

U. Teufel, H. Dittus, A. Berktold

Audio-Magnetotellurik, Magnetotellurik und erdmagnetische Tiefensondierung im mittleren und nördlichen Schwarzwald

Zwischen Oktober 1984 und Oktober 1985 wurde während dreier Meßkampagnen an insgesamt 24 Orten im mittleren und nördlichen Schwarzwald nach der Methode der Magnetotellurik (MT) und der Erdmagnetischen Tiefensondierung (ETS) sowie an 40 Orten auch nach der Methode der Audio-Magnetotellurik (AMT) gemessen. An 19 der 24 Meßorte der MT/ETS wurde auch AMT gemessen.

Für die Magnetotellurik wurden an den meisten Meßorten Induktionsspulen-Magnetometer (Periodenbereich ca. 6 - 1000 s), an einigen Orten auch Fluxgate-Magnetometer (Periodenbereich ca. 40 - 10000 s) eingesetzt. (Passive) Audio-Magnetotellurik wie auch (Audio-) Erdmagnetische Tiefensondierung wurde im Bereich von etwa 1000 Hz bis zu 20 s durchgeführt.

Abb. 1 zeigt die Verteilung der Meßorte, außerdem ist die Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes (s.u.) eingezeichnet. Im Zielgebiet Kinzigtal wurde zusätzlich zu den 5 MT/ETS-Meßorten an 15 weiteren Meßorten mit AMT gemessen. Diese Meßorte sind in Abb. 1 nicht eingezeichnet. Außer den MT/ETS-Meßorten im Zielgebiet Kinzigtal sind die Meßorte des Rheingraben-parallel-profiles (Bad Peterstal-Griesbach-Pforzheim) sowie des Rheingraben-senkrechten Profiles (Freudenstadt-Hechingen) eingetragen. Die 3 zusätzlichen AMT-Meßorte im südlichen Schwarzwald sind nicht gesondert in einer Karte dargestellt worden. Diese AMT-Messungen wurden an einigen der Orte durchgeführt, an denen zuvor die Arbeitsgruppe aus Göttingen registriert hatte.

Die Ergebnisse der Magnetotellurik

In Abb. 1 ist die Vorzugsrichtung von E für Perioden größer als etwa 100 s eingetragen. Im Nordschwarzwald ist die Vorzugsrichtung von E an den meisten Meßorten etwa NW-SE. Zu den Meßorten im mittleren Schwarzwald dreht sie mehr in Richtung EW. Für den Südschwarzwald erhält die Arbeitsgruppe in Göttingen ebenfalls eine Polarisation des induzierten elektrischen Feldes etwa in Richtung NW-SE. Dies ist also für den größeren Teil des Schwarzwaldes typisch.

Der Polarisationsgrad des elektrischen Feldes nimmt mit zunehmender Entfernung vom Rheingraben nicht ab, obwohl dies bei einer zweidimensionalen Leitfähigkeits-Struktur zu erwarten wäre.

In den Abb. 2 u. 3 sind für die beiden Meßorte GIE u. KUL die Kurven des scheinbaren spezifischen Widerstandes ( $\rho$ -S) und der Phasendifferenz als Funktion der Periode, sowie die aus der Komponente senkrecht zur Vorzugsrichtung berechneten  $\phi$ -z-Kurven dargestellt. In Abb. 4 sind die  $\rho$ -S-Kurven für zwei weitere Meßorte (BIM u. JUN) dargestellt. Die  $\rho$ -S-Kurven wurden in einem nach der Methode der minimalen-maximalen Kohärenz optimierten Koordinatensystem berechnet. Unabhängig von der Vorzugsrichtung von E hat die zur elektrischen Feldkomponente in Vorzugsrichtung maximal kohärente magnetische Feldkomponente an allen Orten dieselbe Richtung, nämlich die Richtung NE-SW. Die Ursache dafür ist nicht bekannt.

Wegen der Rotation des elektrischen Feldes im Schwarzwald um 20 Grad von der Rheingraben-Richtung im Uhrzeigersinn ist die Auswertung in einem zu mittleren Streichen des Rheingrabens parallelen Koordinatensystem nicht günstig. Der Fehler bei der

Tiefenbestimmung der Leitfähigkeit scheint geringer zu sein, wenn man diese Tiefenverteilung aus der elektrischen Feldkomponente senkrecht zur Vorzugsrichtung von E und aus der dazu maximal kohärenten magnetischen Feldkomponente bestimmt (nur angenähert die TE-Mode bezüglich des Rheingrabens). In den Abb. 2 - 4 sind dies jeweils die RHO-S-Kurven mit den kleineren Werten und die dazu gehörenden Phasenkurven. Die Phasen bei Perioden von 10-40 s liegen zwischen 70° und 85°. Zu längeren Perioden konvergieren die Phasen etwa gegen 45 Grad. Die hohen Phasen bei Perioden um 10-40 s sind ein Hinweis auf die Existenz einer Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit unter einer Zone geringerer Leitfähigkeit. Aus der Phase und deren Periodenabhängigkeit läßt sich jedoch nur die Existenz dieser Zone erhöhter Leitfähigkeit ablesen. Dagegen läßt sich über die Tiefe bis zur Zone erhöhter Leitfähigkeit keine Aussage machen. Dazu braucht man noch die Informationen der dazu gehörenden RHO-S-Kurve. Man erkennt, daß - passend zur Periodenabhängigkeit der Phasenkurve - der scheinbare spezifische Widerstand von Perioden um 10 s zu Perioden um 100 s abnimmt, um dann bis zu Perioden um 1000 s etwa konstant zu bleiben.

Trotz der zum Teil geringen Streuung der RHO-S - und Phasenwerte ist die Tiefe bis zur Oberfläche der Zone erhöhter Leitfähigkeit nicht sehr sicher zu bestimmen, da die Amplitude der elektrischen Felder an den einzelnen Meßorten verfälscht sein kann ("Gleichstrom-Verzerrung"). Dies hat unbekannt Verschiebungen der RHO-S-Kurven in Richtung der Ordinate zur Folge. Bei der Interpretation erhält man dadurch für die einzelnen Meßorte scheinbar unterschiedliche Tiefenlagen für die Zone erhöhter Leitfähigkeit. Die errechneten Teufenwerte variieren zwischen 10 und 17 km (s. Abb. 2 u. 3). Genauer läßt sich die Tiefe bis zur Oberfläche der Zone erhöhter Leitfähigkeit derzeit nicht angeben.

Um u.a. den Einfluß der seitlich gelegenen Anomalie des Rheingrabens auf die induzierten Felder im Schwarzwald zu verstehen, werden zweidimensionale Modelle berechnet. Die MT/ETS-Arbeitsgruppe in Göttingen hat solche Modellrechnungen für den südlichen Schwarzwald bereits durchgeführt. Das best angepaßte Modell kann den größeren Teil der Meßergebnisse erklären. Es kann jedoch z.B. nicht die starke Polarisierung des induzierten elektrischen Feldes im Schwarzwald erklären. Die Ursache dafür ist noch nicht bekannt.

Um die vermutete östliche Begrenzung der Zone erhöhter Leitfähigkeit zu finden, wurde auch entlang eines zum Rheingraben senkrechten Profils gemessen (Abb. 1). Es zeigte sich, daß die auf die Existenz der Zone erhöhter Leitfähigkeit hinweisende Periodenabhängigkeit der Phase nach Osten bis zur Station BIM beobachtet werden kann (s. Abb. 4). Erst am Ort JUN (Abb. 4) erhält man die für den Schwarzwald typische Periodenabhängigkeit der Phase nicht mehr. Die östliche Begrenzung der Zone erhöhter Leitfähigkeit unter dem Schwarzwald würde damit ca. 60 km östlich vom östlichen Rheingrabenrand liegen. Dieses vorläufige Ergebnis muß jedoch durch weitere Geländemessungen abgesichert werden.

Frühere Messungen der Göttinger Arbeitsgruppe für Meßorte im Schwäbischen Jura ergaben ebenfalls keinen Hinweis auf eine Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit in einer Tiefe von 10 - 17 km unter dem Schwäbischen Jura. Dies ist eines der Ergebnisse, weswegen wir eine östliche Begrenzung der unter dem Schwarzwald gefundenen Zone erhöhter Leitfähigkeit noch westlich des Schwäbischen Jura annehmen.



### Die Ergebnisse der Audio-Magnetotellurik

Die Geländemessungen der Audio-Magnetotellurik im Bereich des mittleren Kinzigtales waren schwierig auszuwerten. Die Konzentration von Industriebetrieben im Bereich Haslach - Hausach und die durch das Kinzigtal führende elektrifizierte Bahnstrecke verursachen starke Störströme, die nicht nur auf den Talbereich begrenzt sind. Insbesondere die Netzfrequenzen ( $16 \frac{2}{3}$  Hz und 50 Hz) sowie deren Harmonische zeigen sich in den Spektren der elektrischen und magnetischen Felder als markante Spitzen. Um diese starken technischen Störfelder möglichst gut eliminieren zu können, wurden Elektronik und Rechenprogramme der Audio-Magnetotellurik Apparatur immer weiter verbessert. Trotzdem sind die Meßdaten von der größeren Anzahl der Orte nicht genügend genau zu interpretieren.

Abb. 5 zeigt als Beispiel die RHO-S-Kurve für den Meßort HTZ (Hinterzarten in südlichen Schwarzwald). Die Werte des scheinbaren spezifischen Widerstandes betragen für den Frequenzbereich von 1 kHz - 1 Hz (entsprechend einer Eindringtiefe bei 1000 Ohmm von 5 - 10 km) an allen Orten im Bereich des mittleren Kinzigtales 500 bis 2000 Ohmm. Es wurden keine Hinweise auf Zonen stark erhöhter elektrischer Leitfähigkeit in diesem Tiefenbereich gefunden. Die induzierten elektrischen Felder sind in dem genannten Frequenzbereich nur schwach polarisiert; dies deutet nicht auf kräftige zweidimensionale Strukturen hin. Die Ergebnisse der AMT sind für alle Meßorte im Bereich Haslach - Hausach ähnlich. Deutliche Änderungen des Kurventyps vom einen Meßort zum anderen wurden nicht beobachtet.

Die aus den Ergebnissen der Magnetotellurik abgeleitete Zone erhöhter Leitfähigkeit in 10 - 17 km Tiefe läßt sich aus den Ergebnissen der AMT für Perioden T größer als 1 s nicht zweifelsfrei nachweisen. Dies kann zum einen aus der deutlichen Abnahme des Signal/Noise-Verhältnisses in diesem Periodenbereich erklärt werden - bedingt durch die Abnahme der Amplitude des induzierenden natürlichen erdmagnetischen Feldes bei gleichzeitig hohem Noisepegel. Zum anderen wird die Existenz der Zone erhöhter Leitfähigkeit aus der elektrischen Feldkomponente senkrecht zur Vorzugsrichtung - einer Komponente mit kleinerer Amplitude - abgeleitet. Diese Situation sowie die im mittleren und nördlichen Schwarzwald besonders starken Störströme erschweren eine optimale Interpretation.

Mit der Audiomagnetotellurik-Apparatur läßt sich auch erdmagnetische Tiefensondierung durchführen. Länge und Richtung von Real- und Imaginärpfeilen schließt für die meisten Meßorte gut an die Ergebnisse der erdmagnetischen Tiefensondierung im längerperiodischen Bereich an. Im Frequenzbereich zwischen 10-100 Hz werden für die meisten Orte im nördlichen Schwarzwald kleine Induktionspfeile beobachtet. Länge und Richtung der Induktionspfeile für Frequenzen größer als 100 Hz sind für viele Meßorte von lokalen Störströmen bestimmt.

Die Audiomagnetotellurik-Apparatur selbst ist inzwischen voll einsatzfähig. Dies haben viele Geländemessungen in anderen Gebieten Deutschlands gezeigt. Dabei konnten gerade im Periodenbereich von 1 - 10 s brauchbare und konsistente Ergebnisse erhalten werden. Als Beispiel wird die RHO-S-Kurve aus einem technisch weniger gestörten Meßgebiet gezeigt (Abb. 6), in dem sich eine periodenabhängige Aufspaltung der RHO-S-Kurven in dem genannten Periodenbereich ergibt. Dies wird durch eine nahezu zweidimensionale, laterale Leitfähigkeitsgrenze hervorgerufen, die sich ebenso aus den Eigenschaften der Induktionspfeile ableiten läßt. Die Ergebnisse mit den beiden Methoden sind bis zu Perioden von 10 s zueinander konsistent.



### Die Ergebnisse der erdmagnetischen Tiefensondierung

In Abb. 7 sind die Realpfeile für Perioden um 500 s eingezeichnet. Man erkennt, daß die Realpfeile für Perioden um 500 s etwa in Richtung SE zeigen. Die Länge der Realpfeile ändert sich entlang des Rheingraben-parallelen Profils kaum. Die Ergebnisse der erdmagnetischen Tiefensondierung im Schwarzwald lassen sich im wesentlichen als das Fernfeld der in den gutleitfähigen Sedimenten des Rheingrabens induzierten Ströme interpretieren. Nur die Richtung der Realpfeile paßt an den meisten Meßorten nicht ganz zu dieser Vorstellung. Die Realpfeile sind, ähnlich wie die Vorzugsrichtung von E, an diesen Meßorten um ca. 20 Grad von der Rheingraben-senkrechten Richtung im Uhrzeigersinn gedreht. Die Ursache für die SE-Richtung der Realpfeile ist nicht sicher bekannt. Ursache könnte zum einen die Existenz einer Streichrichtung oder Anisotropie der Leitfähigkeit unter dem Schwarzwald sein. Die Richtung der Realpfeile könnte jedoch zum anderen auch aus der Überlagerung des Fernfeldes vom Rheingraben und des Fernfeldes einer nördlich vom Schwarzwald gelegenen leitfähigen Struktur (bei evt. erhöhter elektrischer Leitfähigkeit im Saxothuringikum) herrühren. Die im nördlichen Schwarzwald vermutete Grenze Moldanubikum/Saxothuringikum macht sich kaum, im Gegensatz zum Süddeutschen Dreieck, als lateraler Gradient der integrierten elektrischen Leitfähigkeit bemerkbar. Dies kann man unter der Annahme verstehen, daß sich die unter dem Schwarzwald gefundene Zone erhöhter Leitfähigkeit entlang des Rheingrabens nach Norden fortsetzt.

Aus der Berechnung der Übertragungsfunktionen zueinander kohärenter magnetischer Horizontalkomponenten als Funktion der Periode der Variationen erkennt man, daß sich die horizontalen Magnetfeld-Komponenten, ebenso wie die Länge der Realpfeile, im Schwarzwald entlang des Rheingrabens nicht merklich ändern. Im Schwarzwald existiert somit entlang des Rheingrabens keine deutliche laterale Änderung der integrierten elektrischen Leitfähigkeit.

Der untere Teil der Abb. 8 zeigt drei ähnliche zweidimensionale Modelle. Sie sollen die Verteilung der Leitfähigkeit im Bereich des östlichen Rheingrabens und des Schwarzwaldes beschreiben. Unter dem östlichen Rheingraben und unter dem Schwarzwald wurde in einer Tiefe von 12-15 km eine Zone erhöhter Leitfähigkeit mit einer integrierten Leitfähigkeit von 650 S angenommen. Die östliche Begrenzung der Zone erhöhter Leitfähigkeit ist bei den 3 Teil-Modellen A, B und C unterschiedlich. Bei Modell A endet die gutleitfähige Zone ca. 50 km östlich des östlichen Rheingrabenrandes. Im oberen Teil der Abbildung ist für die Periode von 500 s der Betrag der Übertragungsfunktion zwischen der Vertikalkomponente Z und der zu ihr maximal kohärenten Horizontalkomponente H (Betrag  $Z/H$ ) entlang eines Profils senkrecht zum mittleren Streichen des Rheingrabens aufgetragen. Man erkennt, daß für Modell A im Bereich der östlichen Begrenzung der gutleitfähigen Zone die Größe  $Z/H$  in lateraler Richtung nahezu konstant ist. Dieses Ergebnis stimmt mit den Ergebnissen der Geländemessungen überein. Bei den Modellen B und C, wo die gutleitfähige Zone unter dem Schwarzwald entweder fehlt oder nach Osten unendlich ausgedehnt ist, nimmt die Größe  $Z/H$  nach Osten stetig ab. Dies wurde bei den Geländemessungen nicht beobachtet. Die in EW-Richtung relativ konstante Größe  $Z/H$  (bzw. relativ konstante Länge der Induktionspfeile bei Perioden um 500 s) wird als ein weiterer Hinweis dafür angesehen, daß die unter dem Schwarzwald gefundene Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit ca. 60 km östlich des östlichen



Rheingrabenrandes auskeilt.

Die großräumig korrelierten technischen Störungen im Nord-Schwarzwald

Die Geländemessungen haben gezeigt, daß die Amplitude der technischen Störströme vom Südschwarzwald zum Nordschwarzwald deutlich zunimmt. Wie zu erwarten war, haben die technischen Störströme vor allem in den dicht besiedelten Tälern wie dem Kinzigtal große Amplituden. Besonders stark stören die 16 2/3 Hz der Bundesbahn. Diese technischen Störungen sind allerdings meist lokal begrenzt.

Dagegen registriert man im Nord-Schwarzwald im MT-Periodenbereich sehr großräumig korrelierte technische Störungen. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 9 gezeigt. Die beiden Registrierintervalle wurden zeitgleich an den beiden ca. 25 km voneinander entfernten Orten KES und ROM gemessen. Dabei wird besonders auf den technisch bedingten Effekt in den elektrischen Feldkomponenten im Anfangsteil der Registrierintervalle aufmerksam gemacht. Der Effekt ist in den elektrischen Feldkomponenten der beiden Meßorte recht gut zu korrelieren. Er hat an der nördlicheren Station KES deutlich größere Amplituden als an der südlicheren Station ROM (s. den jeweiligen Amplituden-Maßstab am Beginn der Intervalle). Der Effekt dieser technischen Störungen läßt sich sogar noch an dem Meßort GIE ca. 60 km südlich von KES nachweisen, allerdings ist die Amplitude in GIE um einen Faktor 50 - 100 geringer als in KES.

Der Effekt ist jedoch auch in den 3 Magnetfeld-Komponenten (vor allem an der nördlicheren Station KES) zu erkennen. Der Effekt wurde an allen Meßorten im nördlichen Profilverteil in jeder Nacht und immer ca. zur selben Zeit registriert. Die Registrierungen des Magnetfeldes an den 6 nördlichen Orten (HEI-KES) zeigen zusätzlich technisch bedingte Impulse, die die Ergebnisse der MT/ETS für Perioden kleiner als ca. 20 s deutlich verfälschen.

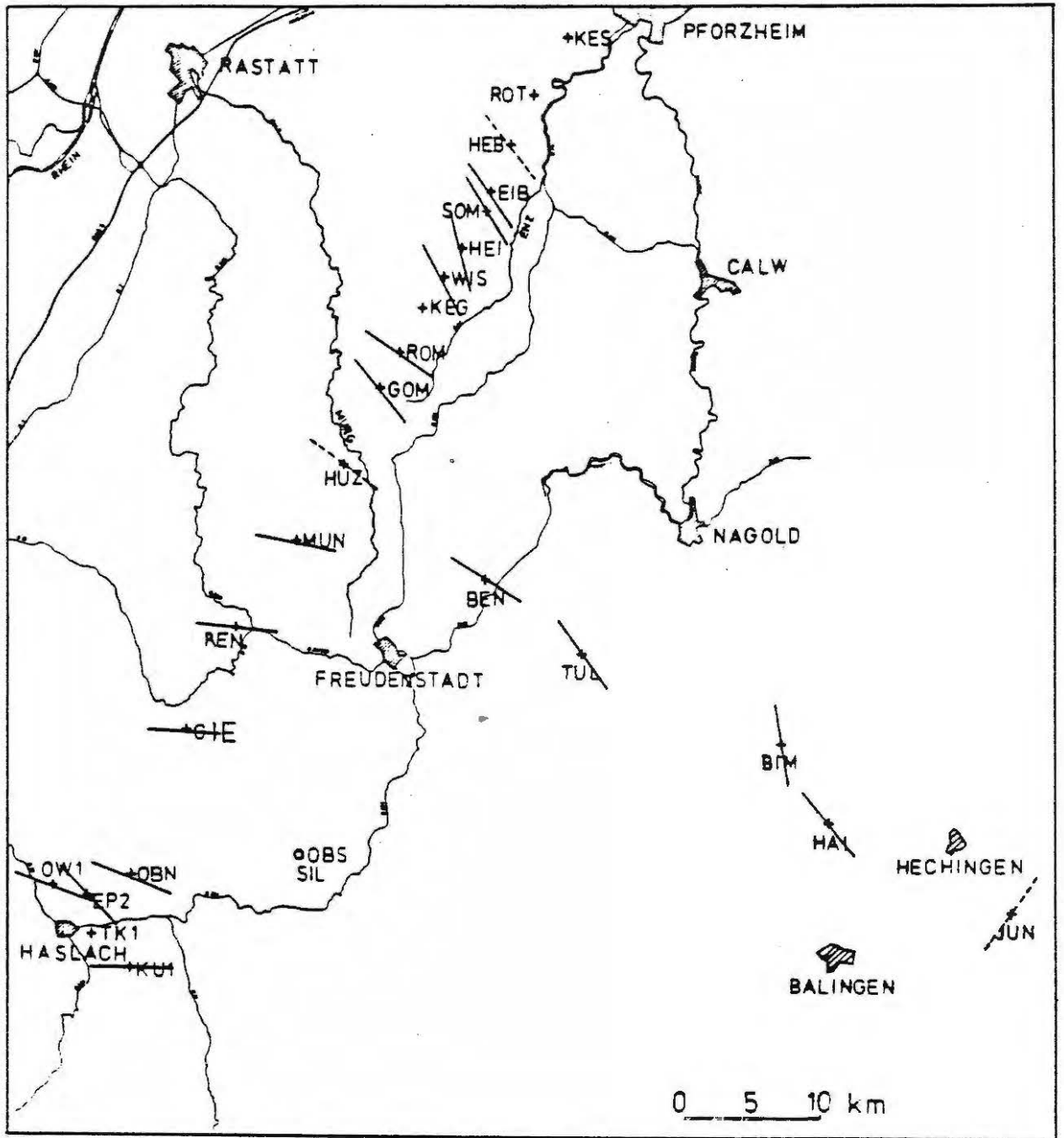
Literatur:

M.L. Richards, U. Schmucker, E. Steveling: Entzerrung der Impedanzkurven von magnetotellurischen Messungen in der Schwäbischen Alb. Protokoll über das Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung in Neustadt/Weinstraße, März 1982.

U. Schmucker, B. Tezkan: Ergebnisse der Magnetotellurik und der erdmagnetischen Tiefensondierung im Süd-Schwarzwald, Institut für Geophysik der Universität Göttingen, interner Bericht, 1985.

Abb. 1

Lage der Meßorte



Vorzugsrichtung des erdelektrischen Feldes

T= 100 s

Rho-Stern - Z-Stern Darstellung der Rhos und Phasenkurve  
am Meßort KUI

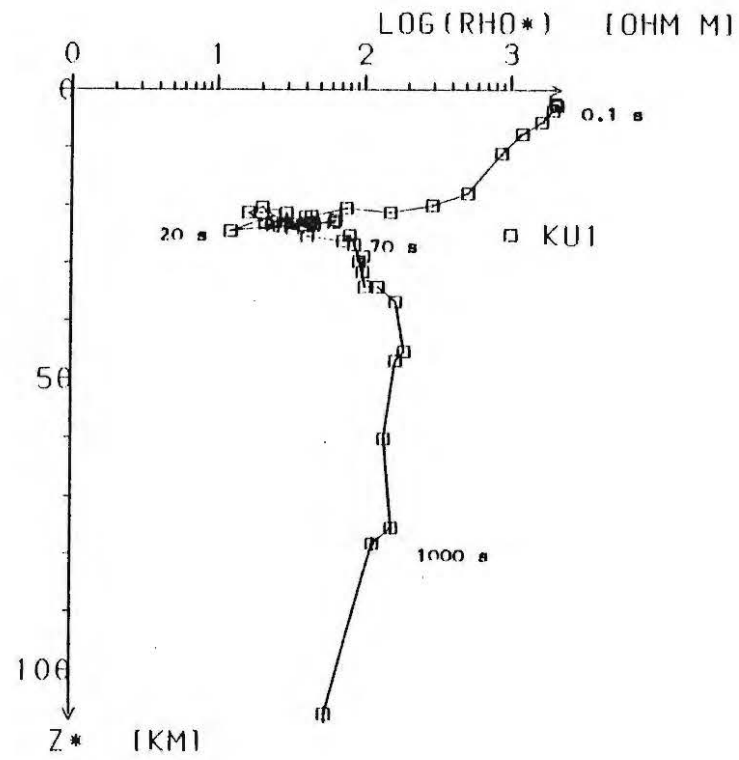
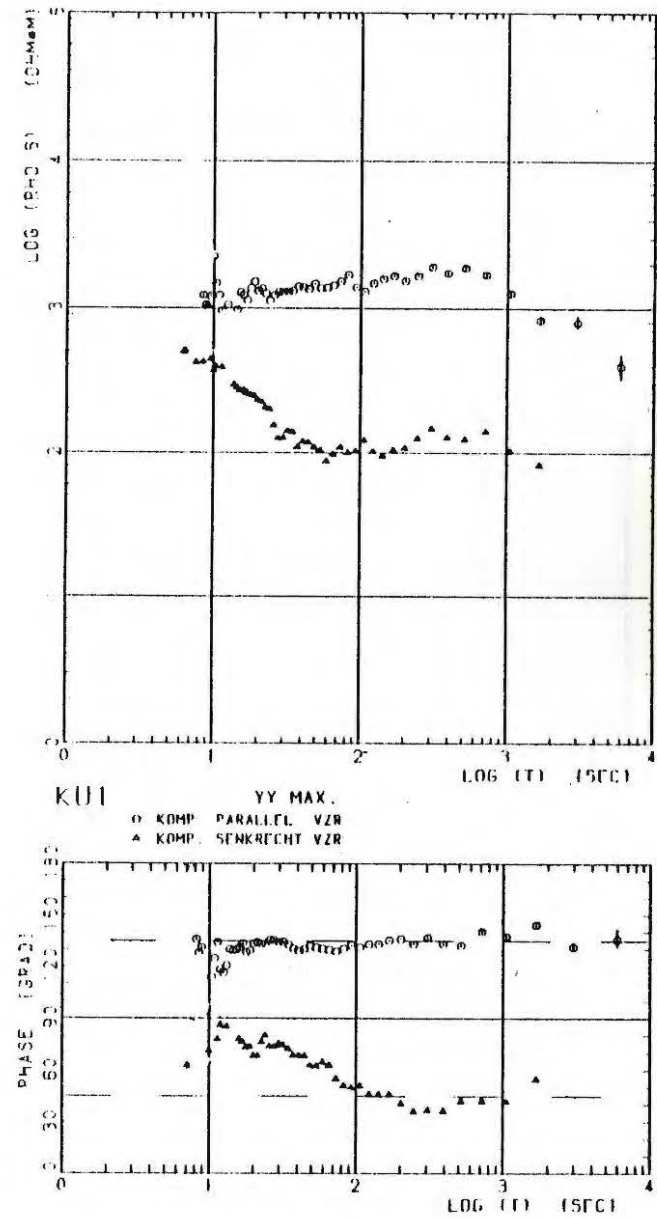


Abb. 2

Rhos- und Phasenkurve



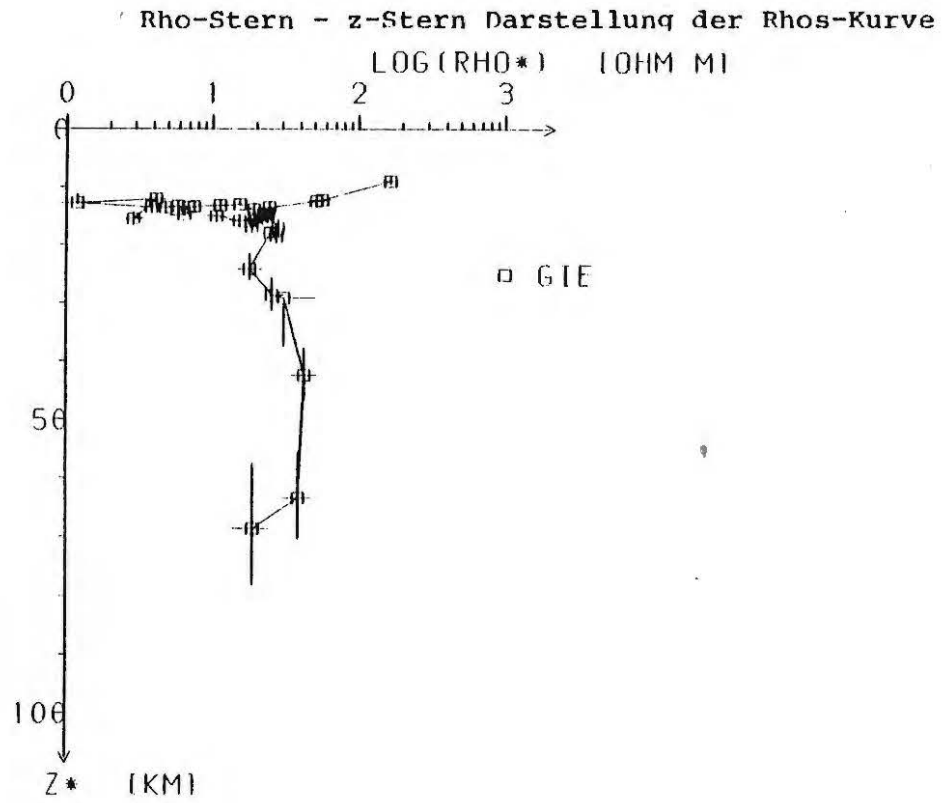
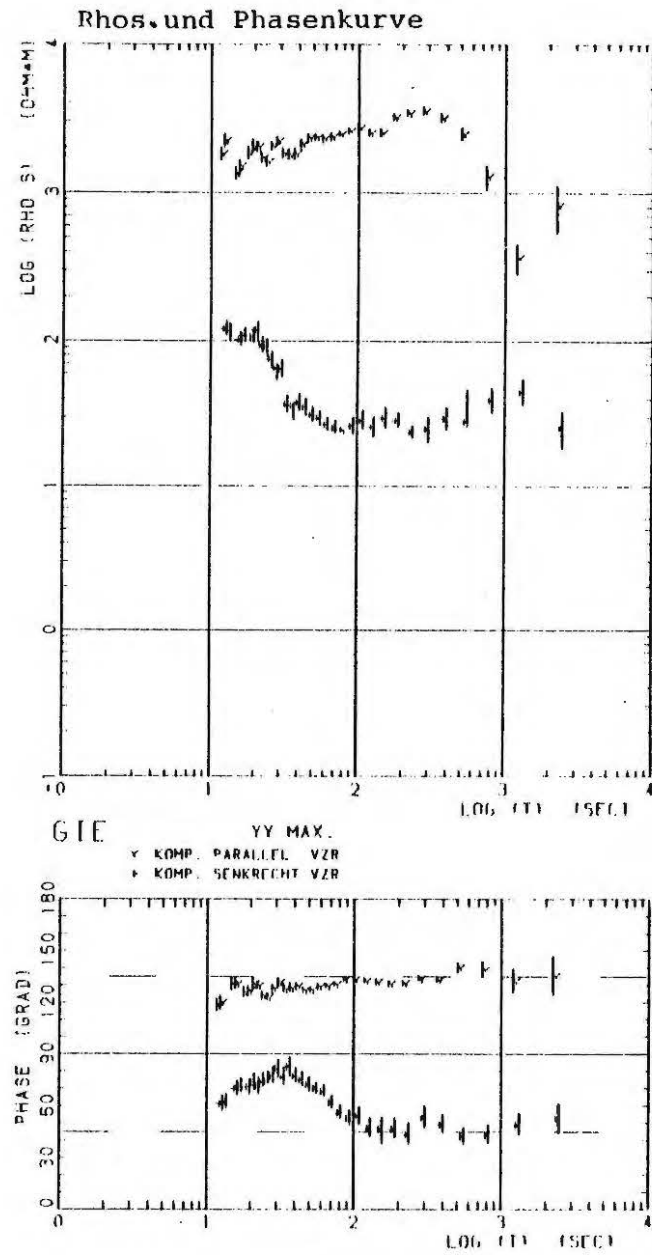
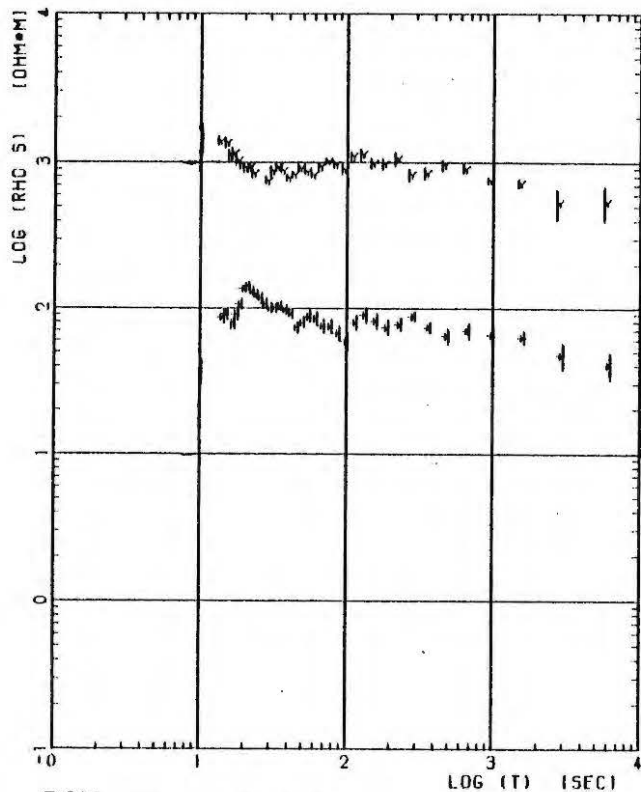


Abb. 3

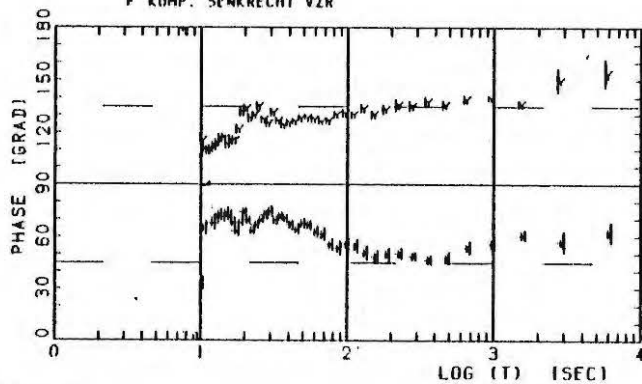




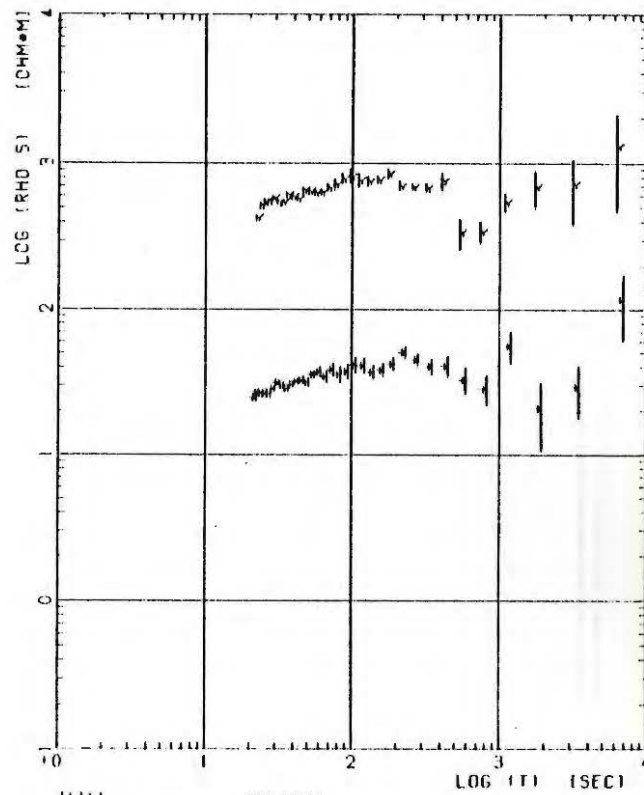
Rhos- und Phasenkurve



BIM YY MAX.  
 Y KOMP. PARALLEL VZR  
 F KOMP. SENKRECHT VZR



Rhos- und Phasenkurve



JUN YY MAX.  
 Y KOMP. PARALLEL VZR  
 F KOMP. SENKRECHT VZR

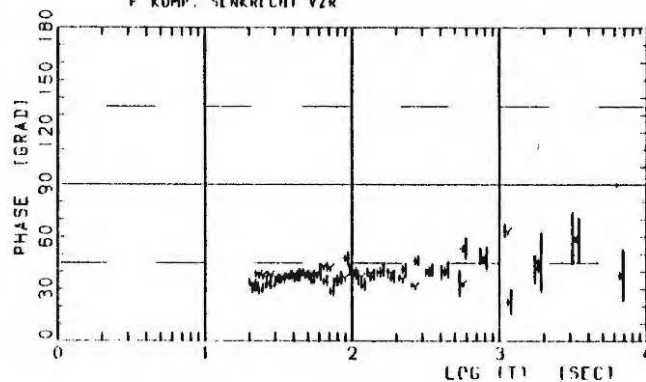
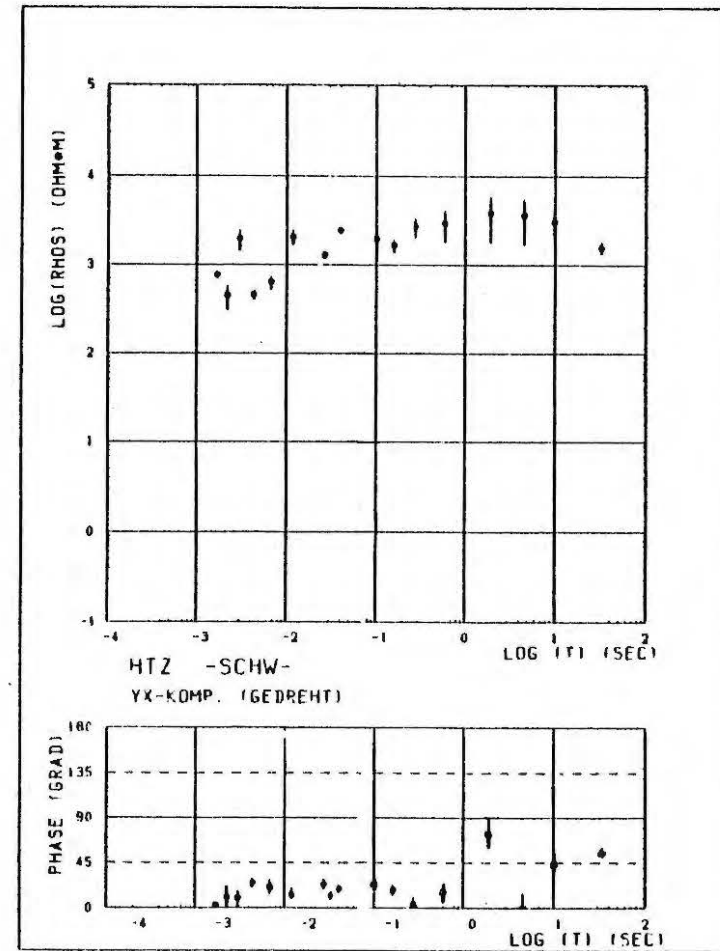
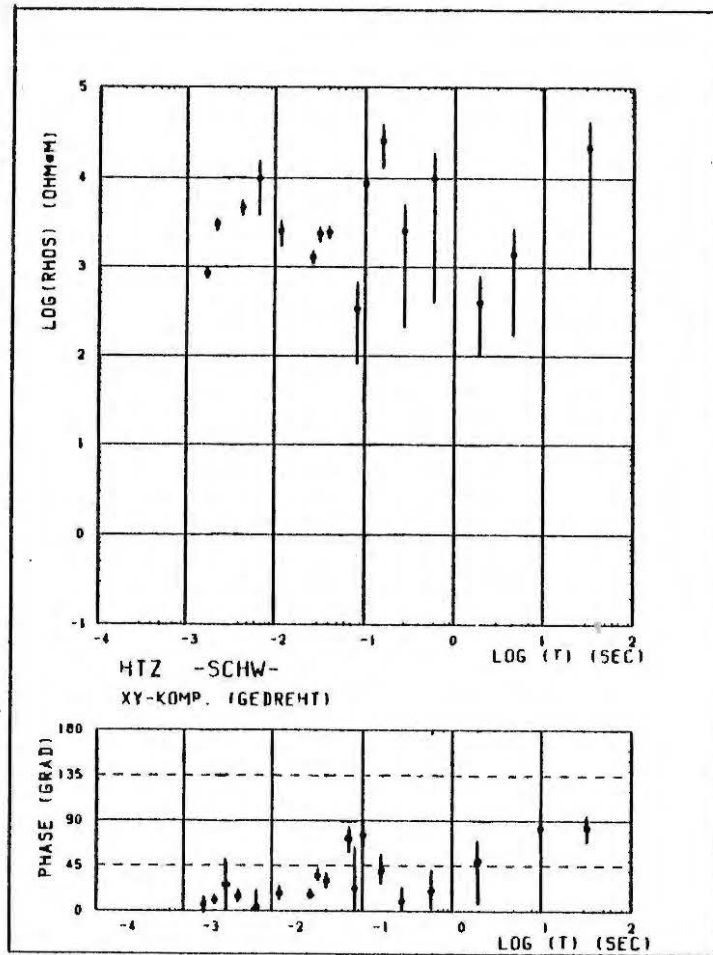


Abb. 4



AMT-Rhos- und Phasenkurve aus dem Südschwarzwald

AMT-Rhos- und Phasenkurve aus dem Südschwarzwald

Abb. 5



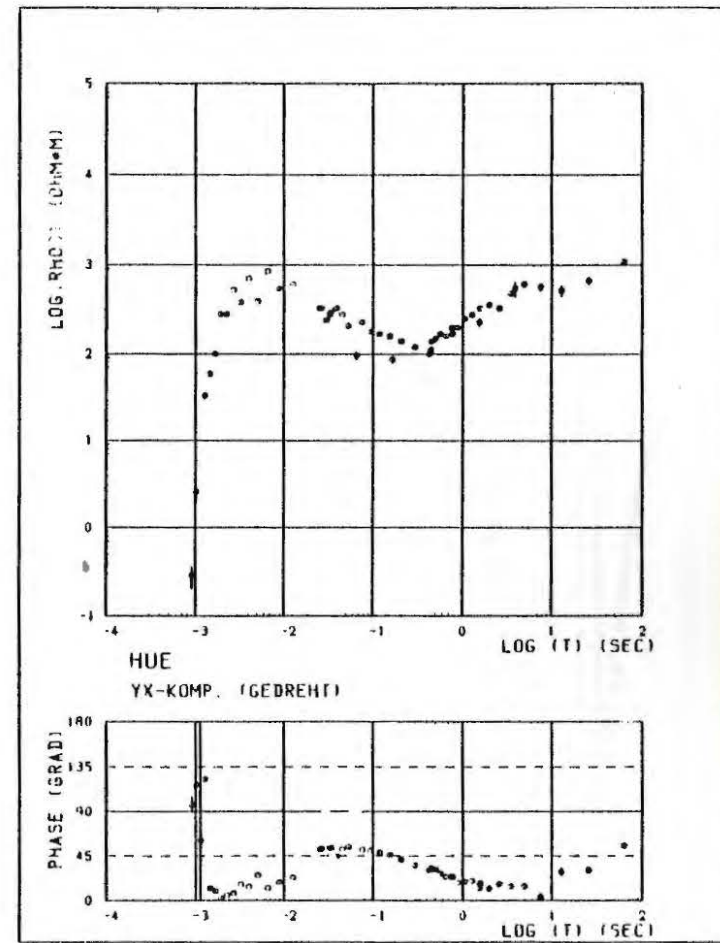
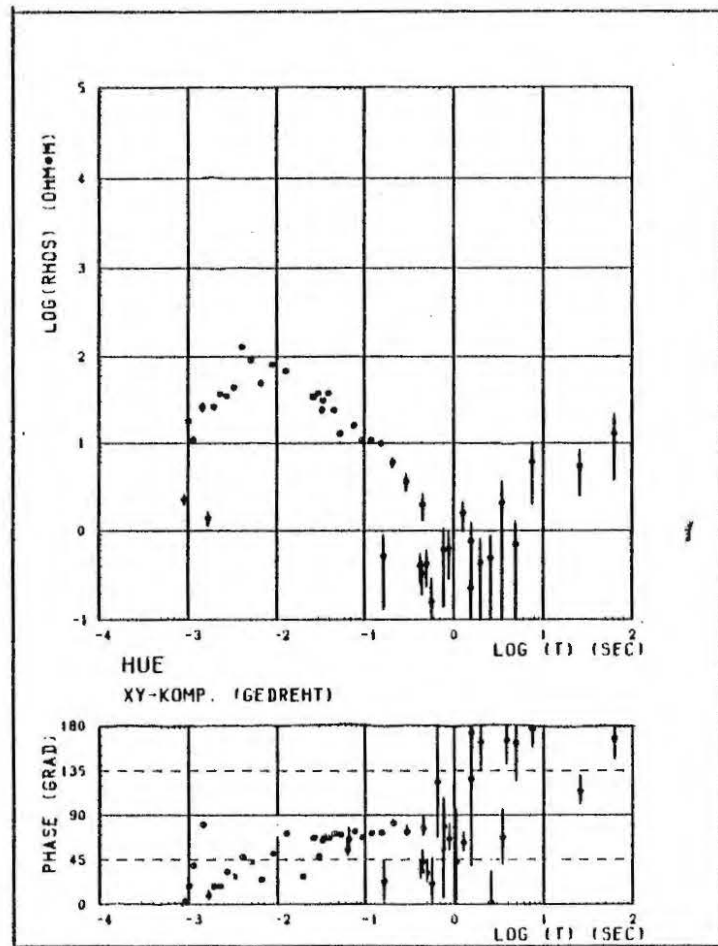
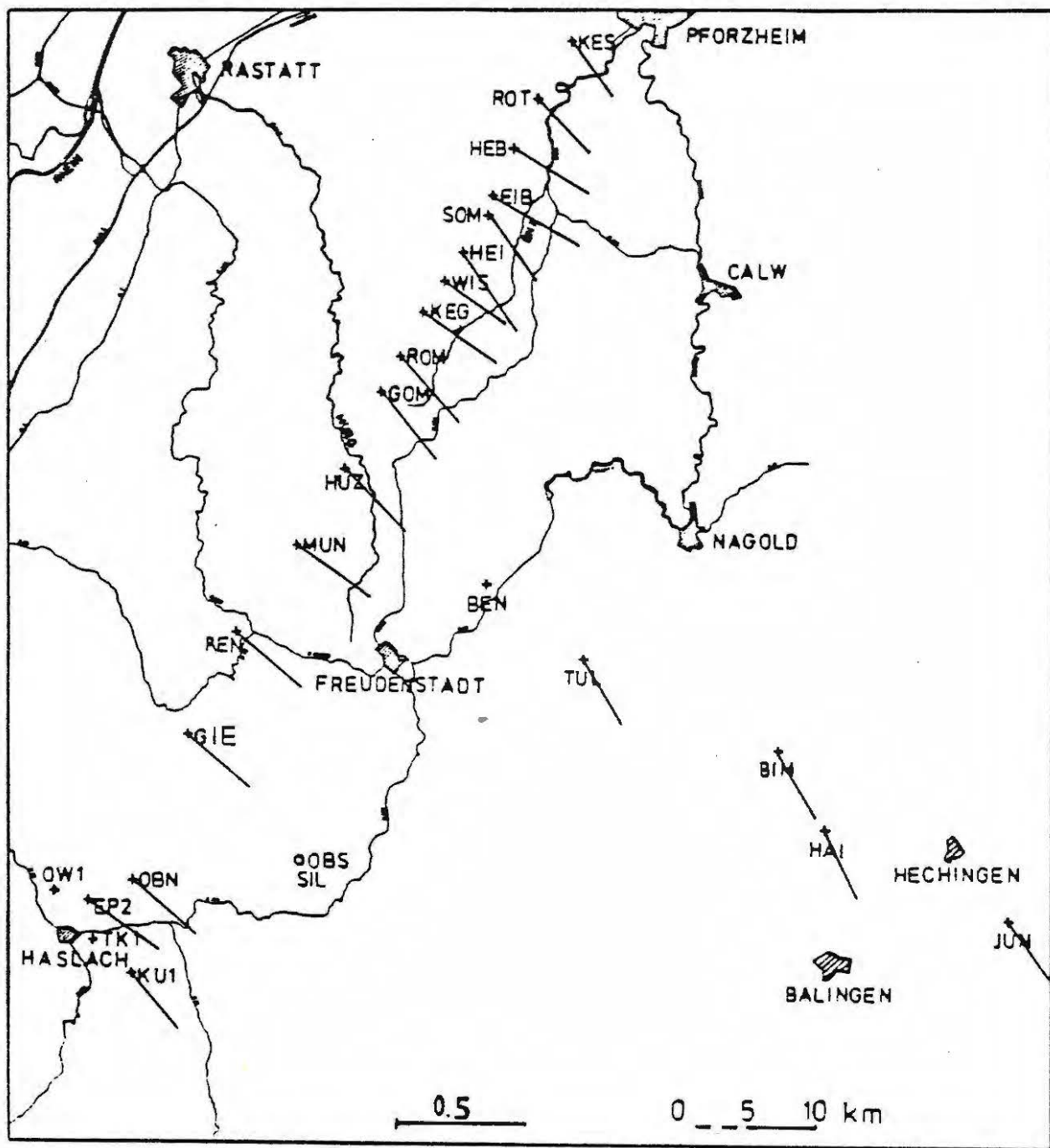


Abb. 6  
Rhos- und Phasenkurven aus einem technisch weniger gestörten Gebiet

Abb. 7



Realpfeile

T = 500 s



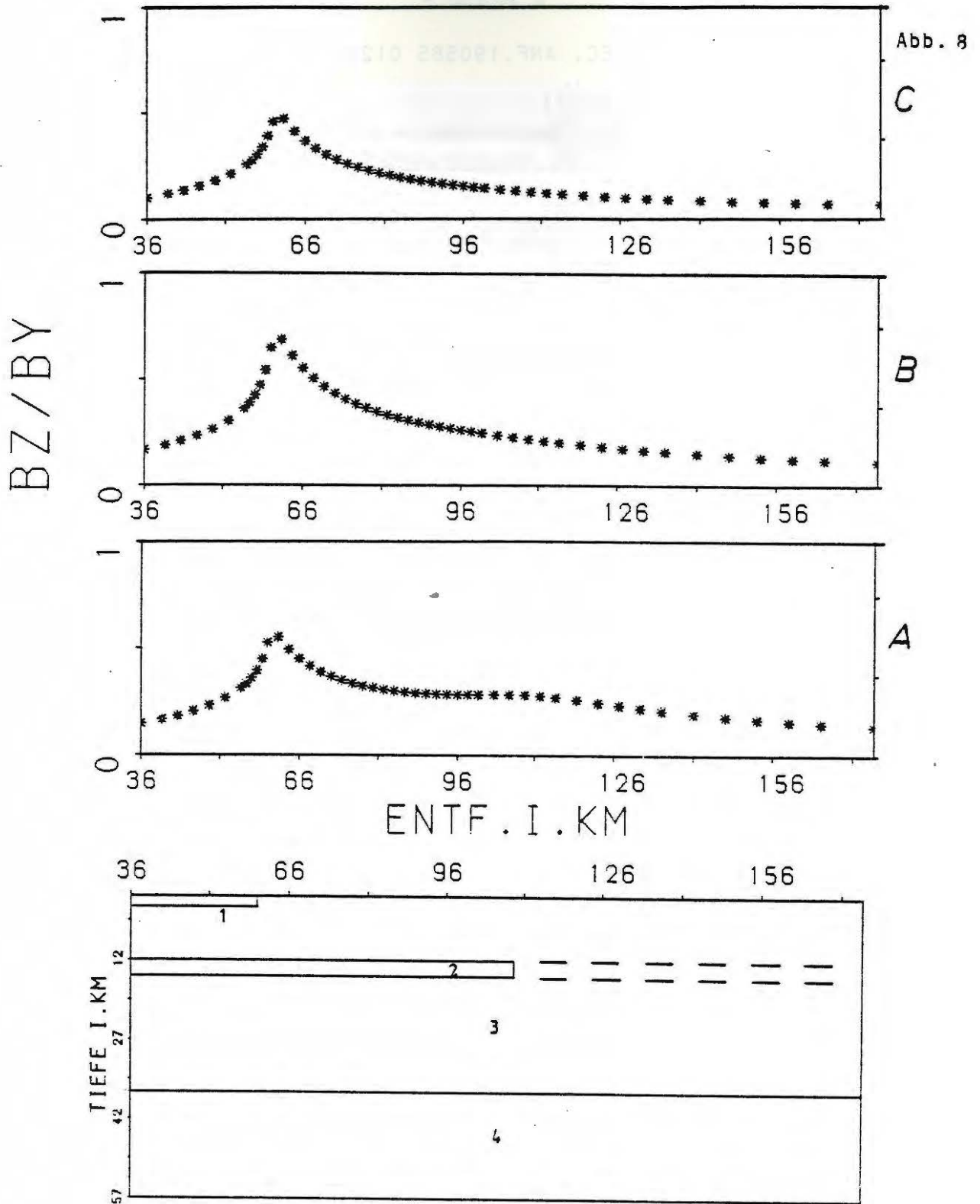


Abb. 8

$T = 500 \text{ s}$

1 = 1.33 OHMM, 2 = 4.6 OHMM, 3 = 1000 OHMM, 4 = 15 OHMM

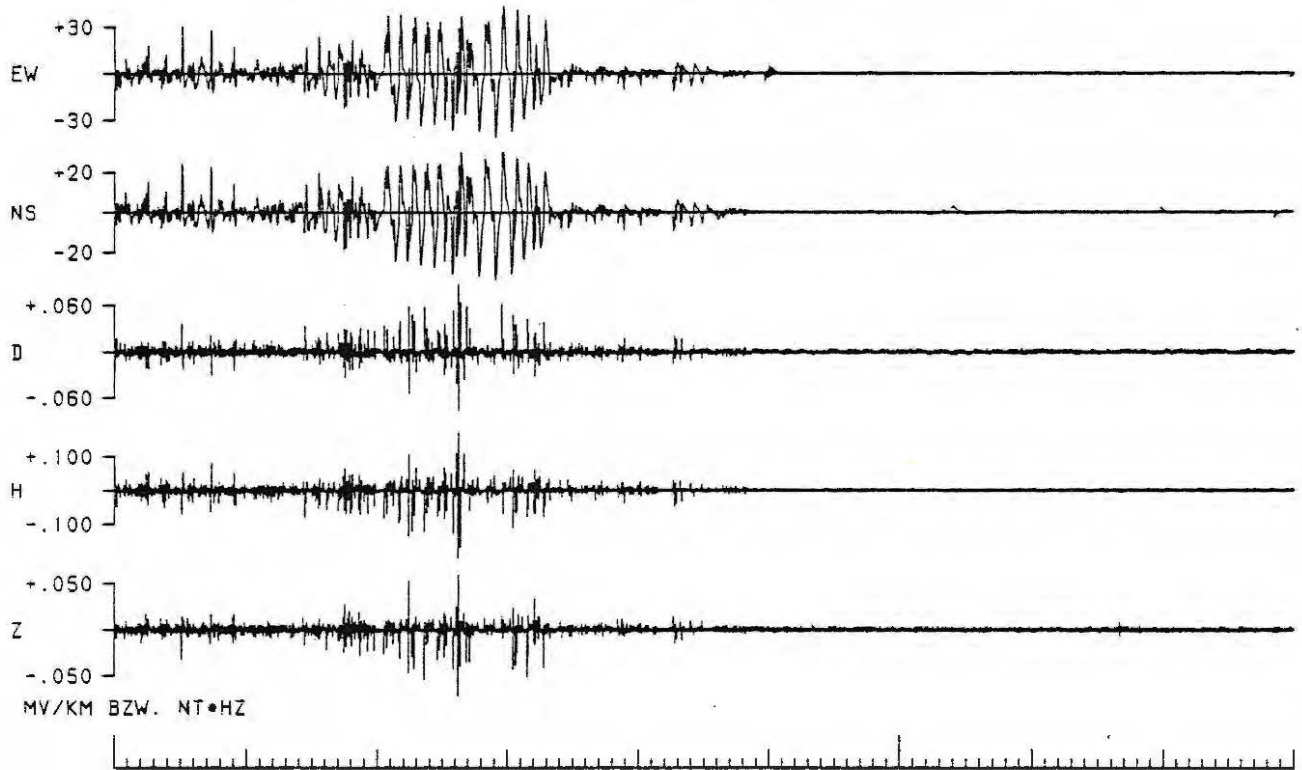
Mod. A : gutleitfähige Zonen endet bei Entf. 109 km

Mod. B : ohne gutleitfähige Zone

Mod. C : gutleitfähige Zone ist unendlich ausgedehnt

Ergebnisse von Modellrechnungen (Betrag Z/H)

KES07 IL 5400 SEC. ANF.190585 012001 SCAN= 1 SEC



Registrierbeispiel von großräumig korrelierten technischen Störungen

ROM01 IL 5400 SEC. ANF.190585 012002 SCAN= 2 SEC

