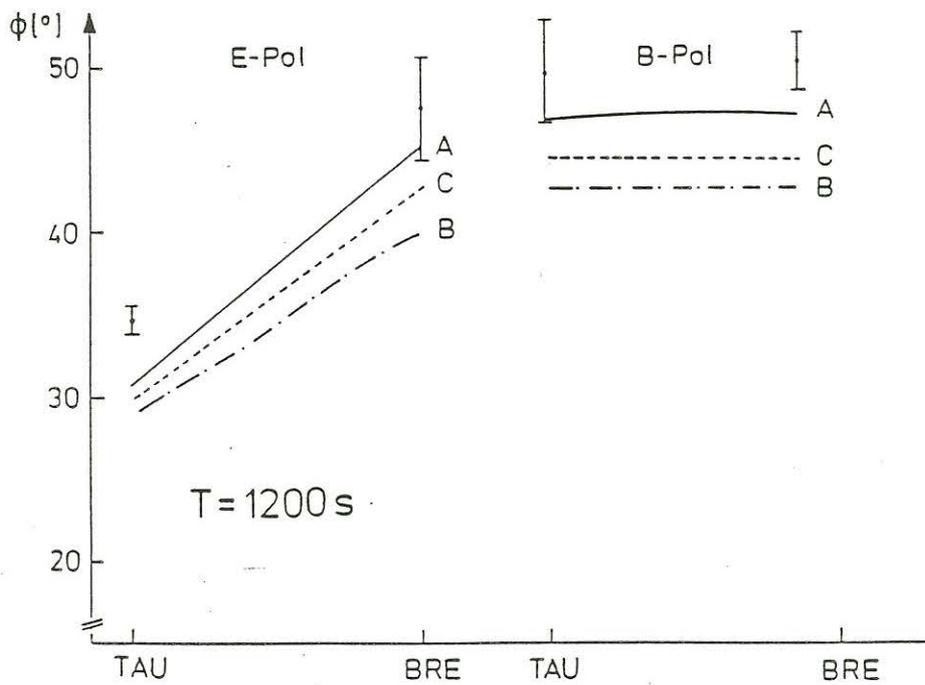
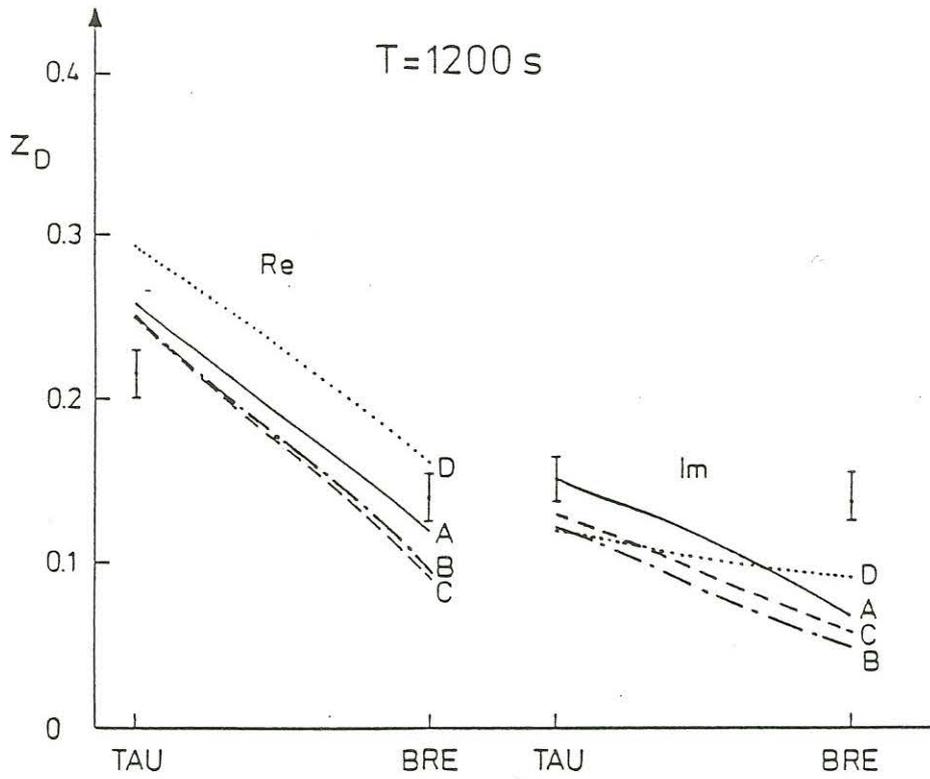


Abb.15: Modelladaptation der Variationsmodelle von Abb.14

5 Zusammenfassende Ergebnisse für die Erkundung gutleitender Zonen im oberen Mantel unter den Grabenstrukturen

Wie für das Pulsationsmodell sollen jetzt die Ergebnisse von der 2D-Modellrechnung für Variationen zusammengefaßt und eine allgemeine Aussage für den Mantelleiter unter den Grabenstrukturen abgeleitet werden.

5.1 Mögliche gutleitende Schichten im oberen Mantel unter dem Graben:

- über die Existenz solcher Schichten geben die 2D-Modellstudien keine Information, auch die Modellstudien mit den B-Polarisationsphasen lassen keine zusätzlichen Aussagen zu.
- Ihr Vorhandensein wird mit 2D-Modellrechnungen nicht ausgeschlossen, aber durch die Daten auch nicht belegt.
- 1D-Modelle geben Hinweise auf solche gutleitenden Zonen, falls nur Variationsdaten für die Modellrechnungen benutzt werden.

5.2 Mögliche gutleitende Schichten im oberen Mantel unter dem angrenzenden Kristallin eines Grabens:

- Die Existenz solcher Leiter ist durch die z_D -Anomalie abgesichert.
- Anders als im Pulsationsbereich gibt die z_D -Anomalie keinen Hinweis auf die Tiefe.
- Genauere Tiefenangaben sind nur mit E-Polarisations- und B-Polarisationsphasen möglich (2D-Modellstudie).

6 Literatur

- 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
- Schmucker, U., Tezkan, B.: 20 Jahre elektromagnetische Tiefenforschung im Rheingraben - eine Zusammenfassung mit Ausblick auf neuere Ergebnisse. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein, 17-34, 1988
- Schmucker, U., Tezkan, B.: Arbeitsbericht zum Vorhaben Schm 101/14-3 im Schwerpunkt "Untere Kruste". Institut für Geophysik, Univ. Göttingen, 76 Seiten, 1989
- Spitzer, K.: Zur Zeitabhängigkeit der Impedanz in der Magnetotellurik, Diplomarbeit, Univ. Göttingen, 1987
- Tezkan, B.: Electromagnetic sounding experiments in the Schwarzwald central gneiss massif. J. Geophysics 62, 109-118, 1988