

H. Dittus, U. Teufel, A. Berktold

Messungen mit den Methoden der Audio-Magnetotellurik, Magnetotellurik und Erdmagnetischen Tiefensondierung längs eines NS-Profiles über den Alpennordrand vom Waginger See bis zur Reiteralpe

Zwischen Juni und November 1982 wurde entlang eines NS-Profiles über den Alpennordrand Ostbayerns mit den Verfahren der Magnetotellurik (MT), Audio-Magnetotellurik (AMT) und der Erdmagnetischen Tiefensondierung (ETS) registriert. MT und ETS wurden jeweils an 16 Orten im Periodenbereich von 4 s bis über 1000 s gemessen. Mit der AMT wurde an 23 Orten im Periodenbereich von 1/1000 s (1 kHz) bis ca. 0.3 s registriert. Die Geländemessungen der AMT wurden von Dr. G. Fischer und Dr. P. Schnegg vom Observatoire Cantonal in Neuchatel/Schweiz durchgeführt. Im Periodenbereich von 0.3 s bis 4 s standen keine Geländemessungen zur Verfügung. Die Lage der Stationen ist aus Abb. 1 zu ersehen. Die Symbole in Abb. 1 haben die folgende Bedeutung :
○ - MT und ETS; × - AMT; ⊗ - AMT, MT und ETS; △ - Tellurik.

Zu folgenden Fragen sollten die Geländemessungen Aussagen ermöglichen:
-Wie weit nach Süden liegen unter den kalkalpinen Einheiten Molassesedimente?
-Wie mächtig sind sie?
-In welcher Tiefe liegen sie?

Um dies zu beantworten sind elektromagnetische Verfahren günstig, da gutleitfähige Gesteine (Molasse, Flysch, Helvetikum) zwischen zwei geringleitfähigen Gesteinseinheiten (kalkalpine Einheiten im Hangenden und kristallines Grundgebirge im Liegenden) liegen. Die Leitfähigkeitsstruktur am Alpennordrand kann als nahezu zweidimensional angesehen werden, was für die Interpretation von Vorteil ist.

Im folgenden werden die Meßergebnisse kurz vorgestellt. (Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse und der verwendeten Methoden befindet sich in : DITTUS 1983, TEUFEL 1983.)

Bei den Messungen der MT und ETS waren gleichzeitig 5 Apparaturen im Einsatz. Eine der 5 Apparaturen war ständig an der Basisstation LAW aufgebaut. Die übrigen 4 Apparaturen wurden nach einer Standzeit von jeweils 7-10 Tagen an einen neuen Meßort umgebaut. Alle 5 Apparaturen wurden zeitgleich betrieben. Dadurch konnten zusätzliche wichtige Auswertergebnisse erhalten werden. Auch konnte versucht werden, mit Hilfe des Remote-Reference-Verfahrens die Qualität der Auswertergebnisse zu verbessern. Die Qualität der Meßdaten wird entscheidend von der Stärke der technischen Störfelder am jeweiligen Meßort bestimmt. An der überwiegenden Zahl der Meßorte waren die technischen Störfelder für Perioden größer als 10 s kleiner als die natürlichen elektrischen und magnetischen Variationen. Nur an wenigen Meßorten waren die technischen Störfelder größer als die natürlichen elektrischen und magnetischen Felder. Insgesamt zeigte sich, daß der überwiegende Teil der technischen Störfelder lokal begrenzt ist und sich hauptsächlich in den elektrischen Feldern bemerkbar macht.

I. Die Vorzugsrichtung des induzierten elektrischen Feldes

Die Vorzugsrichtung des induzierten elektrischen Feldes hängt an den einzelnen Stationen unterschiedlich von der Periode ab. An den beiden nördlichsten Stationen TET und ZEL existiert für Perioden kleiner als etwa 50 s und an der Station REU für Perioden kleiner als etwa 70 s keine Vorzugsrichtung des induzierten elektrischen Feldes. Dagegen existiert sie an den nach Süden anschließenden Stationen für die kurzen Perioden kleiner als 50-70 s. Aus diesen Ergebnissen kann man schließen, daß die Richtung der im Molassetrog induzierten Ströme für Perioden kleiner als etwa 50 s noch nicht durch den Molassetrog als zweidimensionaler Struktur beeinflusst wird (und damit mehr von der Richtung des induzierenden Magnetfeldes abhängt), während sie für Perioden größer als etwa 70 s überwiegend durch den Molassetrog als zweidimensionaler Struktur bestimmt ist. Man erkennt dieses Verhalten auch gut an den Kurven des scheinbaren spezifischen Widerstandes in Abb. 3.

Für Perioden größer als 70 s ist die Vorzugsrichtung an den meisten Stationen unabhängig von der Periode. Diese Vorzugsrichtung für Perioden größer als 70 s wurde in Abb. 2 eingetragen. Die Vorzugsrichtungen an den Stationen SEZ, PFA und RAM sind - wie eine spektrale Zerlegung der elektrischen Felder ergab - stark durch technische Störströme verfälscht. Sie wurden deshalb in Abb. 2 nicht eingezeichnet.

Man erkennt an Abb. 2, daß die Vorzugsrichtungen im nördlichsten Teil des Profils etwa mit der Streichrichtung des Molassetroges übereinstimmen und daß sie etwa von der Station JOB nach S langsam in eine Richtung senkrecht zum Streichen des Molassetroges drehen. Daß sich diese Drehung entlang eines größeren Teils des Profils (JOB-SWA) vollzieht, kann als zusätzlicher Hinweis auf den relativ stetig nach S an Mächtigkeit abnehmenden guten Leiter, der unter den schlechtleitenden Kalken liegt, gedeutet werden. An den Stationen LAW und BIA wird eine periodenunabhängige Vorzugsrichtung von etwa N10W beobachtet. An diesen beiden Stationen sind aus der Vorzugsrichtung und deren Periodenabhängigkeit keine Hinweise auf unterlagernde gutleitfähige Sedimente zu erkennen.

II. Ergebnisse der MT und AMT

Die Auswerteergebnisse der MT sind nicht für alle 16 Stationen gleich befriedigend. Insbesondere an den Stationen SEZ und PFA waren die technischen Störströme zu groß, um befriedigende Ergebnisse zu erhalten. Auch an den Stationen TET, ZWI, MAI und RAM waren die Ergebnisse - insbesondere die Phasenkurven - nicht optimal. Auch die Ergebnisse der AMT waren an einigen Stationen durch technische Störströme verfälscht. Die Auswertungen zeigten jedoch, daß der größte Teil der Störströme nur lokal begrenzt vorkommt.

Die Ergebnisse der MT und AMT werden nicht getrennt besprochen. Es hat sich gezeigt, daß sich die Ergebnisse beider Verfahren in einer gemeinsamen Darstellung besonders gut verstehen lassen. Dazu wurden in Abb. 3 die Kurven des scheinbaren spezifischen Widerstandes von beiden Verfahren für 12 Stationen als Funktion der Periode dargestellt. Die Kurven $\varrho_{s\parallel}$ (Symbol "o" bzw. "y") wurden für jede Station aus der Komponente des elektrischen Feldes in Vorzugsrichtung und der damit maximal korrelierten Komponente des magnetischen Feldes berechnet. Umgekehrt wurden die Kurven $\varrho_{s\perp}$ aus der Komponente des elektrischen Feldes senkrecht zur Vorzugsrichtung und der damit maximal korrelierten Magnetfeldkomponente berechnet.

Die ϱ_s -Kurven in Abb.3 können in 3 Gruppen aufgeteilt werden:

1. die Kurven der Stationen BRO/TET, GEI/ZEL, REU und ADL
2. die Kurven der Stationen ZWI, MAI, HOE, OJE, SWA und RAM
3. die Kurven der Stationen LAW und BIA .

Abb.1

Tabella 1: Die Stationsnamen und ihre Abkürzungen.

Bromberg (ERO): AMT	Tettelhar (TET): MT-ETS
Zeller Forst (ZEL): MT-ETS	Geiersnest (GEI): AMT
Reute (REU): MT-ETS-AMT	Teisenberg (TEI): AMT
Stoiseralm (STO): MT-ETS	Bründl (BRU): AMT
Großwald (GRO): AMT	Frillensee (FRI): AMT
Hochstaufen (HOS): AMT	Adlgaß (ADL): MT-ETS-AMT
Zwieselalm (ZWI): MT-ETS-AMT	Jochberg (JOB): MT-ETS
Maisenberg (MAI): MT-ETS-AMT	Haunschertal (HAU): AMT
Sulzenstübl (SUL): AMT	Höllnbachtal (HOE): MT-ETS-AMT
Schneizlreuth (SEZ): MT-ETS	Oberjettenberg (OJE): MT-ETS-AMT
Schwarzbachtal (SWT): AMT	Schwarzbachalm (SWA): MT-ETS-AMT
Pfaffenwinkel (PFA): MT-ETS	Ramsau (RAM): MT-ETS-AMT
Zauberwald (ZAU): AMT	Hintersee (HIN): AMT
Teufelskopf (TEU): AMT	Lahnwald (LAW): MT-ETS-AMT
Bindalm (BIA): MT-ETS	

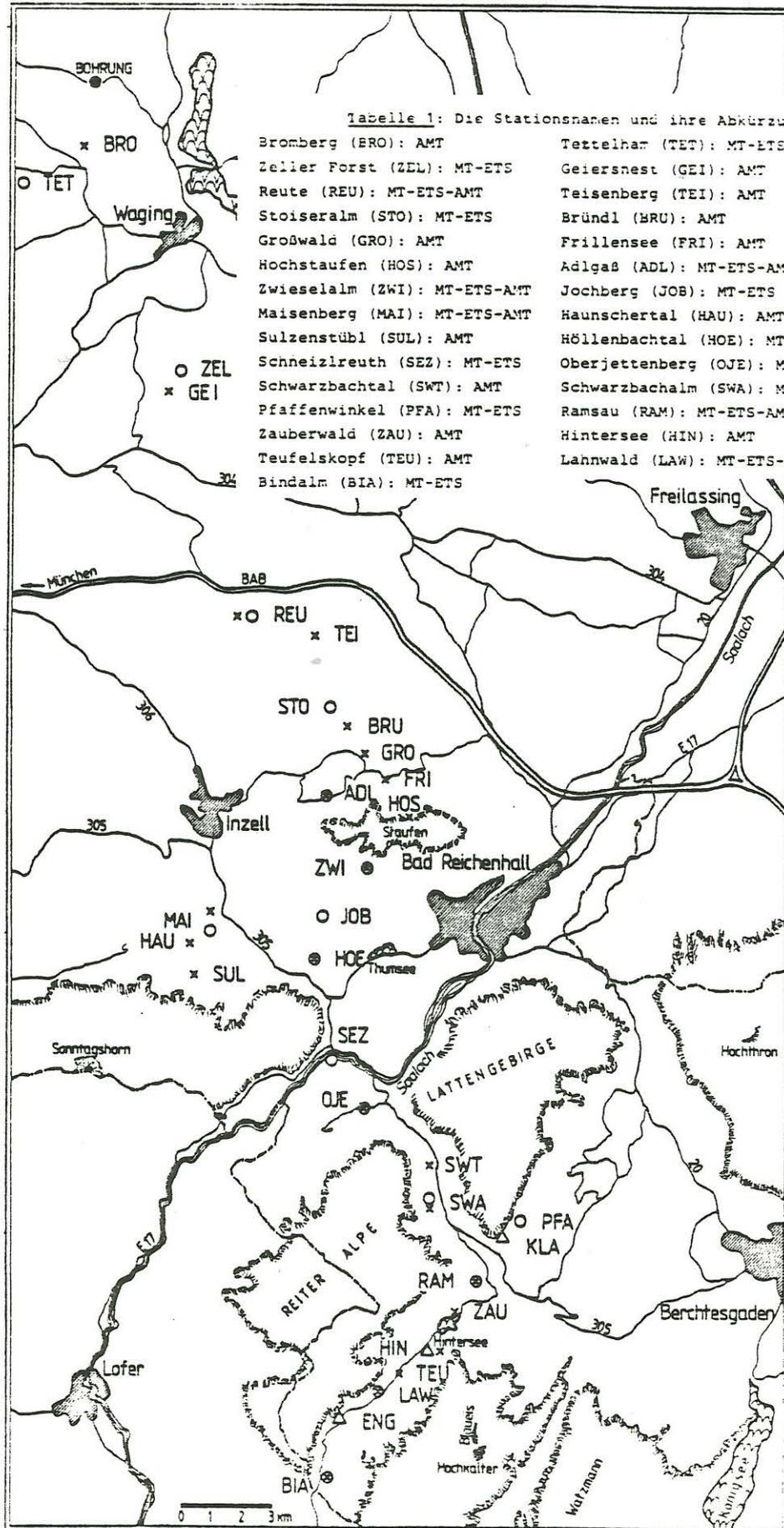


Abb. 2

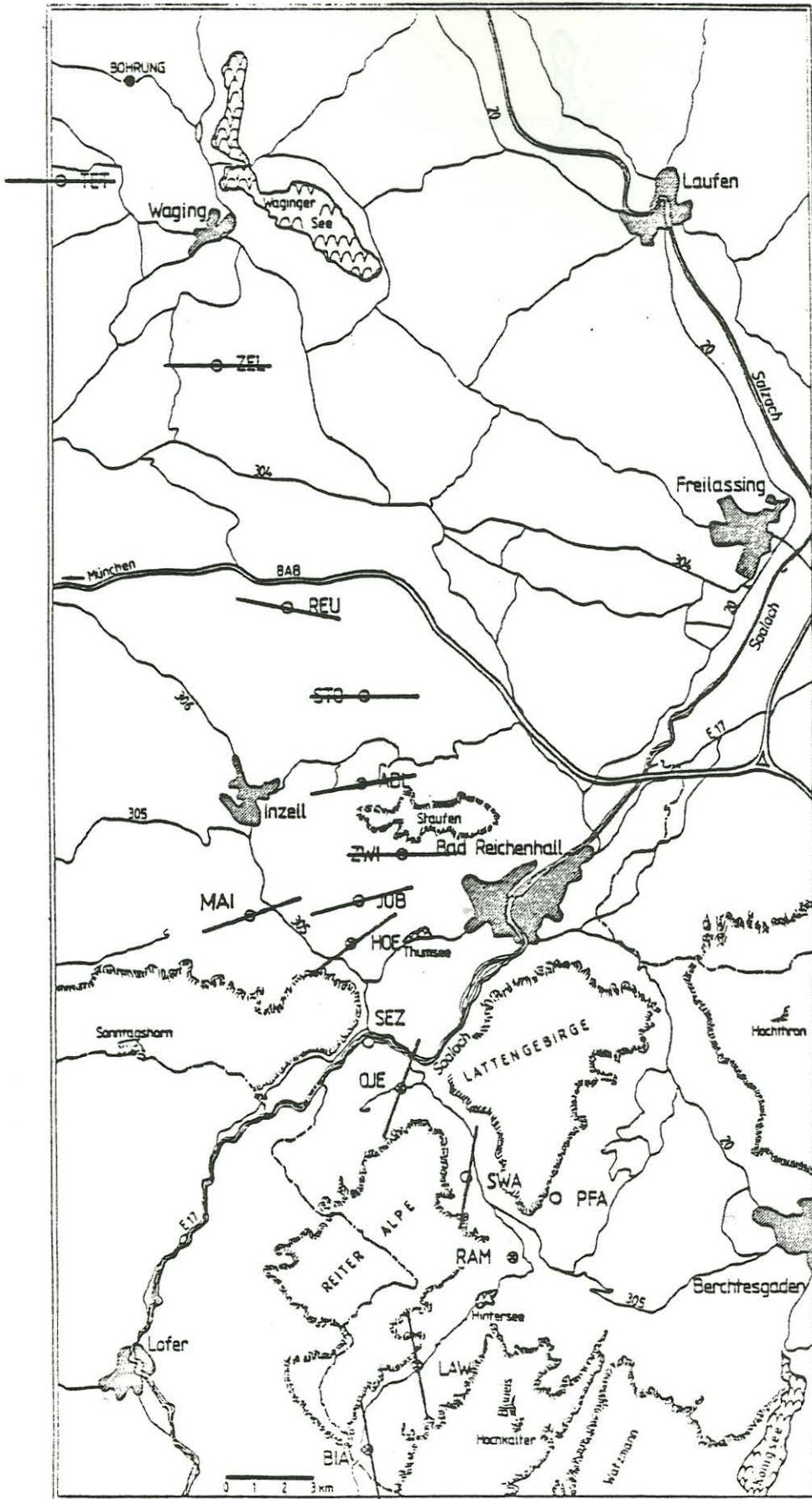
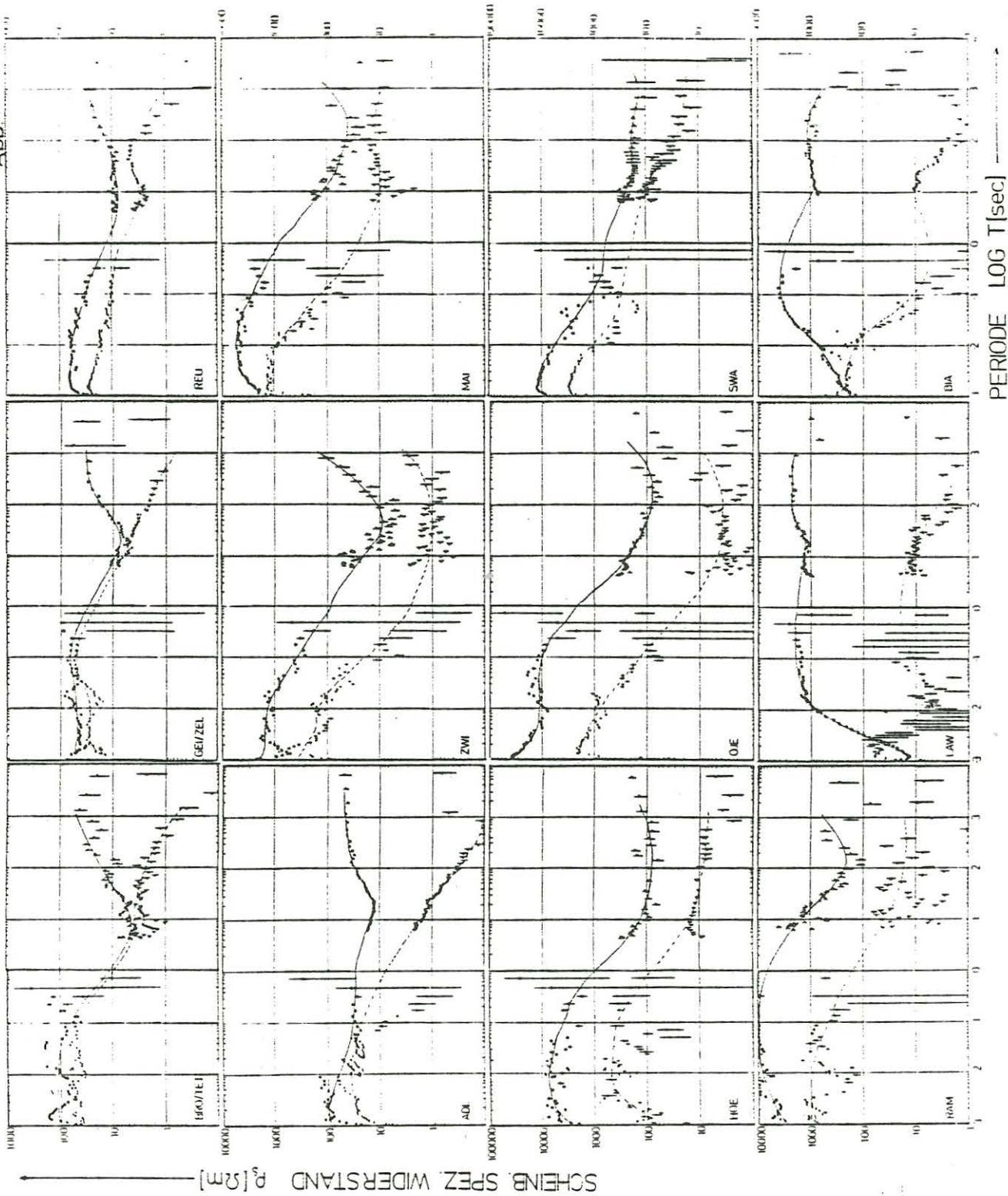


Abb 3



MT-AMT
 p_s -Kurven

— p_s (berechnet) VZR
 - - - p_s (gemessen) VZR

Zur ersten Gruppe gehören die nördlichsten Stationen, die auf Molassesedimenten oder auf Flysch standen. Mit der AMT wurden für die gutleitfähigen Sedimente im oberen Bereich der Deckschicht spezifische Widerstände zwischen 50 und 100 Ohmm gemessen. Diese Werte sind höher als erwartet. Der spezifische Widerstand nimmt mit zunehmender Periode auf Werte kleiner als etwa 10 Ohmm ab (bei Perioden um 10 s). Daraus folgt, daß der spezifische Widerstand in der sedimentären Deckschicht von oben nach unten abnimmt. Dies könnte z.B. dadurch verursacht sein, daß die elektrische Leitfähigkeit der Porenwässer wegen zunehmender Ionenkonzentration mit der Tiefe schneller zunimmt als das Porenvolumen abnimmt. Im Periodenbereich von 1/1000 s bis etwa 10 s sind die $\mathcal{G}_{s\parallel}$ - und $\mathcal{G}_{s\perp}$ -Kurven an der jeweiligen Station nahezu gleich. Dies bedeutet, daß sich die Zweidimensionalität des Molassetrogos bei Perioden kleiner als etwa 10 s noch nicht bemerkbar macht. Erst bei Perioden größer als etwa 10 s beginnen die Kurven $\mathcal{G}_{s\parallel}$ (Fall der E-Polarisation) und $\mathcal{G}_{s\perp}$ (Fall der B-Polarisation) wegen des zunehmenden Einflusses der Zweidimensionalität des Molassetrogos zu divergieren. An der Station TET beginnen die \mathcal{G}_s -Kurven bei Perioden um 10 s zu divergieren während sie an der Station REU erst bei Perioden um 80 s divergieren. Dies deutet auf eine Mächtigkeitzunahme der gutleitfähigen Sedimente von TET nach REU hin. An der Station ADL wird das Divergieren der beiden Kurven schon bei Perioden kleiner als 1 s beobachtet. Dies ist voraussichtlich durch die laterale Variation der Leitfähigkeit am nahen Nordrand der Kalkalpen verursacht. Die Werte des scheinbaren spezifischen Widerstandes im Bereich des Kurvenminimums sind an der Station TET am kleinsten (um 5 Ohmm) und nehmen nach S bis zur Station ADL (> 10 Ohmm) stetig zu. Dadurch wird das Kurvenminimum von TET nach ADL weniger ausgeprägt. Diese Zunahme des scheinbaren spezifischen Widerstandes von TET nach ADL ist durch die Zunahme des spezifischen Widerstandes von den Molassesedimenten zum Flysch verursacht.

Von der Station ZWI nach S ändert sich das Erscheinungsbild der \mathcal{G}_s -Kurven. Die Station ZWI stand am Südabhang des Hochstaufen. Sie war die nördlichste Station auf den Kalken des Tirolikums. Von der Station ZWI bis zur Station RAM haben die $\mathcal{G}_{s\parallel}(T)$ und $\mathcal{G}_{s\perp}(T)$ - Kurven an der einzelnen Station, aber auch von Station zu Station, eine ähnliche Form. Wegen des höheren spezifischen Widerstandes der Kalke des Tirolikums beginnen alle Kurven bei Werten von 1000 -10000 Ohmm. An allen Station nimmt der scheinbare spezifische Widerstand mit zunehmender Periode ab. Wegen des hohen Widerstandes der Deckschicht ist diese Abnahme deutlicher als im Molassetrog. Alle \mathcal{G}_s -Kurven dieser Stationsgruppe zeigen ein mehr oder weniger ausgeprägtes Minimum, das durch die unterlagernden gutleitfähigen Sedimente bedingt ist. An der Station ZWI ist dieses Minimum bei Perioden um 30-40 s. Der spezifische Widerstand im Bereich des Minimums ist dabei 10 Ohmm für $\mathcal{G}_{s\parallel}$ und 1 Ohmm für $\mathcal{G}_{s\perp}$. Die \mathcal{G}_s -Werte im Bereich des Minimums werden dabei von der Station ZWI zur Station RAM immer größer. An der Station RAM ist $\mathcal{G}_{s\parallel}$ z.B. etwa 200 Ohmm. Zudem verschiebt sich das Minimum von N nach S zu immer längeren Perioden. Die Zunahme des scheinbaren spezifischen Widerstandes von N nach S sowie die Wanderung des Kurvenminimums zu längeren Perioden sind eine Folge der stetigen Abnahme der Mächtigkeit der unterlagernden gutleitfähigen Sedimente bei gleichzeitiger Zunahme der Mächtigkeit des auflagernden Kalkalpines.

Südlich der Station RAM ändert sich der Kurventyp nochmals deutlich. An den Stationen LAW und BIA sind im entscheidenden Periodenbereich keine Minima der \mathcal{G}_s -Kurven mehr zu erkennen. Beide Stationen zeigen schon bei recht kurzen Perioden eine starke Polarisation des induzierten Feldes. Die Änderung der Kurvenform von RAM nach LAW und BIA spricht für ein Auskeilen der gutleitfähigen Sedimente südlich der Station RAM.

III. Erdmagnetische Tiefensondierung

Bei den Ergebnissen der Erdmagnetischen Tiefensondierung sollen zunächst die Übertragungsfunktionen zwischen den Horizontalkomponenten des Magnetfeldes an Wander- und Basisstation besprochen werden. Diese Übertragungsfunktion wurde in einem nach der Methode der minimalen/maximalen Kohärenz gedrehten Koordinatensystem berechnet. Der dabei an allen Stationen gefundene Drehwinkel von N10W/S10E (an der Station Bia E10N/W10S), sowie seine Unabhängigkeit von der Periode ist ein deutlicher Hinweis auf die Zweidimensionalität der Leitfähigkeitsstruktur am Alpennordrand.

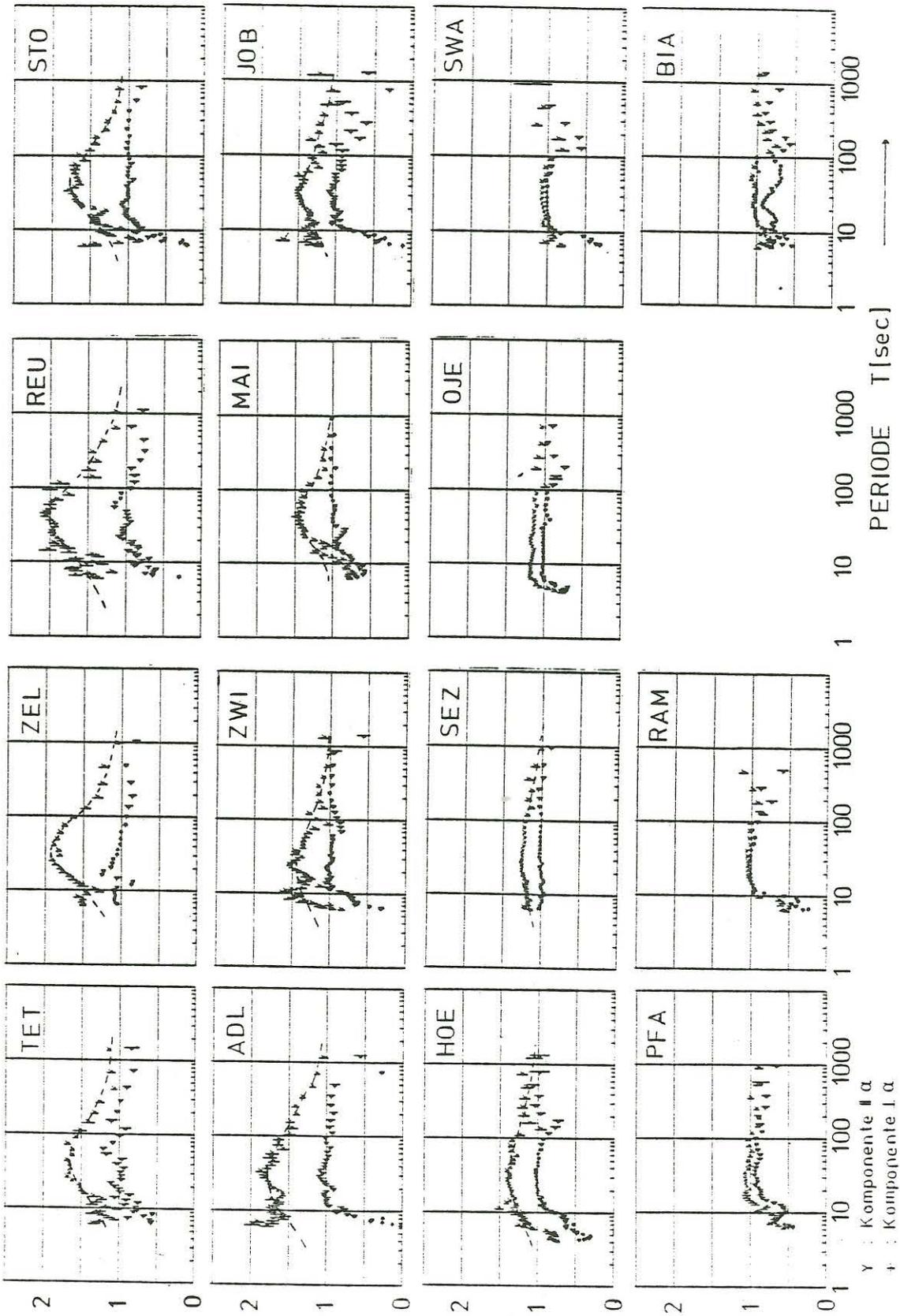
Der Betrag dieser Übertragungsfunktion ist in Abb. 4 dargestellt. (H' bezeichnet das "gesamte" gemessene horizontale Magnetfeld in der Richtung N10E, D' ist senkrecht dazu.) Wäre der Alpennordrand eine ideale zweidimensionale Struktur, sollte $D'w/D'b$ an allen Stationen unabhängig von der Periode sein und sollte den Wert 1 haben. Man erkennt aus Abb. 4 daß dies fast überall der Fall ist. Abweichungen davon werden meist für Perioden kleiner 10-20 s beobachtet. Dieses "Zusammenbrechen" der Kurven $D'w/D'b$ (wie auch $H'w/H'b$) rührt von der Art der Fehlerzuteilung im Auswertalgorithmus her. Besonders deutlich sieht man diesen Effekt an den Diagrammen der Stationen OJE und RAM. In mehreren Diagrammen erkennt man zudem eine erhöhte Streuung der Ergebnisse bei Perioden um 150-200 s (z.B. an den Stationen HOE, OJE und SWA). Dieser Effekt wurde in einem Gerätetyp durch nicht optimale Anpassung der Aufnahme Kanäle für länger- und kürzerperiodische Variationen verursacht. Sieht man von den beiden bekannten Fehlerquellen ab, dann wurde die Periodenunabhängigkeit von $D'w/D'b$ sowie sein Wert gleich 1 wie erwartet erhalten.

Anders als $D'w/D'b$ zeigt $H'w/H'b$ an den meisten Stationen eine deutliche Abhängigkeit von der Periode. Die Periodenabhängigkeit ist an den nördlichsten Stationen am größten, sie nimmt nach S stetig ab und fehlt südlich der Station HOE. Der Wert von $H'w/H'b$ im Maximum der Kurven ist ein Maß für die integrierte Stromdichte in der Umgebung der jeweiligen Station (integriert über den anomal induzierten Strom). Der maximale Wert von $H'w/H'b$ wurde an der Station REU erhalten. Daraus folgt, daß unter der Station REU (oder nahe der Station) die integrierte Stromdichte des anomalen Stromsystems und damit auch die bis zur Basis der gutleitfähigen Sedimente integrierte Leitfähigkeit am größten ist. Von der Station REU nimmt der Maximalwert von $H'w/H'b$ sowohl nach N wie auch nach S ab. Daraus folgt, daß auch die integrierte Leitfähigkeit von REU nach N und S abnimmt. Unter der Voraussetzung, daß die elektrische Leitfähigkeit in einer gewissen Umgebung der Station REU in den Molassesedimenten in lateraler Richtung nur wenig variiert, kann man aus obigen Ergebnissen schließen, daß die gutleitfähigen Sedimente etwa unter der Station REU am mächtigsten sind und daß ihre Mächtigkeit sowohl nach N wie nach S abnimmt. Die Periodenabhängigkeit und das Maximum von $H'w/H'b$ nimmt von der Station REU nach S nur stetig ab. Daraus kann auf eine eher stetige als sprunghafte Abnahme der integrierten Leitfähigkeit nach S geschlossen werden.

Als nächstes wird die Übertragungsfunktion zwischen der Vertikalkomponente und den Horizontalkomponenten des Magnetfeldes an einem Ort diskutiert. Diese Übertragungsfunktionen lassen sich sowohl in Betrag und Phase wie auch als Real- bzw. Imaginärteil von Induktionpfeilen darstellen. In Abb. 5 ist der Realpfeil dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse für die nördlichste Station TET links oben und für die südlichste Station BIA rechts unten angegeben. Sieht man von den Induktionpfeilen mit Perioden kleiner als etwa 20 s ab,

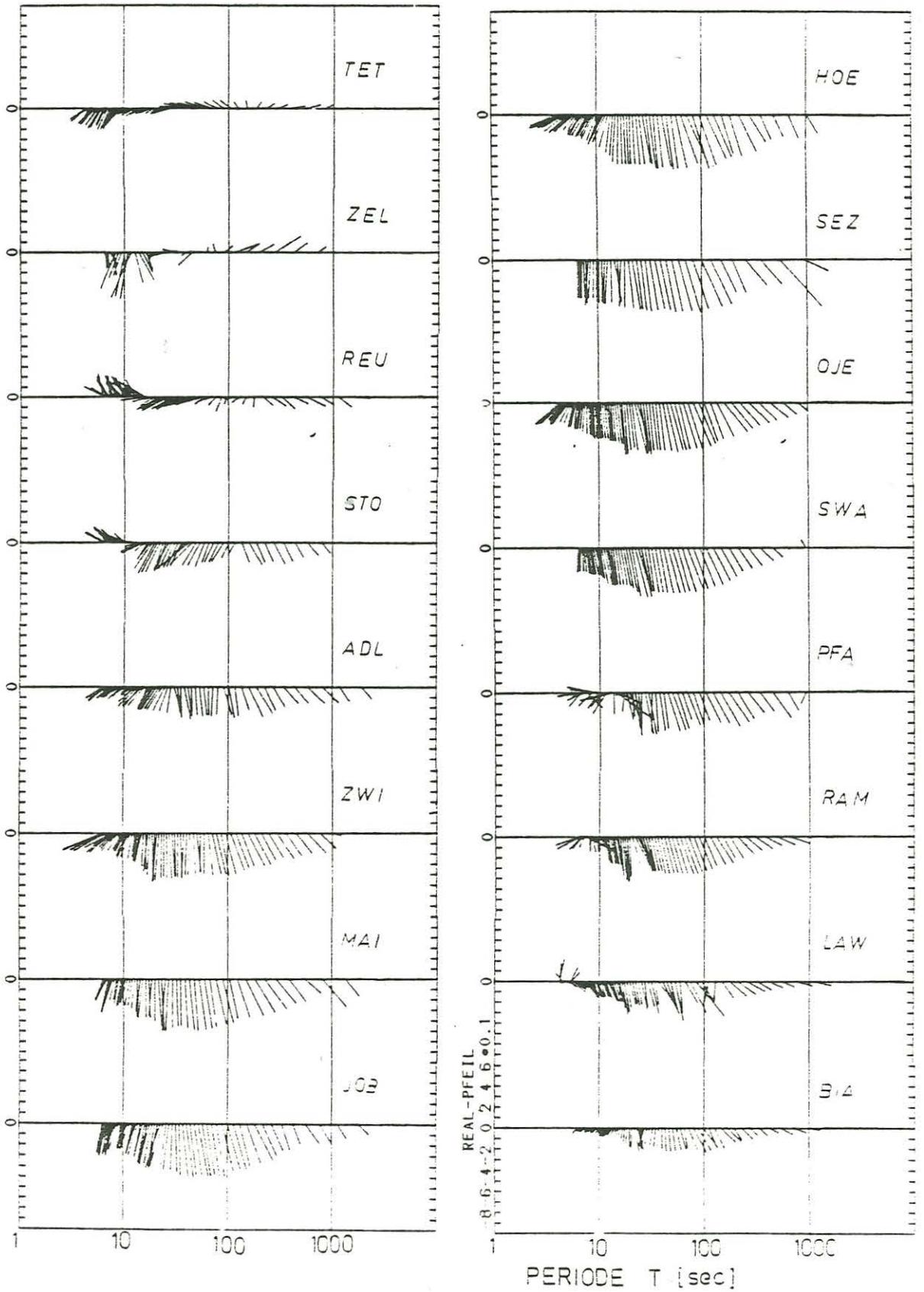
H'_w / H'_b bzw. D'_w / D'_b (Betrag)

Abb. 4



Realpfeil

Abb. 5



so fällt zunächst auf, daß die Induktionspfeile an den meisten Stationen etwa in die gleiche Richtung zeigen. Dies ist die Richtung S10E. Die Richtung der Induktionspfeile ist - vor allem an den Stationen mit den längsten Induktionspfeilen - nahezu unabhängig von der Periode. Beide Ergebnisse besagen, daß in einer gewissen Umgebung des Profils ein anomal induziertes Stromsystem existiert, das in guter Näherung zweidimensional ist und das etwa E10N/W10S gerichtet ist. Es ist naheliegend, darin die in den gutleitfähigen Sedimenten des Molassetroges einschließlich der Sedimente unter den Kalkalpen anomal induzierten Ströme zu sehen, die parallel zur mittleren Streichrichtung des Alpennordrandes fließen. Man erkennt weiter, daß die Induktionspfeile an der Station REU und an allen südlich davon gelegenen Stationen etwa in Richtung S zeigen während sie an den beiden nördlichsten Stationen ZEL und TET eher in Richtung N zeigen. Dieses Umklappen der Induktionspfeile bedeutet, daß zwischen den Stationen REU und ZEL das Gebiet mit der größten integrierten Leitfähigkeit liegt (integriert bis zur Basis der gutleitfähigen Sedimente). Die integrierte Leitfähigkeit muß von diesem Gebiet nach N und nach S abnehmen. Nimmt man (wie oben) an, daß in einer gewissen Umgebung der Stationen REU und ZEL die laterale Variation der Leitfähigkeit innerhalb der einzelnen Molasseschichten gering ist, dann muß der Molassetrog zwischen den Stationen REU und ZEL am mächtigsten sein. An den Stationen TET, ZEL und REU, nahe dem tiefsten Trogteil sind die Induktionspfeile kurz und ihre Richtung ist nicht sehr ausgeprägt. Dies ist nahe der Mittellinie einer zweidimensionalen Struktur zu erwarten. Von der Station REU nach S nimmt die Länge der Induktionspfeile zunächst zu. Wegen des günstigeren Verhältnisses zwischen Nutz- und Störnsignal nimmt auch die Stabilität der Richtung der Induktionspfeile zu. Die Induktionspfeile sind im Bereich der Stationen MAI, JOB und HOE am längsten. Von diesen Stationen nach S nimmt die Länge der Induktionspfeile wieder stetig ab. Diese Ergebnisse besagen zum einen, daß im Bereich der Stationen MAI, JOB und HOE die bis zur Basis der gutleitfähigen Sedimente integrierte Leitfähigkeit von N nach S am stärksten abnehmen muß. Andererseits sieht man, daß die Länge der Induktionspfeile zwischen den Stationen REU und BIA nur langsam zu- und wieder abnimmt. Dies bedeutet, daß eher mit einer kontinuierlichen als mit einer sprunghaften Abnahme der integrierten Leitfähigkeit von N nach S zu rechnen ist. An den meisten Stationen hängt die Länge der Induktionspfeile deutlich von der Periode ab. Die Induktionspfeile sind im Periodenbereich von etwa 40-70 s am längsten und ihre Länge nimmt zu kürzeren wie zu längeren Perioden ab. Von Perioden von etwa 10-20 s zu kürzeren Perioden hin nimmt die Streuung von Länge und Richtung der Induktionspfeile entlang des Profils zu. Dies ist zum einen durch technische Störströme und zum anderen durch dreidimensionale Strukturen nahe der Erdoberfläche bedingt.

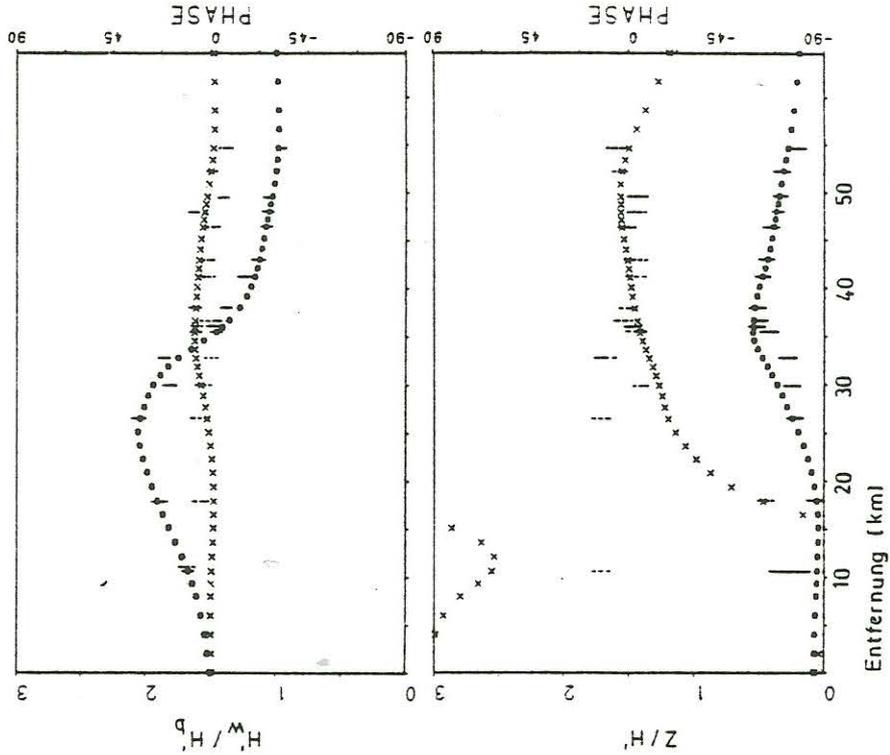
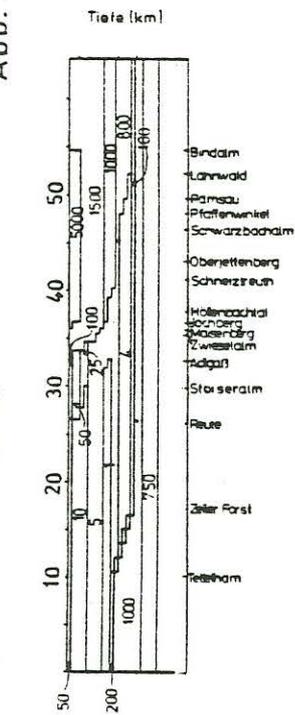
IV. Modellrechnungen

Zur weiteren Interpretation der Meßergebnisse wurden zweidimensionale Modelle berechnet. Es wurde versucht, möglichst alle 4 Übertragungsfunktionen (Z_{11} , Z_{12} , $H'w/H'b$, Z/H') in Betrag, Phase und Periodenabhängigkeit zu erklären. Dabei zeigte sich, daß manche Modelle die Ergebnisse der MT gut erklären, die der ETS dagegen weniger gut (und umgekehrt). Das im folgenden vorgestellte "vorläufige Endmodell" stellt einen Kompromiß hinsichtlich der Anpassung aller Parameter dar. Dies ist noch nicht in allen Teilbereichen des Profils gleich befriedigend gelungen.

In Abb. 6 sind die Ergebnisse der Modellrechnungen zusammen mit den Meßergebnissen und ihren Fehlern für die Periode $T = 40$ s dargestellt.

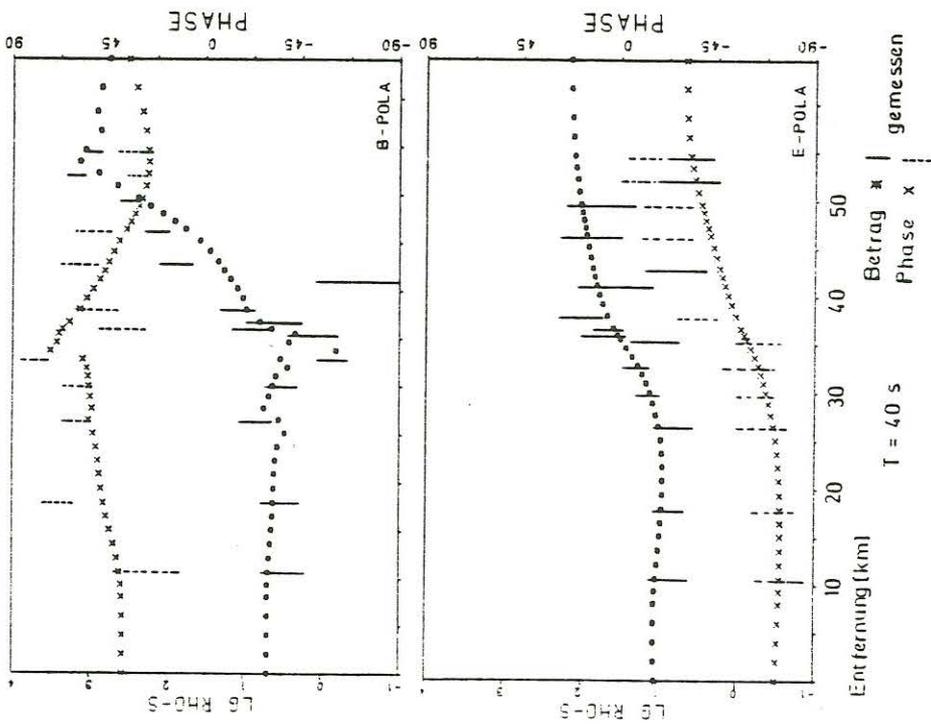
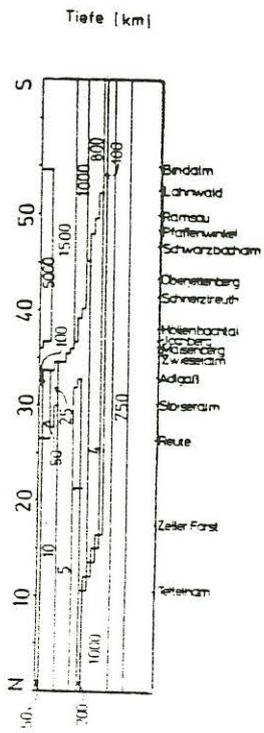
MODELL 1

Abb. 6



$T = 40$ s

MODELL 1



$T = 40$ s

Betrag x | gemessen
Phase o |

Literatur:

- Angenheister, G.; A. Berktold; K.-P. Sengpiel : Die zeitlichen Variationen des erdelektrischen Feldes, beobachtet längs eines NS-Profiles vom Kristallin des Bayerischen Waldes durch das Alpenvorland bis zum Nordrand der Alpen. Bayer. Akad. d. Wiss., Math.-Naturw. Klasse, Sonderdruck 7, München 1965
- Berktold, A.; M. Beblo; K. Kemmerle : On the Distribution of the Conductivity below the Eastern Alps. Geol. Rdsch. 65, S.715-732, Stuttgart 1976
- Dittus, H. : Magnetotellurik in Südostbayern. Diplomarb. am Inst. f. A. u. A. Geophysik d. Univ. München, 1983
- Freimoser, M. : Zur Stratigraphie, Sedimentpetrographie und Faziesentwicklung der Südostbayerischen Flyschzone und des Ultrahelvetikums zwischen Bergen, Obb. und Salzburg. Geologica Bavarica 66, S. 7-91, München 1973
- Herm, D. : Das Lattengebirge - geologisch gesehen. Jb. Verein zum Schutz der Bergwelt, S. 107-126, München 1981
- Kemmerle, K. : Magnetotellurik am Alpennordrand mit Diskussion der lokalen Effekte und Darstellung einer Einzeleffektauswertung. Diss. Fak. f. Geow. Univ. München, 1977
- Teufel, U. : Erdmagnetische Tiefensondierung am Alpennordrand. Diplomarb. am Inst. f. A. u. A. Geophysik d. Univ. München, 1983