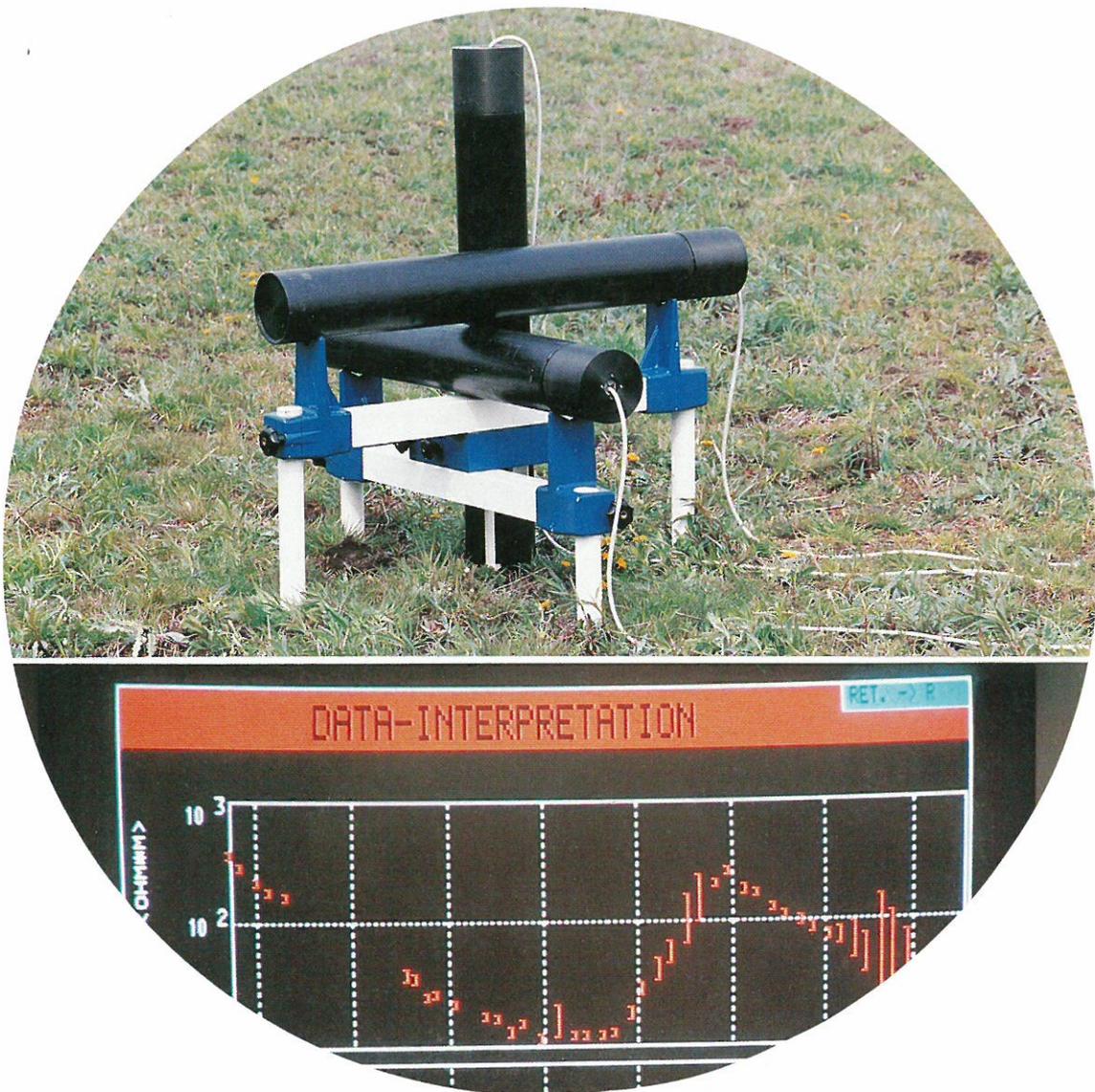


KTB REPORT 88-3

Ergebnisse geowissenschaftlicher Umfelduntersuchungen
Elektromagnetische Tiefensondierungen 1987



Herausgegeben von der
Projektleitung Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland
im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung

K. Bram

Redaktion: Dr. K. Bram

Druck: A. Bernecker, 3508 Melsungen

Titelbild: Orthogonale Induktionsspulen-Magnetometer zur Messung der drei Komponenten H_x , H_y und H_z des erdmagnetischen Feldes sowie rechnergestützte Datenauswertung (Verlauf des scheinbaren elektrischen Widerstandes, Station 19, KTB-Oberpfalz).

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (Förderkennzeichen RG 8604) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Anschrift des Herausgebers: Projektleitung KTB im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Postfach 51 03 53, D-3000 Hannover 51. Telefon: (05 11) 6 43-26 75.

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
	VORWORT.....	5
1	AUFGABENSTELLUNG.....	11
2	FELDMESSUNGEN.....	13
	2.1 Zeitrahmen.....	13
	2.2 Meßlokationen.....	13
	2.3 Gerätebeschreibung.....	14
	2.4 Kalibrierung der Meßanlagen.....	15
	2.4.1 Kalibrierung der Magneto- tellurik-Meßanlagen.....	15
	2.4.2 Kalibrierung der Hochfrequenz- Meßanlage für AMT und CSAMT.....	15
3	DARSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE.....	19
	3.1 Art der Darstellung.....	19
	3.2 MT-ECRE.....	22
	3.3 AMT.....	44
	3.4 CSAMT.....	54
	3.5 Diskussion der Meßergebnisse.....	73
4	AUFBEREITUNG DER DATEN.....	74
	4.1 Einführung in die Methoden Magneto- tellurik und Erdmagnetische Tiefen- sondierung.....	74
	4.2 Aussagen zur Qualität der magnetischen Übertragungsfunktionen.....	75
5	MODELLRECHNUNG.....	77
	5.1 Theoretischer Teil.....	77
	5.2 Modelle für den inneren Bereich in räumlicher Darstellung.....	79
	5.3 1-D-Modelle und Darstellung der Induktionspfeile auf den Kreuzprofilen....	82
	5.3.1 Modelle aus AMT-Daten.....	82
	5.3.2 Darstellung der Induktions- pfeile im AMT-Bereich.....	82
	5.3.3 Zusammenfassung AMT und CSAMT.....	85
	5.3.4 Modelle aus MT-Daten.....	89
	5.3.5 Profildarstellungen.....	89
	5.3.6 Diskussion der 1-D-Inversions- modelle der E-Polarisation.....	89

	Seite	
5.3.7	Diskussion der 1-D-Inversionsmodelle der H-Polarisation.....	93
5.3.8	Darstellung der Induktionspfeile im MT-Frequenzbereich.....	94
5.4	2-D-ECRE-Modellrechnung.....	101
5.4.1	Die Eingabemodelle und die Modellentwicklung.....	101
5.4.2	2-D-Endmodelle.....	102
5.4.3	Das räumliche Endmodell.....	108
6	ABSCHLUSSBETRACHTUNG.....	111
7	ANHANG.....	112
7.1	Koordinaten der Meßpunkte und Registrierzeiten.....	112
7.2	Datenweitergabe und Datenformat.....	113

VORWORT

Die Bewertung der Ergebnisse der Vorerkundungsphase des Kontinentalen Tiefbohrprogrammes der Bundesrepublik Deutschland (KTB) für das Gebiet Oberpfalz (Seeheim II, 1986) zeigten deutlich, daß dieser Teil der zentraleuropäischen variszischen Kruste sehr heterogen aufgebaut ist. Die vielfältigen Ziele des KTB erfordern es deshalb, das abgeleitete erste grobe strukturelle Bild der Kruste im Bereich des Bohrpunktes Oberpfalz durch weitere, gezielte geowissenschaftliche Untersuchungen von der Oberfläche her sukzessive zu verbessern und zu verfeinern.

Erst eine klare und im geologisch-tektonischen sowie geophysikalischen Sinne verständliche räumliche Zuordnung interner Strukturelemente und physikalischer Parameter ermöglichen die sinnvolle Korrelation mit bzw. stellen den wechselseitigen Bezug zu den Ergebnissen der Bohrlochmessungen sowie den Bohrkernuntersuchungen her.

Ein unmittelbarer Vergleich der großmaßstäblich erfaßten 1-dimensionalen Informationsquelle Bohrloch mit den Ergebnissen von Oberflächenuntersuchungen läßt sich nur in einem Nahbereich ausführen. Es ist aber zu erwarten, daß auch in größerer Tiefe aufgefahrene geologische Einheiten und Strukturen mit bekannten, in entsprechender Entfernung an der Erdoberfläche anzutreffenden Einheiten und Strukturen korrelieren.

Die gezielten geowissenschaftlichen Umfelduntersuchungen werden sich deshalb einerseits auf einen inneren Bereich, die sogenannte Kernfläche (Abb. 1) konzentrieren, wobei dieser Begriff synonym für den dazugehörigen Raum mit einer Teufenerstreckung in der Größenordnung der geplanten Bohrtiefe steht. Die geowissenschaftliche Erkundung der Kernfläche hat schwerpunktmäßig routinemäßigen Charakter, vergleichbar mit der Aufgabenstellung des Feldlabors. Sie bildet die Grundlage für weitergehende Forschung.

Der zweite Komplex von Umfelduntersuchungen wird sich auf einen äußeren Bereich, das weitere Umfeld, erstrecken. Sie beziehen sich auf die Stellung der KTB-Lokation Oberpfalz innerhalb der variszischen Kruste Mitteleuropas einschließlich ihrer vor- und nachvariszischen Entwicklung. Der Erkundung des weiteren Umfeldes kommt deshalb eine besondere wissenschaftliche Bedeutung zu.

Als pragmatischer Weg zur Erkundung der Kernfläche bietet sich ein etappenweises, an der Bohrlokation beginnendes Vorgehen an. Die jeweils erhaltenen einzelnen Ergebnisse werden interdisziplinär diskutiert und bewertet und weitere Untersuchungen sich neu ergebenden Fragestellungen angepaßt.

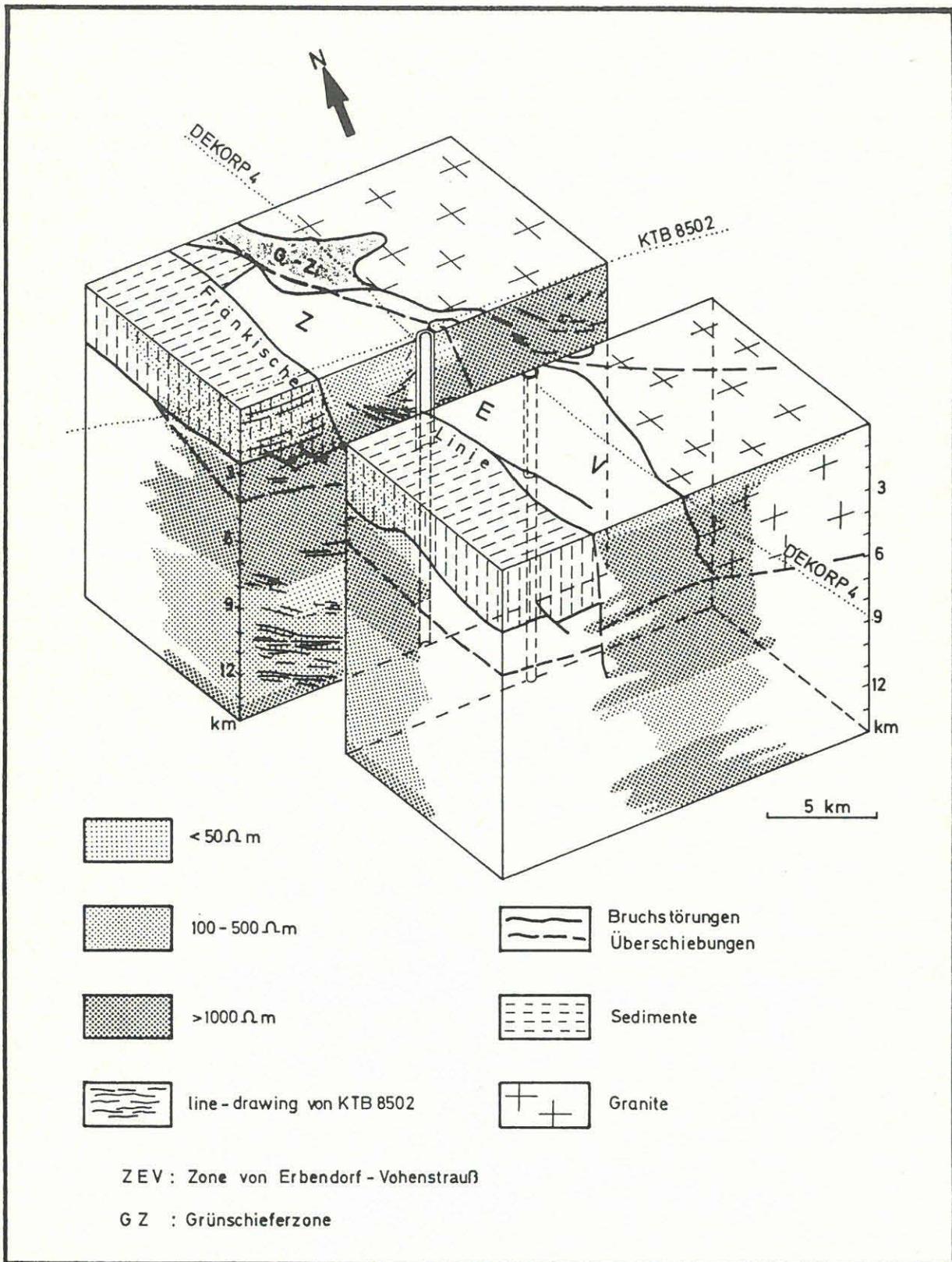


Abb. 1: Blockbild des von der Kernfläche aus zu untersuchenden Raumes mit der aus bisherigen Messungen abgeleiteten Verteilung des elektrischen Widerstandes sowie seismischen Reflektoren.

Bram 4/88

KTB

Der vorliegende Bericht informiert über Ergebnisse 1987 durchgeführter magnetotellurischer Messungen innerhalb der Kernfläche. Die Messungen dienten einerseits der Datensicherung im Bereich des Bohrplatzes, andererseits bilden sie ein Gerüst, dessen weitere Verdichtung zu einem möglichst umfassenden Bild der räumlichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit führen soll.

Die Messungen wurden im Auftrag der Projektleitung, Fachbereich Geowissenschaften, in Abstimmung mit dem DFG-Schwerpunkt KTB von der Firma GEOMETRA, Braunschweig, ausgeführt.

Die von Geräteeinflüssen korrigierten Daten sind auf Magnetband gespeichert. Sie können über die Projektleitung KTB bei der Firma GEOMETRA abgerufen werden.

Dem Empfänger erwächst mit der Entgegennahme der Daten die Pflicht, regelmäßig der Projektleitung bzw. in den ARGEn über den Fortgang der Auswertungsarbeiten zu berichten. Erstveröffentlichungen sind in KTB-Reports vorzusehen. In allen Veröffentlichungen ist auf die Herkunft der Daten zu verweisen.

* Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektleitung KTB
Fachbereich Geowissenschaften
Stilleweg 2
3000 Hannover 51

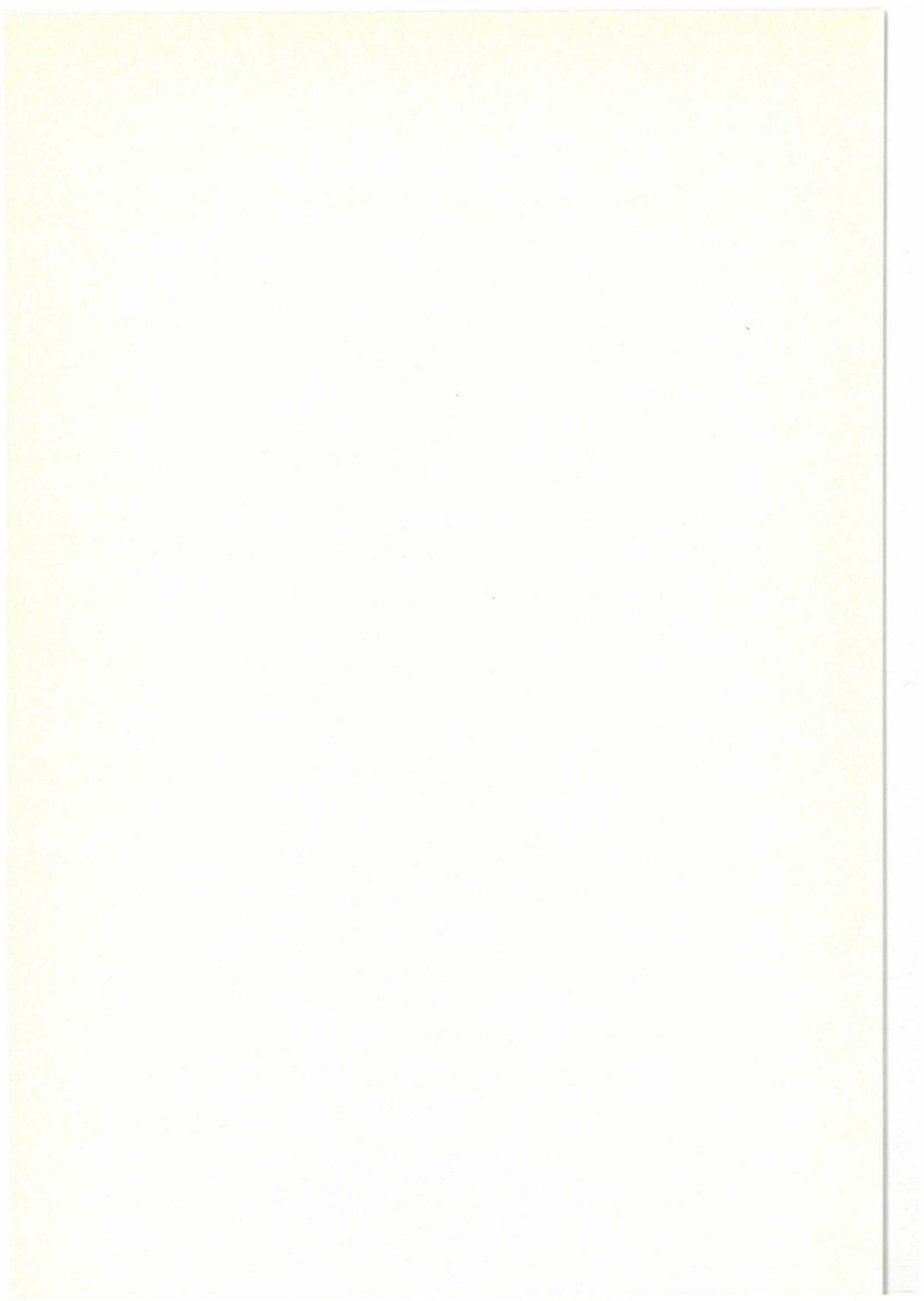
Tel.: 0511/6 43-26 75
Fax : 0511/6 43-26 86



Elektromagnetische Tiefensondierung
KTB

Uwe Jensen
Dr. Rüdiger Karmann
Jürgen Scharberth

Abschlußbericht Februar 1988



1 AUFGABENSTELLUNG

Im Rahmen des "Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland" (KTB) wurden elektromagnetische Tiefensondierungen im Bereich des KTB-Bohrgeländes bei Windischeschenbach nach einem festgelegten Meßpunktraster durchgeführt.

Die Abbildung 1.1 zeigt die Meßlokationen.

An jeweils 17 Meßpunkten wurden Messungen mit der Audio-Magnetotellurik (AMT, 64 Hz - 16 384 Hz) und der aktiven Audio-Magnetotellurik (CSAMT, 1 Hz - 8 000 Hz) durchgeführt.

An 9 Meßpunkten und 1 Referenzpunkt kam das Verfahren der Magnetotellurik (MT-ECRE, Frequenzbereich 512 s - 4 Hz) zum Einsatz.

Angaben zur Durchführung der Messungen, zur Meßstatistik sowie eine Beurteilung der Datenqualität können den Kapiteln 2 und 3 entnommen werden.

Die Kapitel 4 und 5 sind der Auswertung gewidmet. Kapitel 4 behandelt die Berechnung der magnetotellurischen und magnetischen Übertragungsfunktionen. Im Kapitel 5 wird die Modellrechnung ausführlich beschrieben.

Ziel ist es, ein Widerstandstiefenprofil über einen Tiefenbereich von 100 m bis 30 km zu modellieren. Folgende Arbeitsschritte waren hierzu erforderlich:

- 1-D-Modellrechnungen der AMT und CSAMT-Daten für einen Oberflächenbereich von 600 m x 600 m und einer Aussagetiefe von bis zu 1,5 km (innerer Bereich)
- 1-D-Modellrechnungen auf Kreuzprofilen (s. Abb. 1.1) für einen oberflächennahen Tiefenbereich (bis 1,5 km) und einen Bereich bis in große Tiefen (bis 200 km)
- Auswertung der magnetischen Übertragungsfunktionen (Induktionspfeile)
- 2-D-ECRE-Modellrechnung für den Bereich 1,5 - 50 km Tiefe

Kapitel 6 gibt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Im Kapitel 7 findet man die Koordinaten der Meßlokationen und Hinweise zur Weitergabe der Daten.

*-----
* ECRE = Electrical Conductivity Reference Exploration

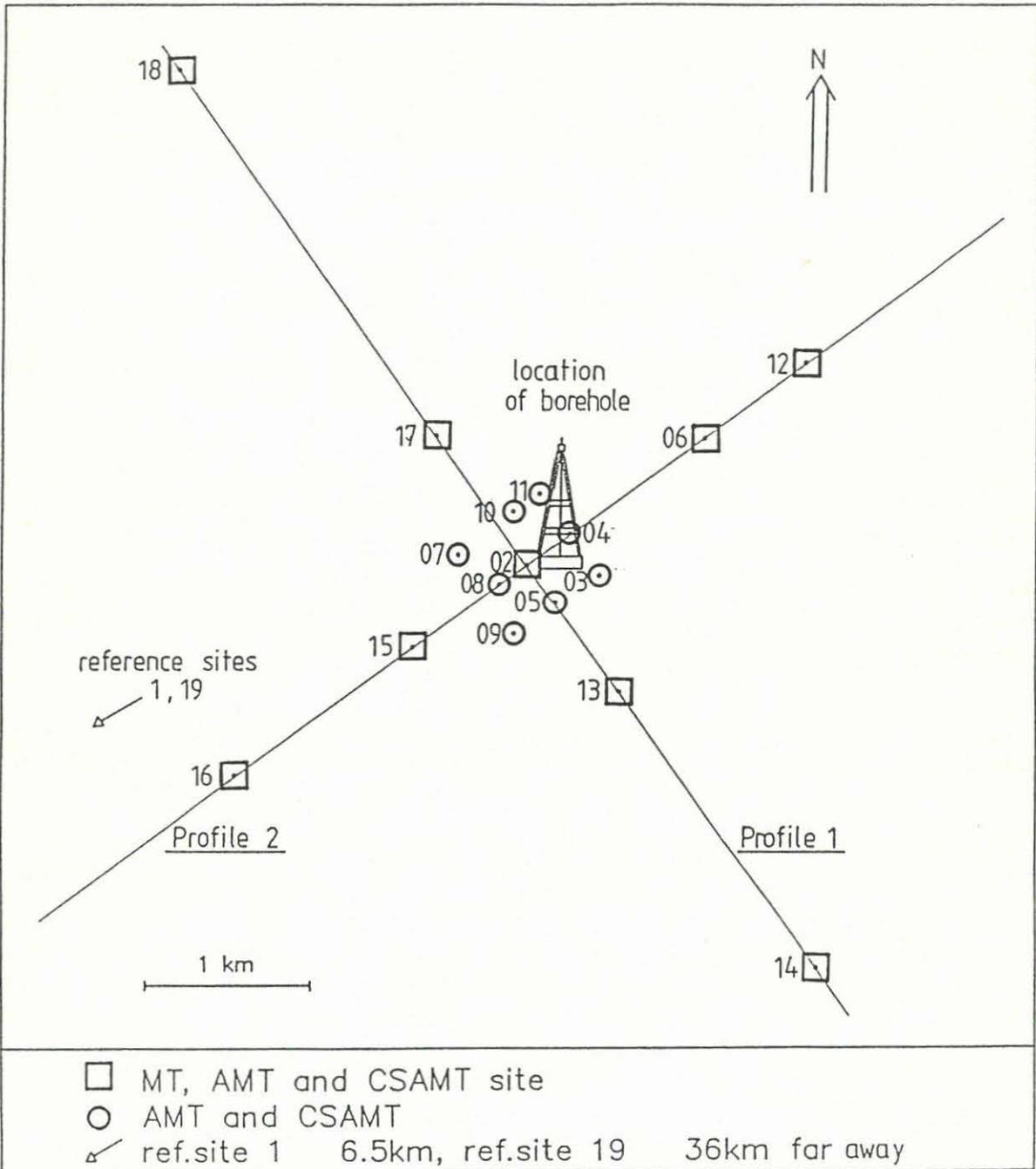


Abb. 1.1: Übersichtskarte der Meßlokationen



2 FELDMESSUNGEN

2.1 Zeitrahmen

Die Messungen erstreckten sich über eine Erkundungsphase vom 15.03. bis 27.03.1987 sowie eine Hauptphase vom 21.04. bis 30.05.1987. Eine Nachmessung an 3 MT-Stationen wurde im Zeitraum 04.06. bis 10.07.1987 durchgeführt.

2.2 Meßlokationen

Auftragsgemäß wurden CSAMT und AMT-Messungen an 17 Meßlokationen durchgeführt. Zusätzlich erschienen dem Auftragnehmer AMT-Messungen an den MT-Referenzpunkten 1 und 19 sowie eine CSAMT-Messung am Referenzpunkt 1 sinnvoll.

An 9 MT-Stationen wurde mit parallel laufender Referenzstation registriert.

Die Gauß-Krüger-Koordinaten der Stationen können dem Anhang 7.1 entnommen werden.

Von dem vorgegebenen Meßpunktraster wurde in Absprache mit der Projektleitung an folgenden Punkten abgewichen:

Nr. der Station	Begründung
10	Steilhang, dichtes Unterholz
08	Straßenbau
06	technische Störungen durch Ortschaft Naabdemenreuth, Hochspannungsleitung
14	technische Störungen durch Ortschaft Windischeschenbach, Hochspannungsleitung
18	technische Störungen durch Ortschaft Krummennaab

2.3 Gerätebeschreibung

Die Meßkampagne wurde mit 2 unterschiedlichen Meßsystemen durchgeführt. Für den langperiodischen Bereich von 512 - 0,25 s und den damit verbundenen langen Standzeiten kam das METRONIX Meßsystem MMS 02E zum Einsatz. Es besteht aus folgenden Bau-gruppen:

- Sensoren zur Aufnahme elektrischer und magnetischer Wechsel-felder
- analoge Signalaufbereitung und Analog/Digital-Wandlung im Datenlogger EMF 863
- portabler Datenspeicher mit Mutteruhr
- Auswerterechner MDS 861

Mit den Dataloggern können bis zu 1/2 Mbyte lange Zeitreihen im Feld registriert werden. Der portable Datenspeicher ermöglicht sowohl den Datentransport zum Auswerterechner als auch einen genauen Zeitabgleich zwischen parallel registrierenden Systemen.

Der Auswerterechner erlaubt die Verarbeitung der Zeitreihen bis hin zur 1-D-Modellrechnung im Basislager.

Die aktive und passive Messung im Frequenzbereich 6 Hz - 8 kHz (16 kHz) wurde mit dem METRONIX ECHTZEIT MT-Meßsystem durchgeführt. Mit dieser Apparatur können alle Auswerteschritte bis zur Berechnung eindimensionaler Leitfähigkeitsmodelle im Gelände durchgeführt werden.

Sie besteht aus folgenden Baugruppen:

- Sensoren zur Aufnahme elektrischer und magnetischer Wechsel-felder
- analoge Signalaufbereitung
- Analog/Digital-Wandler
- Doppelcomputersystem

Das Doppelcomputersystem enthält zwei identische Rechner, von denen der eine die am A/D-Wandler anfallenden Daten in "Echtzeit" verarbeitet und nach Anwendung von Datenbewertungskriterien geglättete und gestapelte Kreuz- und Powerspektren der gemessenen elektrischen und magnetischen Felder berechnet.

Mit dem zweiten Rechner können die aktuell anfallenden Spektren in magnetotellurische Größen umgerechnet werden.

Dafür sind Algorithmen zur Koordinatentransformation, bivariaten Ausgleichsberechnung, Berechnung von Schiefe-Kenngrößen etc. sowie ein 1-D-Inversionsprogramm implementiert. Alternativ können die an früheren Meßpunkten angefallenen Daten "offline" ausgewertet werden.

Das gesamte System ist in einem Meßfahrzeug (VW LT 28) untergebracht.

2.4 Kalibrierung der Meßanlagen

Die von der Firma GEOMETRA eingesetzten Meßanlagen werden generell einer sorgfältigen Kalibrierung unterworfen, um über den gesamten Meßfrequenzbereich ein Höchstmaß an Meßgenauigkeit zu erzielen. Je nach Meßfrequenzbereich werden unterschiedliche Kalibrierprozeduren durchgeführt:

2.4.1 Kalibrierung der Magnetotellurik-Meßanlagen

Für die Magnetotellurik-Messungen wurden automatisch registrierende Meßanlagen vom Typ MMS 02E eingesetzt. Die Messung erfolgte über einen Frequenzbereich von mindestens 512 s bis hin zu 4 Hz. Die Sensoren und die analoge Signalaufbereitung wurden vor Beginn der Messungen mit Hilfe des Solartron-Spectrumanalysators Typ 1172 dynamisch kalibriert. Die Induktionsspulenmagnetometer-Kalibrierung erfolgte in einer 5 m langen Zylinderspule, deren Spulenkonstante mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2\%$ vermessen wurde.

2.4.2 Kalibrierung der Hochfrequenz-Meßanlage für AMT und CSAMT

Für magnetotellurische Messungen im Frequenzbereich bis zu 16 kHz muß die Kalibrierung der Meßanlage aus folgenden Gründen unmittelbar vor Beginn der eigentlichen Messungen durchgeführt werden:

- a) Die Kapazität und der Widerstand der Sonden für die elektrische Feldmessung sind vom Untergrund abhängig. Der Einfluß der komplexen Sondenimpedanz ist normalerweise für Frequenzen ≥ 300 Hz nicht mehr zu vernachlässigen.
- b) Die komplexe Sondenimpedanz der E-Sonden kann sich bei Einsatz von Regen durch die zunehmende Feuchtigkeit erheblich ändern.
- c) Die Übertragungsfunktion der verwendeten Bandpassfilter ist geringfügigen Änderungen in Abhängigkeit von der Temperatur unterworfen.

Das Prinzip der Kalibrierung der Meßkanäle für E und H ist der Abb. 2.1 zu entnehmen.

Bei der E-Kalibrierung wird zunächst ein präziser Kalibrierstrom über einen Widerstand der Größe $10 \text{ k}\Omega$ eingespeist und die Übertragungsfunktion des gesamten Meßkanales gemessen. Anschließend wird der Kalibrierstrom auf die E-Sonden geschaltet und ebenfalls die Übertragungsfunktion gemessen. Aus beiden gemessenen Übertragungsfunktionen wird sodann die Gesamtübertragungsfunktion einschließlich der komplexen Sondenimpedanz berechnet und der Sondenwiderstand R und die Sondenkapazität C bestimmt.

Die Kalibrierung der Magnetfeldkanäle erfolgt mit Hilfe einer Kalibrierspule, die integraler Bestandteil eines jeden Magnetometers ist. Die Kalibrierspulenkonstante einschließlich der Elektronik des gesamten Kalibrierkanals wurde mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2 \%$ eingeeicht. Mit Hilfe des erzeugten Kalibrierermagnetfeldes wird die Übertragungsfunktion des H-Meßkanals bestimmt.

Die Gesamtkalibrierung für alle 5 Meßkanäle wird automatisch für jede Meßfrequenz mit einer Toleranz von $\pm 0,2 \%$ durchgeführt. Ein typisches Kalibrierergebnis für den Meßpunkt KTB 001 ist der Abb. 2.2 zu entnehmen. Man erkennt die Übertragungsfunktion der 5 Meßkanäle, dargestellt nach Betrag und Phase, und die berechneten Sondenwiderstände und Kapazitäten. Die gemessene Kapazität schließt die Kabelkapazität des Verbindungskabels der E-Sonde zur Meßanlage mit ein.

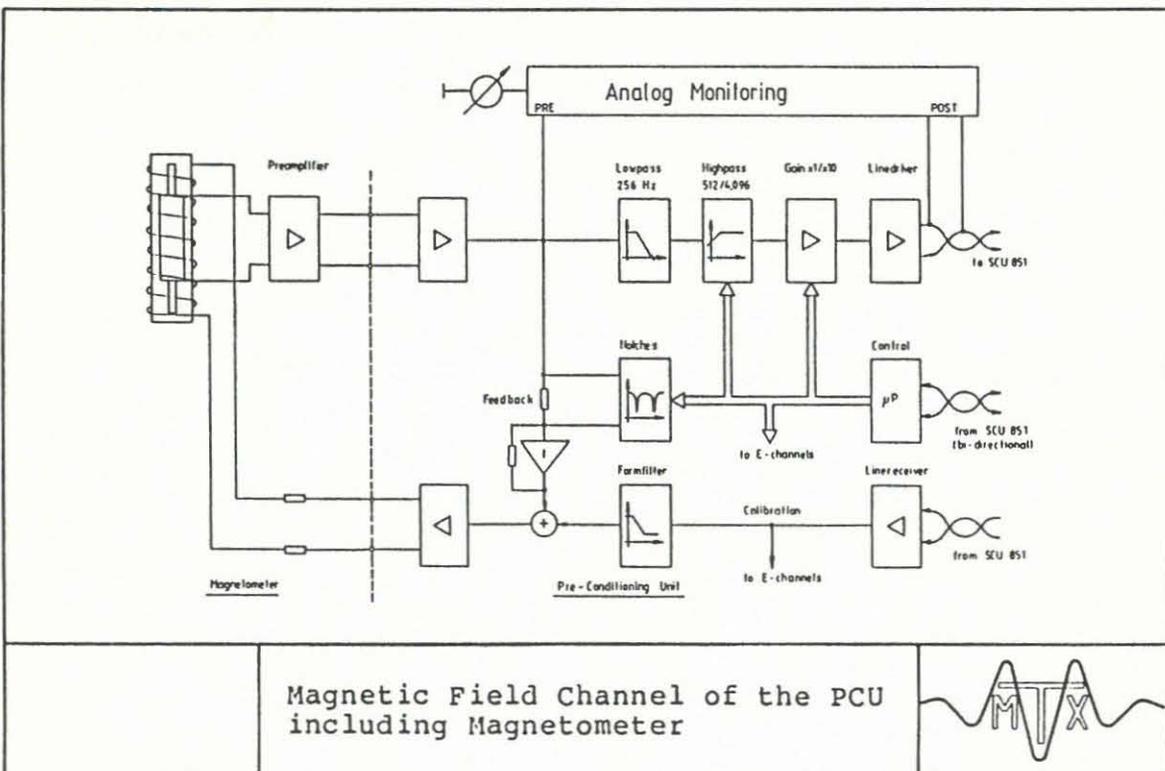
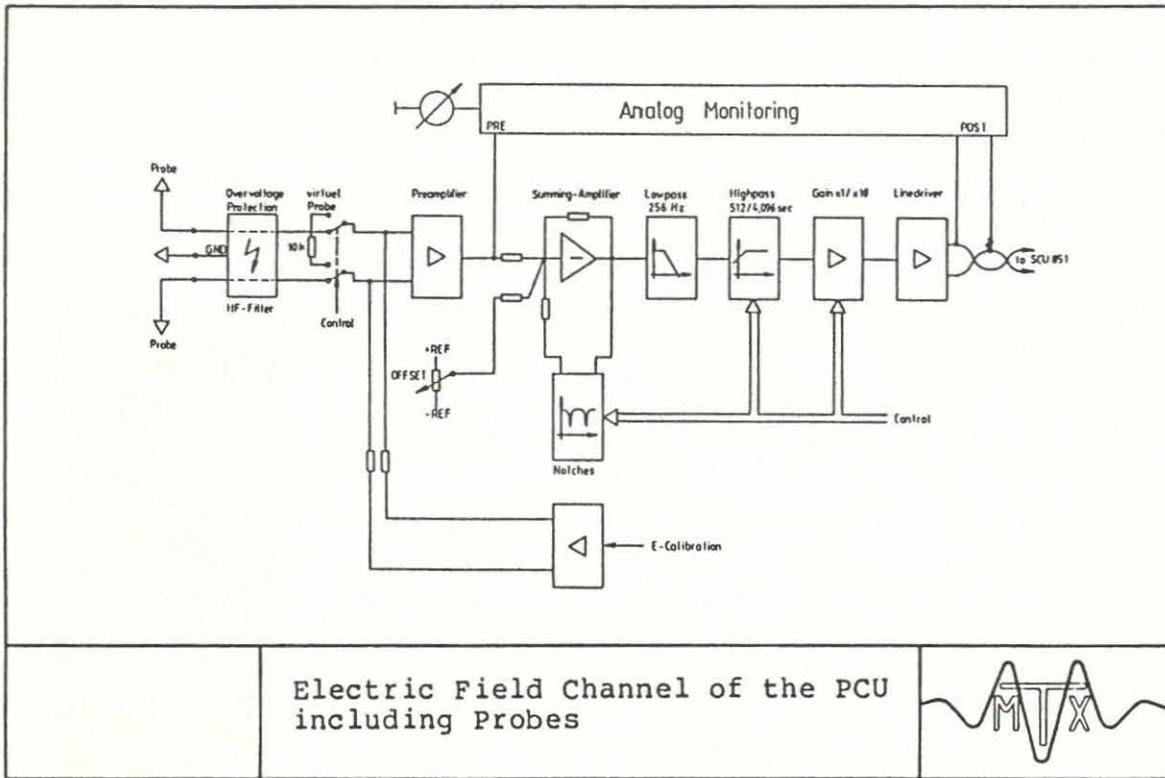


Abb. 2.1: Kalibrierung der AMT/CSAMT Meßanlage

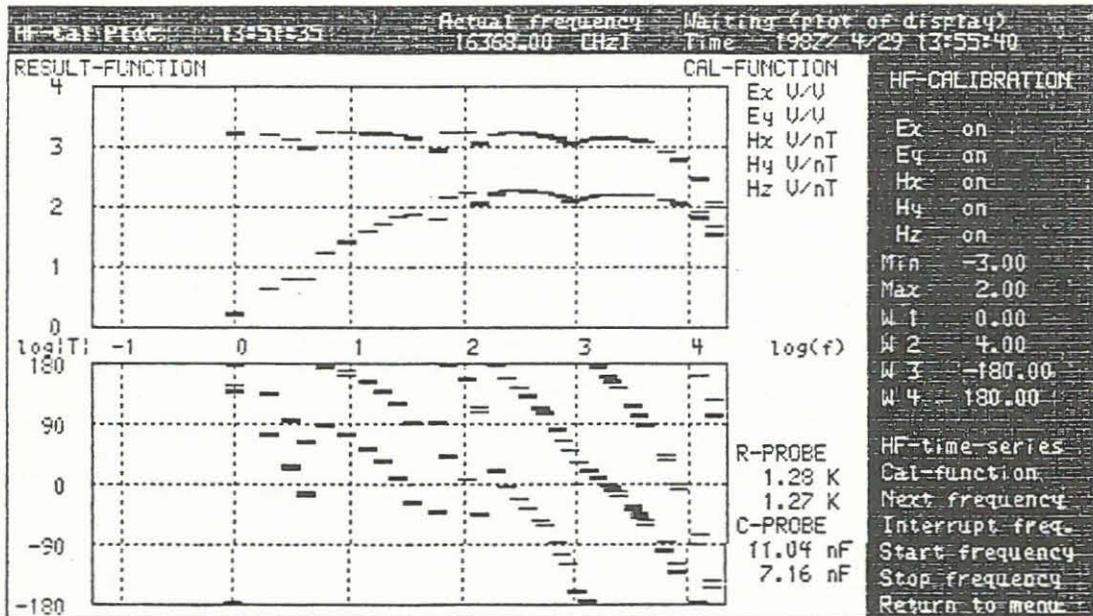


Abb. 2.2: Kalibrierergebnis einer AMT/CSAMT Kalibrierung

3 DARSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE

3.1 Art der Darstellung

Als Darstellungsweise der MT, AMT und CSAMT-Ergebnisse sind

- a) der scheinbare elektrische Widerstand,
- b) die Phase der Impedanz,
- c) die Induktionspfeile gewählt worden.

Die Darstellungen des scheinbaren Widerstandes und der Phase der Impedanz machen die Qualität der magnetotellurischen Messungen deutlich. Die Qualität ist um so besser, je kleiner die Fehlerbereiche sind und je glatter der Kurvenverlauf ist. Die Qualität der magnetischen Messungen ist um so größer, je konstanter der Verlauf der Induktionspfeile und je kleiner die Fehlerellipsen sind.

- a) Der scheinbare elektrische Widerstand des Untergrundes:

$$\text{RHO} - A_{ij} = \frac{\mu_0}{\omega} \left| Z_{ij} \right|^2$$

$$ij = xy \text{ oder } yx$$

mit

Z : komplexe Impedanz, berechnet aus bivariater Analyse des Systems

$$E_x \text{ gemessen} = E_x \text{ errechnet} + \Delta E_x$$

$$E_x \text{ errechnet} = Z_{xx} \times H_x + Z_{xy} \times H_y$$

$$\text{mit Minimierung von } \left| \Delta E_x \right|^2$$

Entsprechende Formeln gelten für E_y .

- b) Die Phase der Impedanz

$$\text{PHI}_{ij} = \arctan \left(\frac{\text{Im} (Z_{ij})}{\text{Re} (Z_{ij})} \right)$$

c) Die Induktionspfeile nach Schmucker als Darstellung der magnetischen Übertragungsfunktion

$$\text{Realpfeil} = \text{Re}(z_H) \cdot \hat{x} + \text{Re}(z_D) \cdot \hat{y}$$

$$\text{Imaginärpfeil} = \text{Im}(z_H) \cdot \hat{x} + \text{Im}(z_D) \cdot \hat{y}$$

\hat{x}, \hat{y} : Einheitsvektoren in Nord- und Ostrichtung

z_H, z_D : komplexe Übertragungsfunktionen ermittelt aus dem System

$$H_z \text{ errechnet} = z_H \cdot H_x + z_D \cdot H_y$$

$$H_z \text{ gemessen} = H_z \text{ errechnet} + \Delta H_z$$

Die dargestellten Vertrauensbereiche (senkrechte Striche und Ellipsen) umfassen 68 % der statistischen Werte.

Alle Übertragungsfunktionen wurden aus unrotierten, d. h. in Nord/Süd- und Ost/West-Richtung vermessenen E- und H-Feld-Spektren berechnet.

In den folgenden Kapiteln 3.2 bis 3.4 sind die von Geräteeinflüssen korrigierten Ergebnisse ohne weitere Kommentare wiedergegeben.

RHO-A und Phase sind für alle Stationen dargestellt, Induktionspfeile wegen des Umfangs der graphischen Abbildungen nur als repräsentative Beispiele.

Bis auf Station 19, wo die Ergebnisse der "single site"-Auswertung schon nicht mehr verbesserungsfähig waren, sind die Ergebnisse der Remote-Reference (RR)-Auswertung gezeigt. Die Berechnung der Impedanz hielt sich an das von Gamble et al.¹⁾ vorgeschlagene Verfahren.

Die RR-Auswertung lieferte in der Regel glattere Kurven mit kleinen Vertrauensbereichen.

1) Gamble, Th., Goubau, W. and Clarke, J., 1979; Magnetotellurics with a remote reference. Geophysics, Vol. 44, No 1, 53-57.

Der Übersichtlichkeit wegen wurde eine feste Skalierung gewählt.

- MT und AMT

RHO-A : 10^0 - 10^5 Ohm*Meter
Phase : 0° - 90°

- CSAMT

RHO-A : 10^0 - 10^5 Ohm*Meter
Phase : -180° - $+180^\circ$

Die Ergebnisse der CSAMT-Messungen zeigen eine wesentlich größere Phasendrehung als allgemein für die Impedanzen üblich. Deshalb wurde die Darstellung auf den Phasenbereich von -180° bis $+180^\circ$ erweitert.

3.2

MT-ECRE

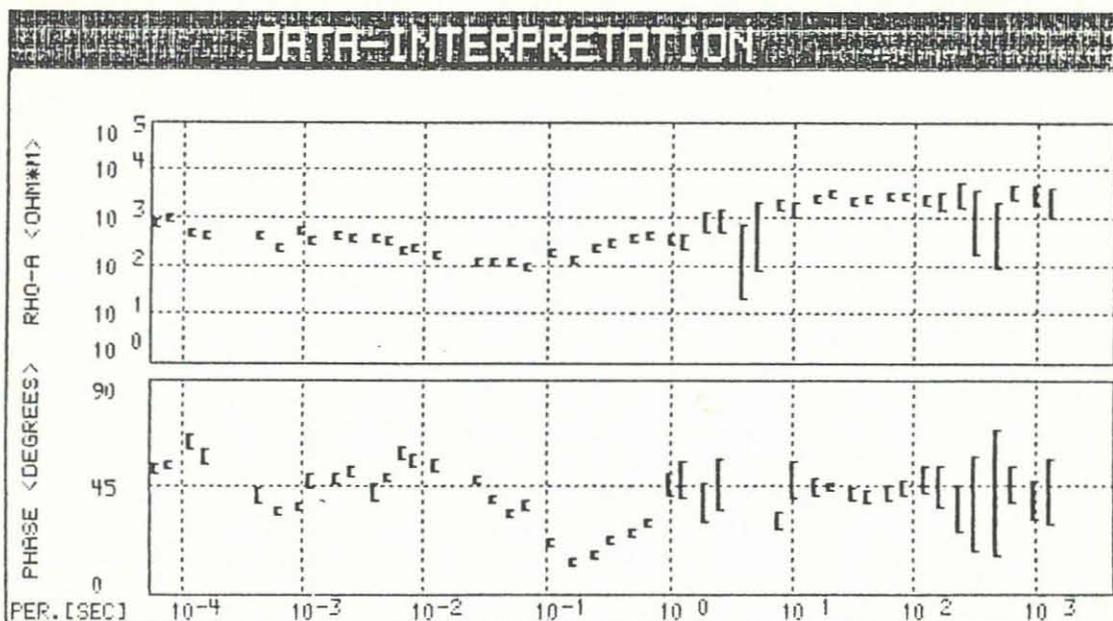
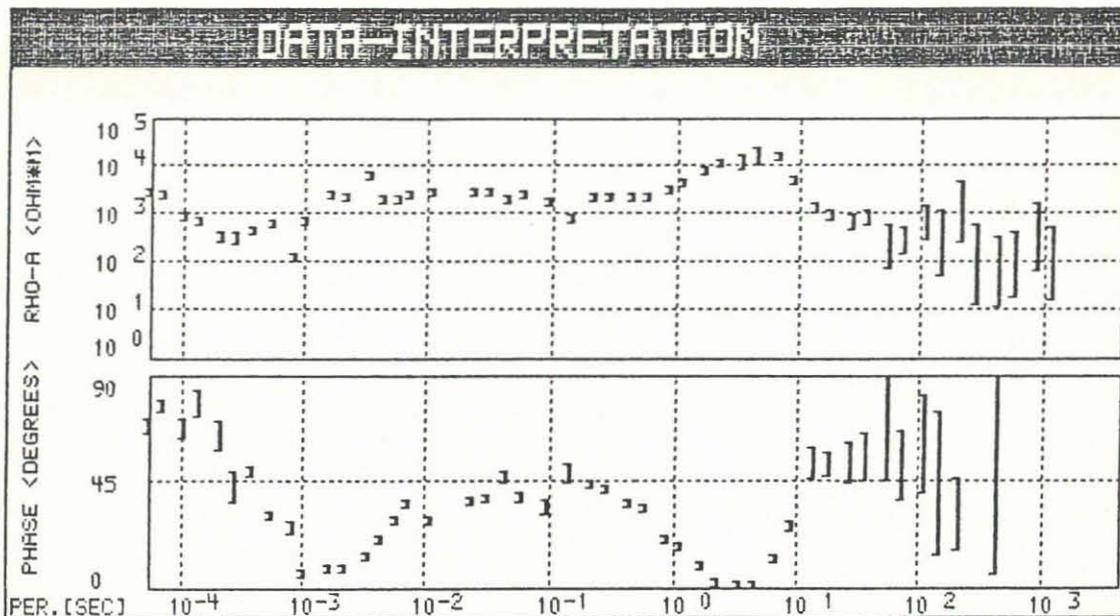
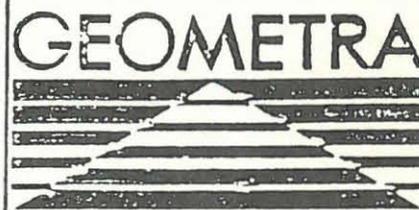


Abb.: MT-ECRE - 1 -
 Station: 2 AMT+MT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



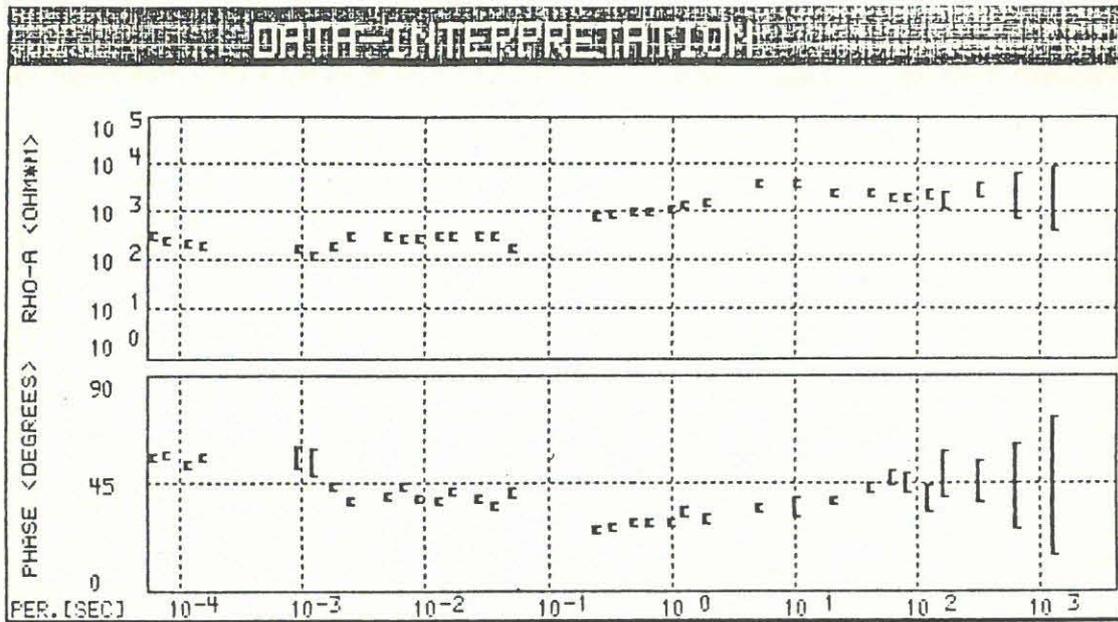
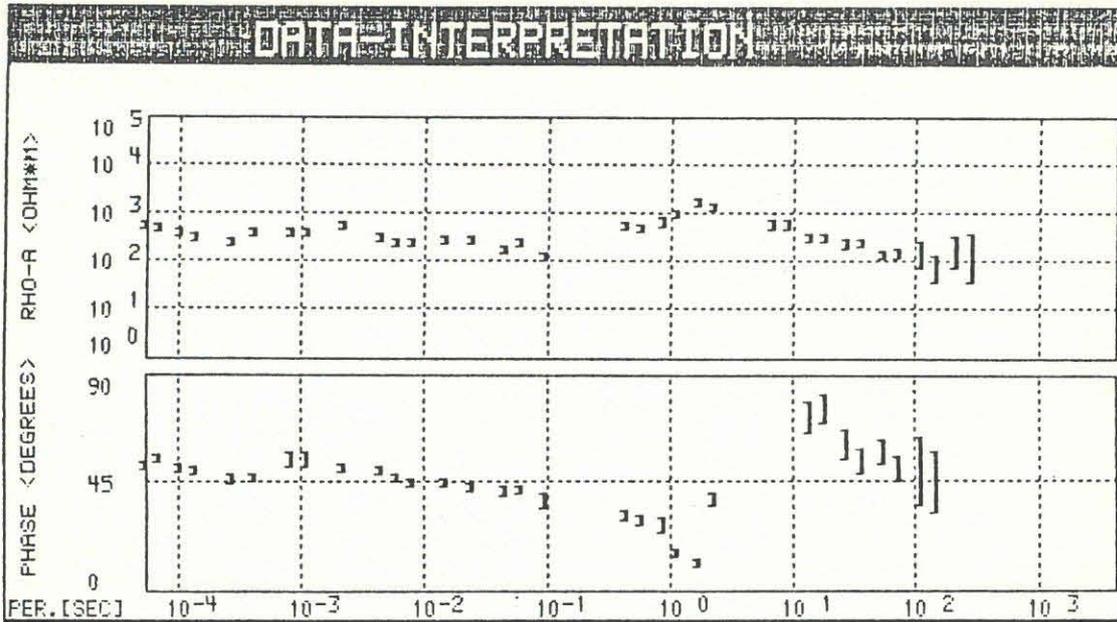
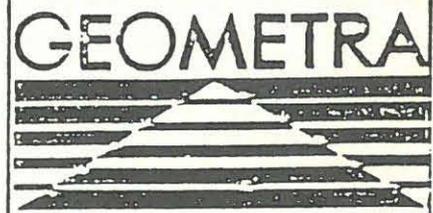


Abb.: MT-ECRE - 2 -
Station: 6 AMT+MT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



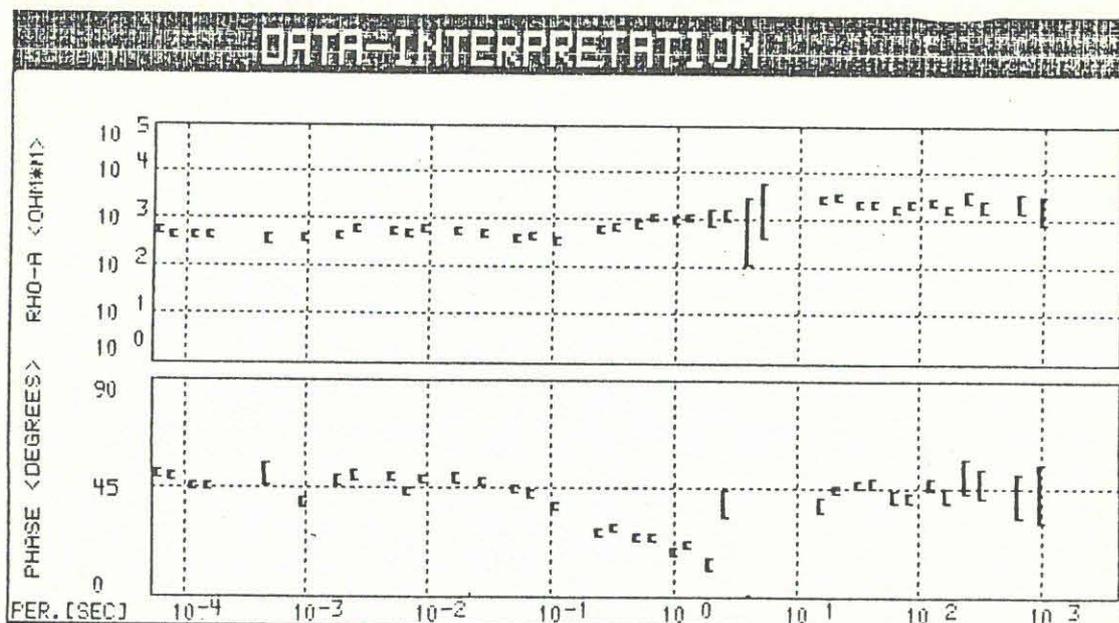
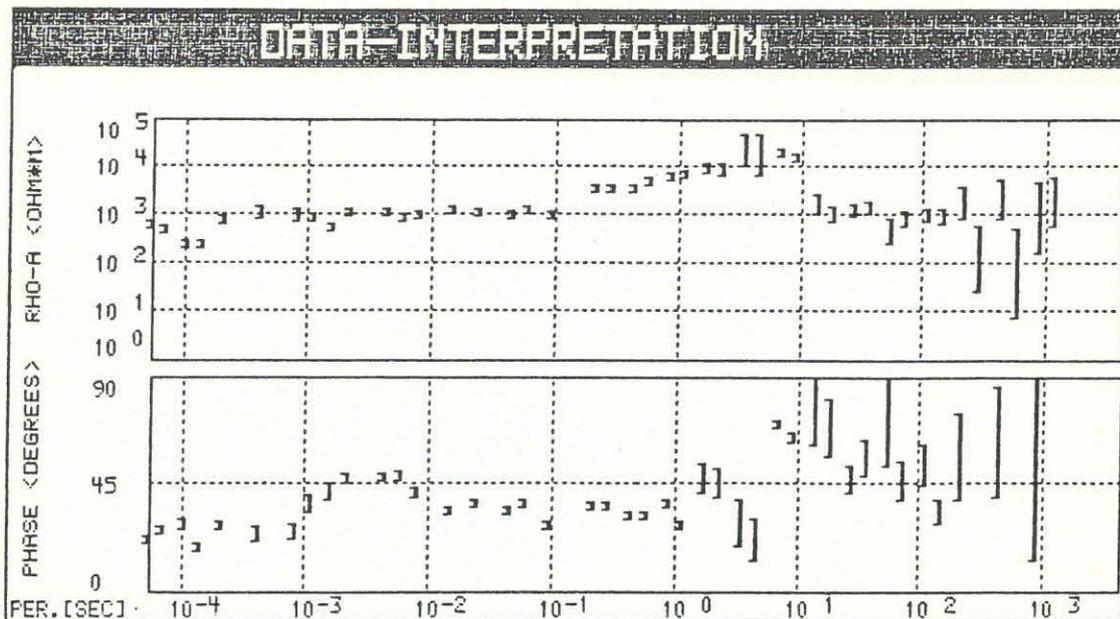
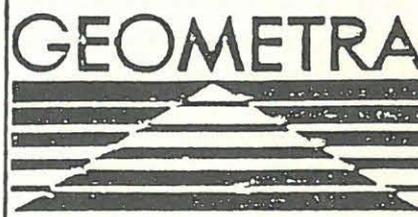


Abb.: MT-ECRE - 3 -
 Station: 12 AMT+MT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



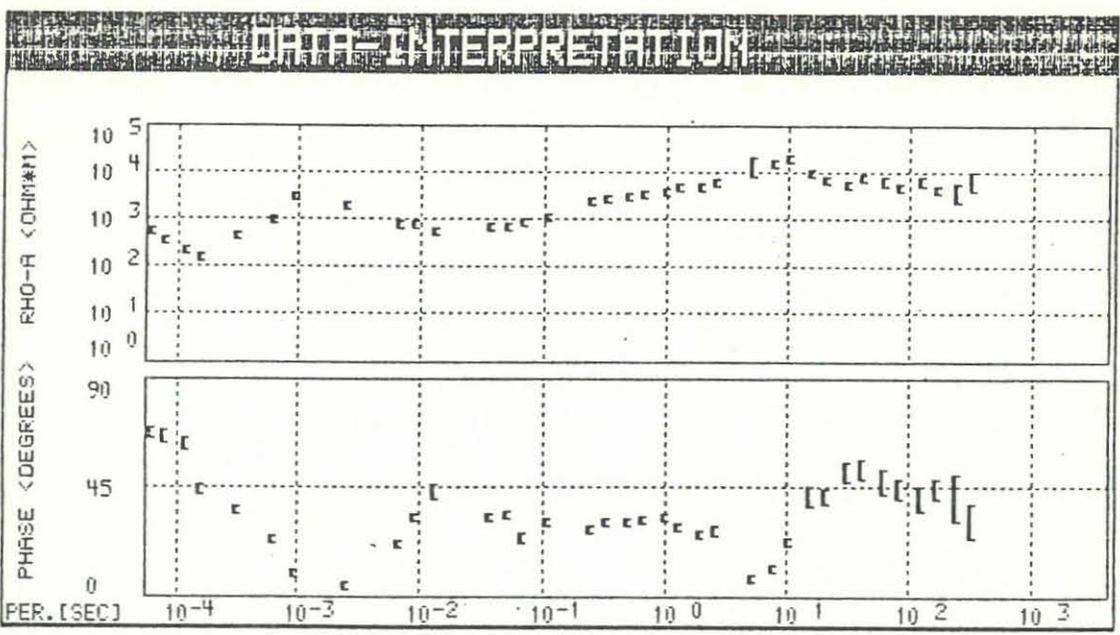
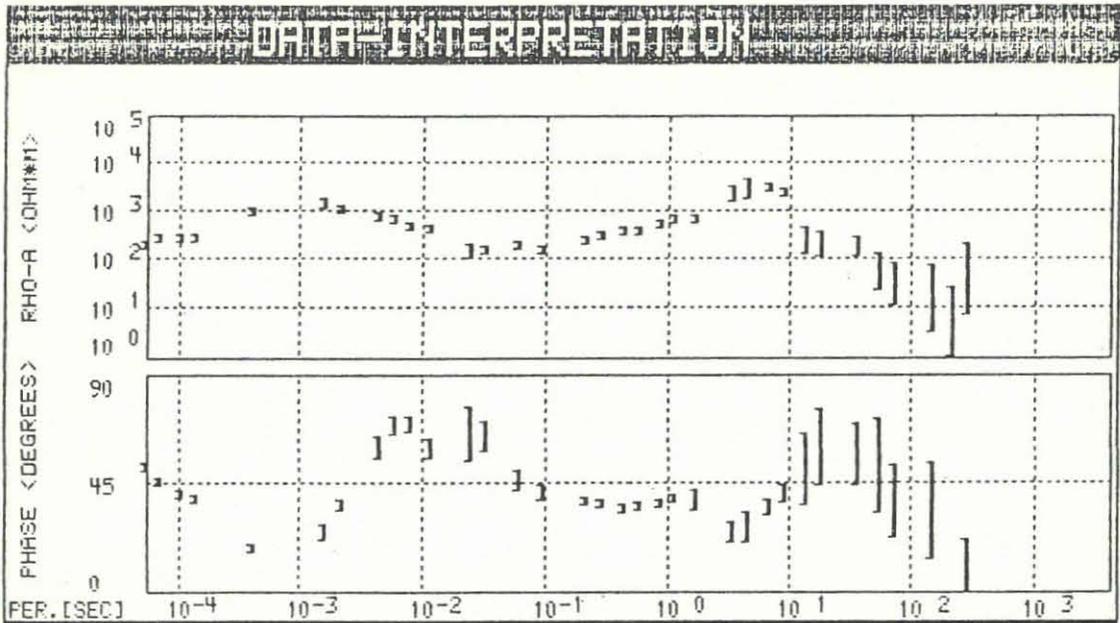


Abb.: MT-ECRE - 4 -
 Station: 13 AMT+MT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



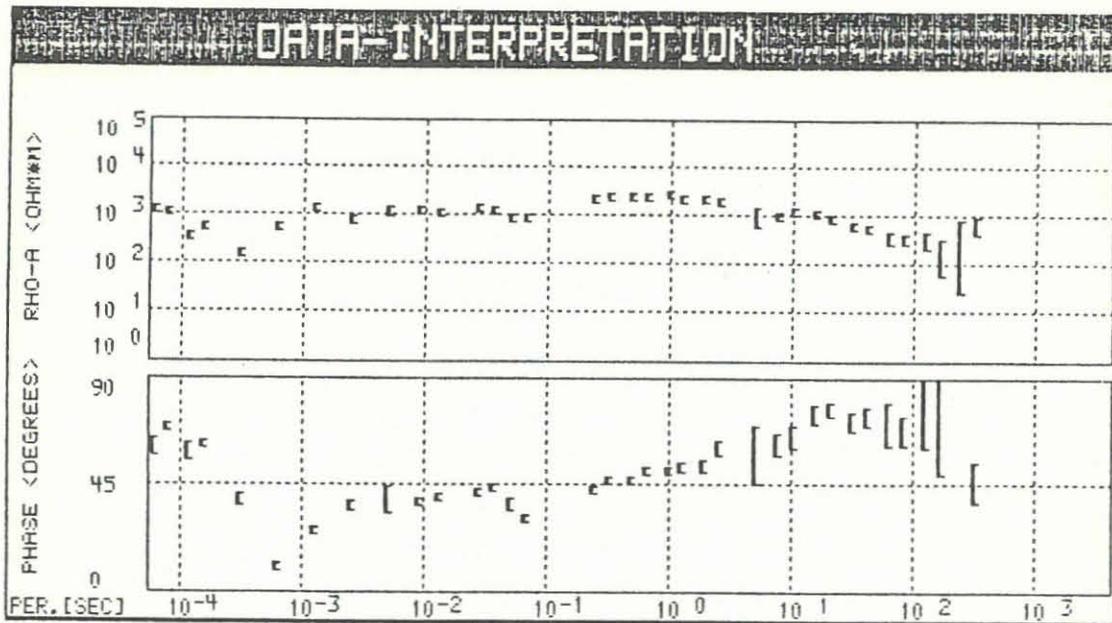
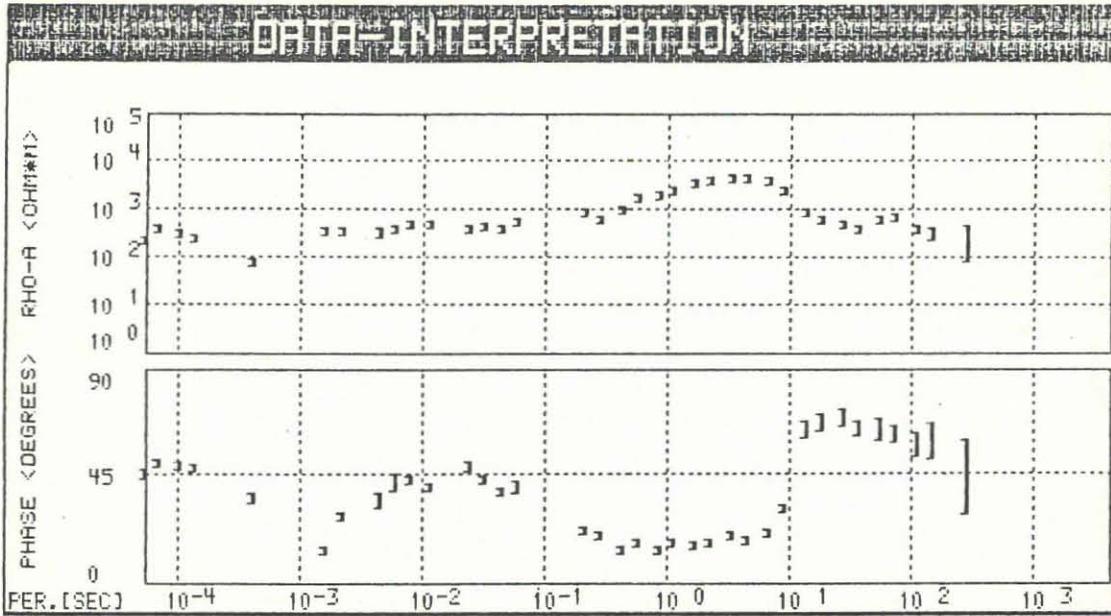
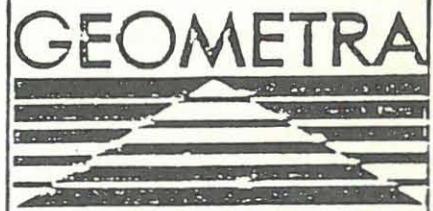


Abb.: MT-ECRE - 5 -
 Station: 14 AMT+MT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



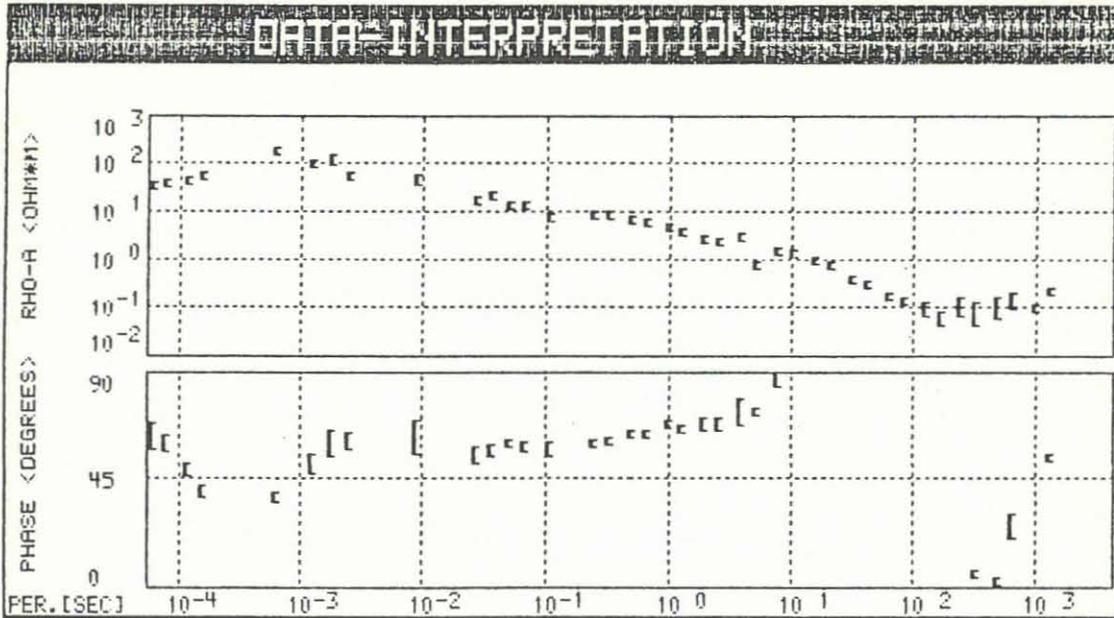
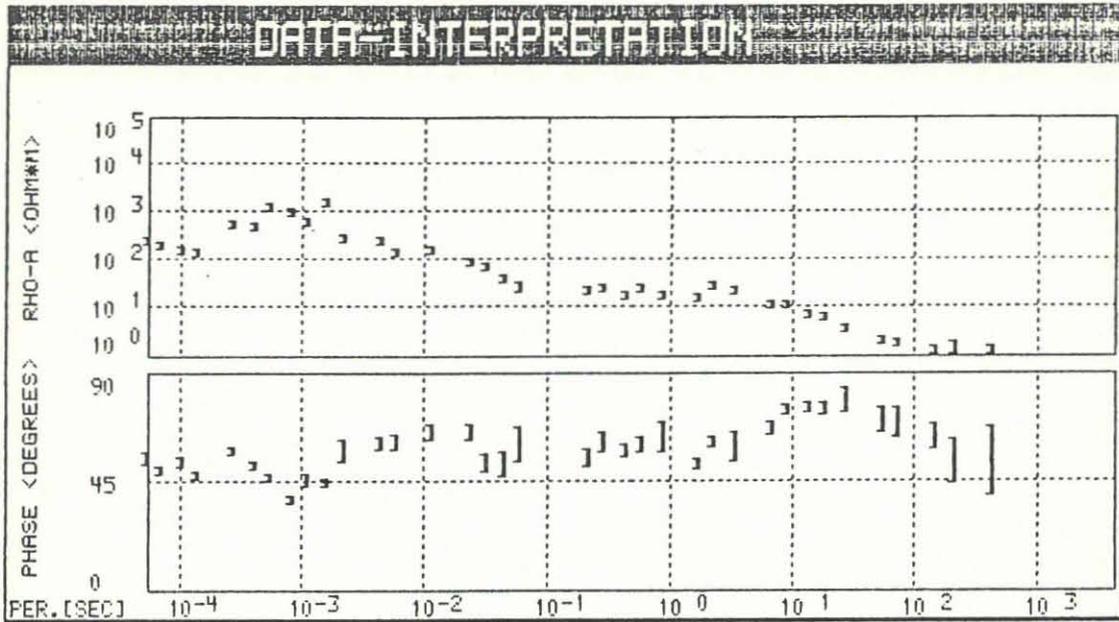
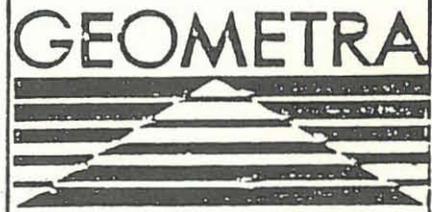


Abb.: MT-ECRE - 6 -
Station: 15 AMT+MT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



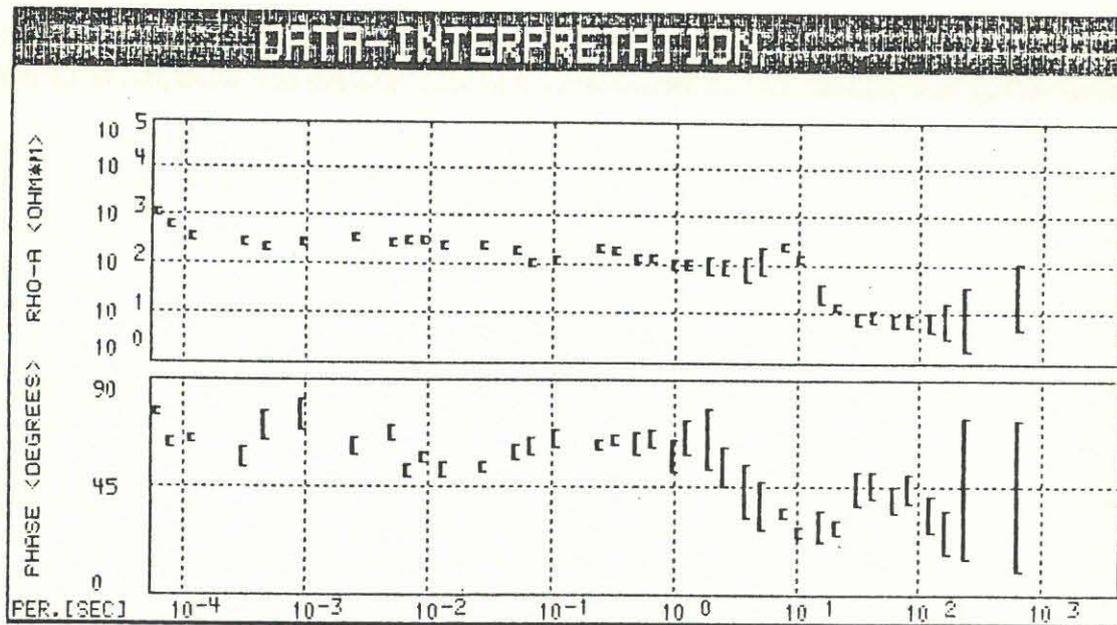
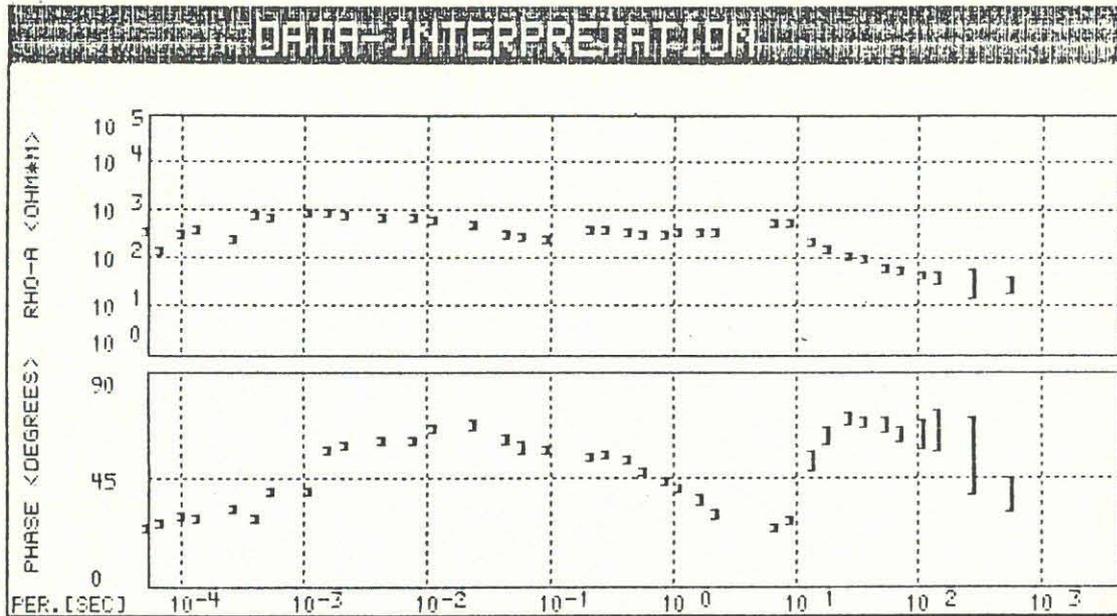
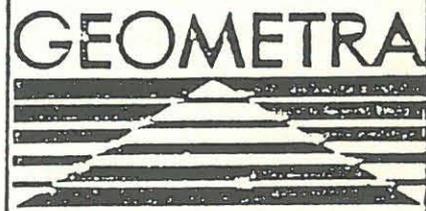


Abb.: MT-ECRE - 7 -
 Station: 16 AMT+MT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



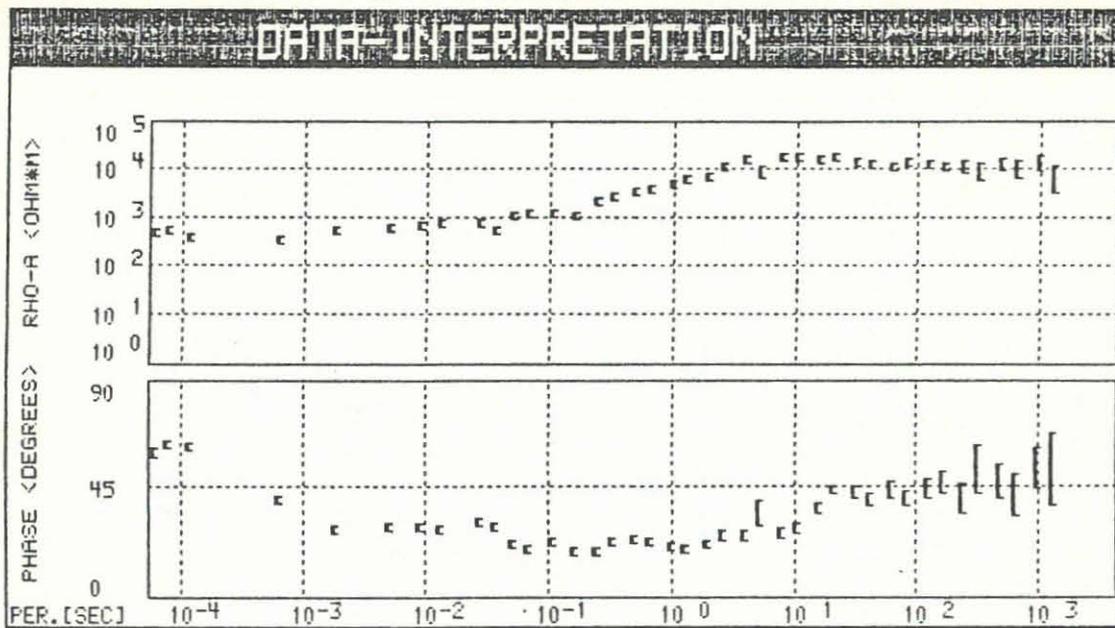
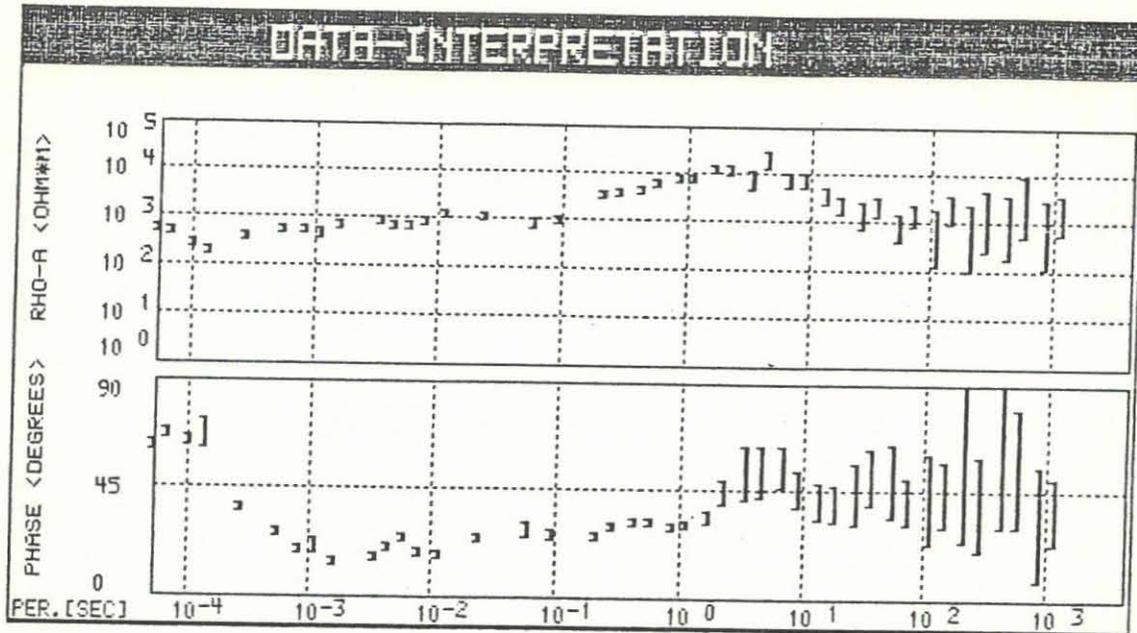
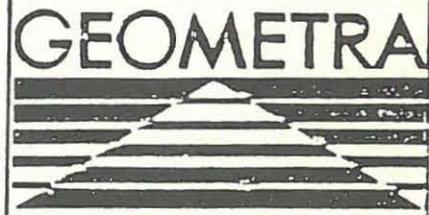


Abb.: MT-ECRE - 8 -
 Station: 17 AMT+MT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



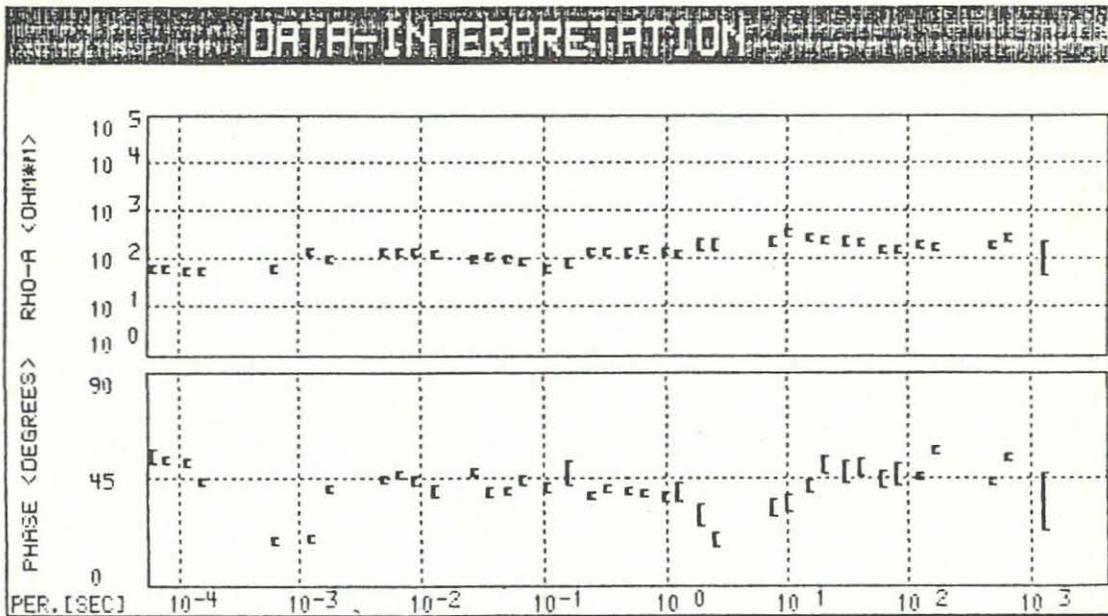
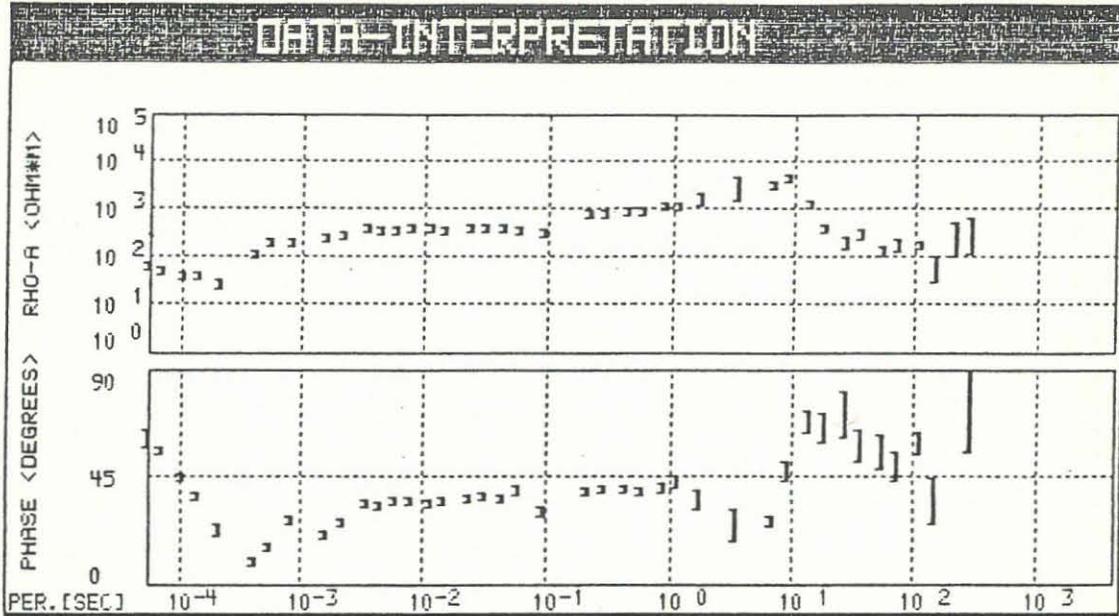


Abb.: MT-ECRE - 9 -
Station: 18 AMT+MT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



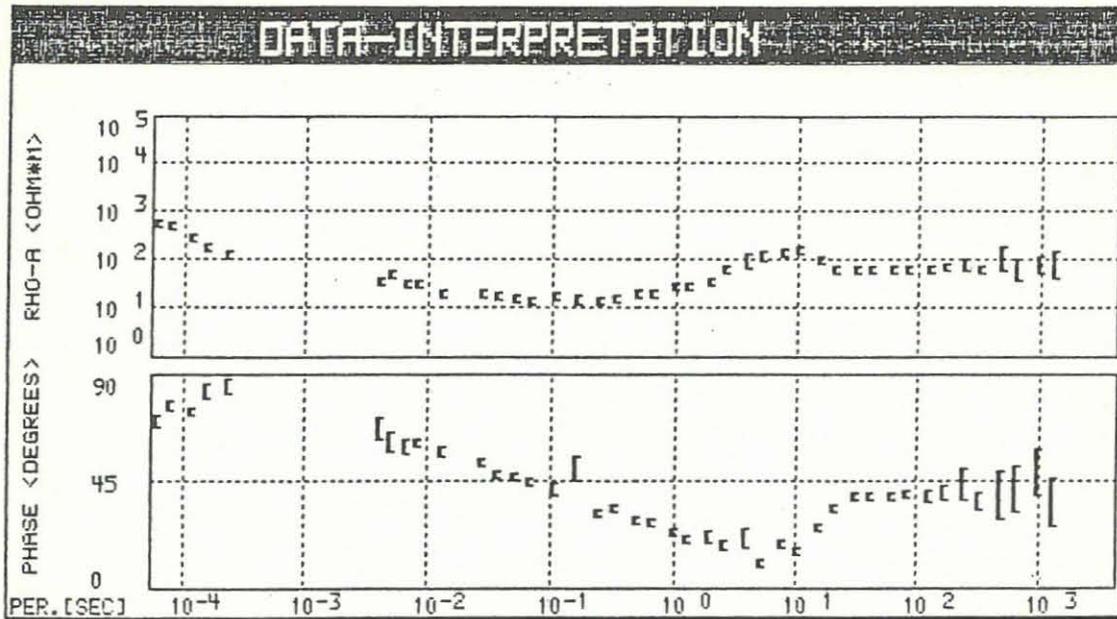
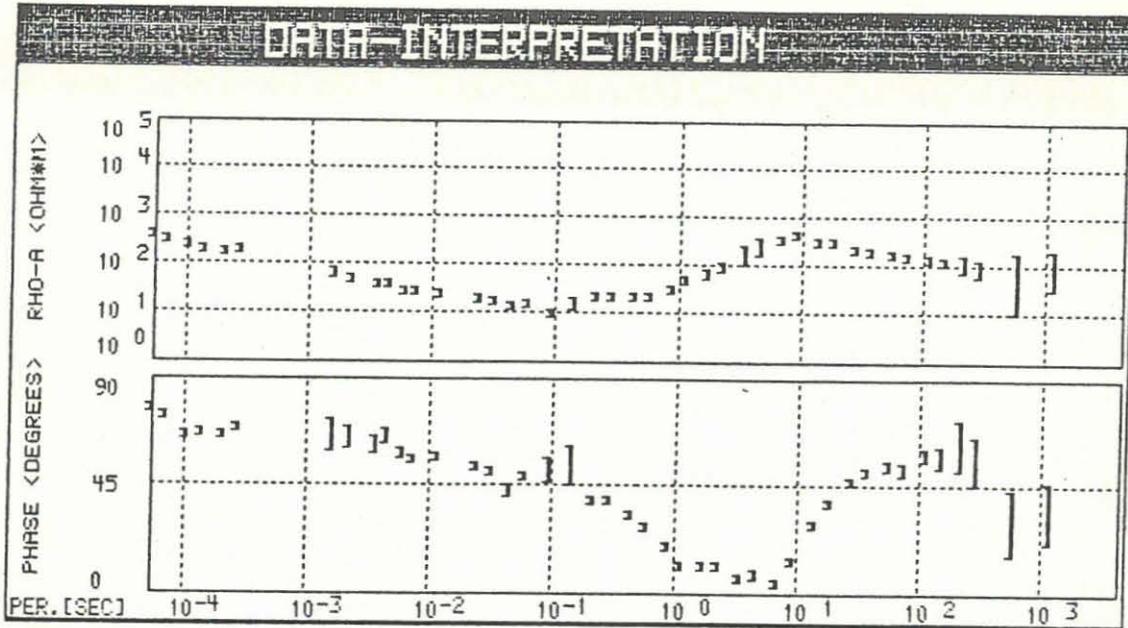


Abb.: MT-ECRE - 10 -
 Station: 19 AMT+MT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



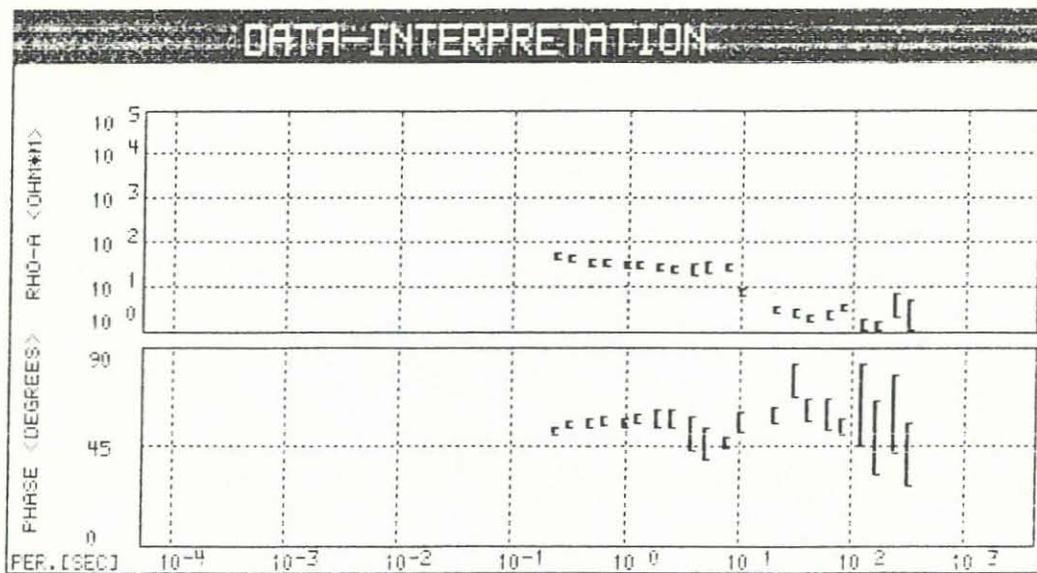
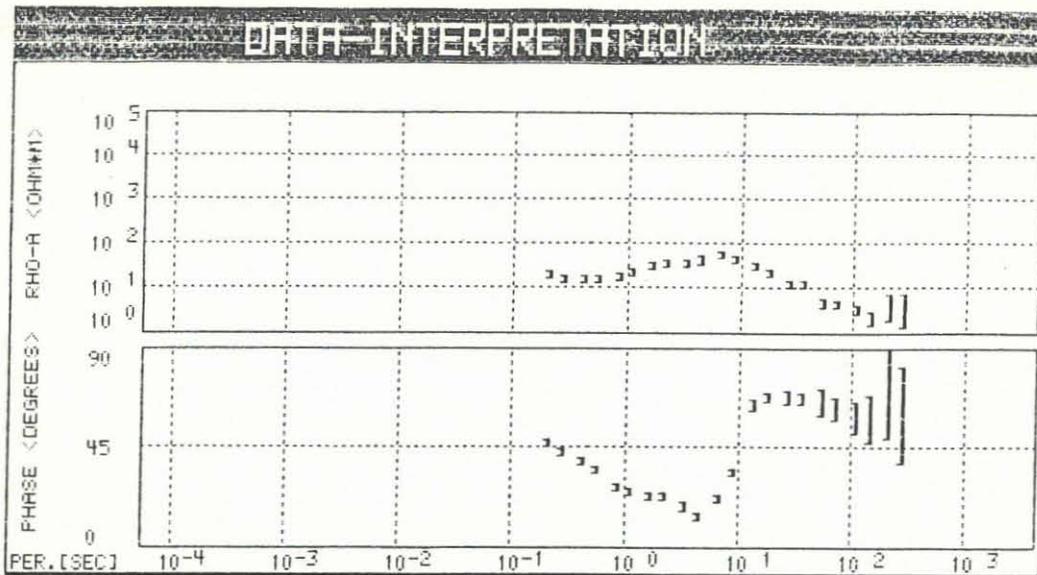


Abb.: MT-ECRE - 11 -
 Station: 1 MT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



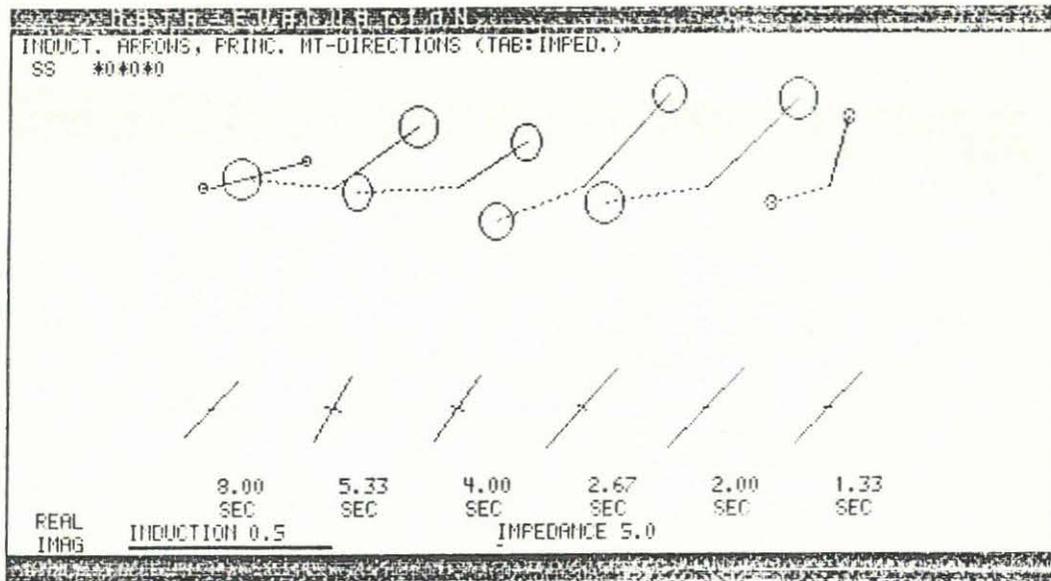
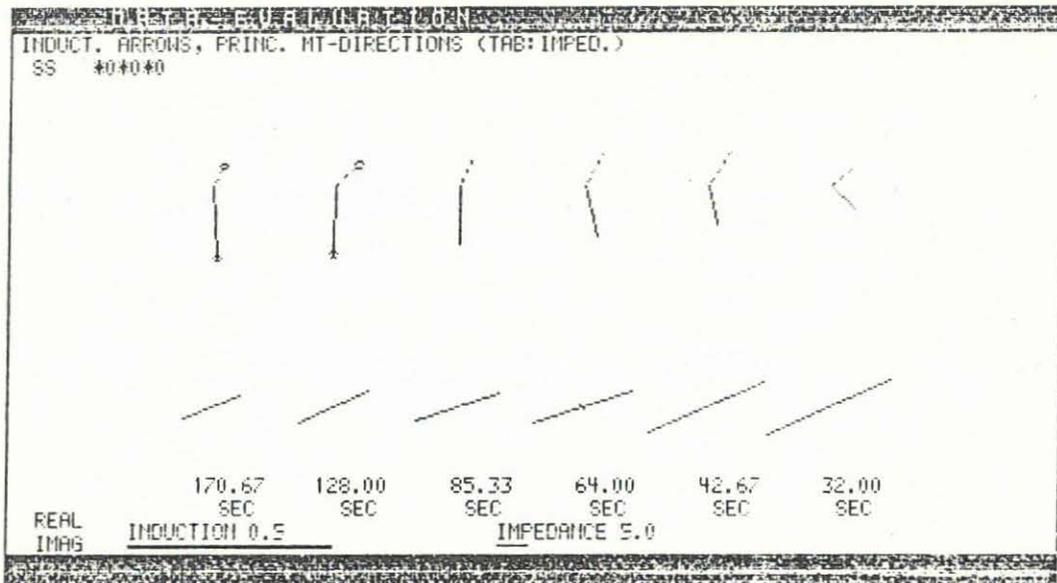


Abb.: MT-ECRE - 12 -
Station: 2
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



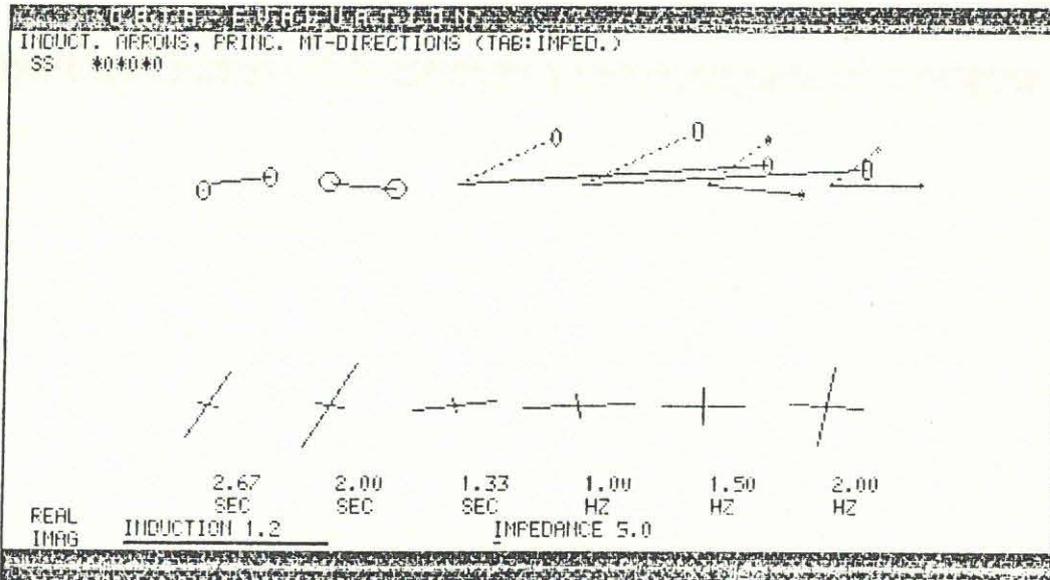
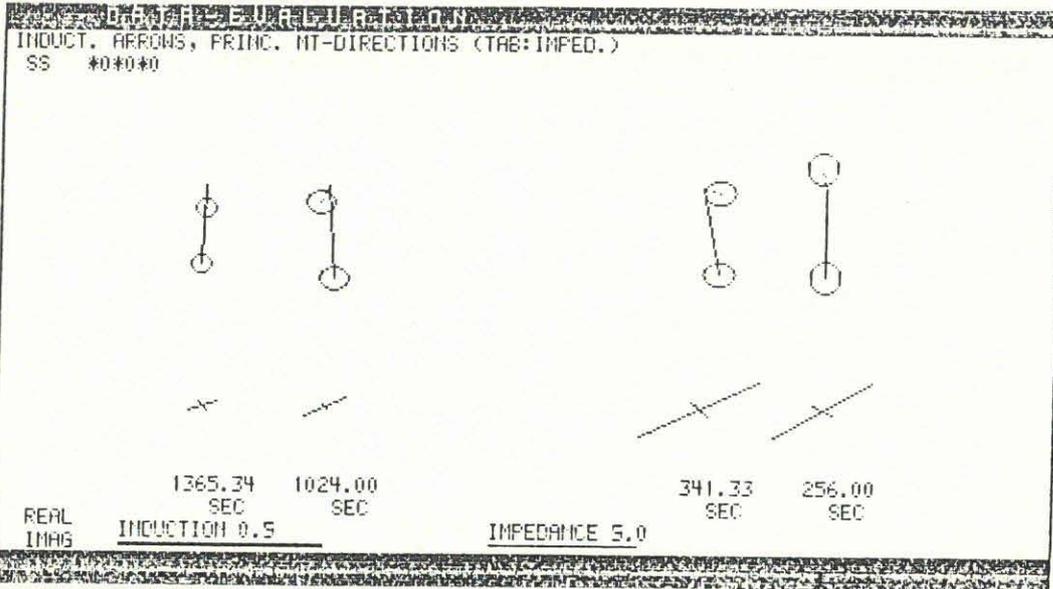
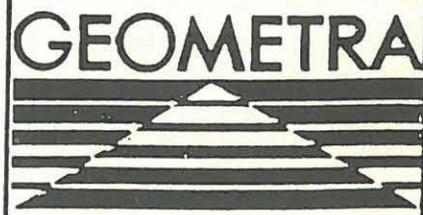


Abb.: MT-ECRE - 13 -
Station: 6
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



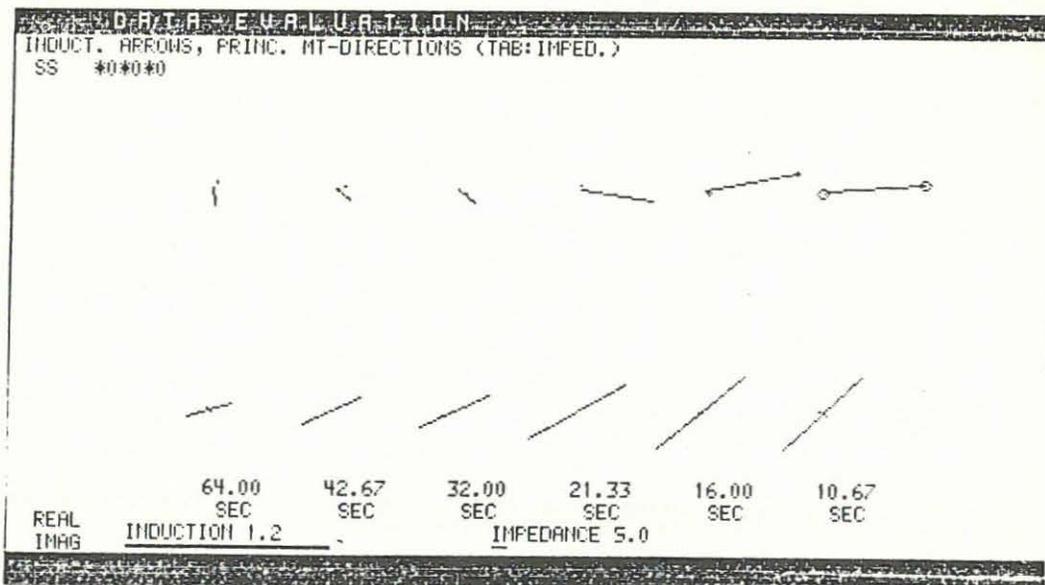
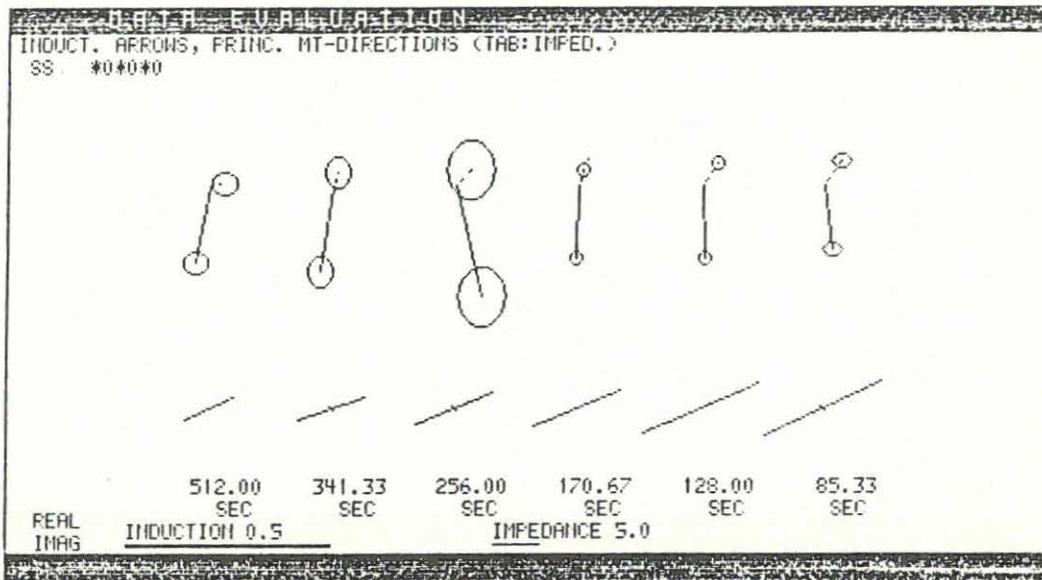


Abb.: MT-ECRE - 14 -
Station: 12
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



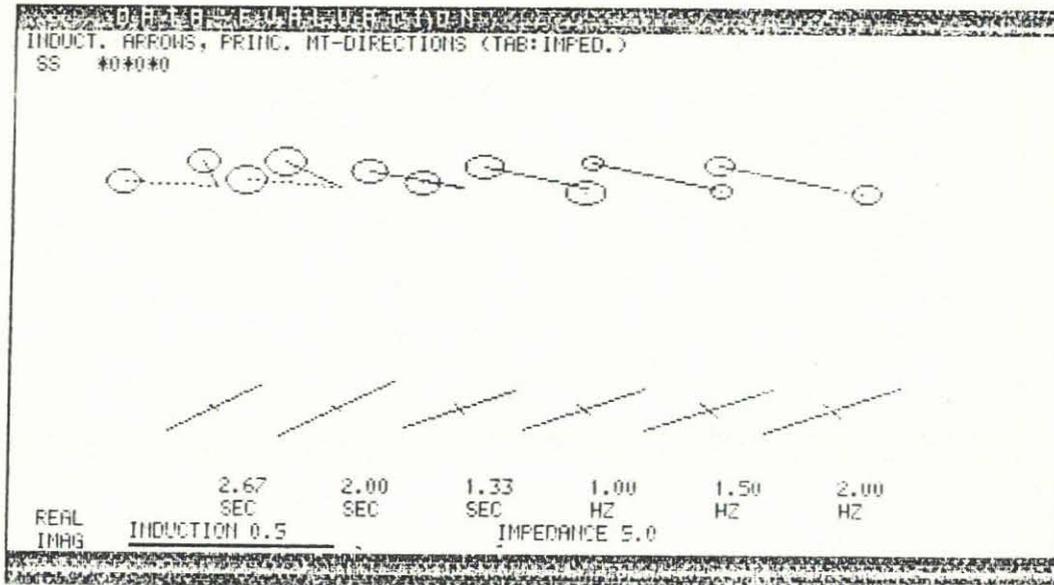
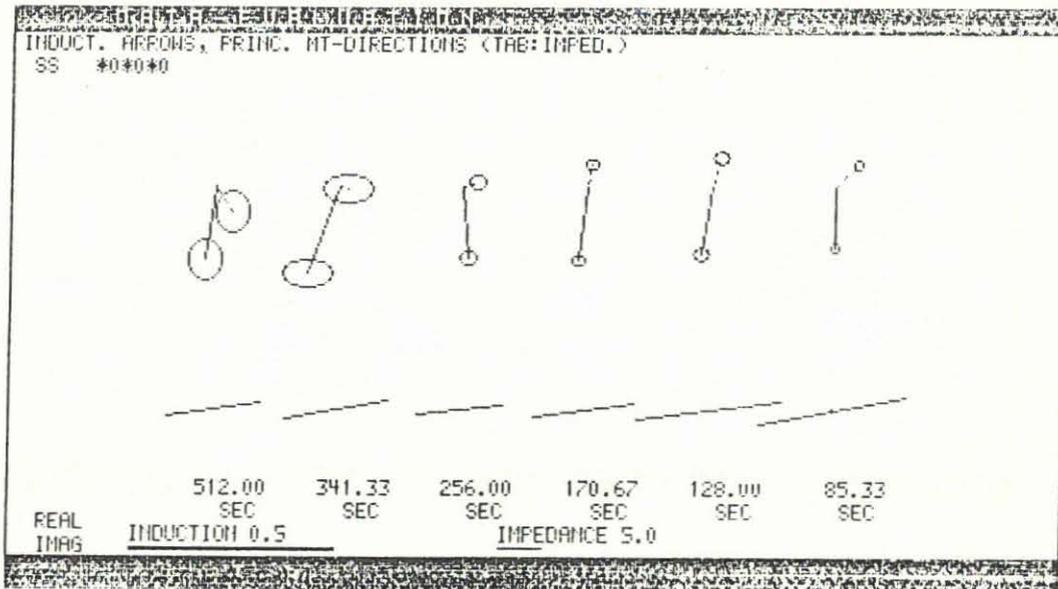


Abb.: MT-ECRE - 15 -
Station: 13
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



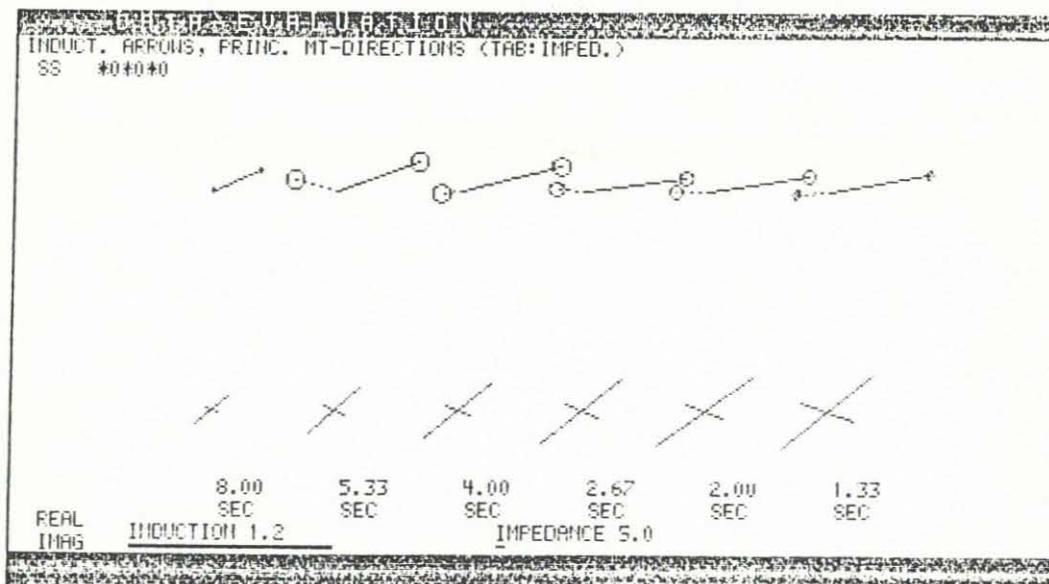
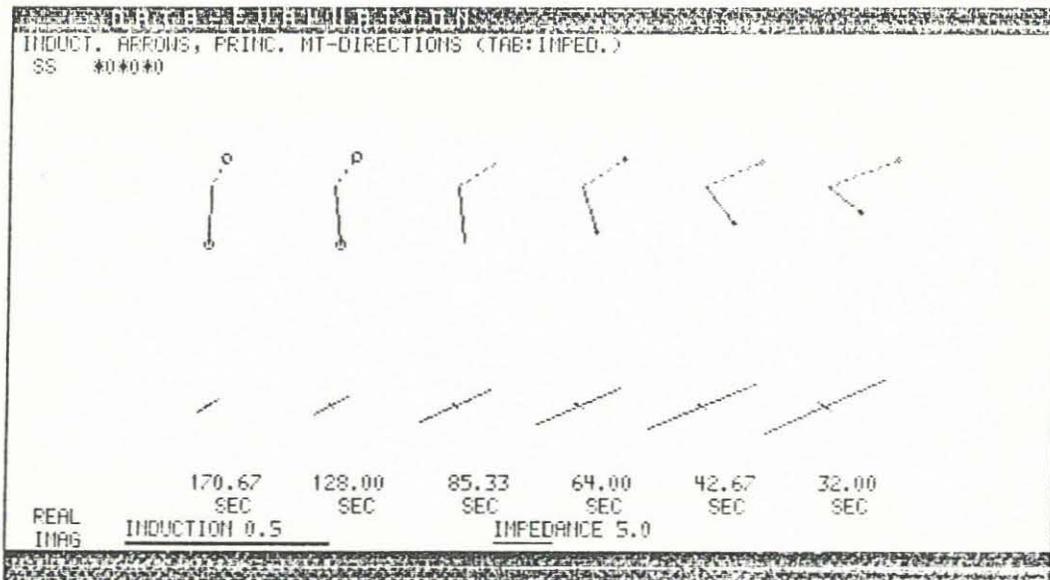
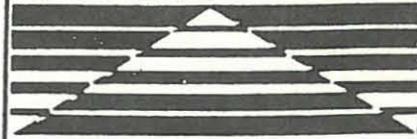


Abb.: MT-ECRE - 16 -
Station: 14
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie

GEOMETRA



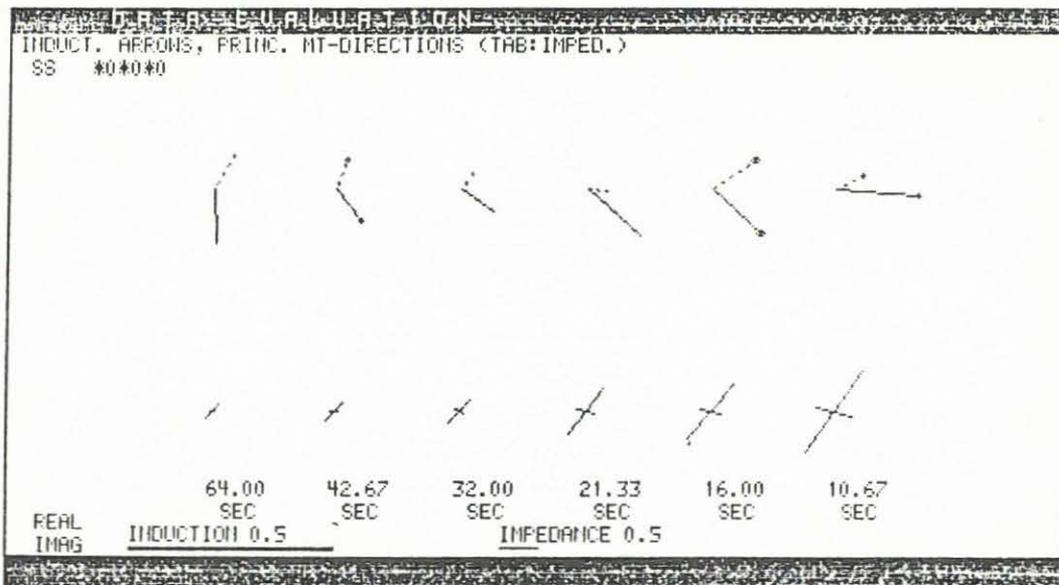
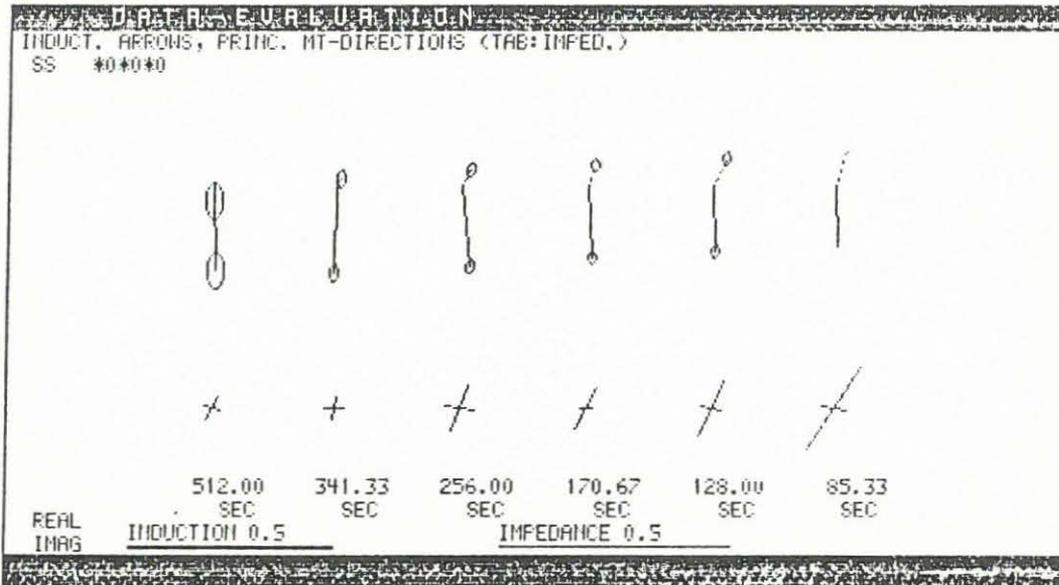
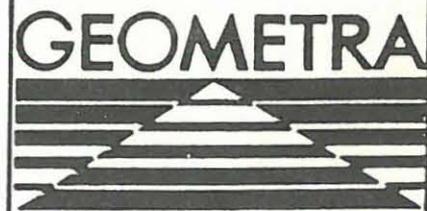


Abb.: MT-ECRE - 17 -
Station: 15
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



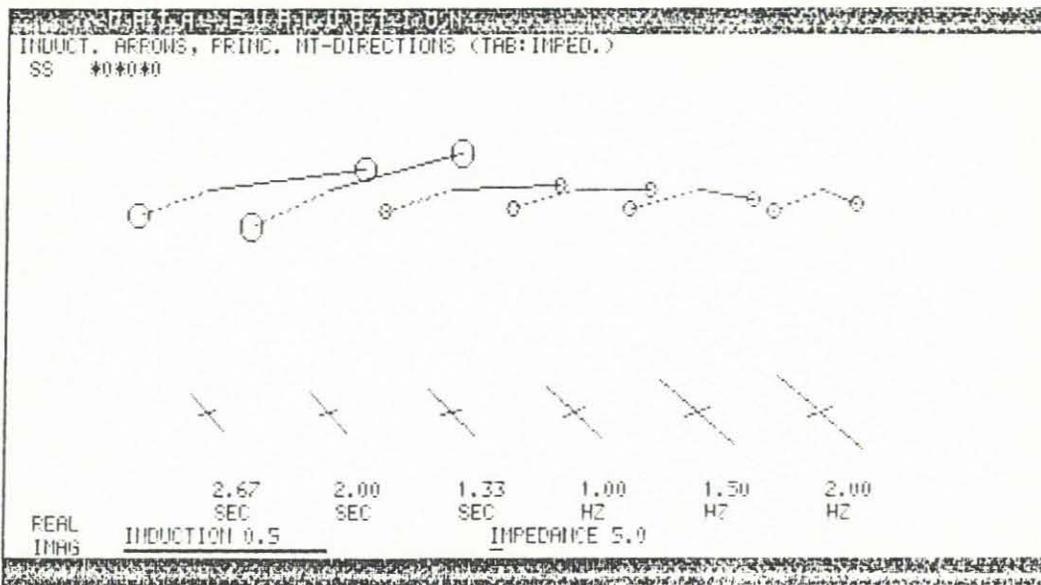
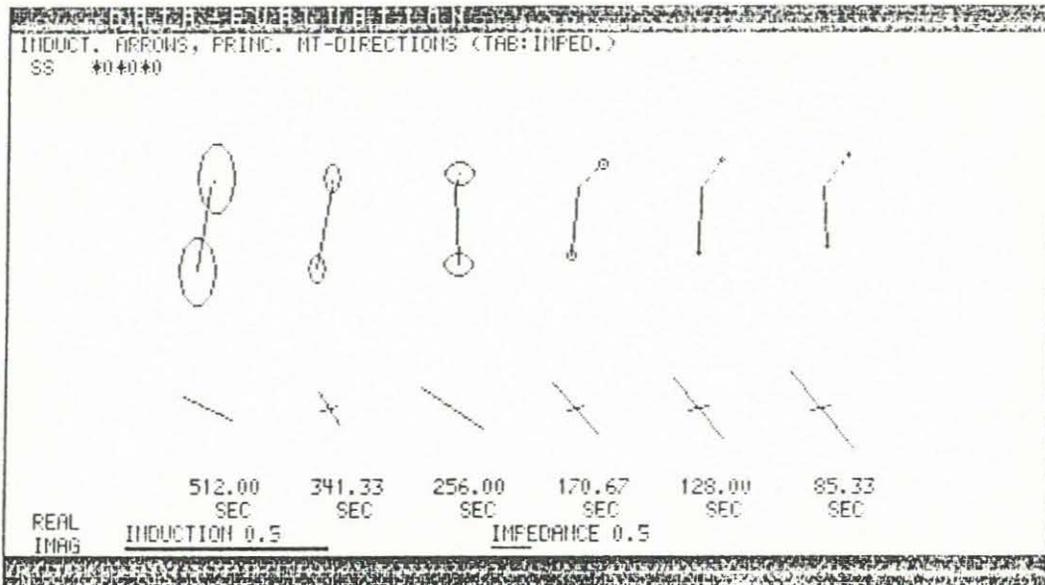


Abb.: MT-ECRE - 18 -
Station: 16
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



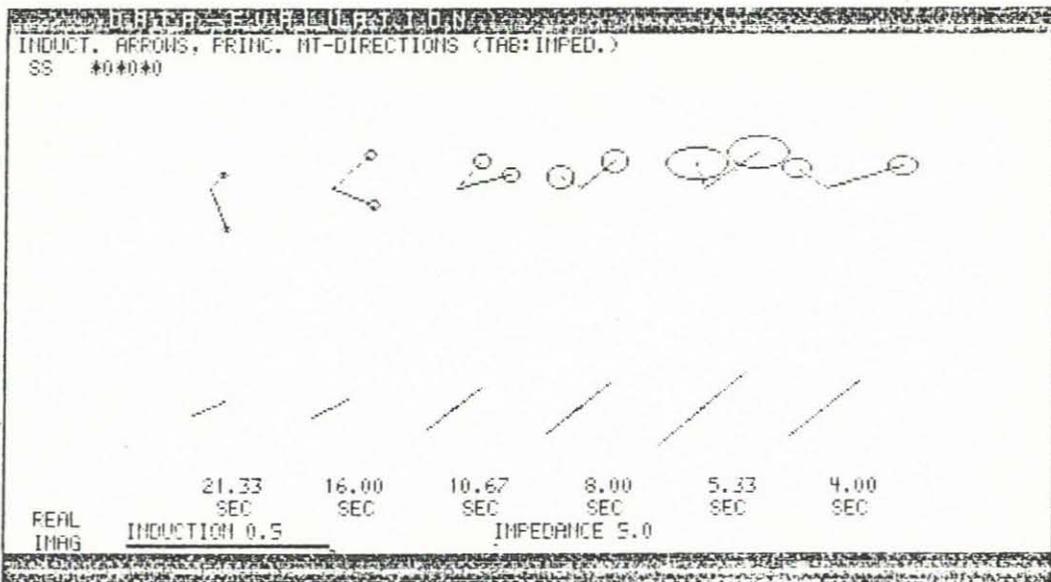
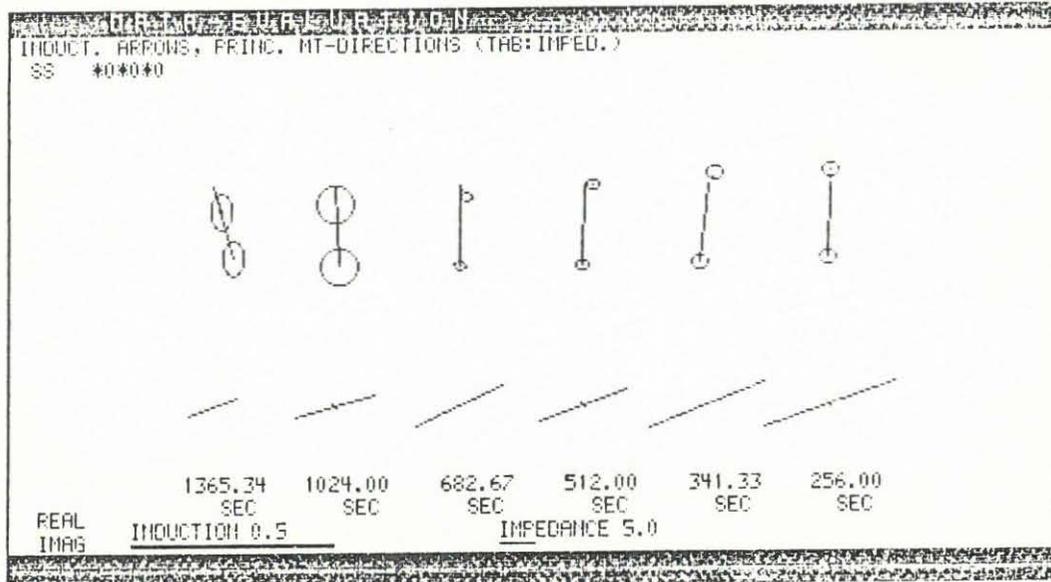
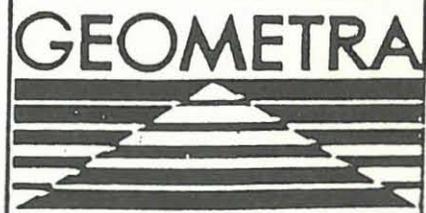


Abb.: MT-ECRE - 19 -
Station: 17
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



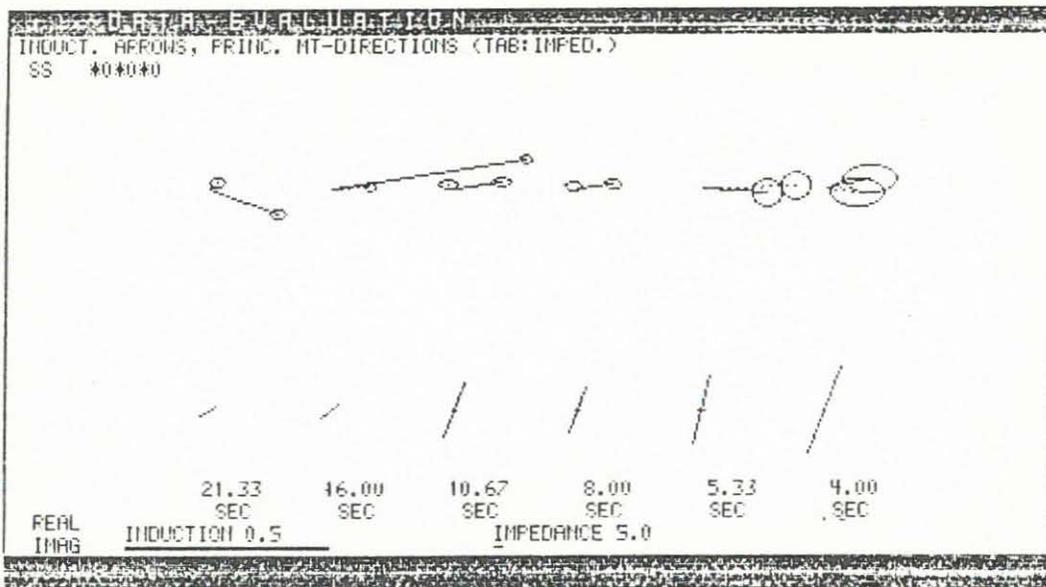
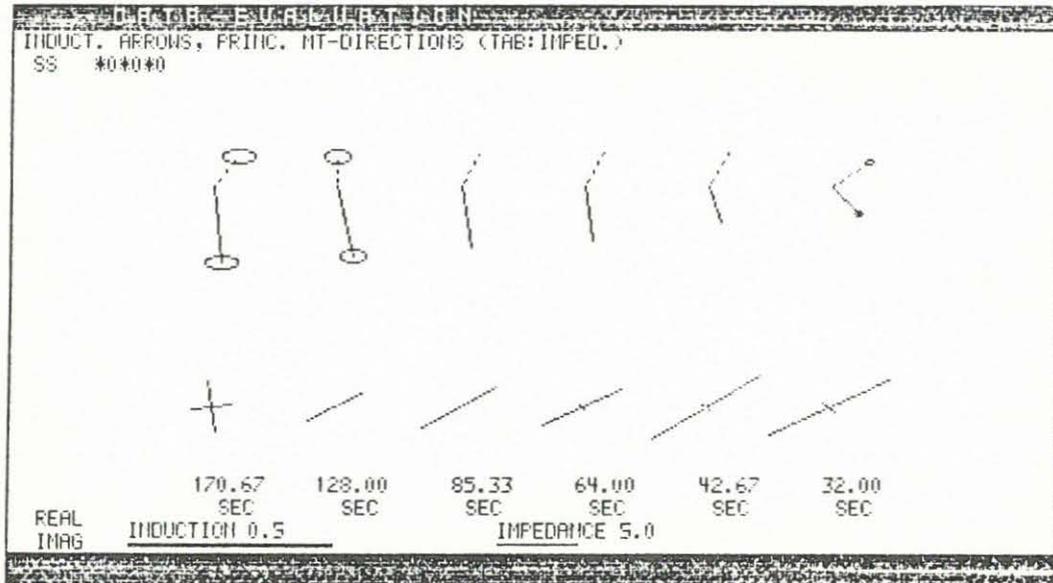


Abb.: MT-ECRE - 20 -
Station: 18
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



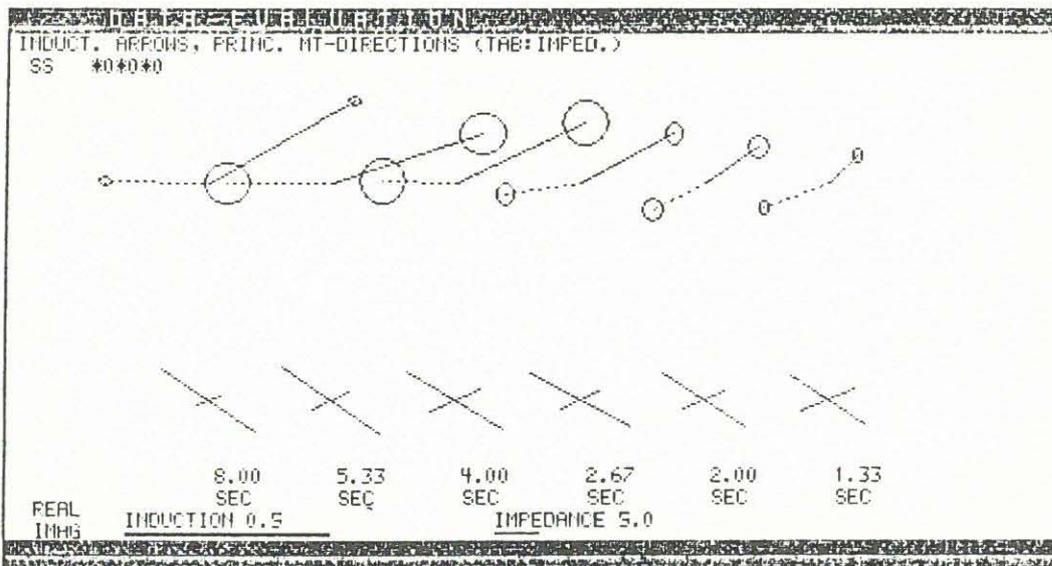
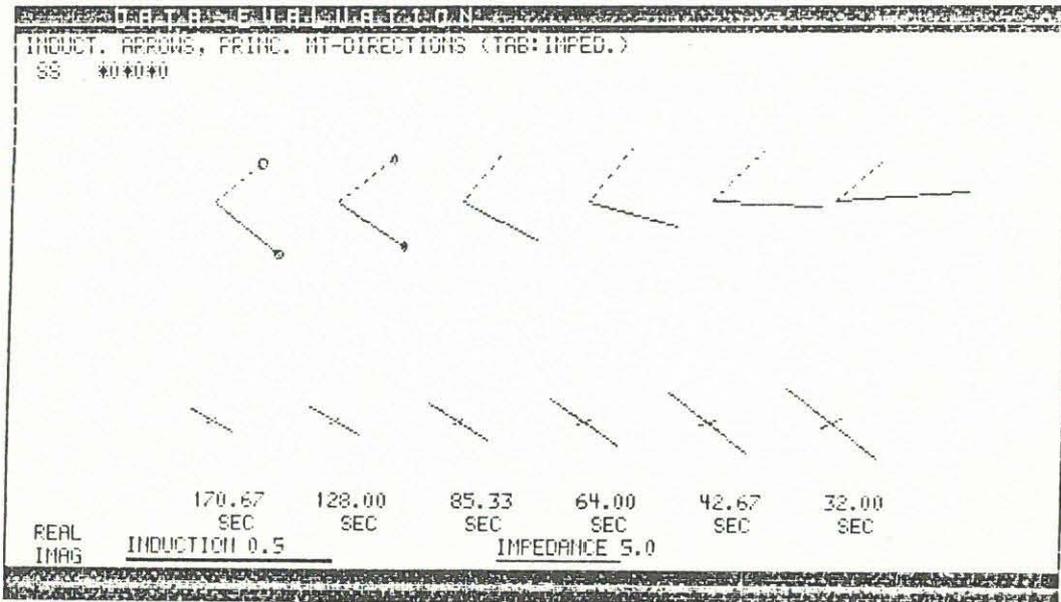


Abb.: MT-ECRE - 21 -
Station: 19
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



3.3

AMT

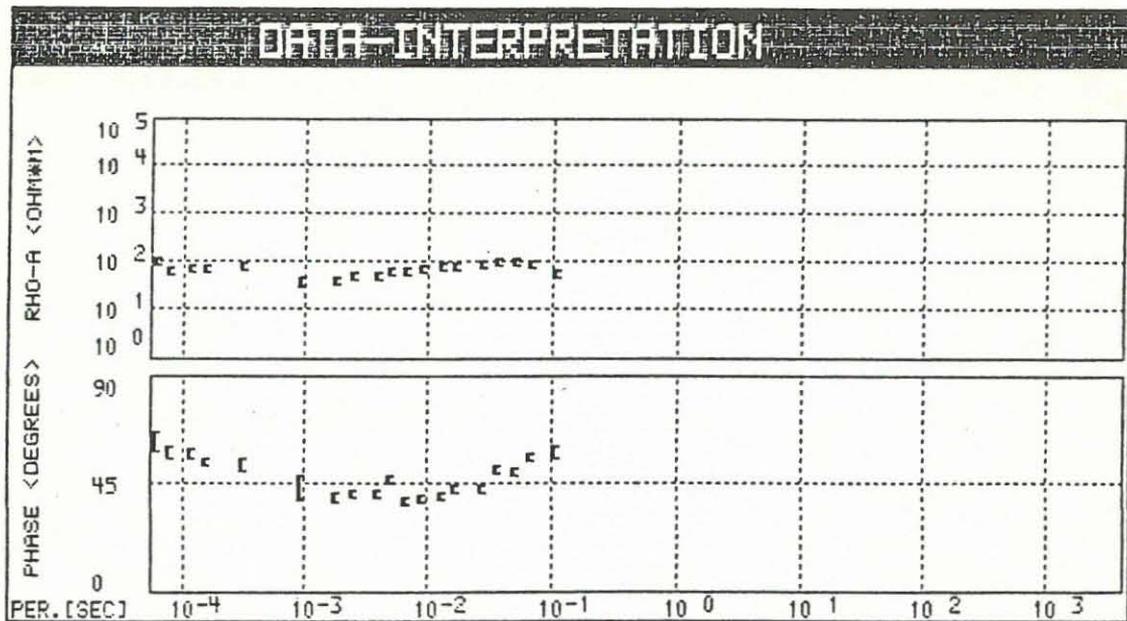
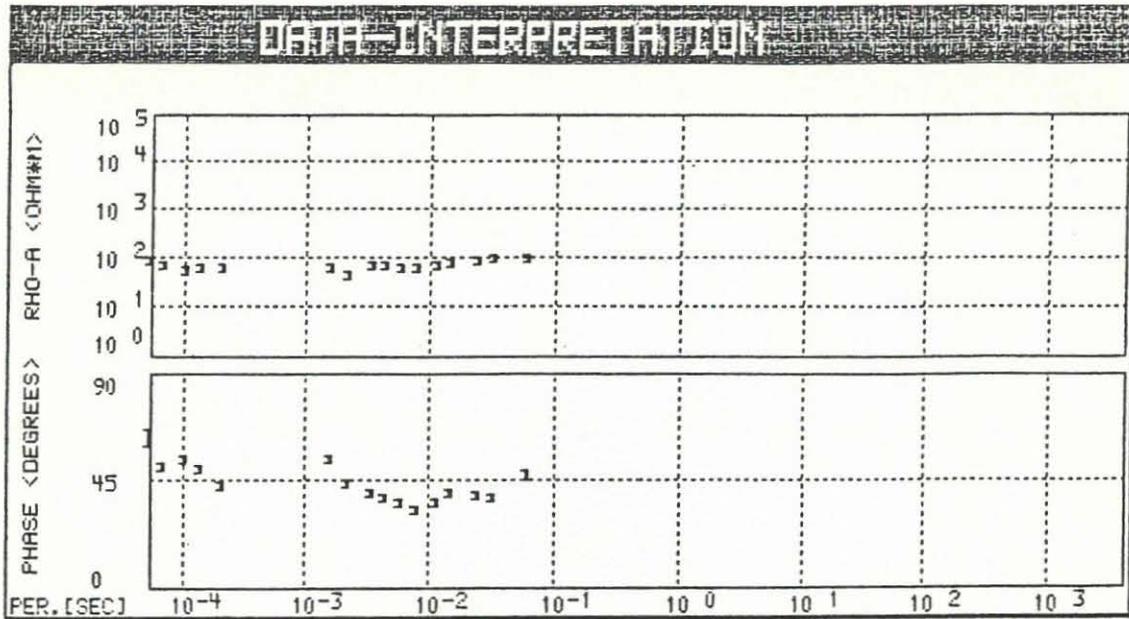
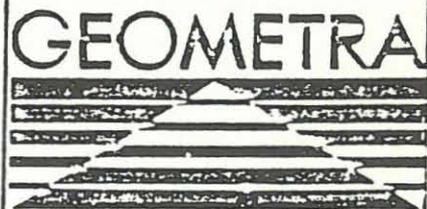


Abb.: AMT - 1 -
 Station: 1 AMT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



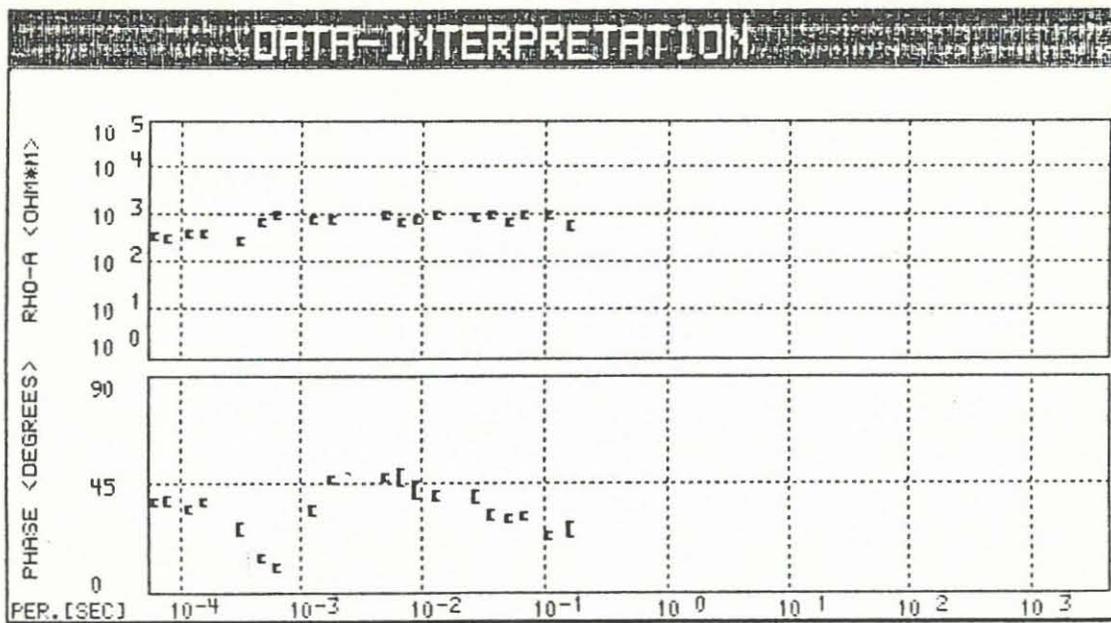
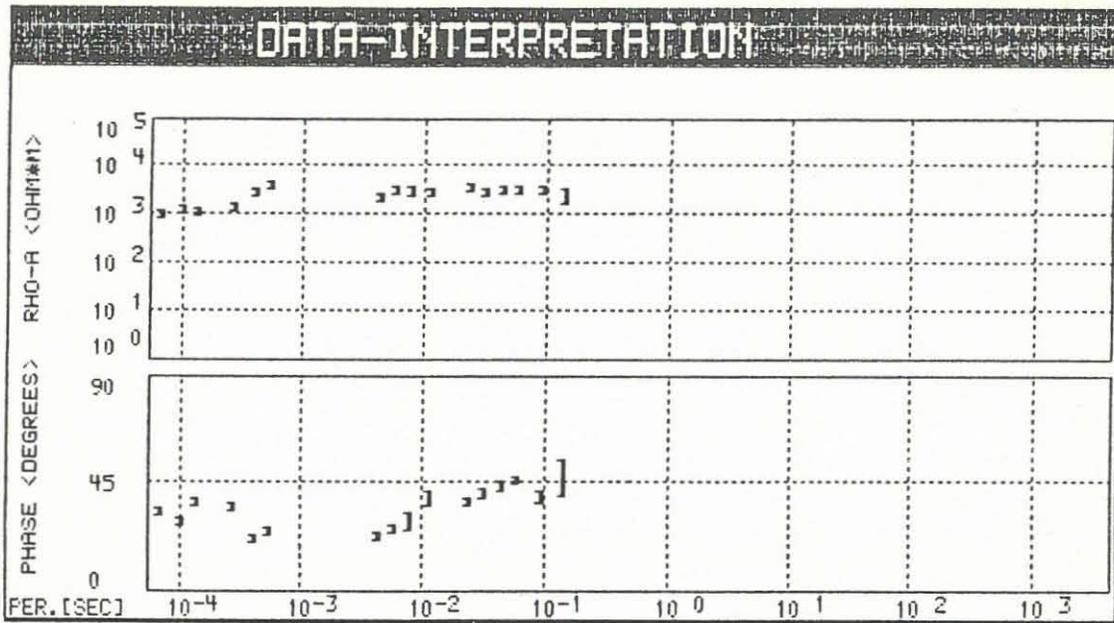
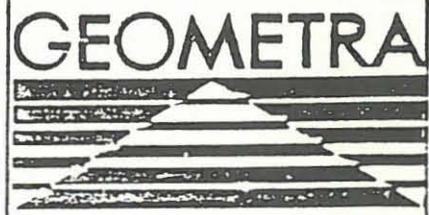


Abb.: AMT - 2 -
 Station: 3 AMT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



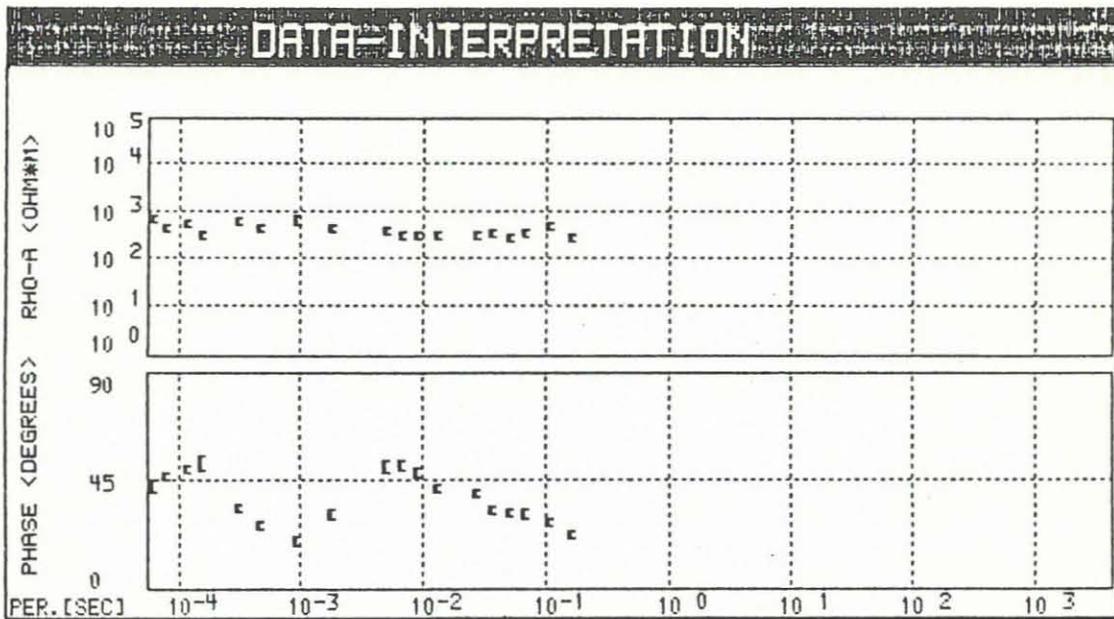
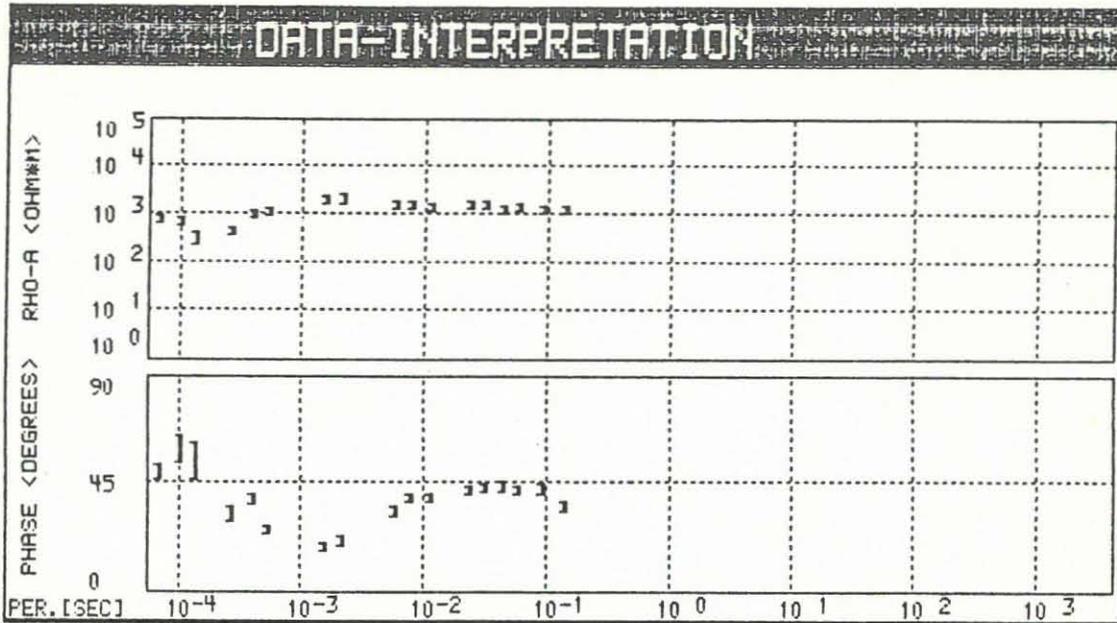


Abb.: AMT - 3 -
Station: 4 AMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}

GEOMETRA



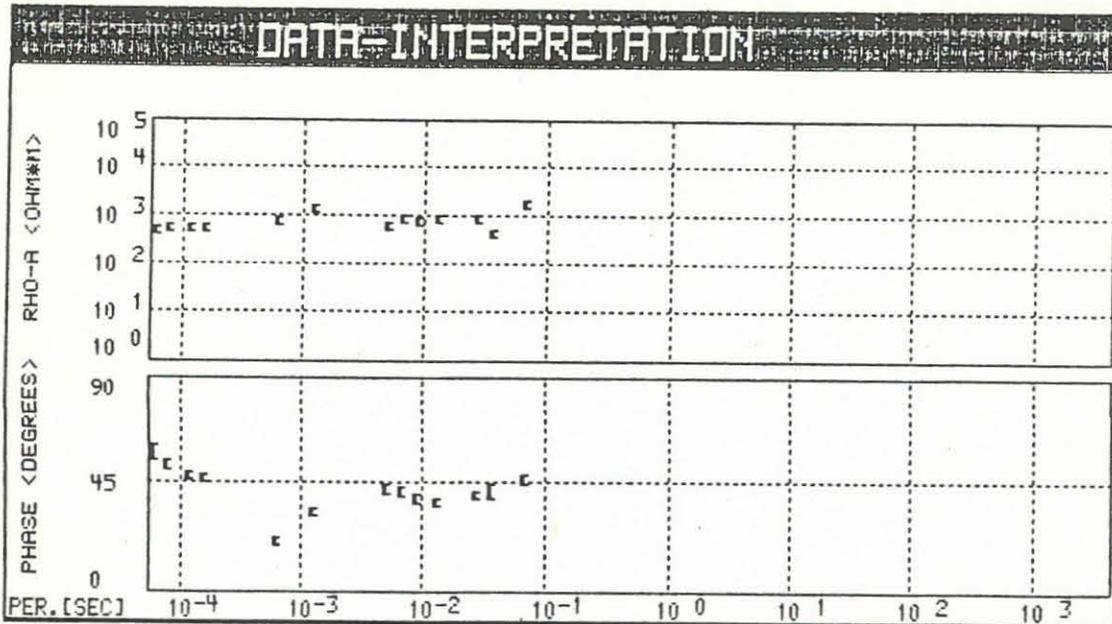
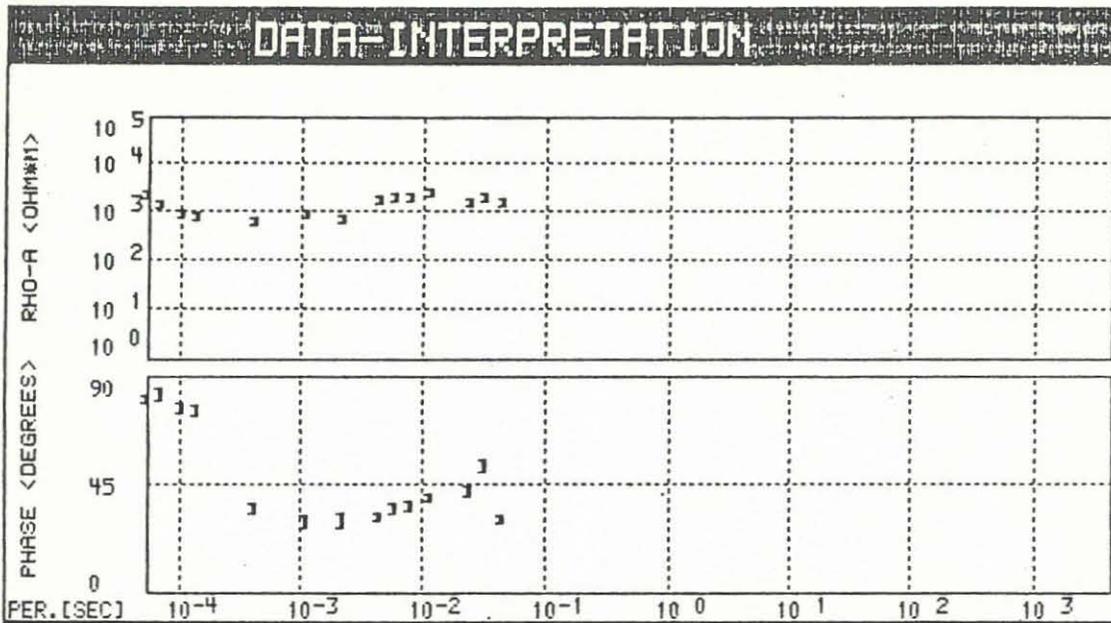
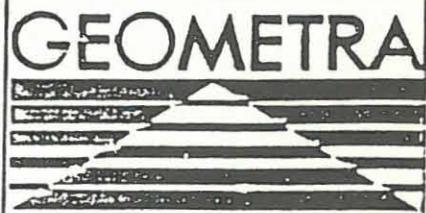


Abb.: AMT - 4 -
 Station: 5 AMT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



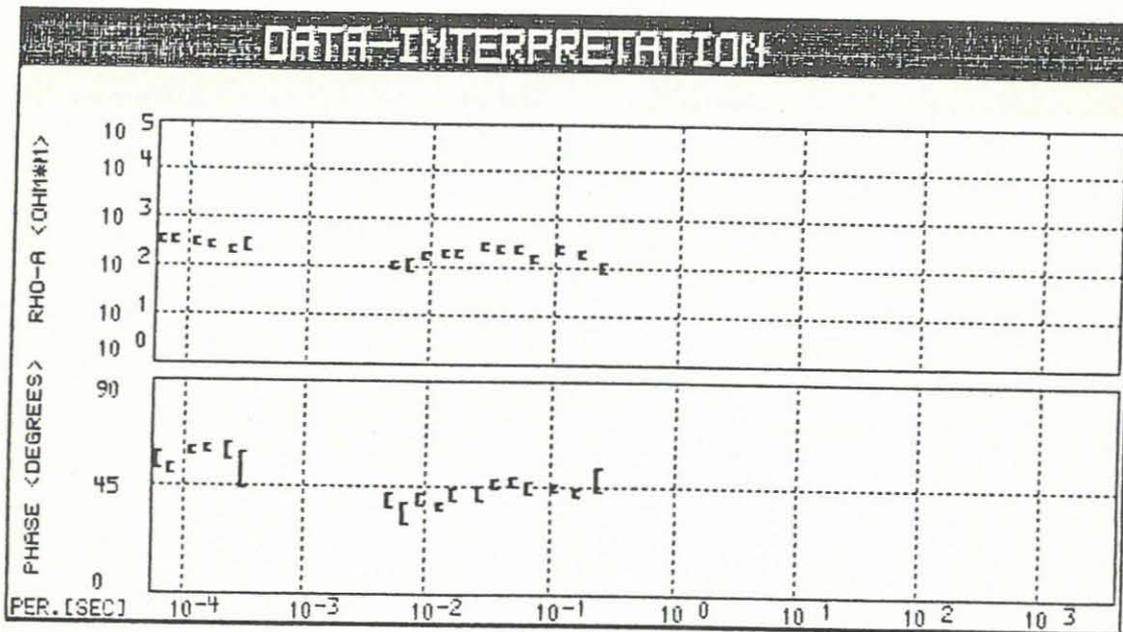
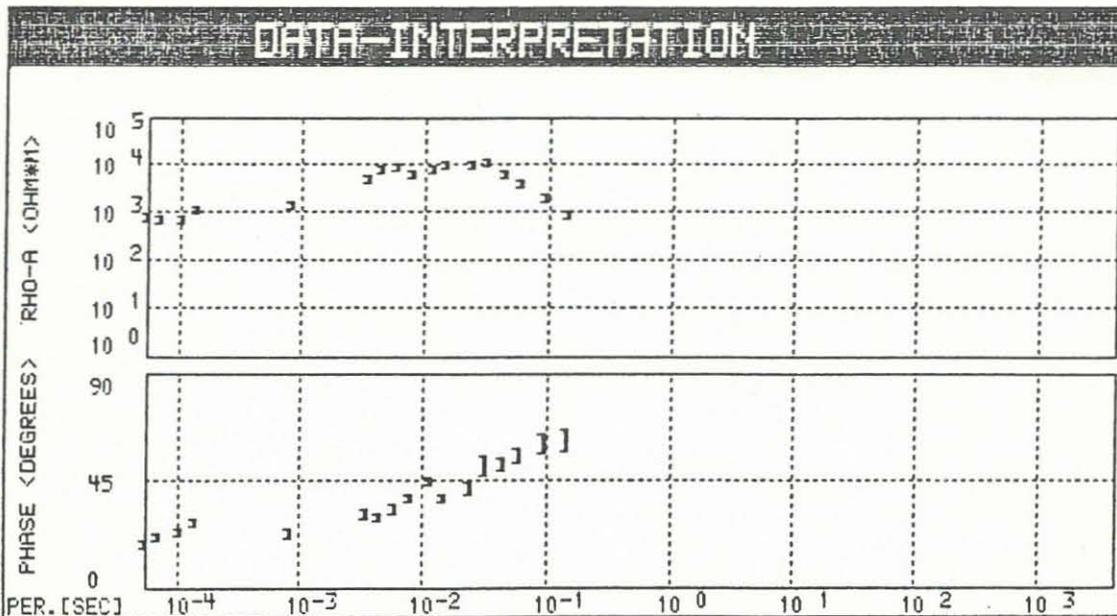
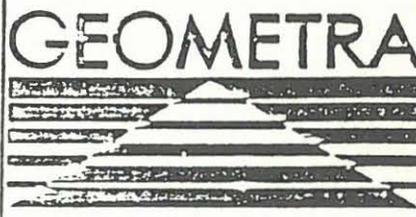


Abb.: AMT - 5 -
 Station: 7 AMT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



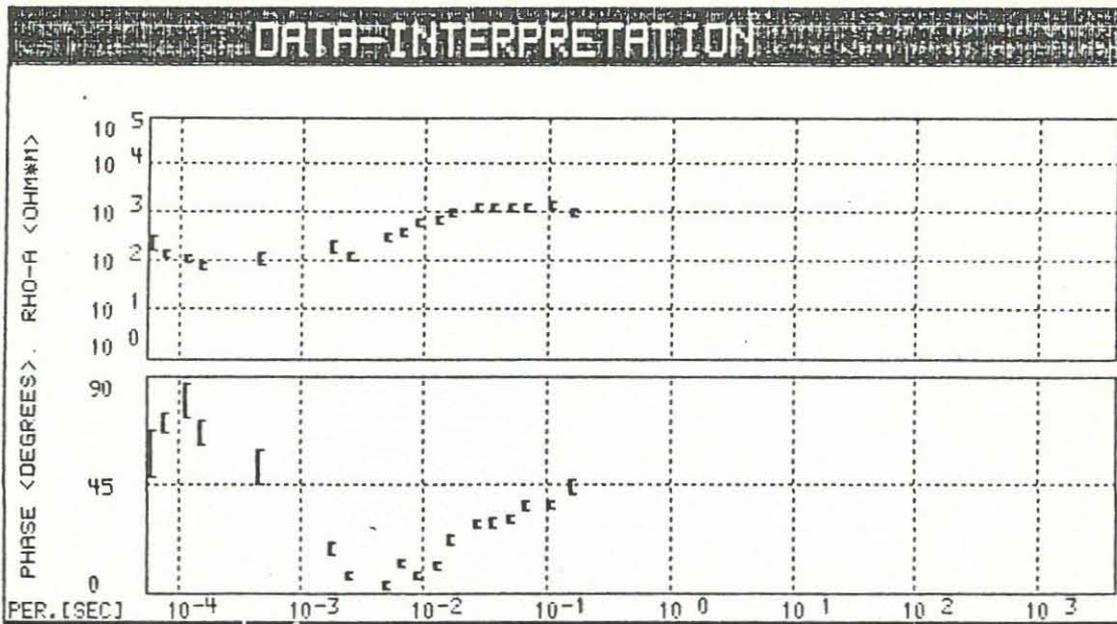
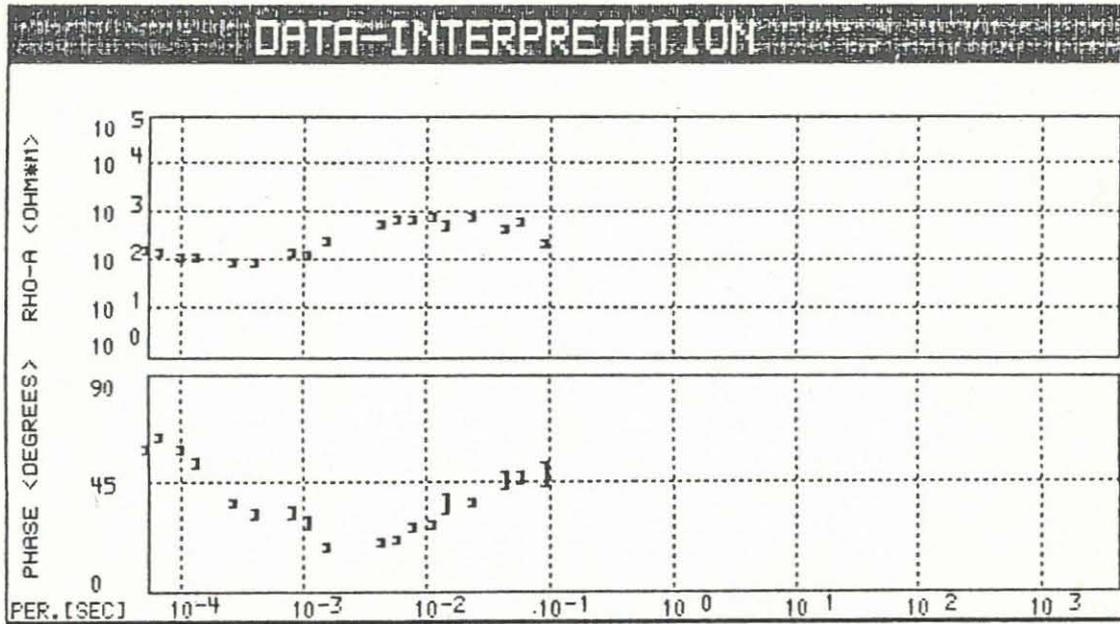
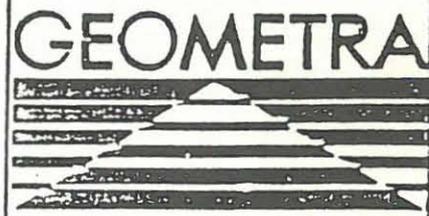


Abb.: AMT - 6 -
 Station: 8 AMT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



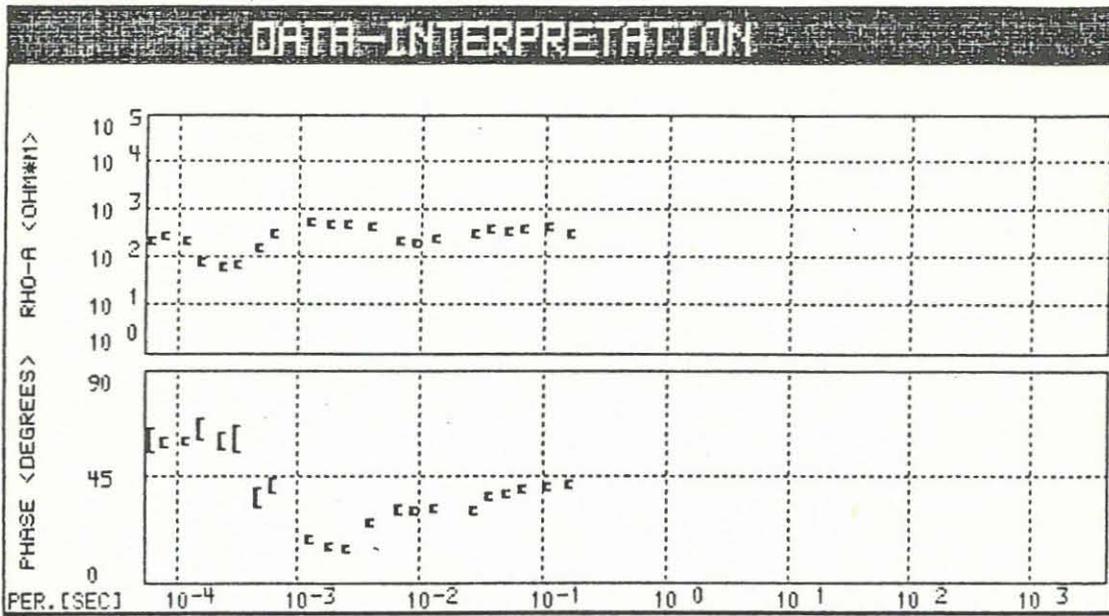
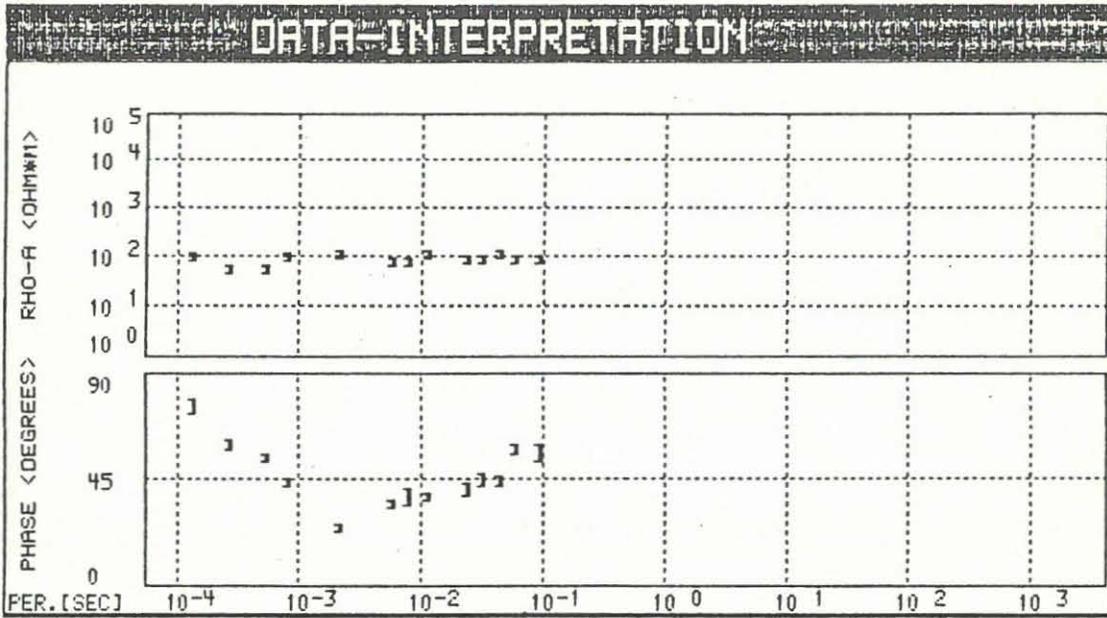
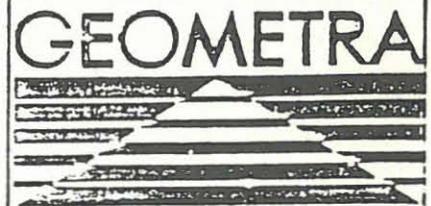


Abb.: AMT - 7 -
 Station: 9 AMT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



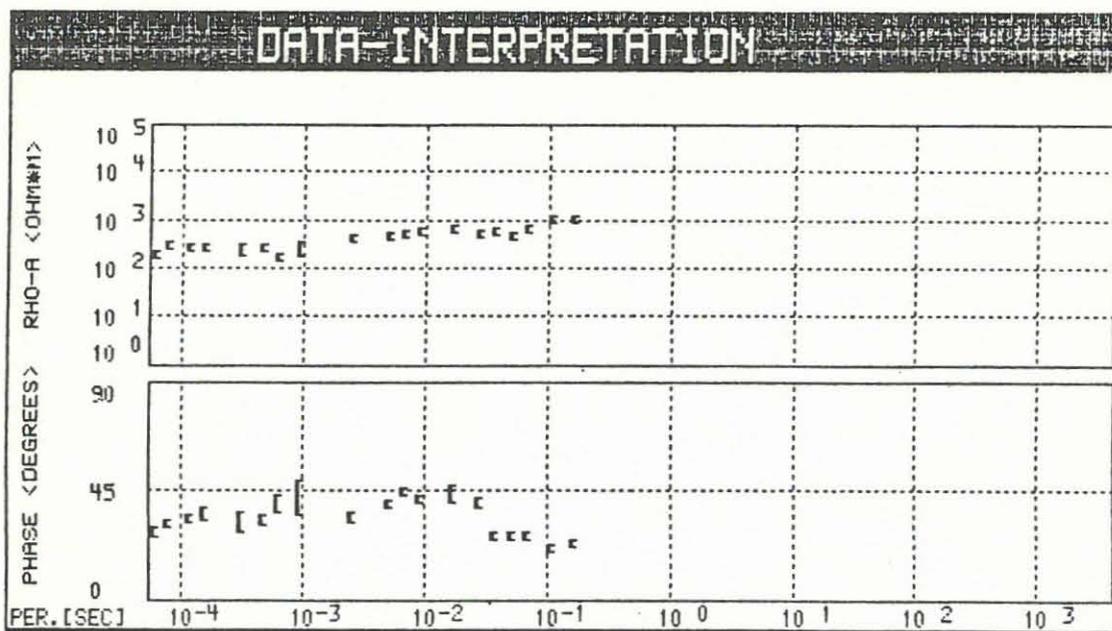
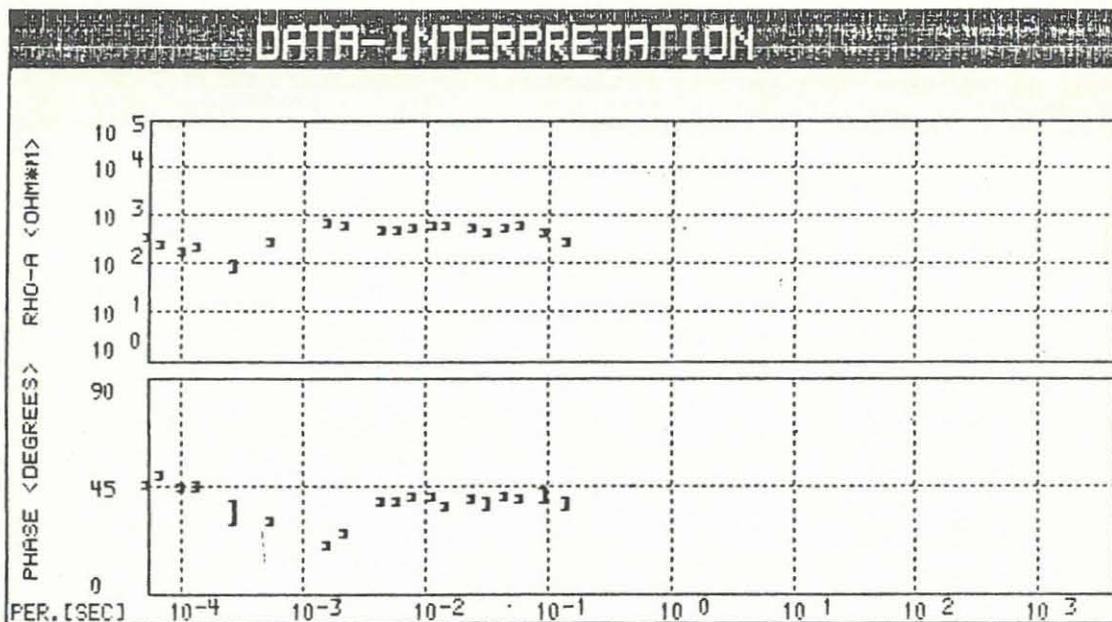


Abb.: AMT - 8 -
 Station: 10 AMT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}

GEOMETRA



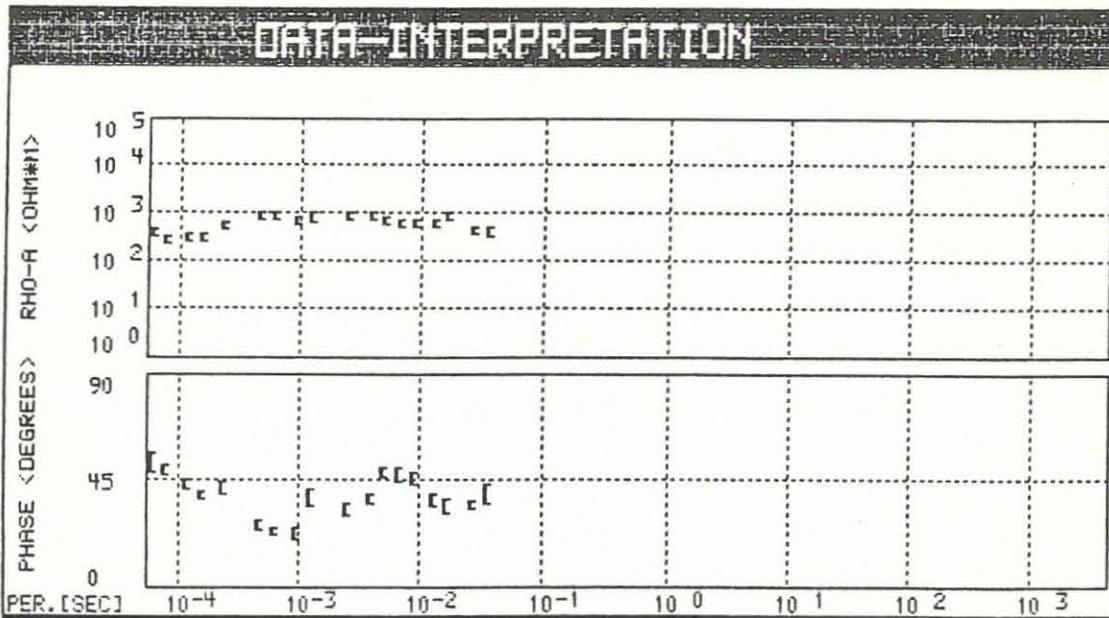
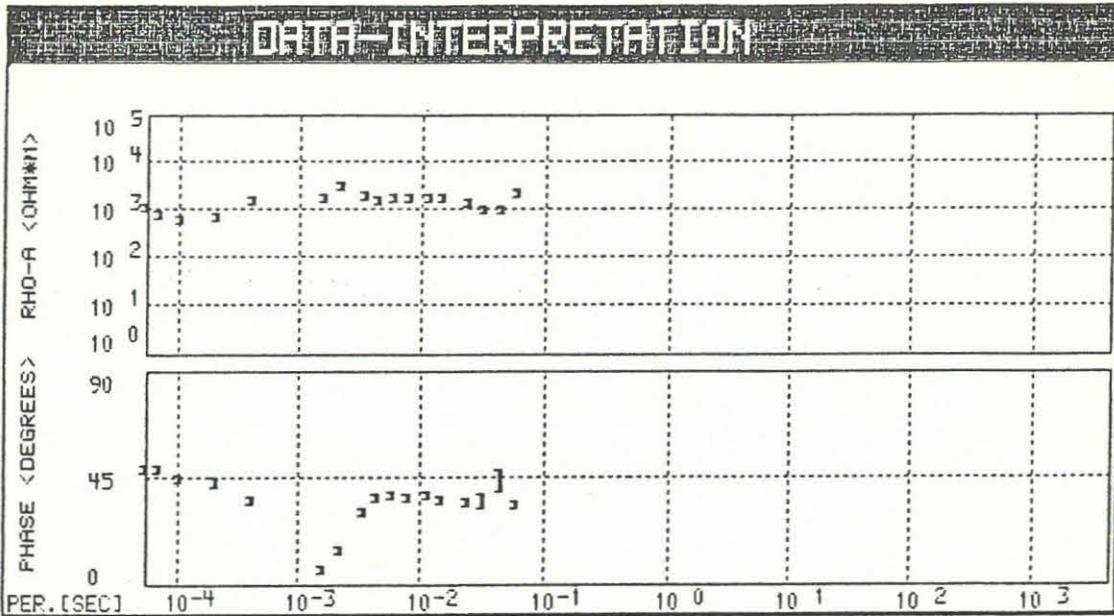
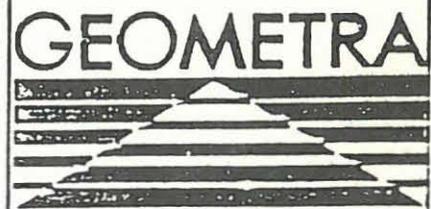


Abb.: AMT - 9 -
 Station: 11 AMT-Messung
 Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
 Impedanz PHI
 oben: Z_{xy} unten: Z_{yx}



3.4

CSAMT

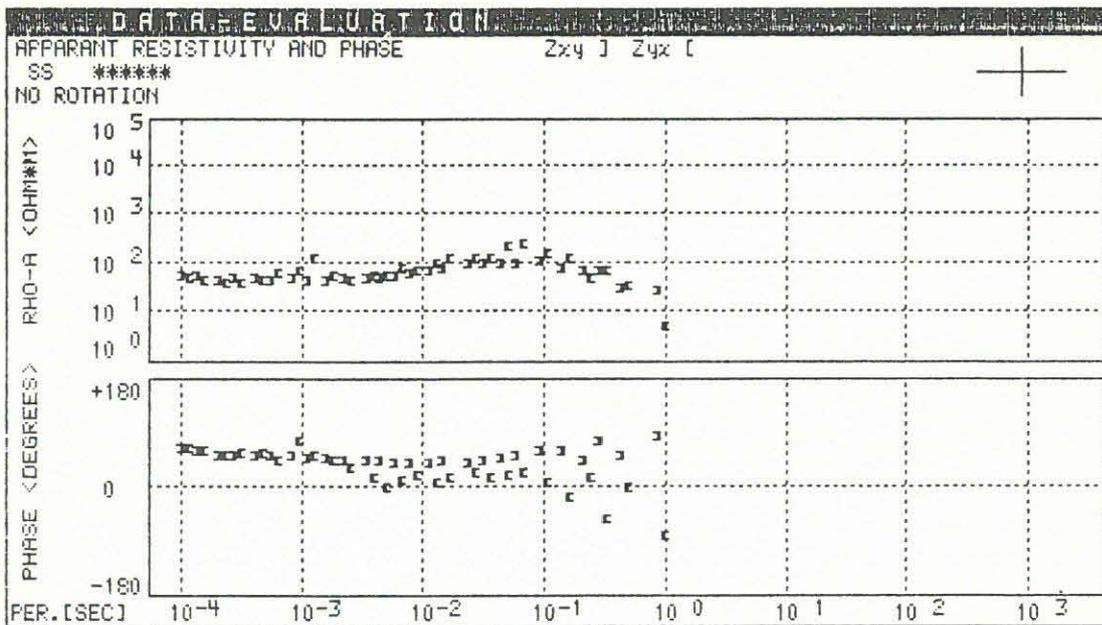
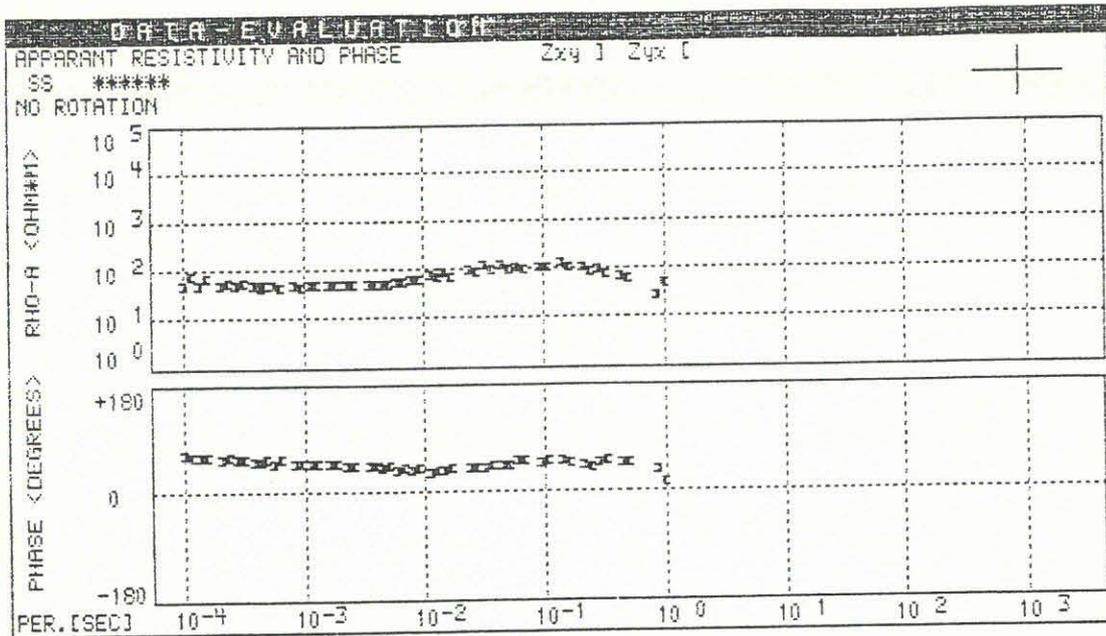
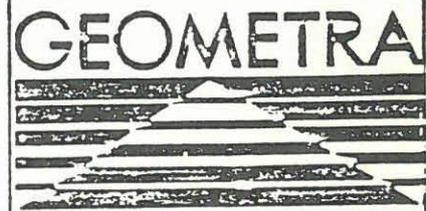


Abb.: CSAMT - 1 -
Station: 1 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



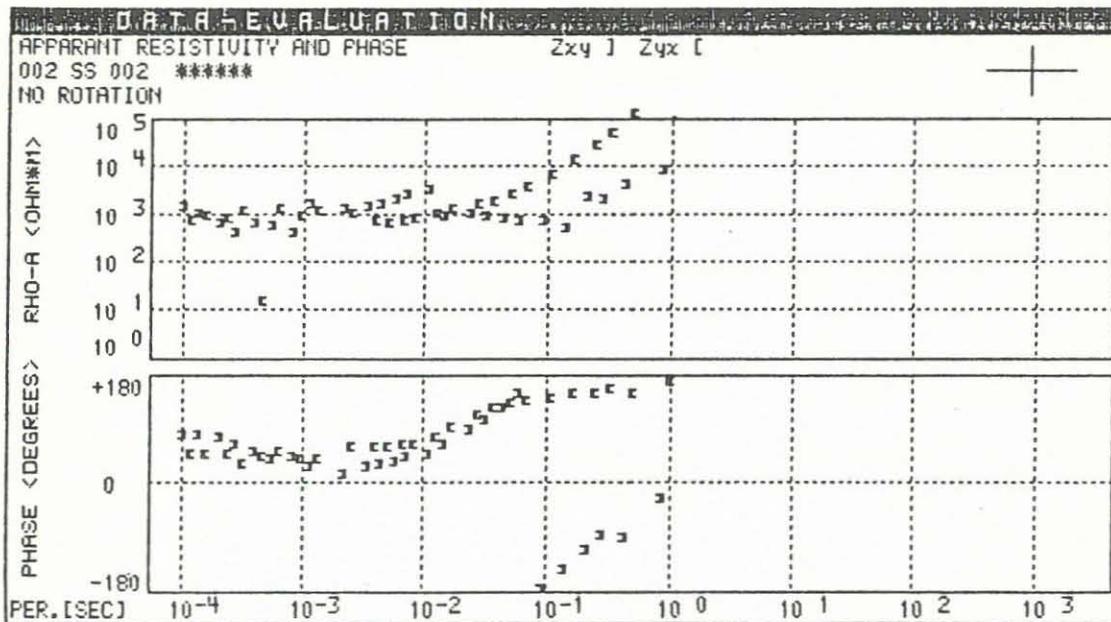
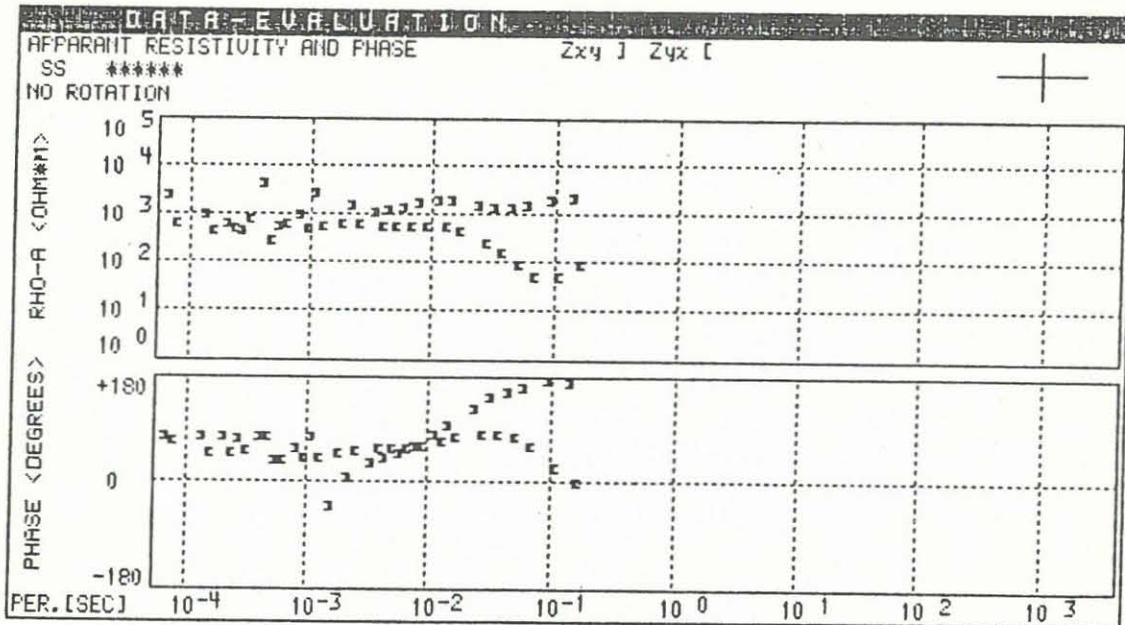
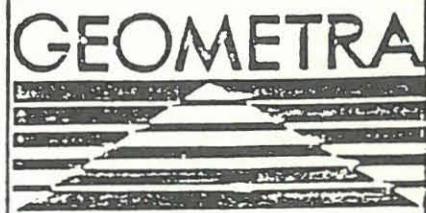


Abb.: CSAMT - 2 -
Station: 2 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



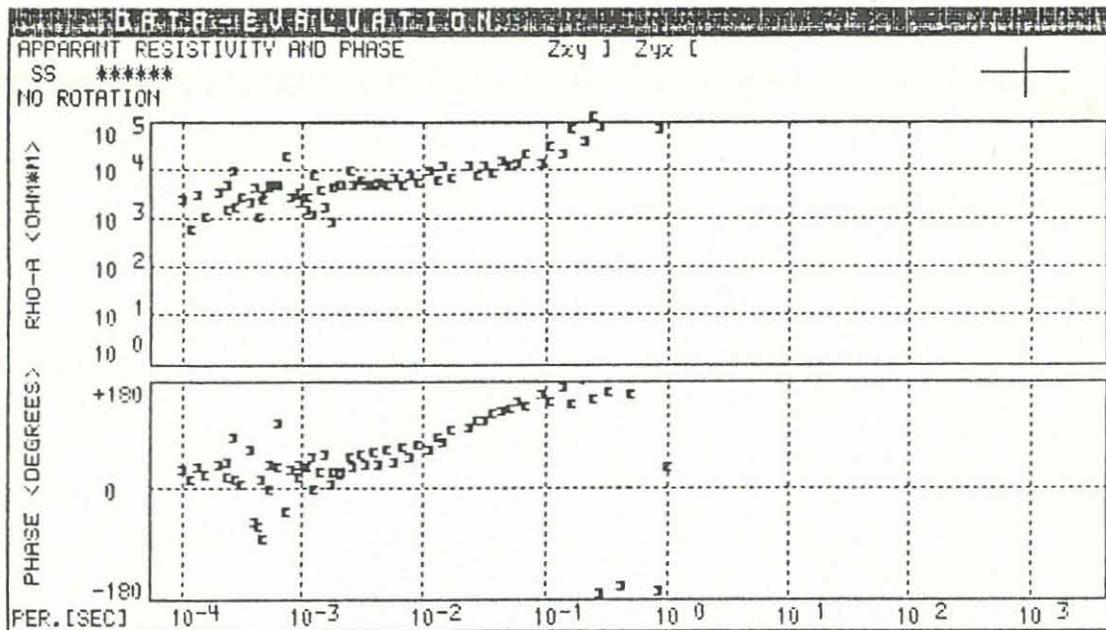
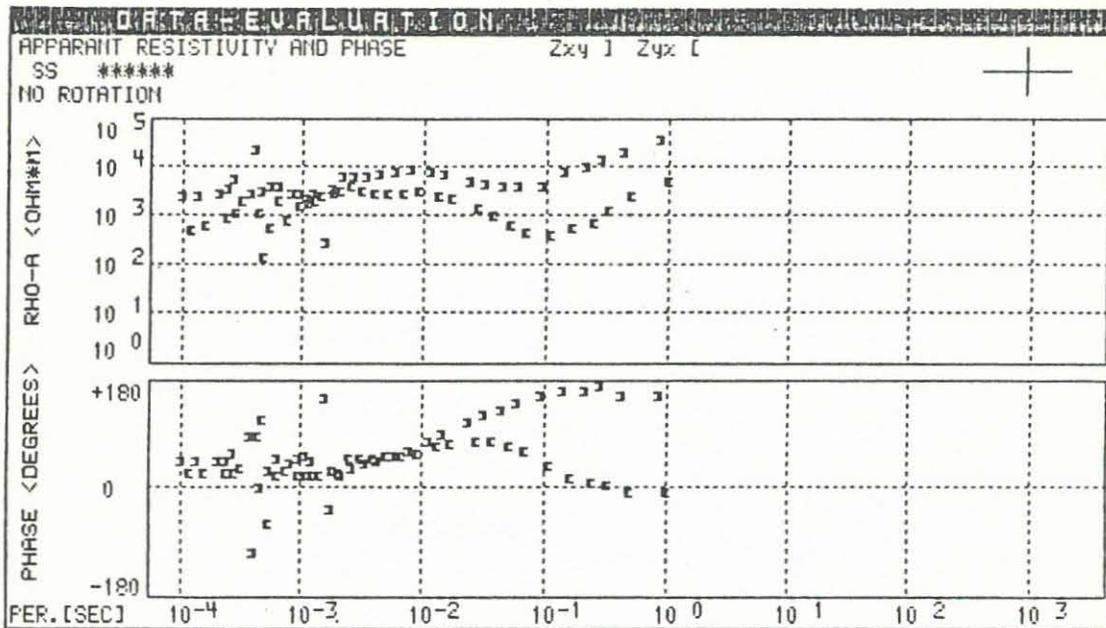
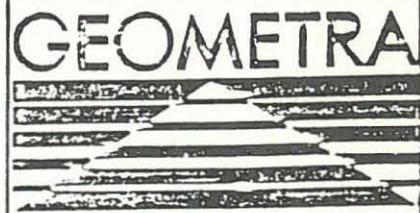


Abb.: CSAMT - 3 -
Station: 3 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



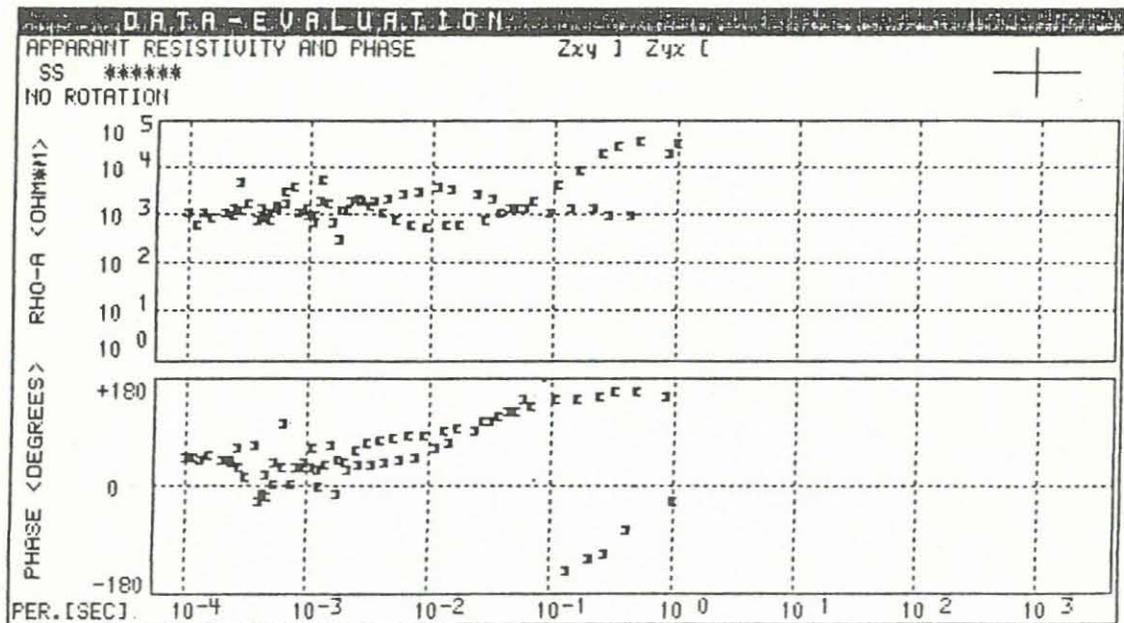
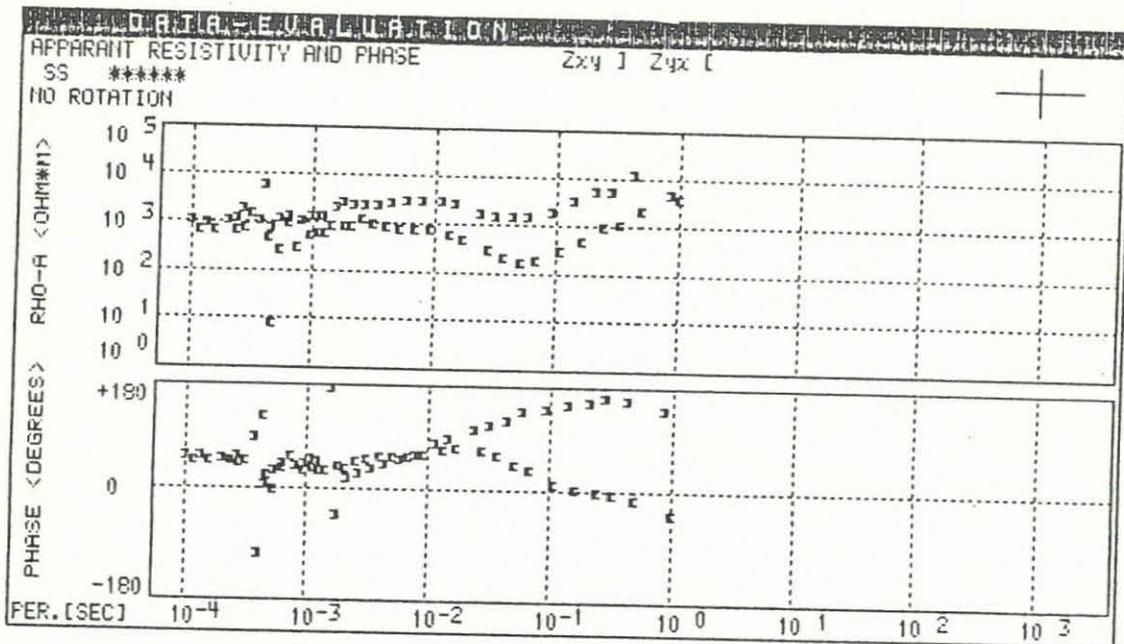
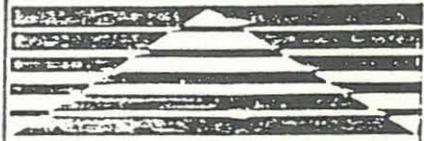


Abb.: CSAMT - 4 -
Station: 4 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W

GEOMETRA



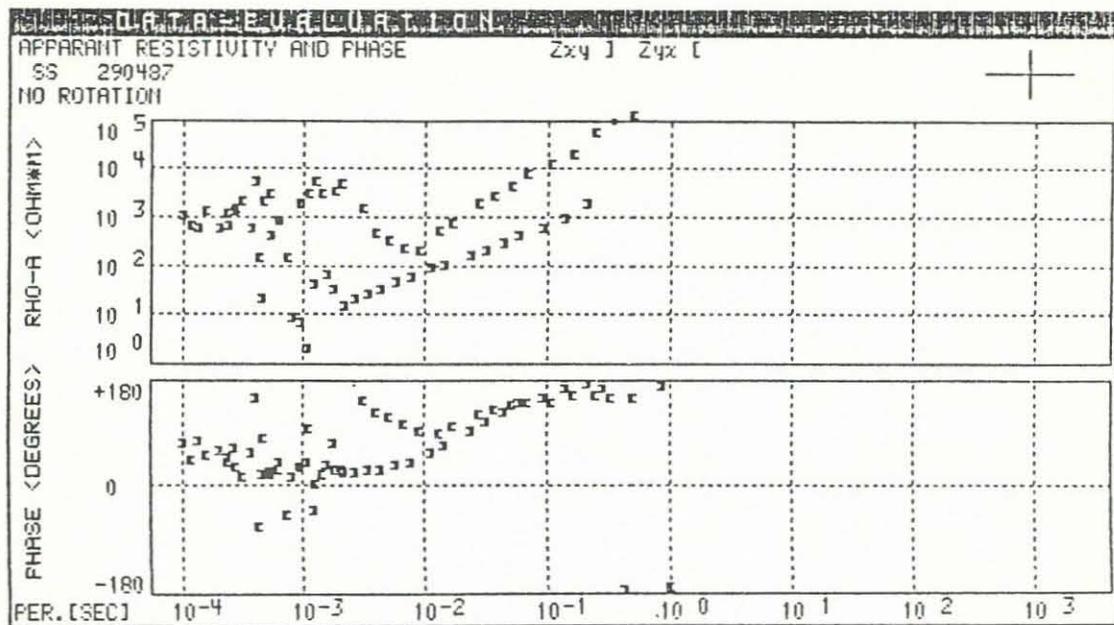
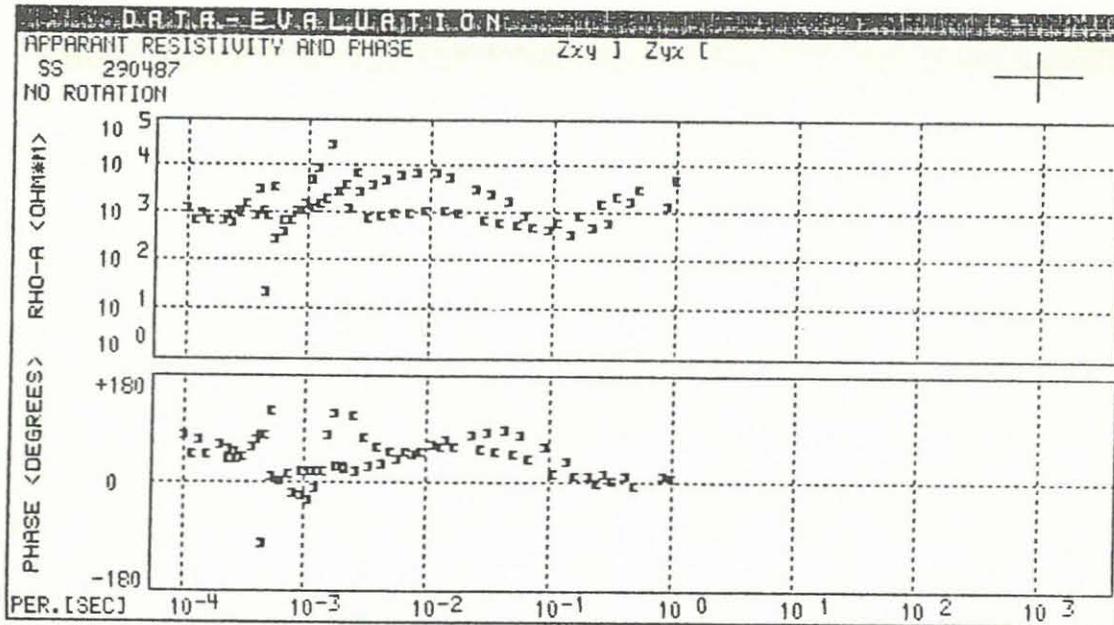


Abb.: CSAMT - 5 -
Station: 5 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W

GEOMETRA



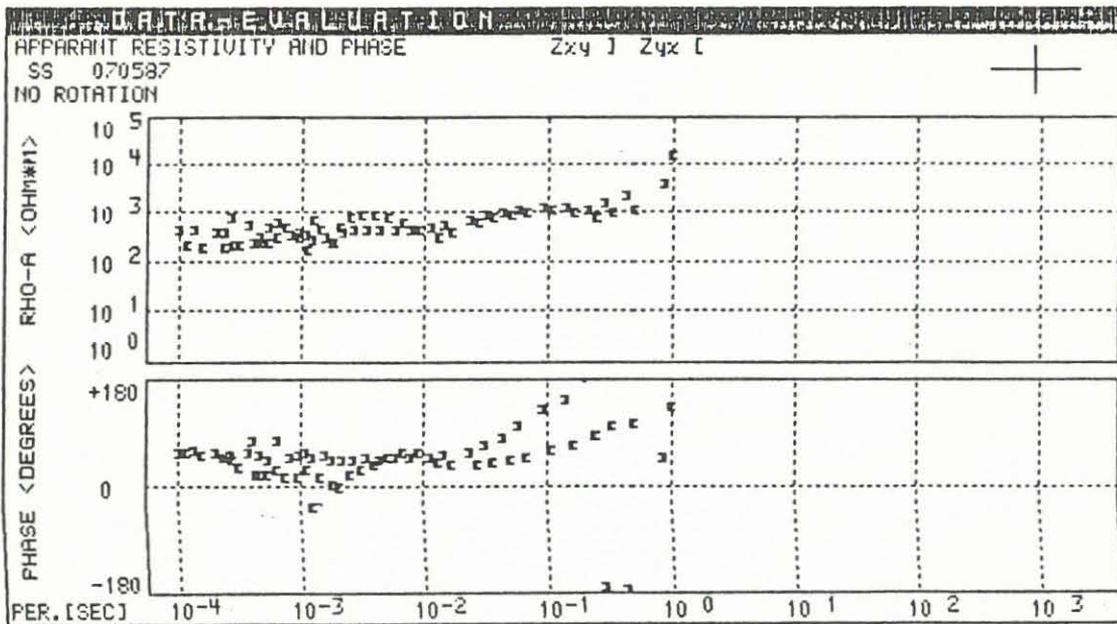
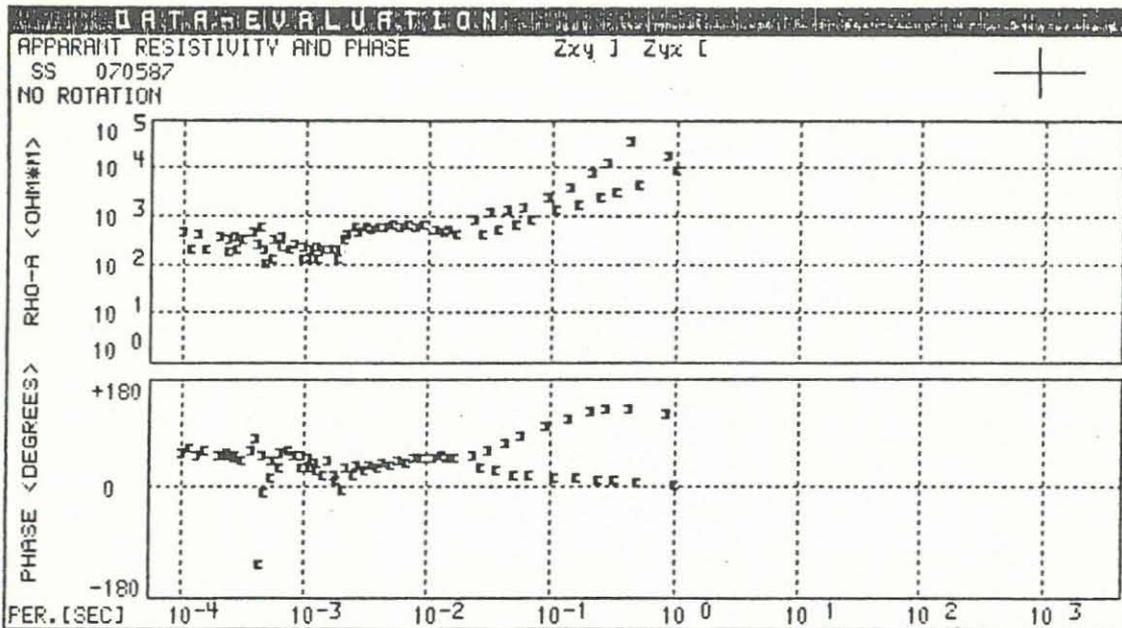
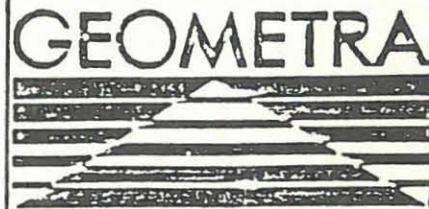


Abb.: CSAMT - 6 -
Station: 6 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



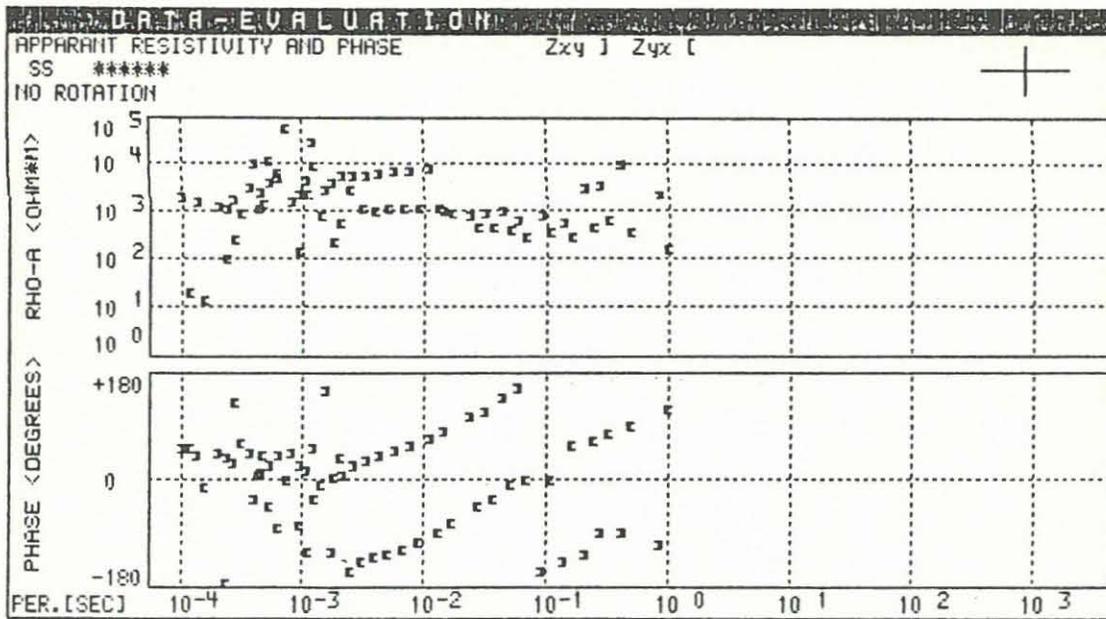
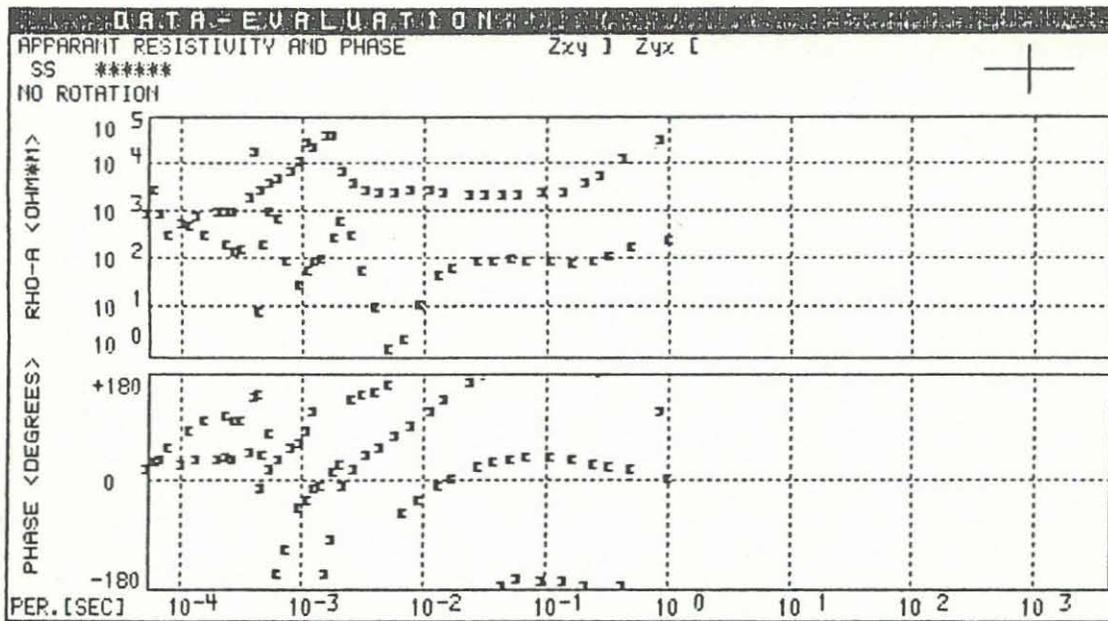
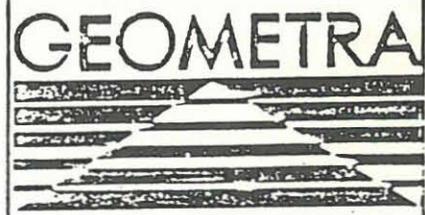


Abb.: CSAMT - 7 -
Station: 7 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



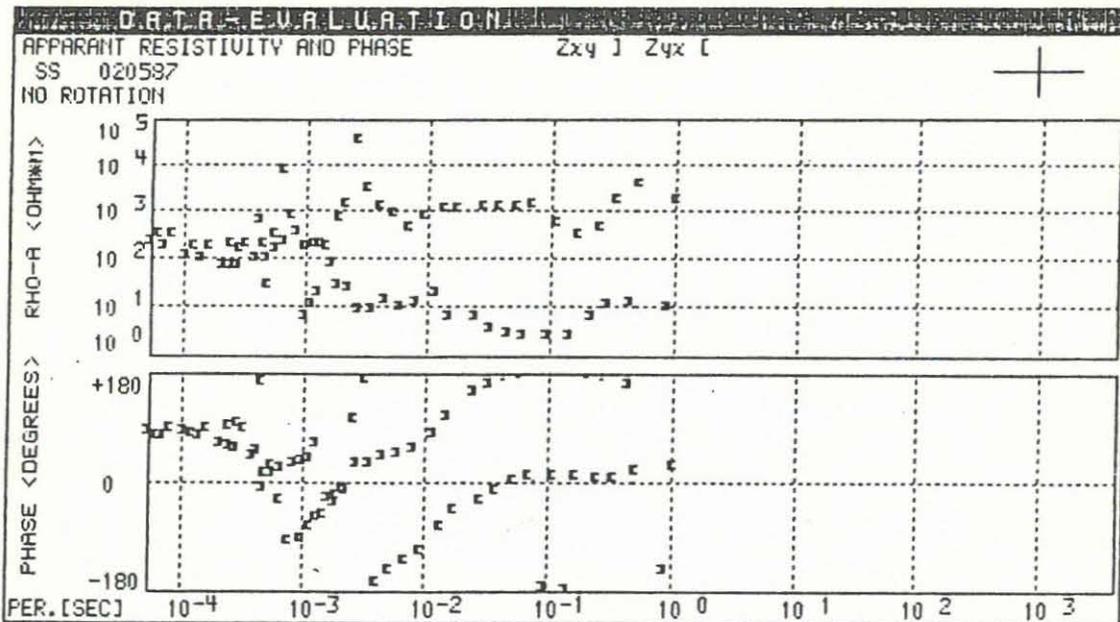
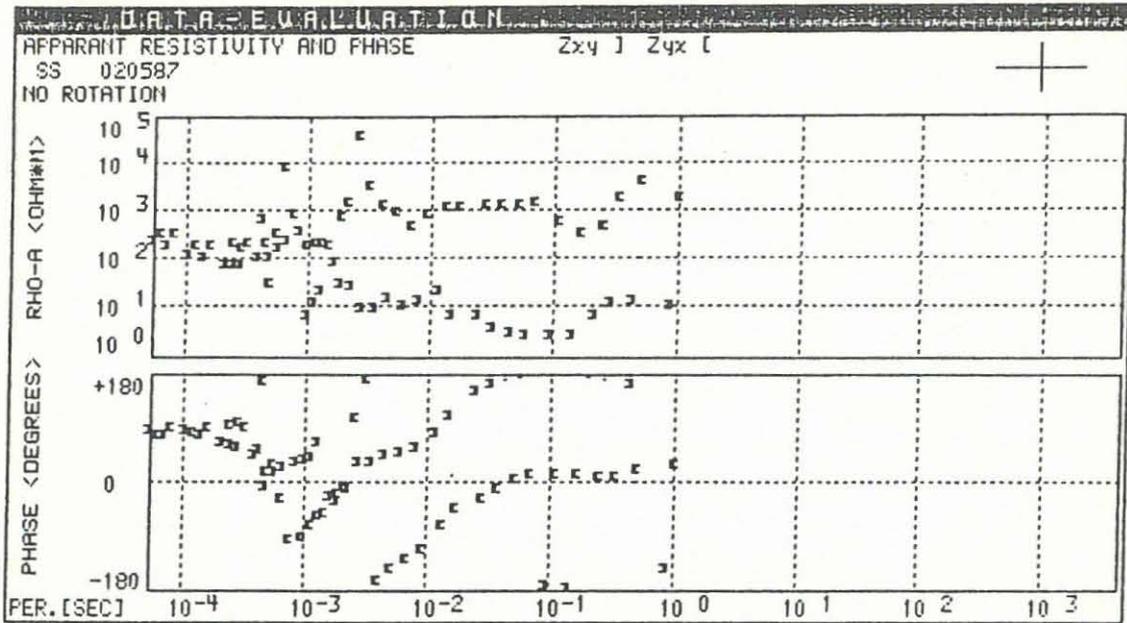
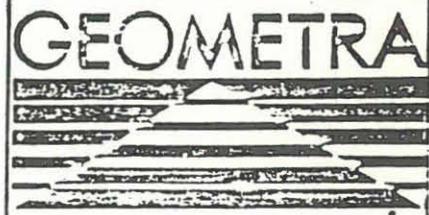


Abb.: CSAMT - 8 -
Station: 8 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



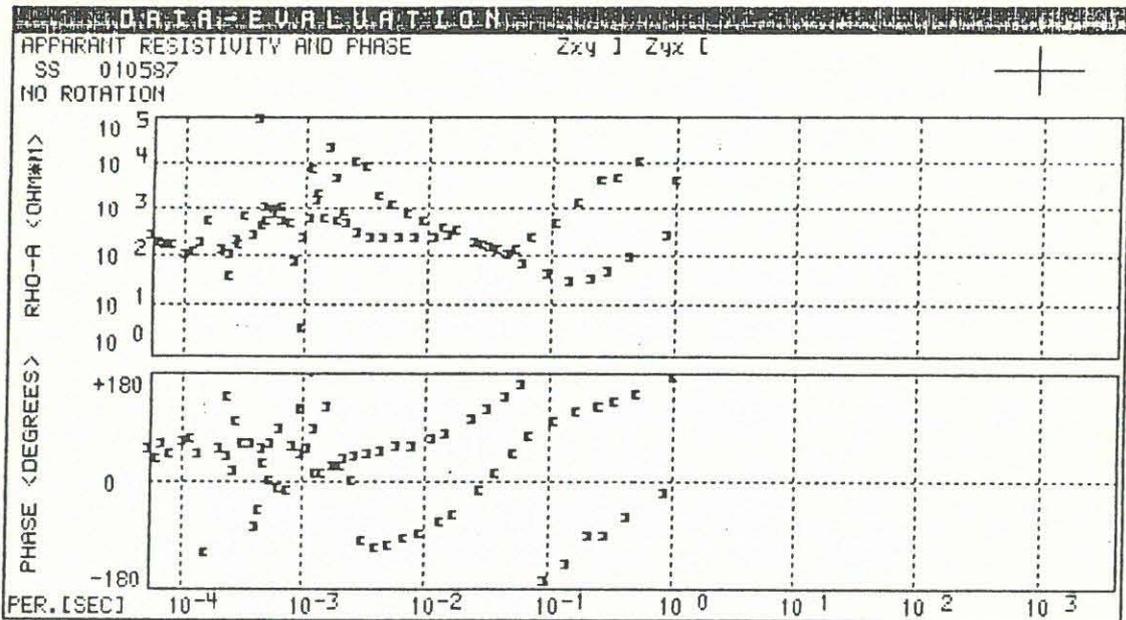
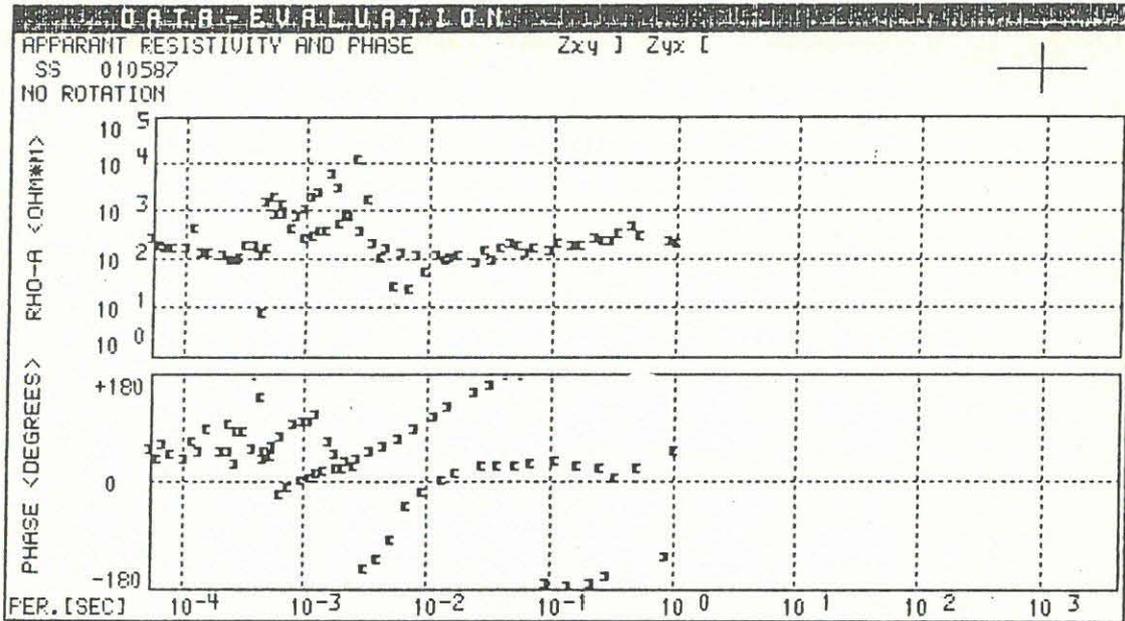
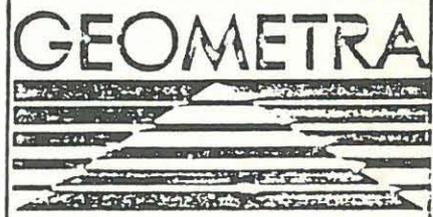


Abb.: CSAMT - 9 -
Station: 9 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



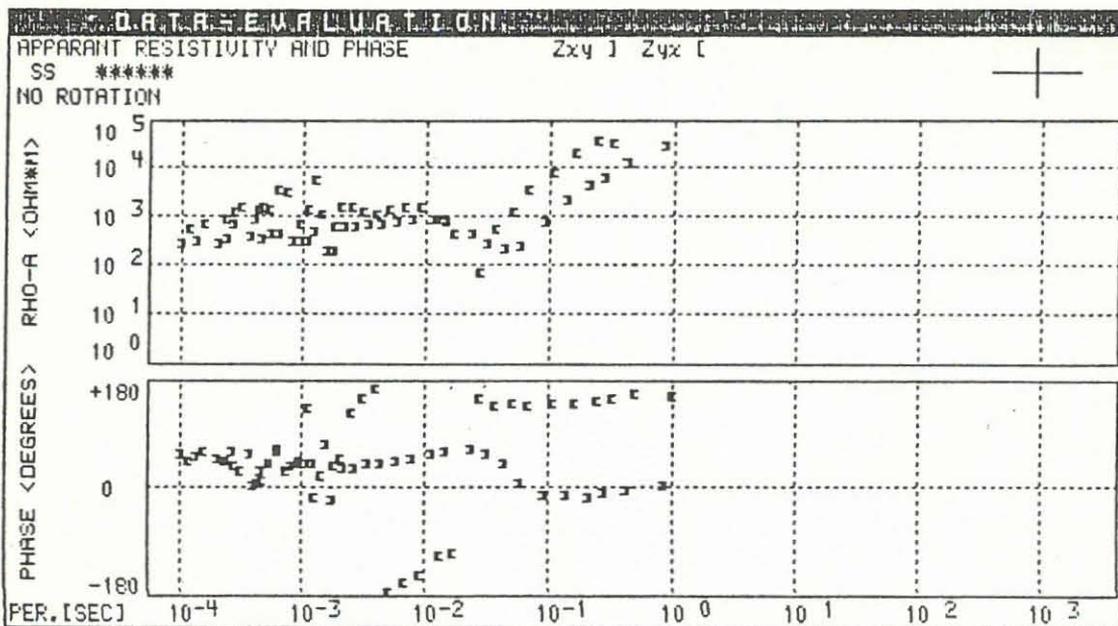
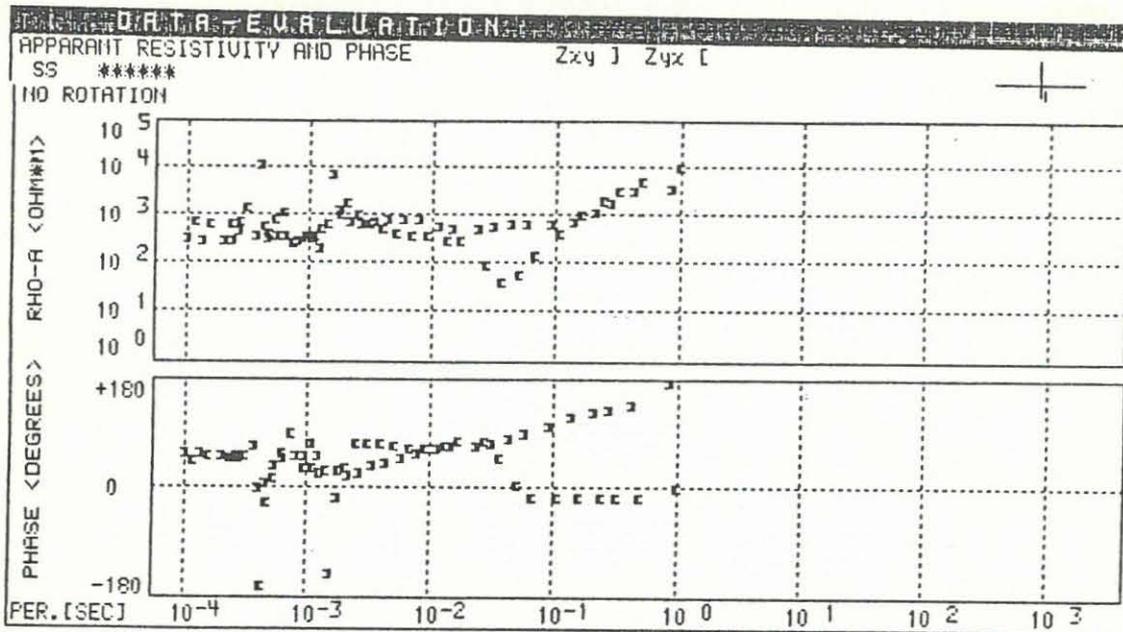
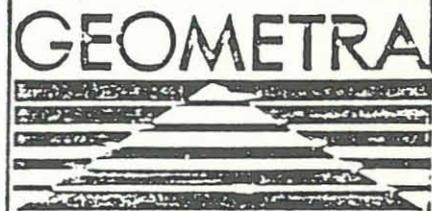


Abb.: CSAMT - 10 -
Station: 10 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



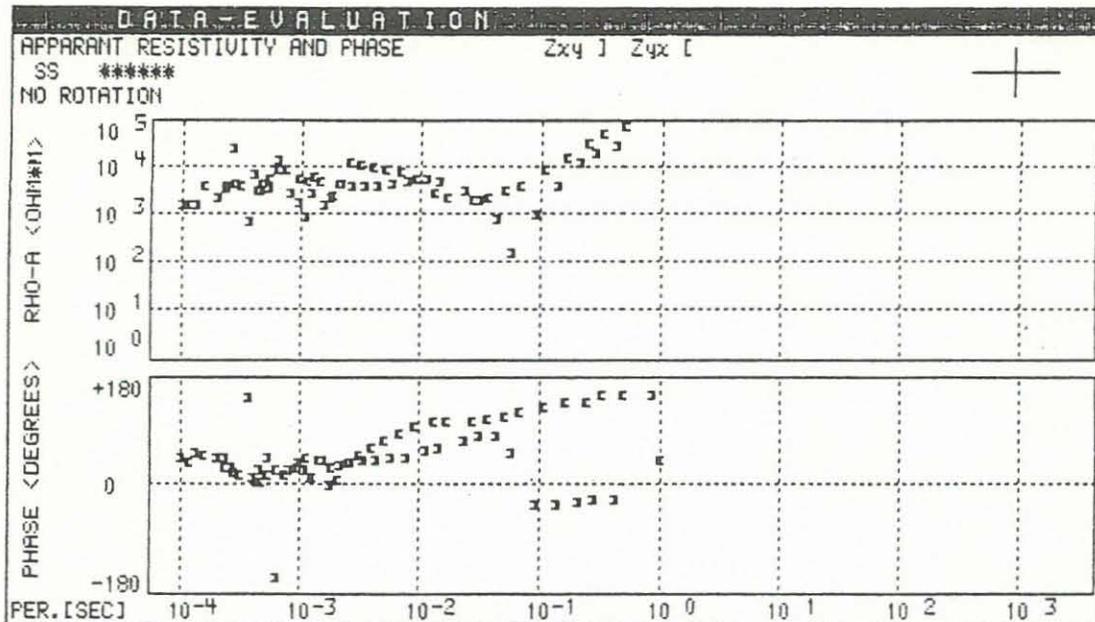
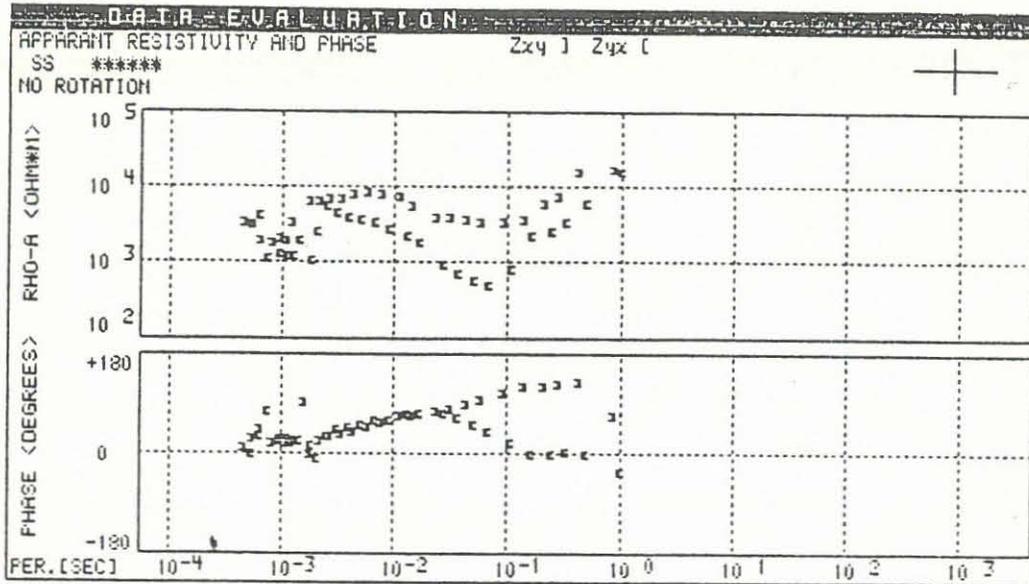
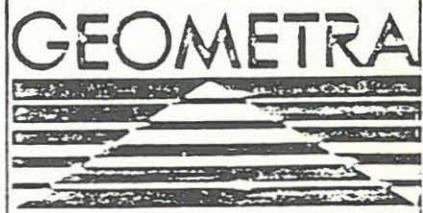


Abb.: CSAMT - 11 -
Station: 11 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



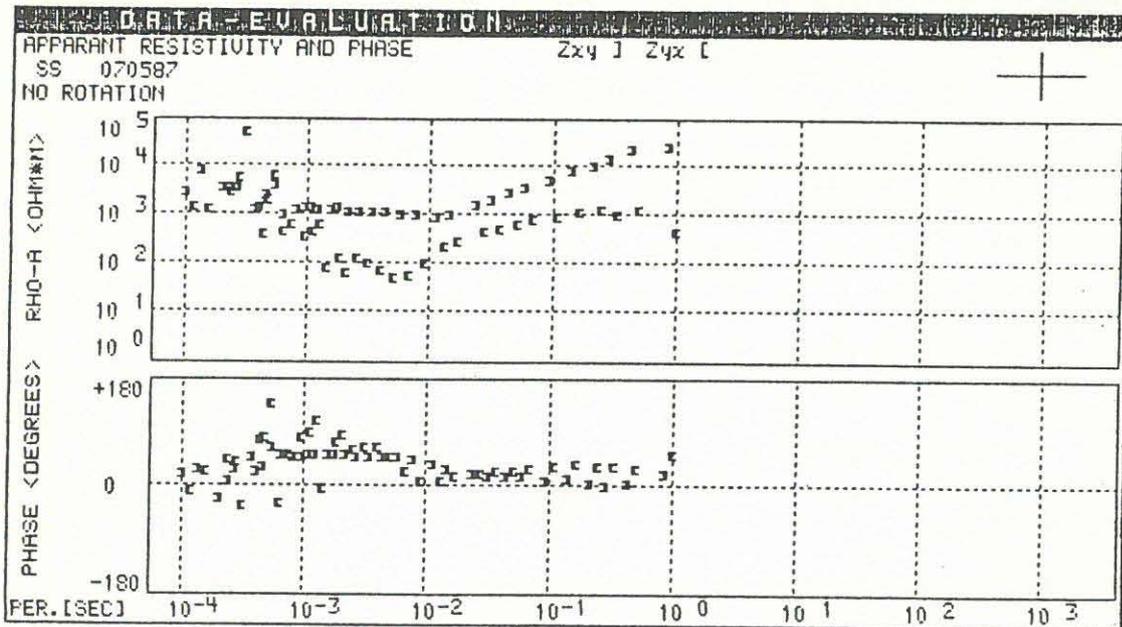
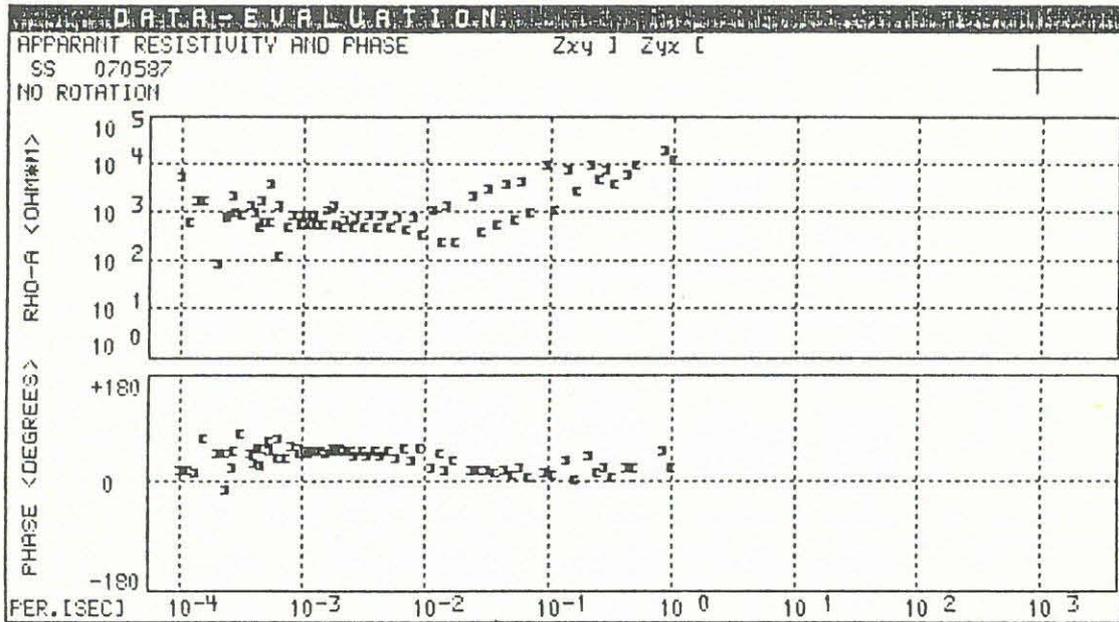
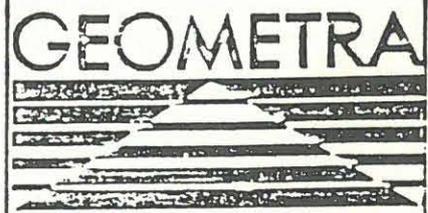


Abb.: CSAMT - 12 -
Station: 12 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



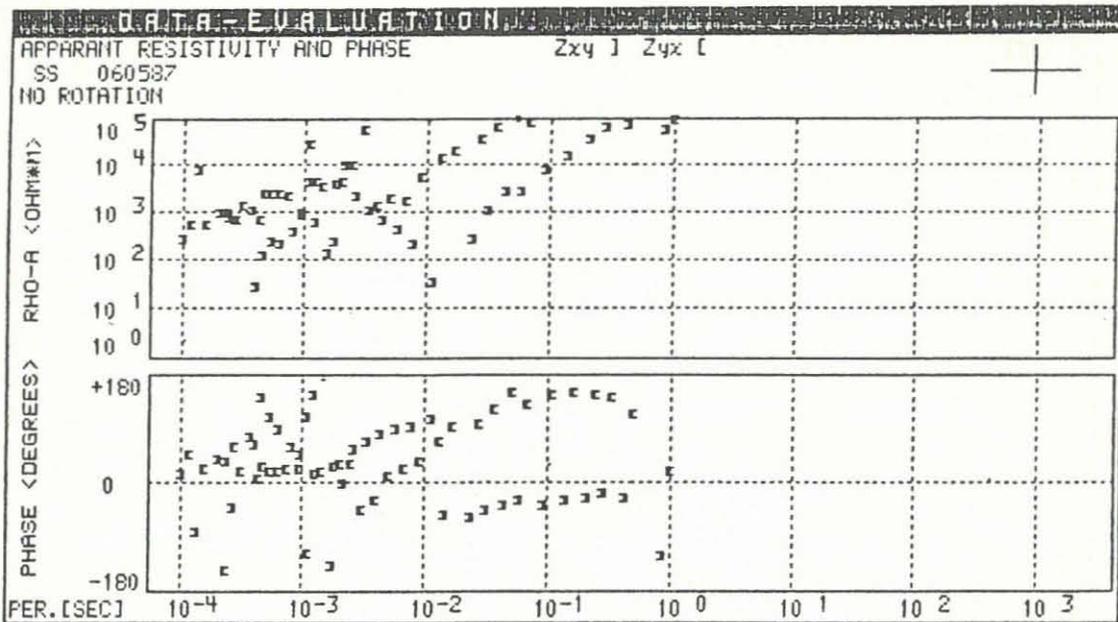
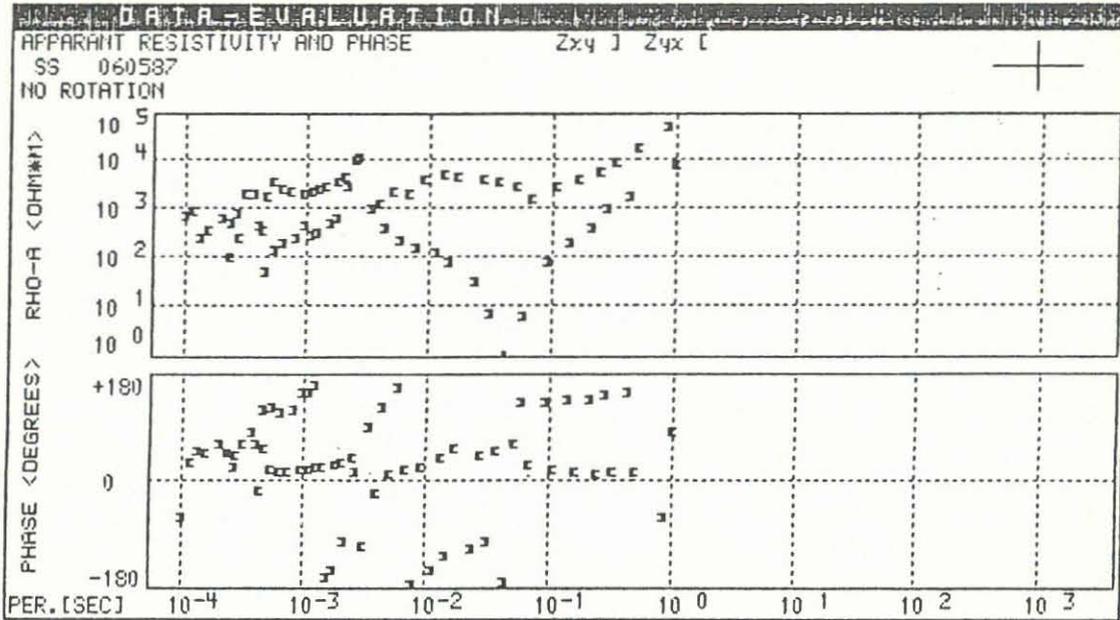
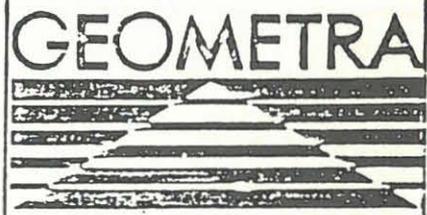


Abb.: CSAMT - 13 -
Station: 13 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



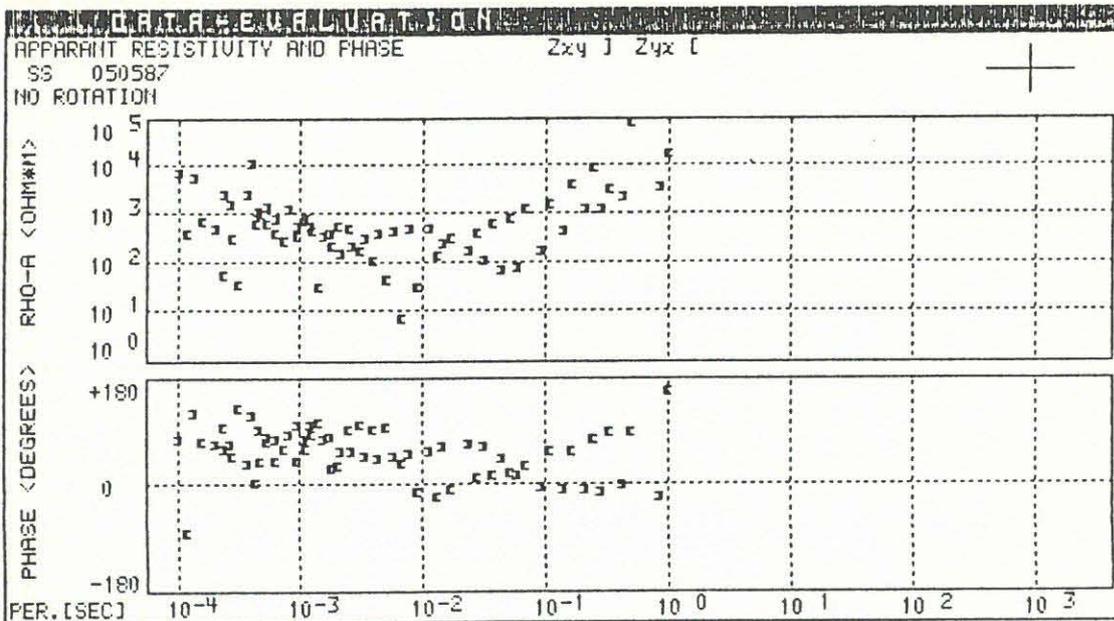
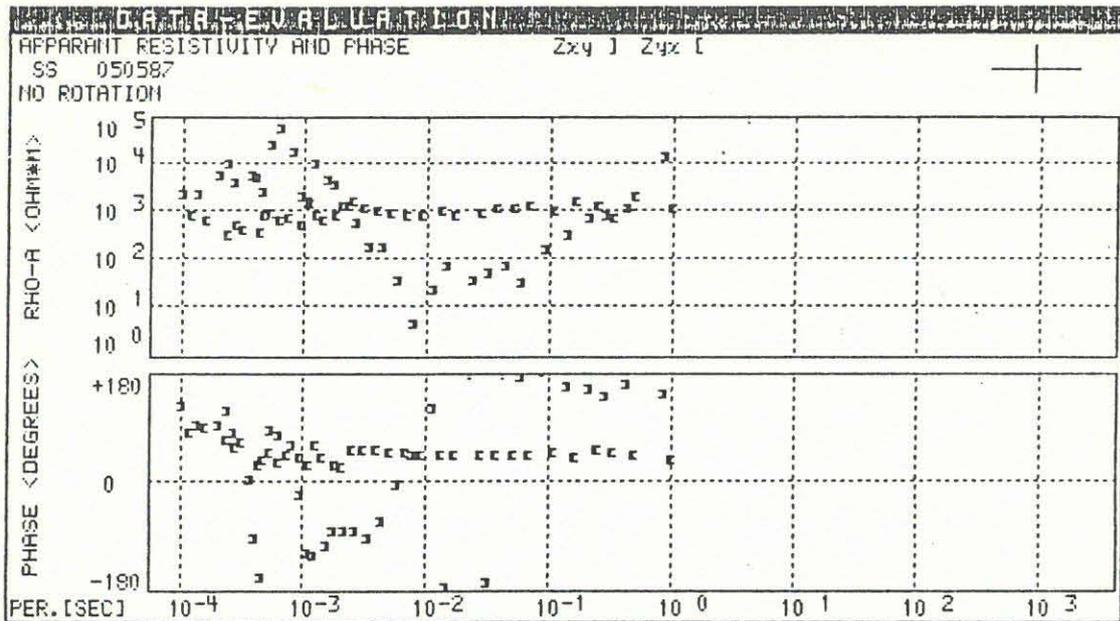
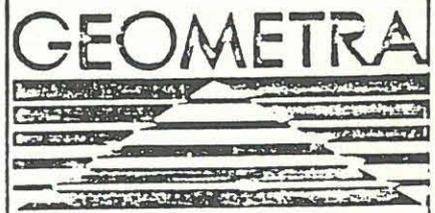


Abb.: CSAMT - 14 -
Station: 14 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



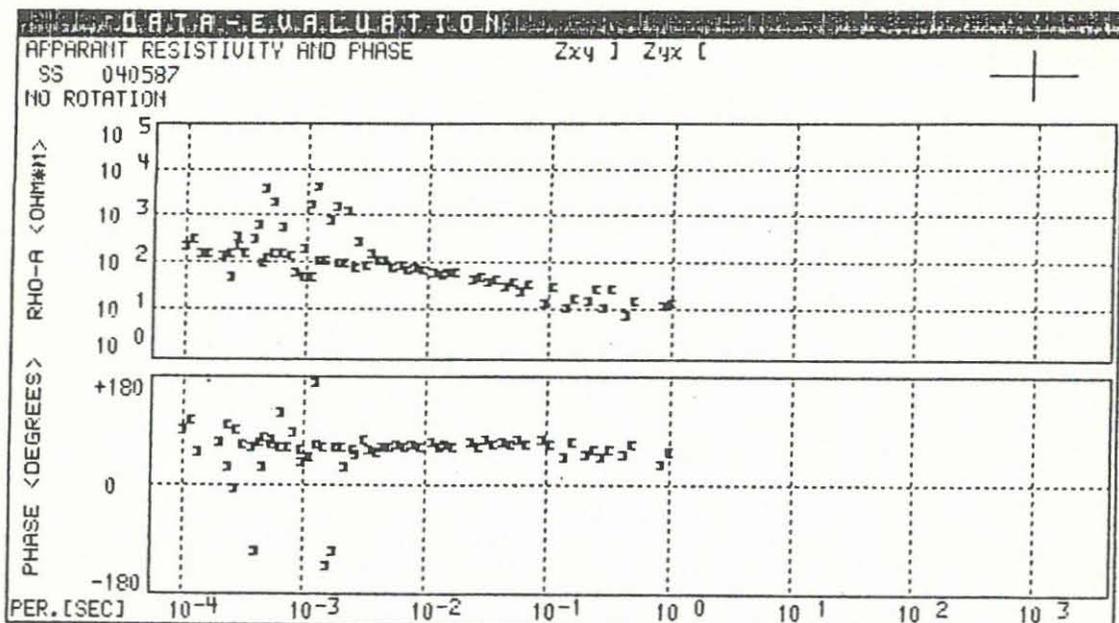
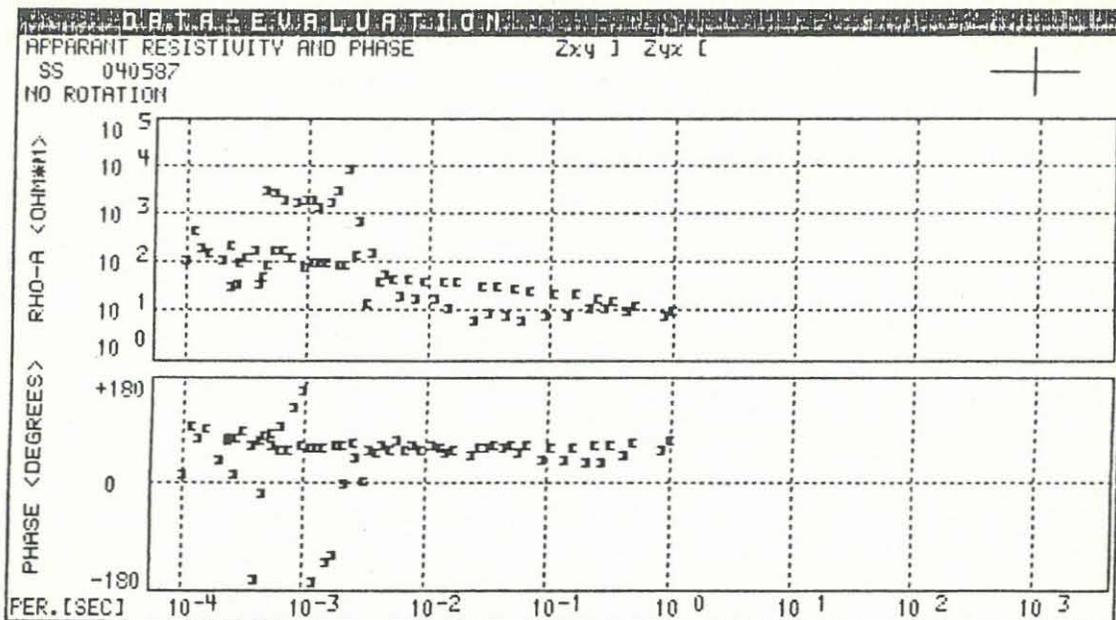
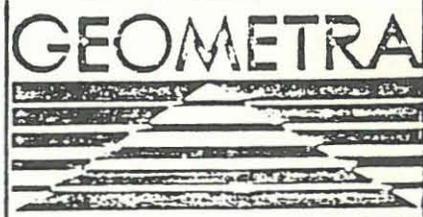


Abb.: CSAMT - 15 -
Station: 15 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



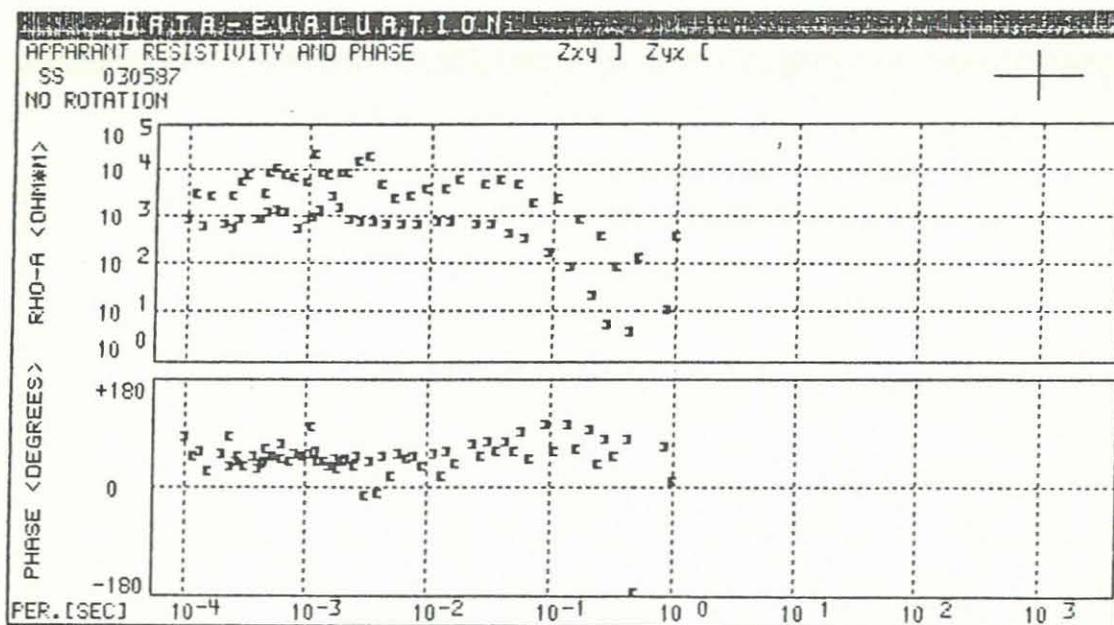
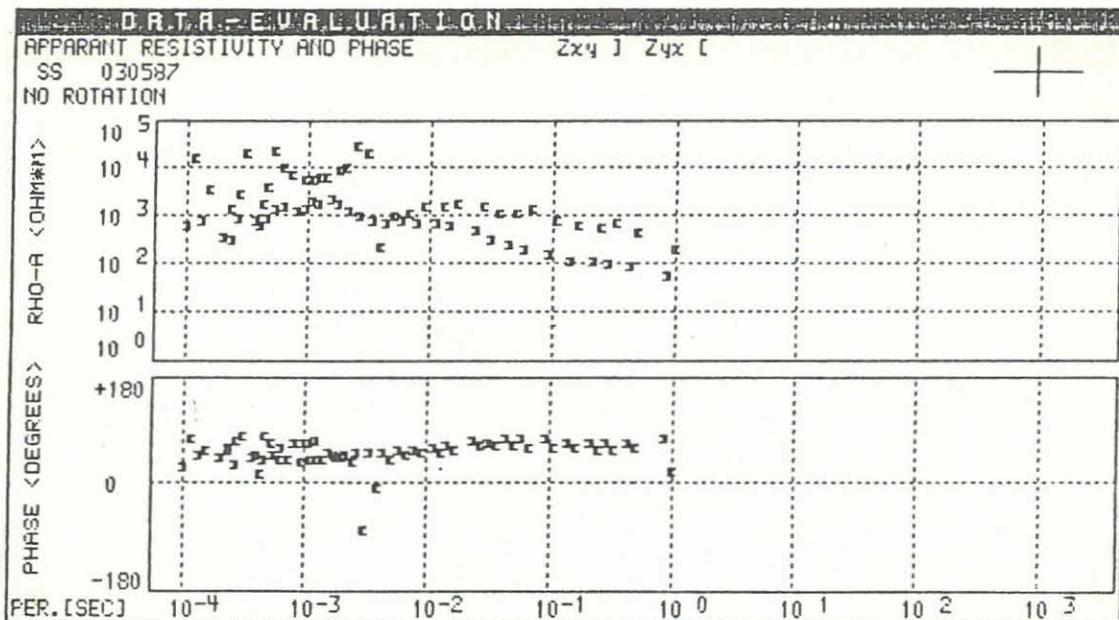
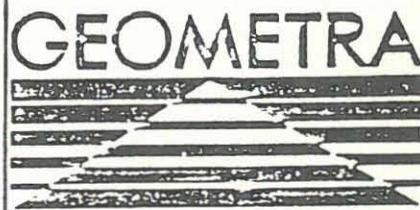


Abb.: CSAMT - 16 -
Station: 16 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



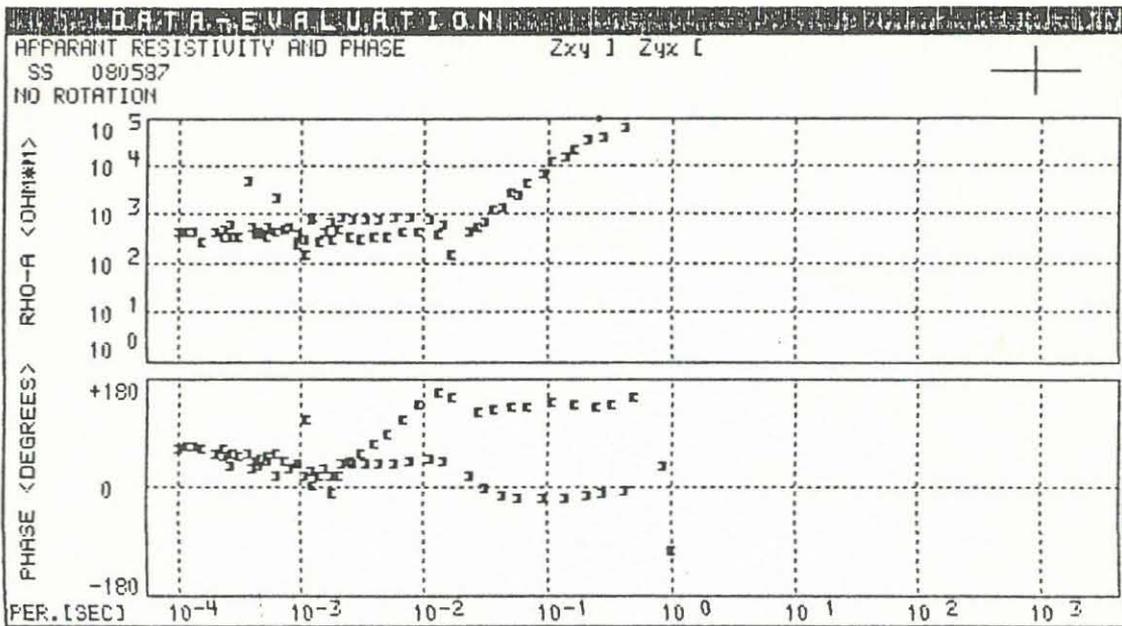
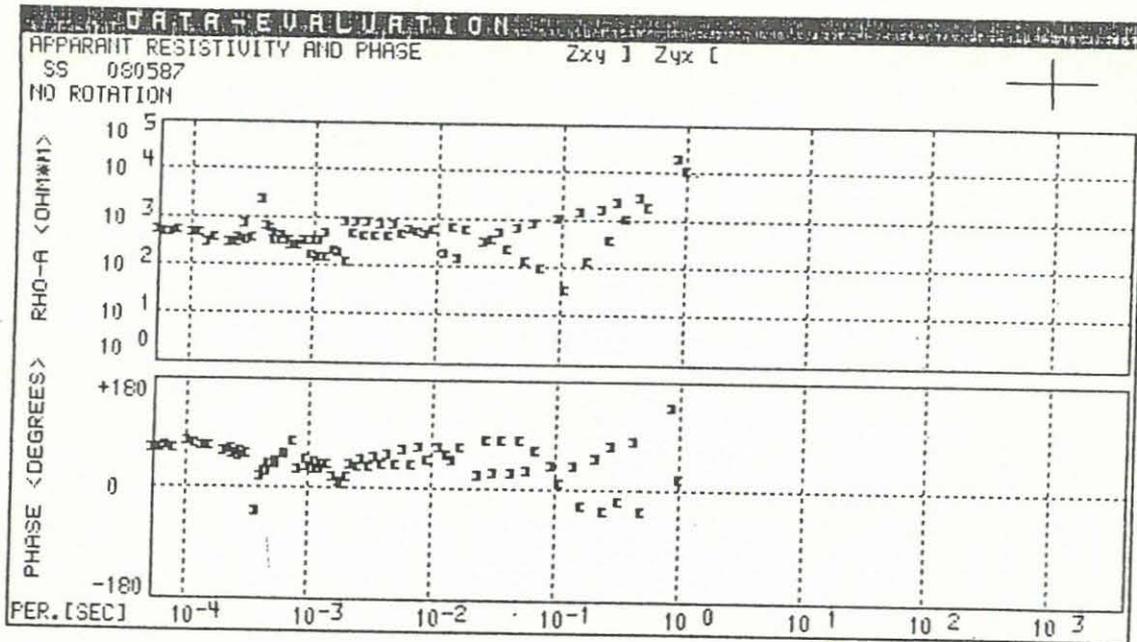
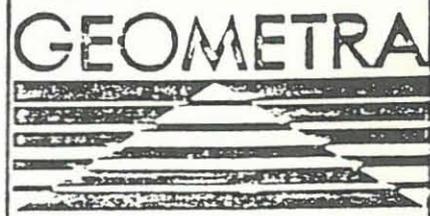


Abb.: CSAMT - 17 -
Station: 17 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



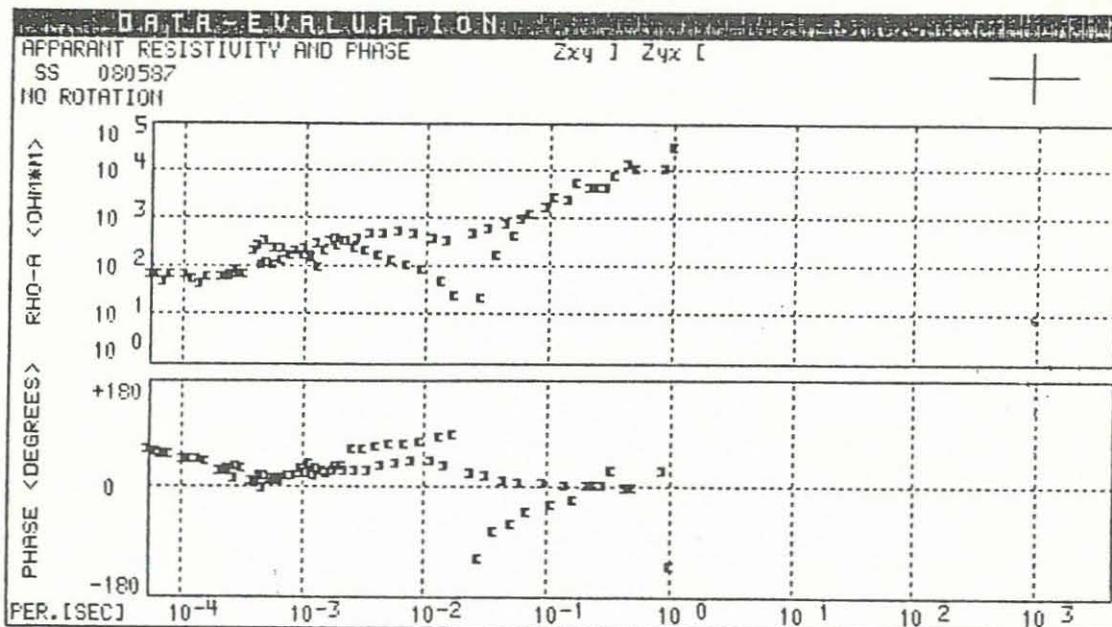
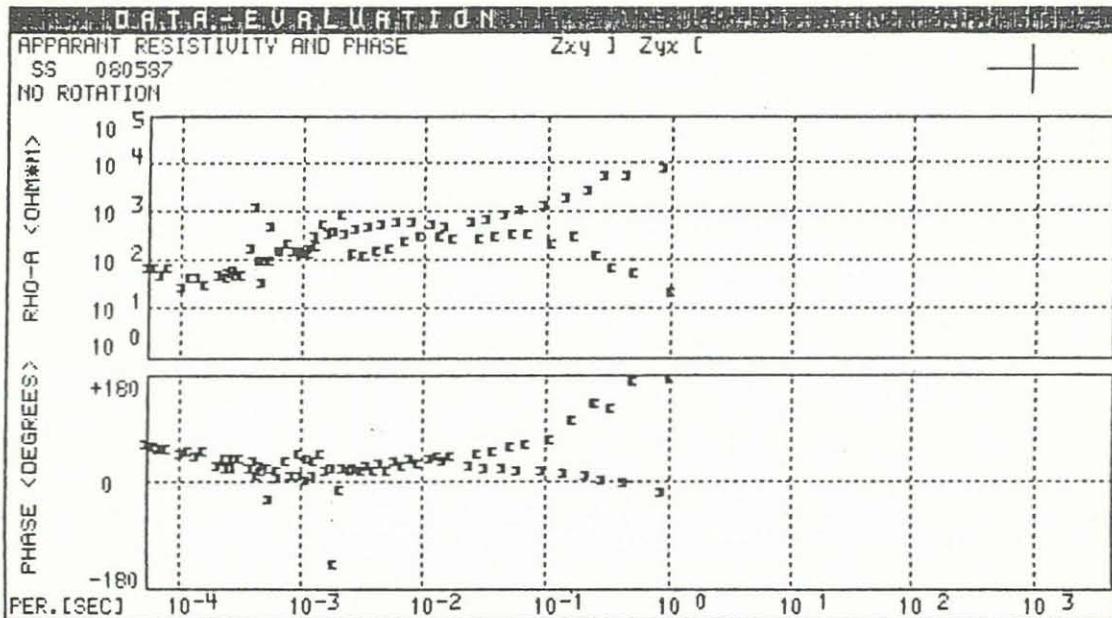
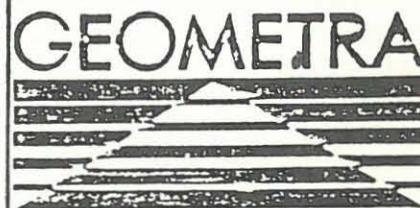


Abb.: CSAMT - 18 -
Station: 18 CSAMT-Messung
Scheinbarer Widerstand RHO-A und Phase der
Impedanz PHI
oben : Senderauslage N-S,
unten: Senderauslage O-W



3.5 Diskussion der Meßergebnisse

Die Datenqualität der MT- und AMT-Meßergebnisse ist als durchschnittlich bis gut zu bezeichnen. Selbst bei sehr langer Registrierung, z. B. an der Station 2 über 3 Wochen (MT), konnte die Meßgüte nicht weiter gesteigert werden. Dieses liegt vor allem an den relativ starken elektromagnetischen Störungen im Meßgebiet. Die CSAMT-Daten sind bei aufeinanderfolgenden Messungen bis auf wenige Prozent reproduzierbar.

In folgenden Frequenzbereichen wurden die Daten mit geringerer Güte gemessen:

- AMT 1 kHz bis einige kHz, starke Streuung = Lücken in einigen Kurven
 - CSAMT 800 Hz bis einige kHz, starke, aber reproduzierbare (bis auf wenige Prozent) Streuung der Kurven
 - MT einige Sekunden bis 10 s, Streuung der Daten, übersteiler Phasenanstieg an einigen Stationen, Aufwölbung der RHO-A-Kurven auf einigen Stationen
- > 200 s, unsichere Daten an einigen Stationen

4 AUFBEREITUNG DER DATEN

4.1 Einführung in die Methoden Magnetotellurik und Erdmagnetische Tiefensondierung

Die Grundlage zur Untersuchung der Widerstandsverteilung im Erdinnern bilden die beiden Methoden Magnetotellurik (MT) und Erdmagnetische Tiefensondierung (Geomagnetic Depth Sounding, GDS).

Mit der MT läßt sich die vertikale Strukturierung des spezifischen Widerstandes am Ort der Messung studieren. Es werden horizontale erdelektrische und erdmagnetische Felder miteinander in Beziehung gesetzt.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \underline{\underline{Z}} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}$$
$$\underline{\underline{Z}} = \begin{pmatrix} z_{xx} & z_{xy} \\ z_{yx} & z_{yy} \end{pmatrix} \text{ ist der Impedanztensor.}$$

Für einfache Leitfähigkeitsstrukturen (\leq 2-D-Strukturen) des Untergrundes verschwinden die Hauptdiagonalelemente z_{xx} und z_{yy} .

Die GDS untersucht laterale Inhomogenitäten (Anomalien) des spezifischen Widerstandes. Bei ihr werden horizontale und vertikale Magnetfelder mit dem gleichzeitig registrierten horizontalen Magnetfeld einer Bezugs- bzw. Referenzstation verglichen. Diese sollte so gewählt werden, daß sie möglichst unbeeinflusst ist von der zu untersuchenden lateralen Widerstandsverteilung. Außerdem sollte sie eine nahezu eindimensionale Leitfähigkeitsstruktur aufweisen.

Von den Magnetfeldern der übrigen Wanderstationen kann man dann das Normalfeld der Referenzstation, das nur von der vertikalen Widerstandsverteilung abhängt, subtrahieren. Anhand des Restfeldes, dem sogenannten anomalen Magnetfeld, lassen sich Rückschlüsse auf die laterale Verteilung des spezifischen Widerstands entlang des Meßprofils ziehen.

Die der MT entsprechende Beziehung lautet für die Horizontalfelder:

$$\begin{pmatrix} B_{ax} \\ B_{ay} \end{pmatrix} = \underline{\underline{W}} \begin{pmatrix} B_{nx} \\ B_{ny} \end{pmatrix}$$

mit $B_a = B - B_n$ als anomalem Magnetfeld und B_n als Magnetfeld an der Referenzstation sowie

$$\underline{\underline{W}} = \begin{pmatrix} h_H & h_D \\ d_H & d_D \end{pmatrix} \text{ als Perturbationstensor.}$$

\underline{W} verschwindet vollständig für eindimensionale Leitfähigkeitsstrukturen, während bei 2-D-Strukturen die Anomalie entweder allein durch z_H oder durch z_D dargestellt werden kann in Abhängigkeit vom benutzten Koordinaten-System, d. h. je nachdem, ob die lateralen Widerstandsänderungen parallel oder senkrecht zum Meßprofil vorhanden sind. Für 3-D-Strukturen ist \underline{W} voll besetzt.

Eine ähnliche Beziehung gilt für das vertikale Magnetfeld

$$B_z = (z_H \ z_D) \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}$$

Aus den magnetischen Übertragungsfunktionen z_H und z_D wurden die Induktionspfeile konstruiert.

E- und H-Polarisation

Bei zweidimensionalen Verteilungen des spezifischen Widerstandes hat man es mit zwei verschiedenen Induktionsvorgängen zu tun:

Mit **E-Polarisation** bezeichnet man den Fall, bei dem parallel zur Streichrichtung leitfähiger Strukturen elektrische Ströme von einem Magnetfeld induziert werden, das senkrecht dazu polarisiert ist.

Dementsprechend bezeichnet man mit **H-Polarisation** den Fall, bei dem das Magnetfeld parallel zur Streichrichtung polarisiert ist und senkrecht dazu elektrische Ströme induziert.

4.2 Aussagen zur Qualität der magnetischen Übertragungsfunktionen

Zur Beurteilung der MT-Datenqualität siehe Kapitel 3. Probleme gab es im Bereich von 2 - 20 s, sonst war die Datenqualität durchweg gut bis befriedigend.

Die Qualität der Daten zur Bestimmung der Induktionspfeile ist sehr gut. Die Fehler der magnetischen Übertragungsfunktionen z_H und z_D sind stets $< 10 \%$. Die Richtung und Größe der Induktionspfeile sind sowohl räumlich als auch in Abhängigkeit von der Frequenz äußerst konsistent (s. Abb. 4.1).

Die magnetischen Übertragungsfunktionen des Perturbationstensors \underline{W} sind von etwas schlechterer Qualität als z_H und z_D . Besondere Probleme gab es im Bereich von 2 - 20 s.

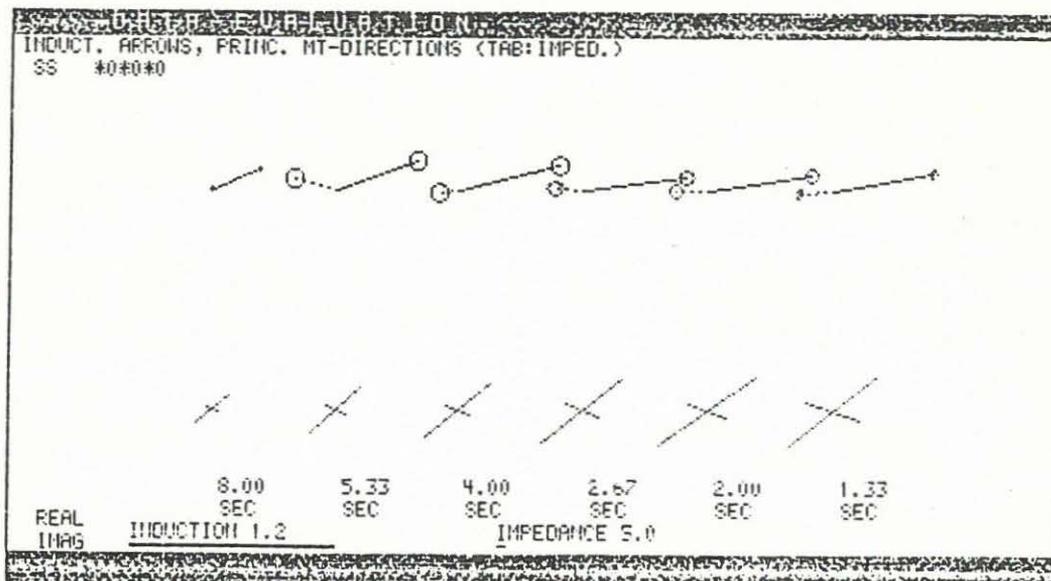
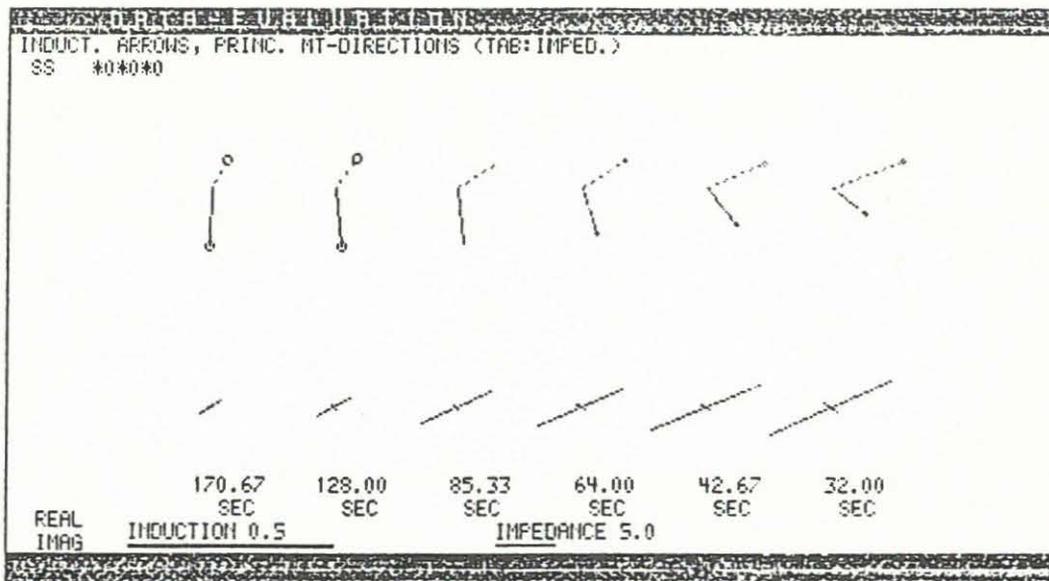


Abb.: 4.1
Station: 14
Induktionspfeile
MT-Richtungen mit Anisotropie



5 MODELLRECHNUNG

5.1 Theoretischer Teil

Ziel der Modellrechnungen ist, aus den gemessenen Daten die Verteilung des elektrischen Widerstandes im Untergrund zu bestimmen. Es handelt sich dabei um ein Umkehrproblem. Basierend auf einer 1-D-Modellvorstellung wird aus den an einer Station gemessenen Impedanzen Z_{ij} mit der Methode der kleinsten Quadrate eine Tiefen-Widerstandsverteilung am Meßpunkt berechnet.

Der zugrundeliegende Rechenalgorithmus ist der einer verallgemeinerten Matrixinversion, welche von einer linearen Beziehung zwischen dem Modellvektor \underline{x} und dem Datenvektor \underline{y} ausgeht:

$$\underline{y} = \underline{G} \underline{x} \quad (1)$$

mit der modellabhängigen Datenkernmatrix \underline{G} .

Ein Modell ist am besten bestimmbar, wenn der sogenannte Anpassungsfehler

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\Delta \underline{y}^T - \Delta \underline{y}}{N'}} \quad (2)$$

mit $\underline{y} = \underline{y} - \underline{G} \underline{x}$, N' : Zahl der Freiheitsgrade

in der Größenordnung des mittleren Datenfehlers liegt.

Die in (1) geforderte lineare Beziehung zwischen Daten und Modell wird durch den sogenannten χ^2 -Algorithmus (Schmucker¹⁾) geliefert.

Bei der Modellrechnung wird das Modell so lange iterativ verändert, bis keine nennenswerte Verbesserung in der Anpassung mehr gelingt. Der Anpassungsfaktor ϵ aus (2) ist abhängig von zwei Modellparametern: von der Anzahl der Schichten l und der durchschnittlichen Schichtdicke d_0 . Der dem Hauptminimum entsprechende d_0 -Wert liefert das Endmodell. Die optimale Schichtzahl wird festgelegt, indem diese schrittweise erhöht wird, bis eine Erhöhung keine wesentliche Verbesserung in der Anpassung mit sich bringt.

Bei den durchgeführten Modellrechnungen zeigt es sich, daß in der Mehrzahl der Fälle Vier-Schichten-Modelle ausreichend waren.

1) Schmucker, U., in Larsen, 1975; Low Frequency (0.5 - 6.0 cpd) electromagnetic study of deep mantle electrical conductivity beneath the Hawaiian Islands. Geophys. J. R. astr. Soc., 43, 17-46.

Bei der 2-D-Modellrechnung handelt es sich im Gegensatz zur 1-D-Modellrechnung um ein Vorwärtsproblem: zu einem vorgegebenen Modell werden Daten berechnet, die mit den gemessenen verglichen werden. Die Modellstruktur, laterale Grenzen, Schichtmächtigkeit und spezifische Widerstände bestimmter Modellbereiche müssen so lange verändert werden, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Modell- und Felddaten für alle Stationen des Meßprofils gefunden wird.

Bei dem zugrundeliegenden Rechenalgorithmus wird vorausgesetzt, daß die Struktur des Untergrundes so beschaffen ist, daß sich der spezifische Widerstand bzw. die elektrische Leitfähigkeit σ nur in vertikaler und einer horizontalen Richtung ändert.

Die Struktur wird in einen normalen und anomalen Anteil aufgespalten:

$$\sigma(y, z) = \sigma_n(z) + \sigma_a(y, z)$$

so daß für das elektrische und magnetische Feld normale und anomale Anteile existieren.

Dieses führt zu einer 2-D-Induktionsgleichung für den anomalen Anteil in E-Polarisation:

$$\nabla^2 E_{ay} = i\omega\mu_0 (\sigma_a E_n + \sigma E_{ay})$$

Die numerische Lösung dieser Induktionsgleichung mit der Methode der finiten Differenzen bildet den Kern des Rechenalgorithmus. Hierbei wird die 2-D-Struktur durch ein Gitternetz mit konstanter y- und z-Ausdehnung der Zellen über einem geschichteten Halbraum approximiert.

An den horizontalen und vertikalen Zellgrenzen müssen die Stetigkeitsbedingungen der anomalen Feldkomponenten und deren ersten Ableitungen berücksichtigt werden. Desweiteren müssen Randbedingungen, wie z. B. das Verschwinden des anomalen Anteils für große Entfernungen von einer Anomalie, betrachtet werden.

Als Ergebnis der Modellrechnungen ergeben sich Übertragungsfunktionen der 2-D-Struktur: h_H , z_H für die erdmagnetische Tiefensondierung sowie z_{yx} für die Magnetotellurik.

Der Vergleich, der aus der 2-D-Modellrechnung erhaltenen Übertragungsfunktionen, mit den aus den Felddaten berechneten kann in zwei unterschiedlichen Darstellungsarten erfolgen:

- In der PROFILDARSTELLUNG wird für eine vorgegebene Periode der Verlauf der Übertragungsfunktionen über das gesamte Meßprofil angegeben.
- In der FREQUENZDARSTELLUNG wird die Periodenabhängigkeit der Übertragungsfunktion an einer vorgegebenen Station gezeigt.

5.2 Modelle für den inneren Bereich in räumlicher Darstellung

Die Spektren wurden vor den 1-D-AMT-Inversionsrechnungen um 54° im Uhrzeigersinn rotiert (Richtung des Profils 2). Die Anzahl der Eingabefrequenzen betrug je nach Station 6 - 15. Es wurden fast ausschließlich 4-Schicht-Modelle berechnet, da sich bei Erhöhung der Anzahl der Schichten keine Verbesserung der Anpassung der Modell- an die Felddaten ergab. Die analysierten Frequenzen lagen meistens in dem Bereich von 10 - 800 Hz. Für höhere Frequenzen erschwerten starke Streuungen der Werte eine Inversion.

Für jede Station wurden Modelle für Ströme in NW-SE und NE-SW berechnet, und zwar liegen jedem 1-D-Endmodell ca. 30 - 45 Modellrechnungen zugrunde, die sich in dem Frequenzbereich und in dem Modellparameter d_0 , der durchschnittlichen Schichtdicke, unterscheiden. Die Anpassung der Modelle an die Meßdaten lag im Durchschnitt bei 10 %. Wie schon aus den RHO-A-Kurven zu erwarten, lieferten die beiden Polarisierungen oft stark unterschiedliche Ergebnisse (s. Abb. 5.1), was auf starke inhomogene, dreidimensionale Effekte schließen läßt.

Die CSAMT-Daten waren von Messung zu Messung am selben Ort bis auf 1 - 3 % reproduzierbar. Der Frequenzbereich zwischen 1 000 und 8 000 Hz läßt sich durch starke, aber systematische Gänge von RHO-A und Phase mit den herkömmlichen Methoden nicht interpretieren (s. Kapitel 3.5). Dies äußert sich auch darin, daß eine Rotation der CSAMT-Daten zu nicht konsistenten Ergebnissen führt. Deshalb wurde vor der 1-D-Auswertung auf eine Rotation der Daten verzichtet. Weiterhin beschränkt sich die Auswertung auf den sogenannten Fernfeldbereich (Frequenzen > 100 Hz).

Die Anzahl der Stützstellen für die Inversion war 8 - 15, die Anpassung etwas besser als bei den AMT-Daten, also < 10 %.

Für das dichte Meßpunktraster in unmittelbarer Nähe der Bohrlokalationen wurde eine räumliche Darstellung gewählt (s. Abb. 5.2).

Entsprechend der räumlichen Informationsdichte konnte eine Korrelation einzelner Schichten erzielt werden, die auch zu der Bestimmung eines Entzerrfaktors bei einzelnen Stationen führte.

AMT-Modelle für Station 18

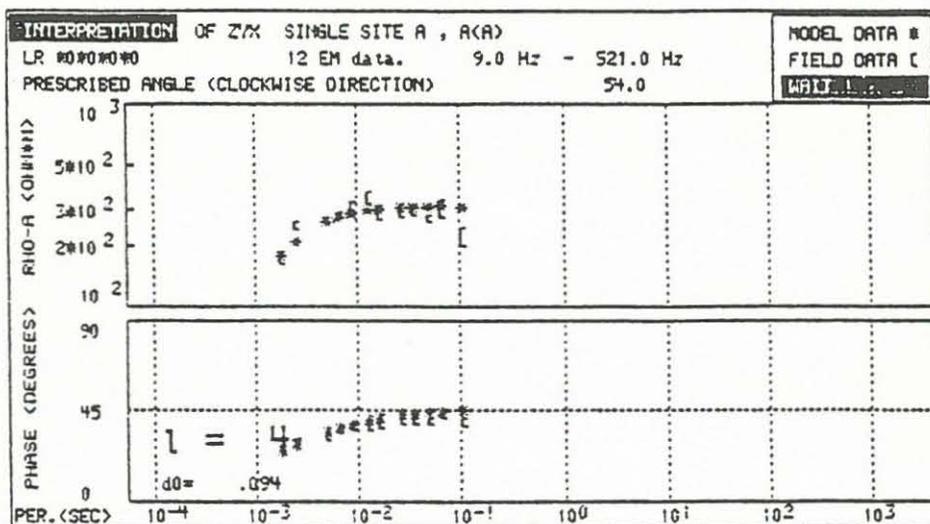
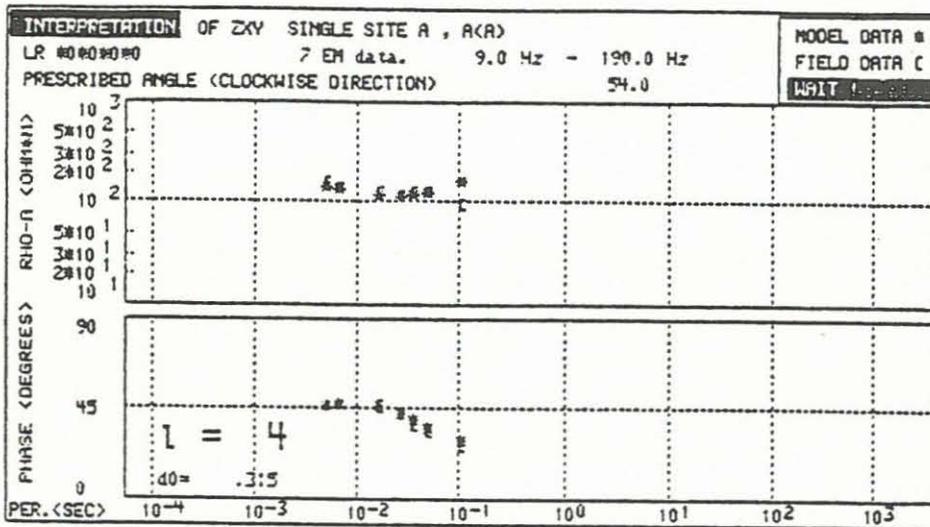
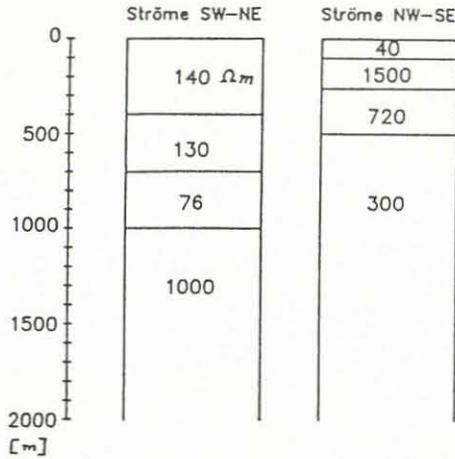


Abb.: 5.1
 AMT-Modelle für Station 18
 oben : Leitfähigkeitsmodelle
 Mitte: Anpassung zu Modell "Ströme SW-NE"
 unten: Anpassung zu Modell "Ströme NW-SE"
 [- gemessen, * - berechnet]



Vergleicht man die beiden Würfel, so sind die Widerstände bei SW-NE fließenden Strömen immer größer. Dieses deutet auf gut leitfähige Schichten hin, die NW-SE, also parallel zur Fränkischen Linie, streichen. Die oberflächennahsten Schichten - max. 500 m - sind durchweg besser leitend. Unterhalb 1 km wird ein guter Leiter sichtbar.

Die Station 9 fällt bei den Polarisationsrichtungen wegen extrem großer statischer Verzerrung aus dem Rahmen.

5.3 1-D-Modelle und Darstellung der Induktionspfeile auf den Kreuzprofilen

5.3.1 Modelle aus AMT-Daten

Die Abb. 5.3 und 5.4 zeigen Profildarstellungen der im vorigen Abschnitt besprochenen 1-D-AMT-Inversionsmodelle für die Profile 1 und 2. Es wurden jeweils die Ströme in NE-SW-Richtung betrachtet, da diese Richtung größere Konsistenz in den Modellen über dem Profil aufweist.

Abb. 5.3 zeigt ein AMT-Profil in NE-SW-Richtung. Es wird eine Aussagetiefe von etwa 1 km erreicht. Die Darstellung läßt nur wenige flächenhafte Strukturen erkennen, die überwiegend horizontal verlaufen. So ist der gute Leiter an den Stationen 2 und 10 in einer Tiefe von 800 - 950 m und der gute Leiter an den Stationen 5 und 14 (13?) in einer Tiefe von 700 - 900 m bemerkenswert. Eine markante Grenzlinie zeichnet sich zwischen den Stationen 17 und 10 ab. Nordwestlich dieser Linie sind keine gutleitenden Schichten erkennbar.

Abb. 5.4 zeigt ein AMT-Profil in SW-NE-Richtung. Es wurden Aussagetiefen bis zu 2 km erreicht. Deutlich erkennbar ist die Fränkische Linie, die die Sediment-Stationen 19 und 1 (niedrige Widerstände) von den übrigen Stationen abgrenzt. Ein guter Leiter in einer Tiefe von 1 100 bis 1 300 m scheint jedoch den Einfluß dieser markanten geologischen Strukturlinie nicht zu spüren. Für die Stationen 15 und 8 ist eine 1-D-Modellrechnung wegen eines offensichtlich vorhandenen 3-D-Effektes nicht sinnvoll. Im Gegensatz hierzu stehen die Modelle der Stationen 2, 4 und 6, die ein einheitliches Bild einer von SW nach NE ansteigenden Schichtenfolge von Gneisen und Amphiboliten liefern. Deutlich abgegrenzt hiervon ist die auf dem Granit liegende Station 12 mit hohen Widerstandswerten bis in die größten betrachteten Tiefen.

5.3.2 Darstellung der Induktionspfeile im AMT-Bereich

- Für 30 Hz (Abb. 5.5) ist vor allem im östlichen Meßgebiet noch deutlich eine einheitliche N-E-Richtung der Induktionspfeile zu erkennen, die ein Streichen in NW-SE-Richtung anzeigt, was sehr gut mit dem Streichen der Fränkischen Linie

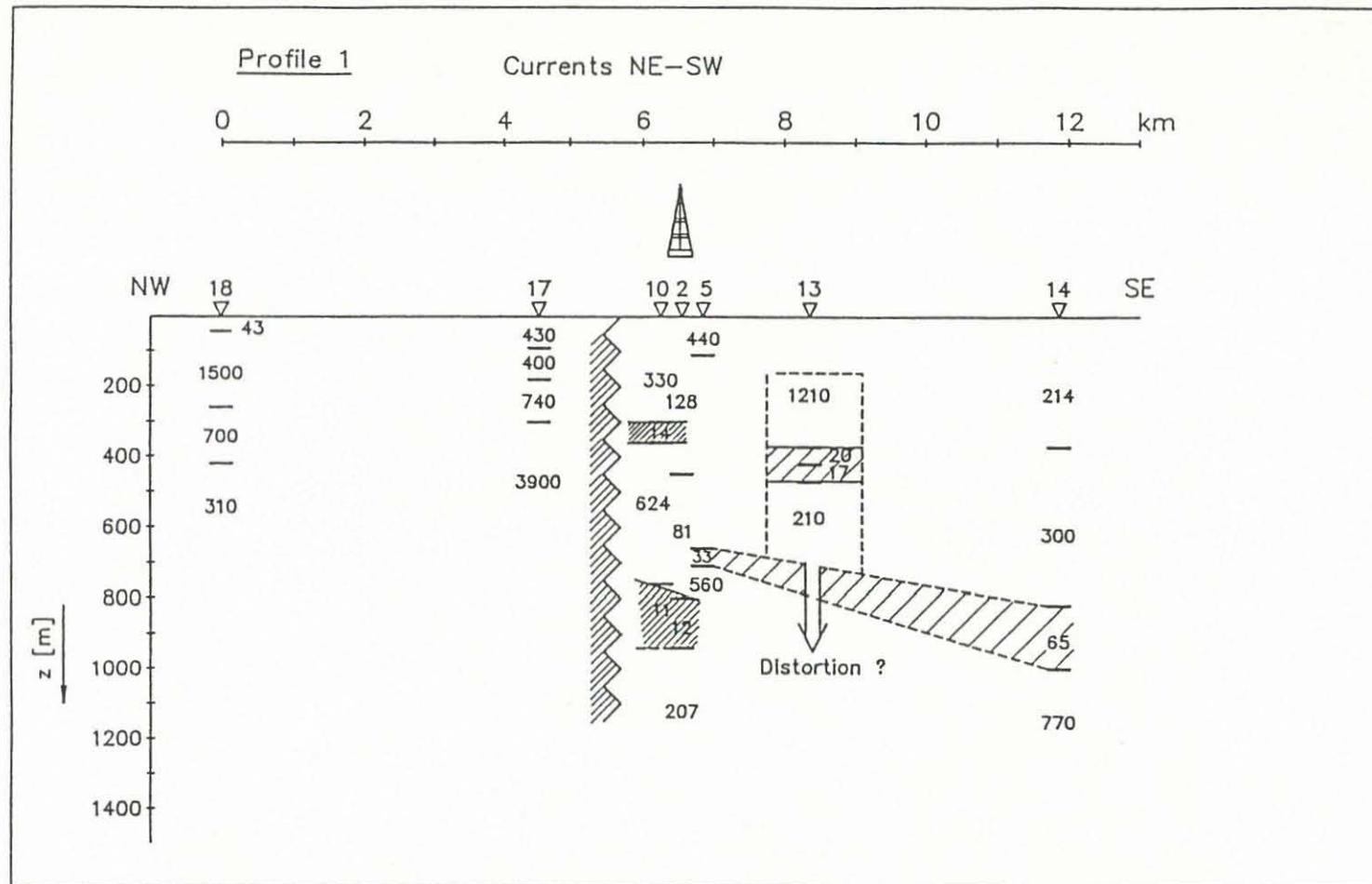
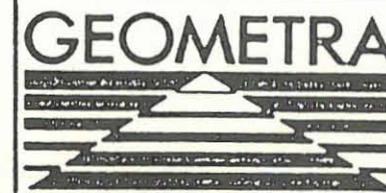


Abb.: 5.3
 Profildarstellung von 1-D-AMT-Inversionsmodellen für Profil 1



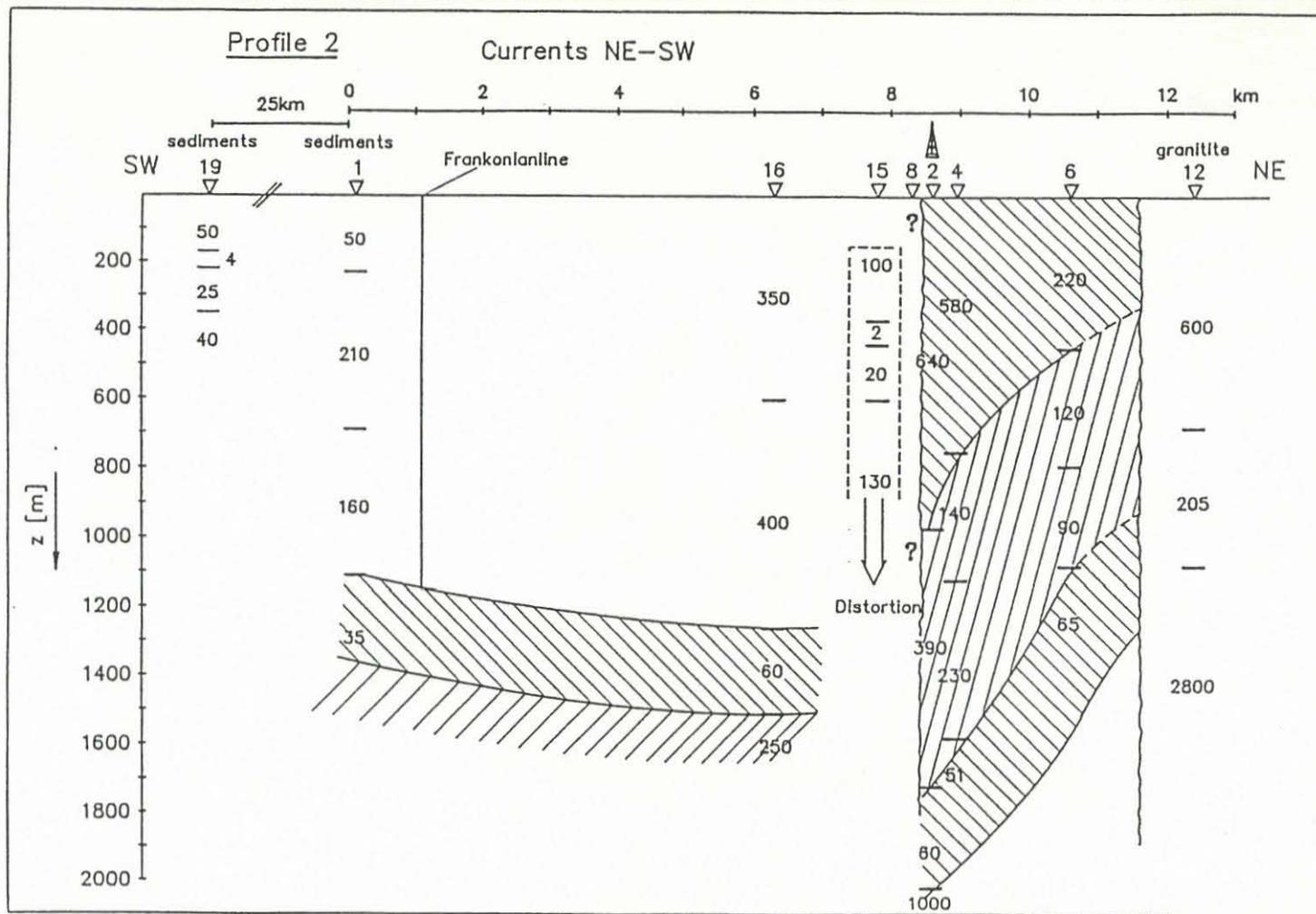
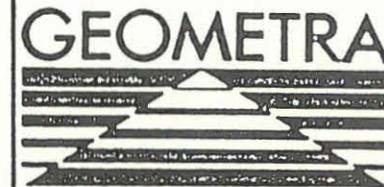


Abb.: 5.4
 Profildarstellung von 1-D-AMT-Inversionsmodellen für Profil 2



zusammenfällt (s. auch NW-SE streichender guter Leiter im inneren Bereich).

Die Induktionspfeile sagen aus, daß Störungen mit gleicher Streichrichtung wie die Fränkische Linie auch östlich der Bohrlokation existieren müssen.

- In der Nähe der Bohrlokation im westlichen Meßgebiet ist die oben besprochene regionale Struktur durch lokale Strukturen überlagert. Das westliche Meßgebiet ist demnach im oberen Bereich geologisch wesentlich komplexer als das östliche.
- Für 10 000 Hz werden die Induktionspfeile von lokalen Effekten beherrscht (s. Abb. 5.6). So deutet der Induktionspfeil an der Station 2 eine leitfähige Struktur im SW von ihr an (Graphit?).

5.3.3 Zusammenfassung AMT und CSAMT

Aus den Ergebnissen der AMT, CSAMT und der Induktionspfeile für Frequenzen > 1 Hz können folgende Aussagen für die obersten 1 500 m getroffen werden (s. Abb. 5.7):

- einheitliche Struktur des Untergrundes unter Stationen 2, 4, 6 und 10 gekennzeichnet durch
 - . korrelierbare 1-D-Modelle und
 - . einheitliche Induktionspfeil-Richtungen.
- An der Station 2 macht sich schon ein lokaler Störeinfluß bemerkbar, der sich bei der Station 8 (s. Induktionspfeil bei 30 Hz, inkonsistentes 1-D-Modell auf dem Profil 2) und der Station 9 (s. Induktionspfeile und abweichende AMT- und CSAMT-Modelle in der Darstellung des inneren Bereiches) voll auswirkt.
- Lokation der Station 12 auf einem schlechtleitenden Granitblock mit der Streichrichtung NW-SE.
- 3-D-Effekte an den Stationen 11, 15, 8 und 9.
- Störung südwestlich von Station 17 mit Streichen in NE-SW. Besserer Leiter im Süden dieser Störung.
- Verzerrung an der Station 13 über dem gesamten Frequenzbereich (sichtbar in Profil- und Würfeldarstellung).
- Niedrige Widerstände an den Sedimentstationen 19 und 1. Schichten vergleichbaren Widerstandes sind jedoch nicht korrelierbar, da die Stationen auf unterschiedlichen geologischen Einheiten 25 km auseinanderliegen.

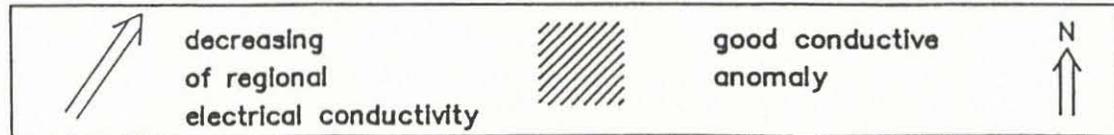
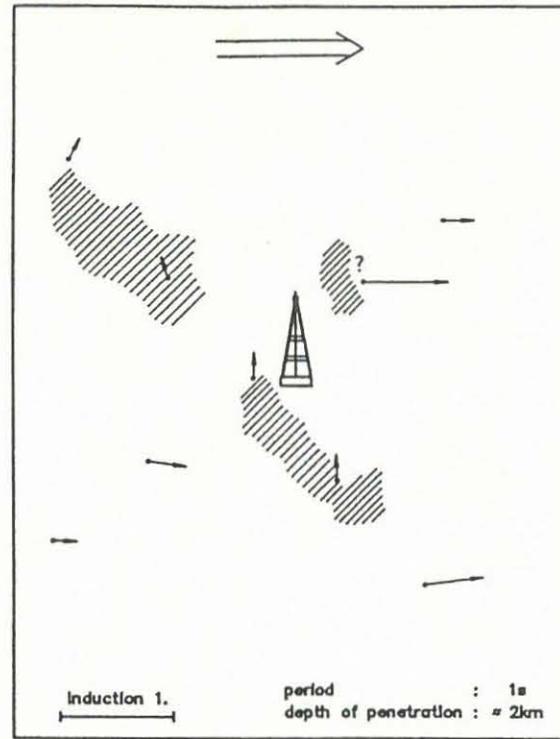
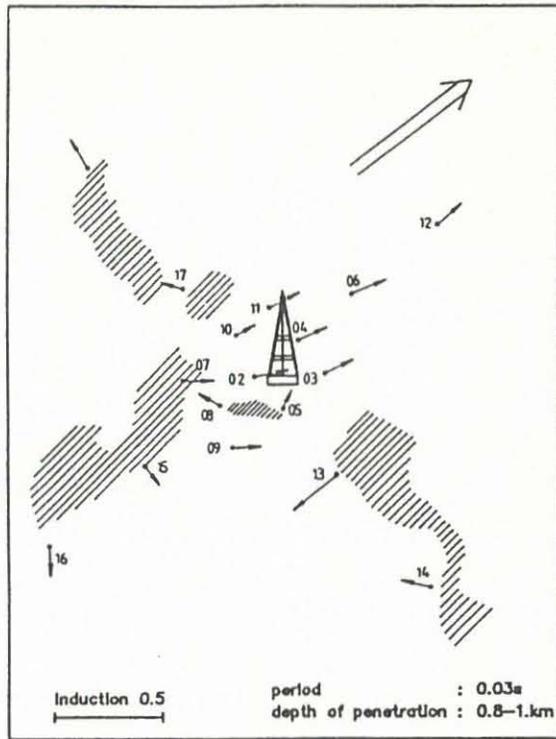
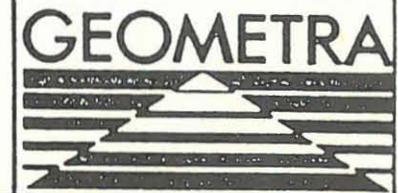


Abb.: 5.5
Induktionspfeile für den AMT-Frequenz-Bereich



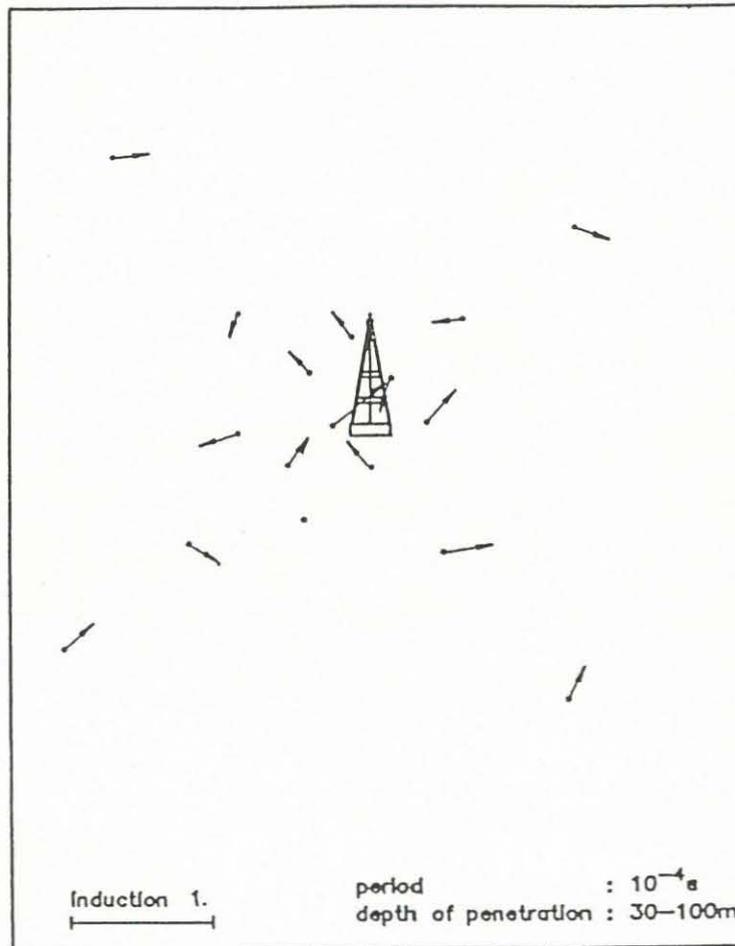


Abb.: 5.6
AMT-Induktionspfeile



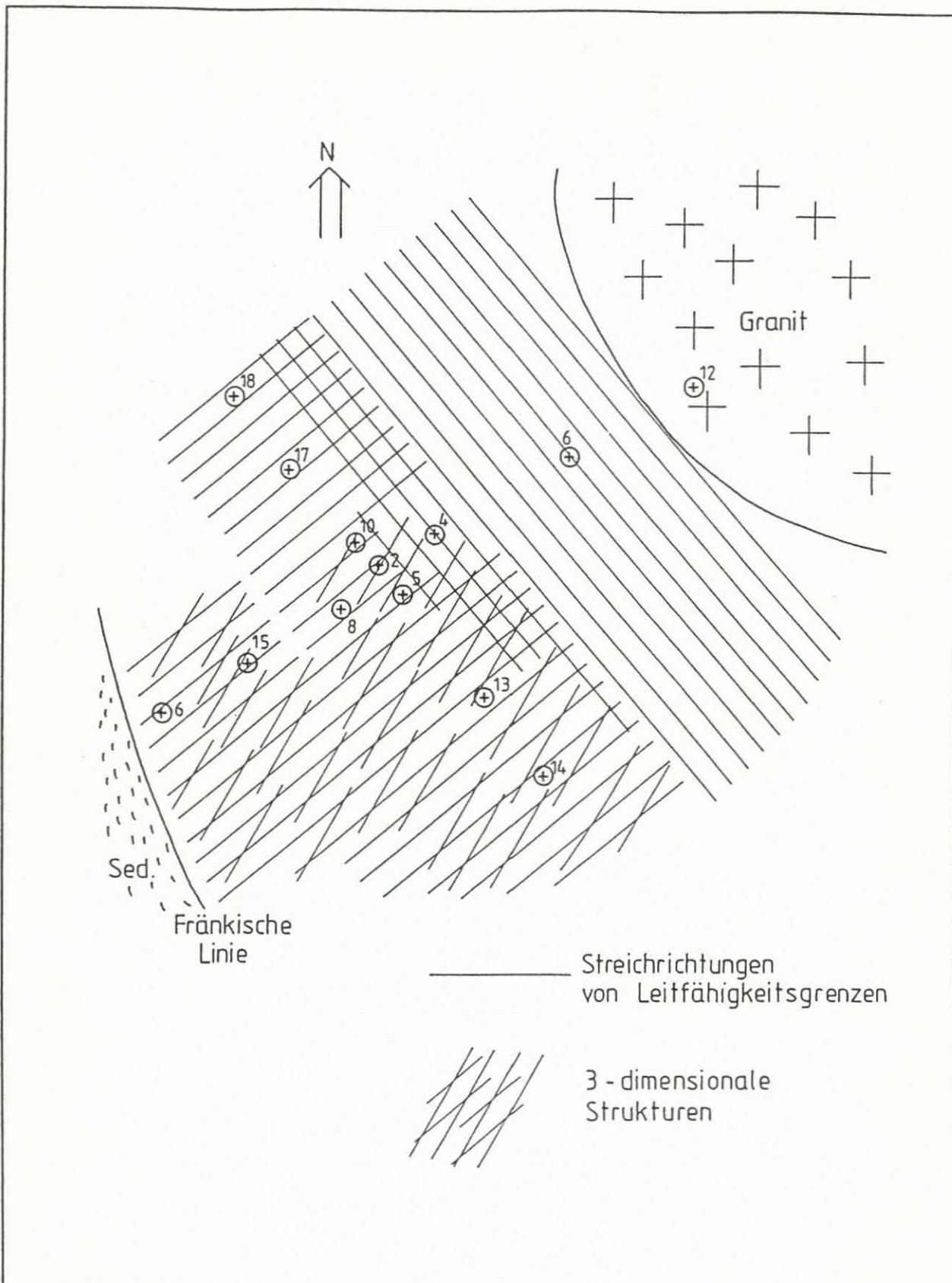
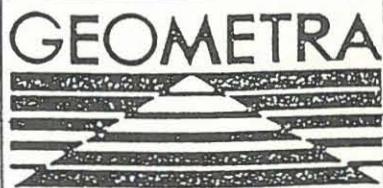


Abb.: 5.7
Struktur der elektrischen Leitfähigkeit der obersten 2 - 3 km gewonnen aus MT- und GDS-Ergebnissen. Die Stationen der Profile 1 und 2 sind eingetragen. Im Bereich der Station 4 und nordwestlich überlagern sich zwei Strukturen.



5.3.4 Modelle aus MT-Daten

Die geglätteten Spektren, die der 1-D-Inversionsrechnung zugrunde liegen, sind um 54° im Uhrzeigersinn rotiert. Die Anzahl der Eingabefrequenzen für die Inversion betrug in der Regel 15 - 20. Es wurden 4-Schicht-Modelle berechnet. Für die Darstellung wurden Schichten mit Widerständen der gleichen Größenordnung zusammengefaßt (s. Abb. 5.9, Profil 1, Ströme NE-SW). Bei der Verwendung einer höheren Schichtzahl ergaben sich keine signifikant besseren Anpassungen von den Modell- an die Meßdaten. Den hier gezeigten Modellen liegen etwa 30 - 45 Modellrechnungen pro Station zugrunde, wobei die durchschnittliche Schichtdicke und der zu interpretierende Frequenzbereich verändert wurde. Die Anpassung der Modell- an die Meßdaten gelang in der Regel bis auf 10 - 15 % (s. Abb. 5.8).

Die MT-1-D-Inversionsmodelle lassen Aussagen über die Tiefen 1 - 100 km zu.

In den Abb. 5.9 und 5.10 sind die Strukturen für den die Tiefbohrung interessierenden Bereich (1 - 15 km) gezeigt.

5.3.5 Profildarstellungen

Betrachtet man die Fränkische Linie als in dem Meßgebiet vorherrschende geologische Streichrichtung, so sind in Abb. 5.9 und 5.10 jeweils die Modelle der

- E-Polarisation, Ströme NW-SE, parallel zur Fränkischen Linie
und unten die Modelle der

- H-Polarisation, Ströme NE-SW, senkrecht zur Fränkischen Linie

dargestellt.

5.3.6 Diskussion der 1-D-Inversionsmodelle der E-Polarisation

Diese Modelle sind in den Abb. 5.9 und 5.10 oben dargestellt. Die betrachteten Ströme fließen NW-SE.

- Die Modelle der E-Polarisation zeigen eine erstaunliche Konsistenz für die Existenz und die Tiefe (7 - 9 km) eines guten Leiters in der mittleren Kruste.

- Die elektrische Leitfähigkeit des guten Leiters Mittelkruste nimmt, nach den Ergebnissen der 1-D-Modelle von

. NW nach SE ab (s. Abb. 5.9: Profil 1 oben) und von

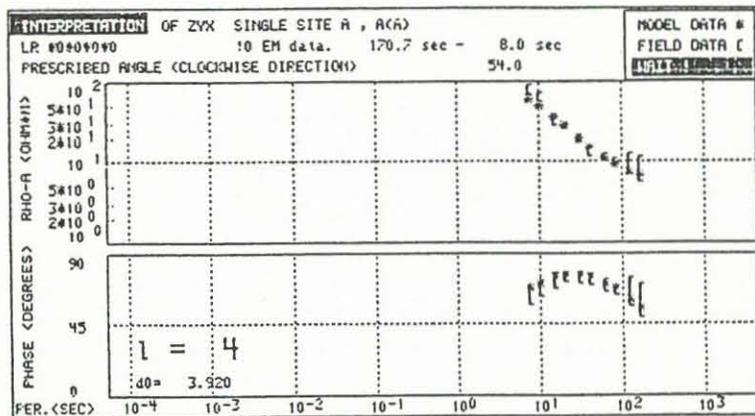
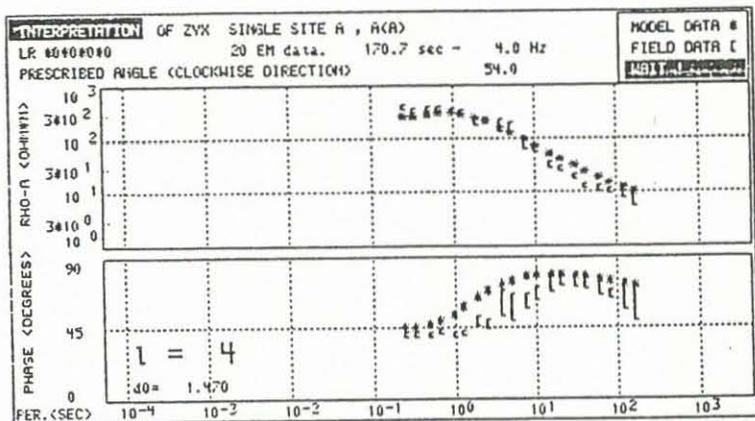
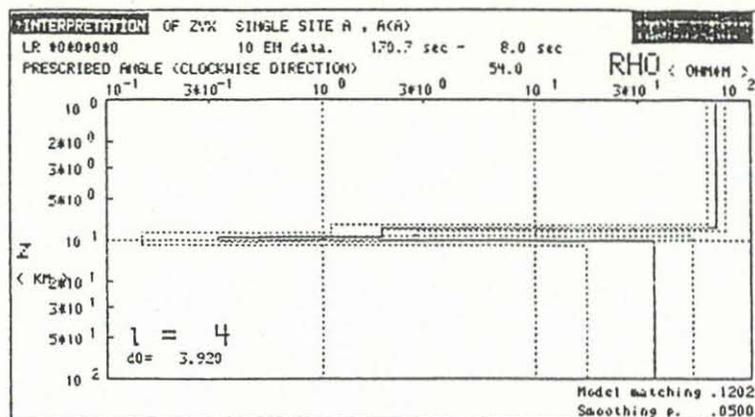
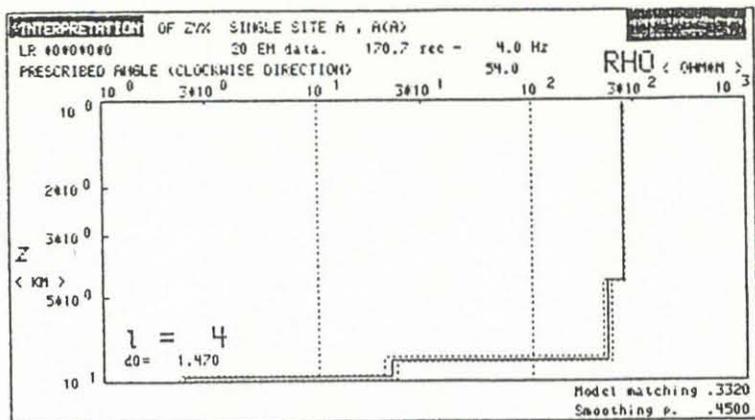
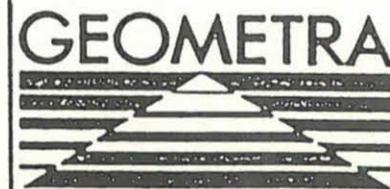


Abb.: 5.8
1-D-Inversionsmodelle für Station 14.
oben: Leitfähigkeitsmodell
unten: Anpassung Modell- an Felddaten



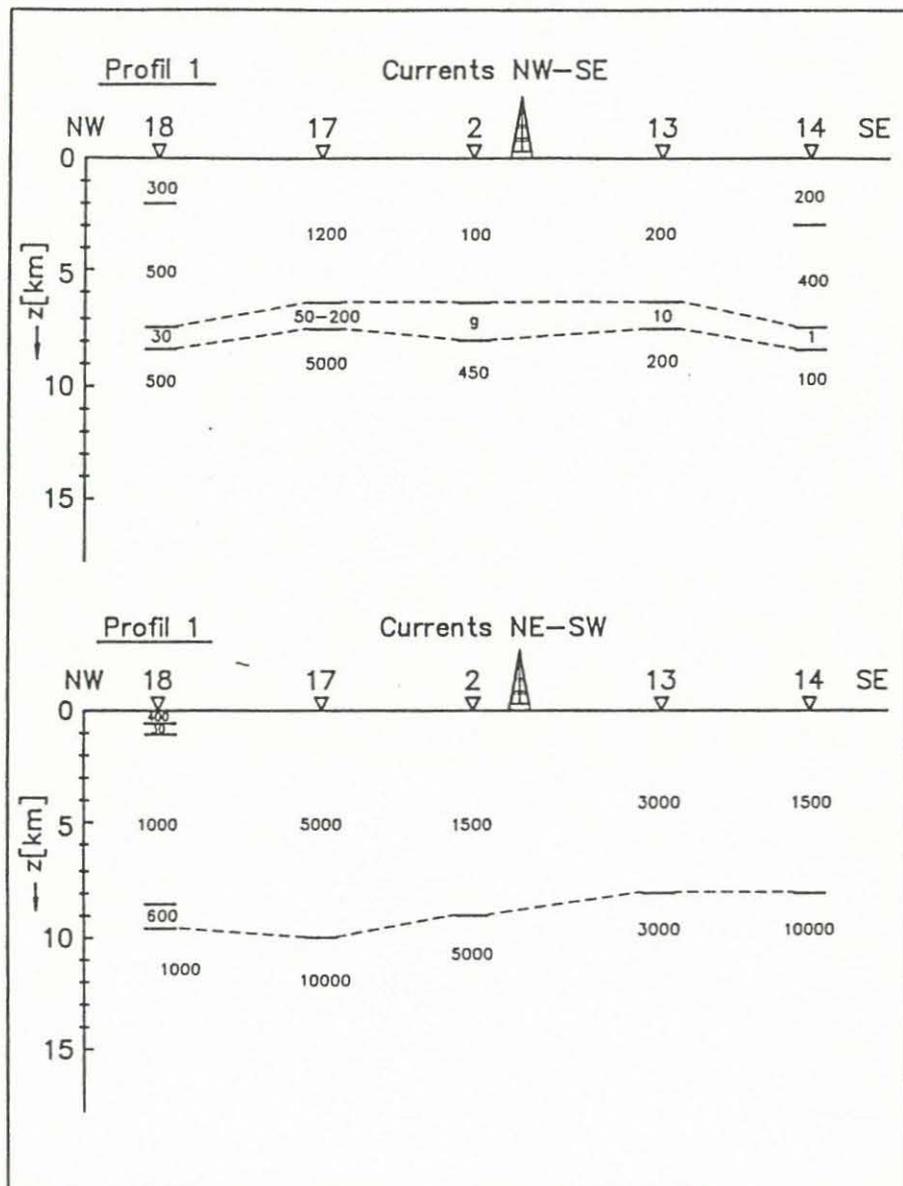
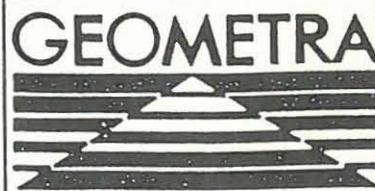


Abb.: 5.9
 Profildarstellung von 1-D-MT-Inversionsmodellen für Profil 1. Teilweise entzerrt, um bessere Korrelation der Modelle zu erreichen.



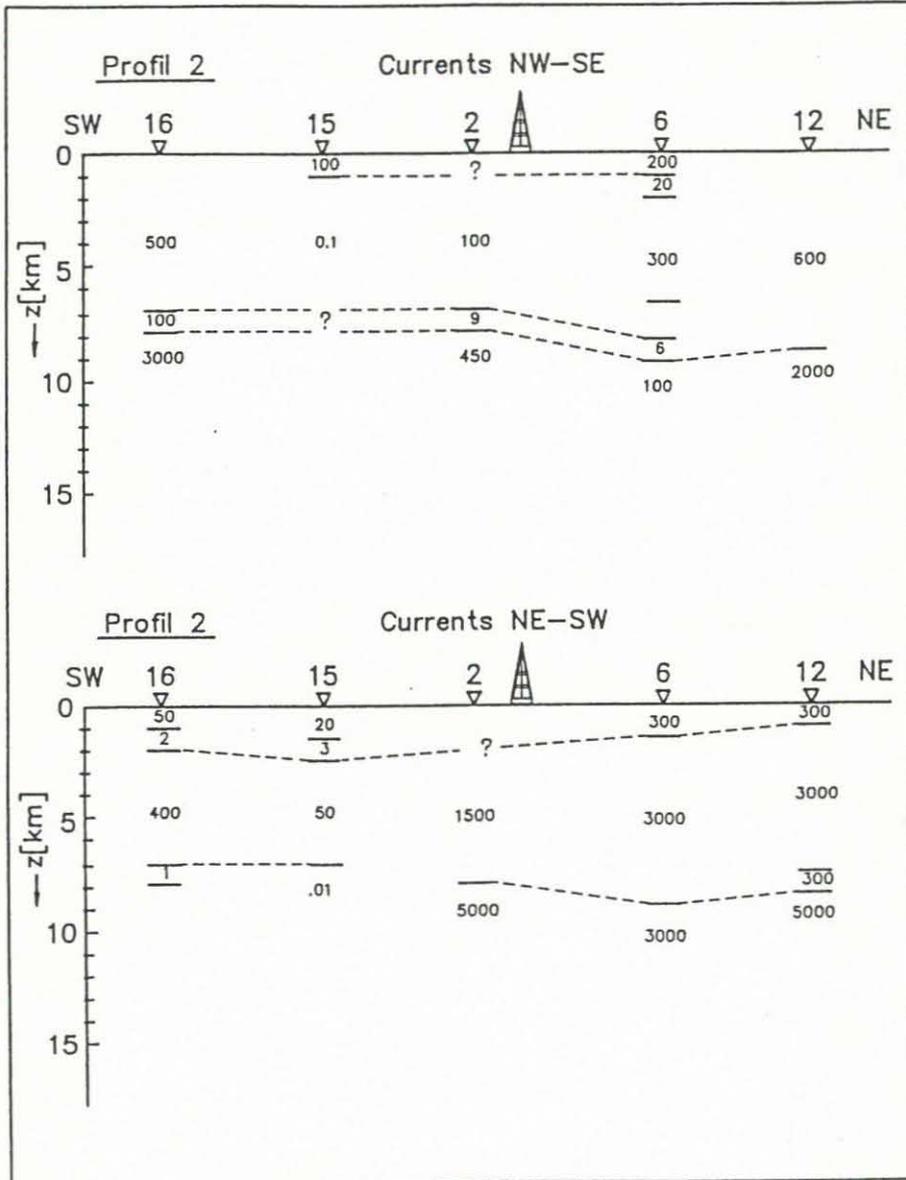


Abb.: 5.10
 Profildarstellung der 1-D-MT-Inversionsmodelle für Profil 2. Teilweise entzerrt, um bessere Korrelation zu erreichen.



. SW nach NE ab (s. Abb. 5.10: Profil 2 oben),

d. h. insgesamt von West nach Ost.

- Ob die gutleitende Schicht aufsteigt, abtaucht oder shlig gelagert ist, kann hier nicht aufgelöst werden. Weitere Hinweise auf die Tiefe und die Struktur des guten Leiters Mittelkruste werden bei der 2-D-Auswertung gegeben.
- Bei den E-Polarisations-Modellen sind die Widerstände aller Schichten an der Station 17 sicher zu hoch (Verzerrung) und der Widerstand für den Halbraum an der Station 15 viel zu klein. Entzerrfaktoren werden bei der nachfolgenden 2-D-ECRE-Auswertung gegeben.
- Station 15 ist extrem verzerrt, die RHO-A-Werte fallen über den gesamten (!) zunehmenden Periodenbereich kontinuierlich ab. Auf diesen Punkt wird bei der Betrachtung der Induktionspfeile und bei der 2-D-ECRE-Auswertung eingegangen.
- Der durchschnittliche Widerstandswert für die oberen 7 - 8 km liegt bei einigen hundert Ohm-Metern.
- Eine vertikale Strukturierung dieser oberen 7 - 8 km gelingt nur mit wenigen MT-Datensätzen. Dabei deutet sich an, daß oberflächennah (< 3 km) besser leitfähige Gesteinsschichten (50 - 300 Ohm-Meter) zu erwarten sind.
- Die Modelle der E-Polarisation zeigen keine vertikale Strukturierung für Tiefen > 15 km.
- Der Halbraumwiderstand (> 10 km) beträgt 500 - 1 000 Ohm-Meter.

5.3.7 Diskussion der 1-D-Inversionsmodelle der H-Polarisation

Diese Modelle sind in den Abb. 5.9 und 5.10 unten dargestellt. Die betrachteten Ströme fließen NE-SW.

- Der gute Leiter Mittelkruste der E-Polarisation ist bei den H-Polarisations-Modellen nur vereinzelt (an den Stationen 18 und 12) und dann auch nur andeutungsweise erkennbar. Dieses läßt ein anisotropes Verhalten der Gesteinsschichten vermuten, dessen Ursache in einer großräumigen Lamellenstruktur oder in Veränderungen in mikroskopischen Größenordnungen liegen kann.
- Die Widerstände für die oberen 7 - 8 km sind bei den H-Polarisations-Modellen um den Faktor 2 - 10 größer, d. h. den Strömen in nordöstlicher Richtung wird ein erheblich größerer Widerstand entgegengebracht. Die Ursachen können die gleichen wie bei der Anisotropie des guten Leiters sein.

- Eine vertikale Strukturierung der oberen 7 - 8 km ist nur für das Profil 2 möglich. Vergleichbar mit den Ergebnissen der E-Polarisation sind die oberen 2 km um den Faktor 5 - 10 besser leitfähig als der Bereich darunter.
- Die süd-westlich gelegenen Stationen 15 und 16 unterscheiden sich signifikant durch eine durchweg gute Leitfähigkeit von allen anderen östlich gelegenen Stationen. Besonders Station 15 scheint durch eine Anomalie extrem guter Leitfähigkeit in etwa 2 - 3 km Tiefe beeinflusst zu sein. Sowohl die H- als auch die E-Polarisations-Modelle zeigen auffallend geringe Widerstände (1 - 0,1 Ohm-Meter). Hierauf wird bei der Induktionspfeil- und der 2-D-ECRE-Auswertung eingegangen.
- Für 6 MT-Stationen wird ein guter Leiter in der Tiefe 70 - 100 km nachgewiesen. Dieser gute Leiter ist auch an der Station 18 sichtbar, die als relativ wenig verzerrt betrachtet werden darf (s. Abb. 5.11).

5.3.8 Darstellung der Induktionspfeile im MT-Frequenzbereich

Abb. 5.5 und 5.12 zeigen Realteile der Induktionspfeile für 9 MT-Stationen für 3 Frequenzen.

- Im Bereich der ausgewerteten MT-Perioden (0,25 bis 1 000 s) gibt es zwei vorherrschende Richtungen der Induktionspfeile und damit zusammenhängend zwei unterschiedliche Leitfähigkeitsgradienten (s. Abb. 5.14):

. Perioden < 1 s (2 - 3 km)

Die durch die Ostrichtung der Induktionspfeile angedeutete großräumige Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit von West nach Ost weist auf gut leitfähige Strukturen hin. Damit werden die gleichen Strukturen aufgezeigt, die auch mit der niederfrequenten AMT-Messung (30 Hz) erkannt werden.

Station 6 liegt in der Nähe einer markanten Leitfähigkeitsgrenze mit einem nord-südlichen Streichen (Grenzlinie der Amphibolite zum Granit).

Lokale Strukturen mit abweichendem west-östlichen Streichen existieren an den Stationen 18, 17, 2, 13 (s. auch AMT-Ergebnisse und Abb. 5.13).

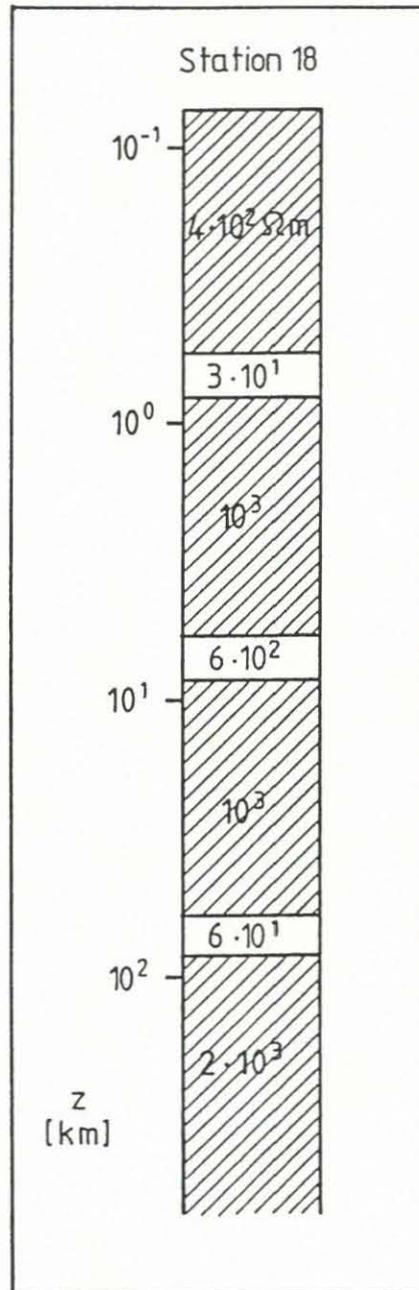


Abb.: 5.11
Zusammengesetztes 1-D-Modell für Station 18
gewonnen aus AMT- und MT-Ergebnissen.
Ströme NE-SW

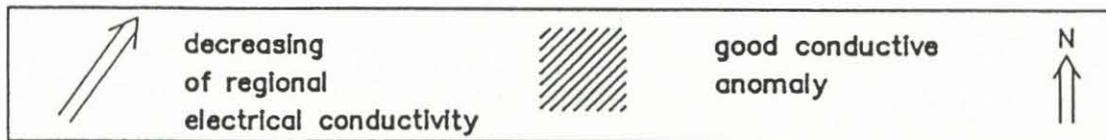
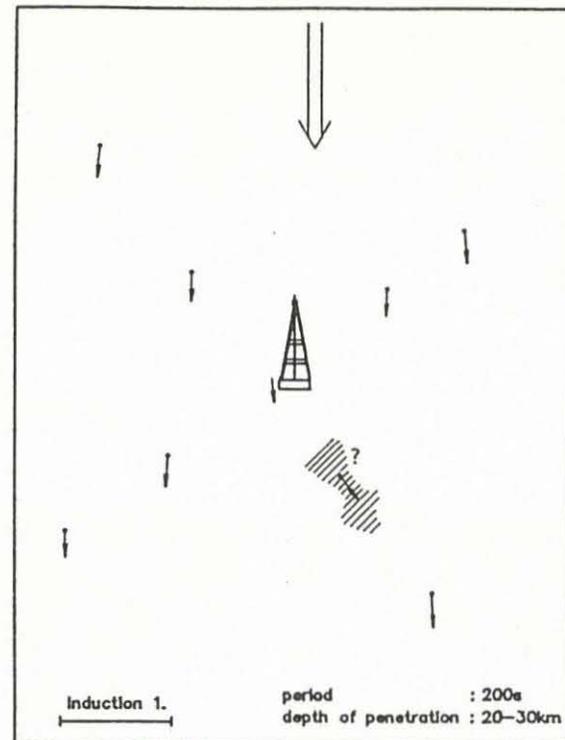
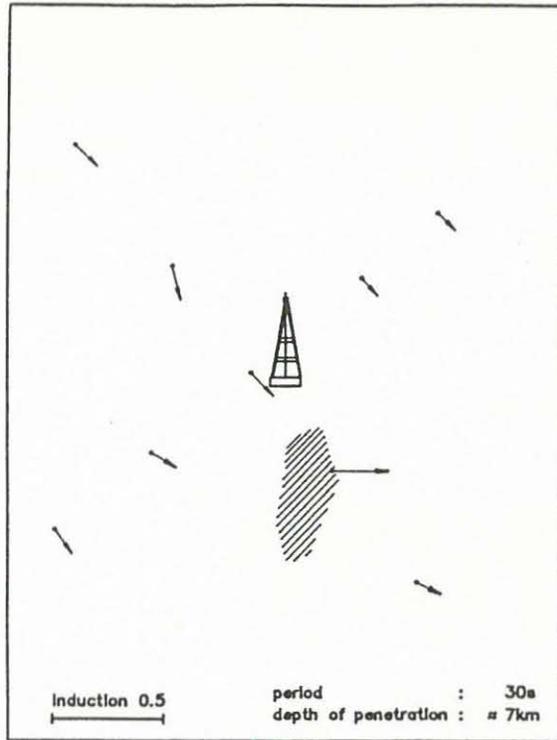
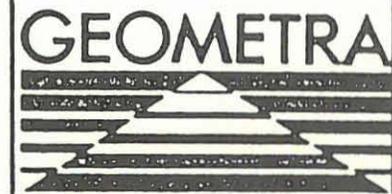


Abb.: 5.12
Induktionspfeile für MT-Frequenz-Bereich



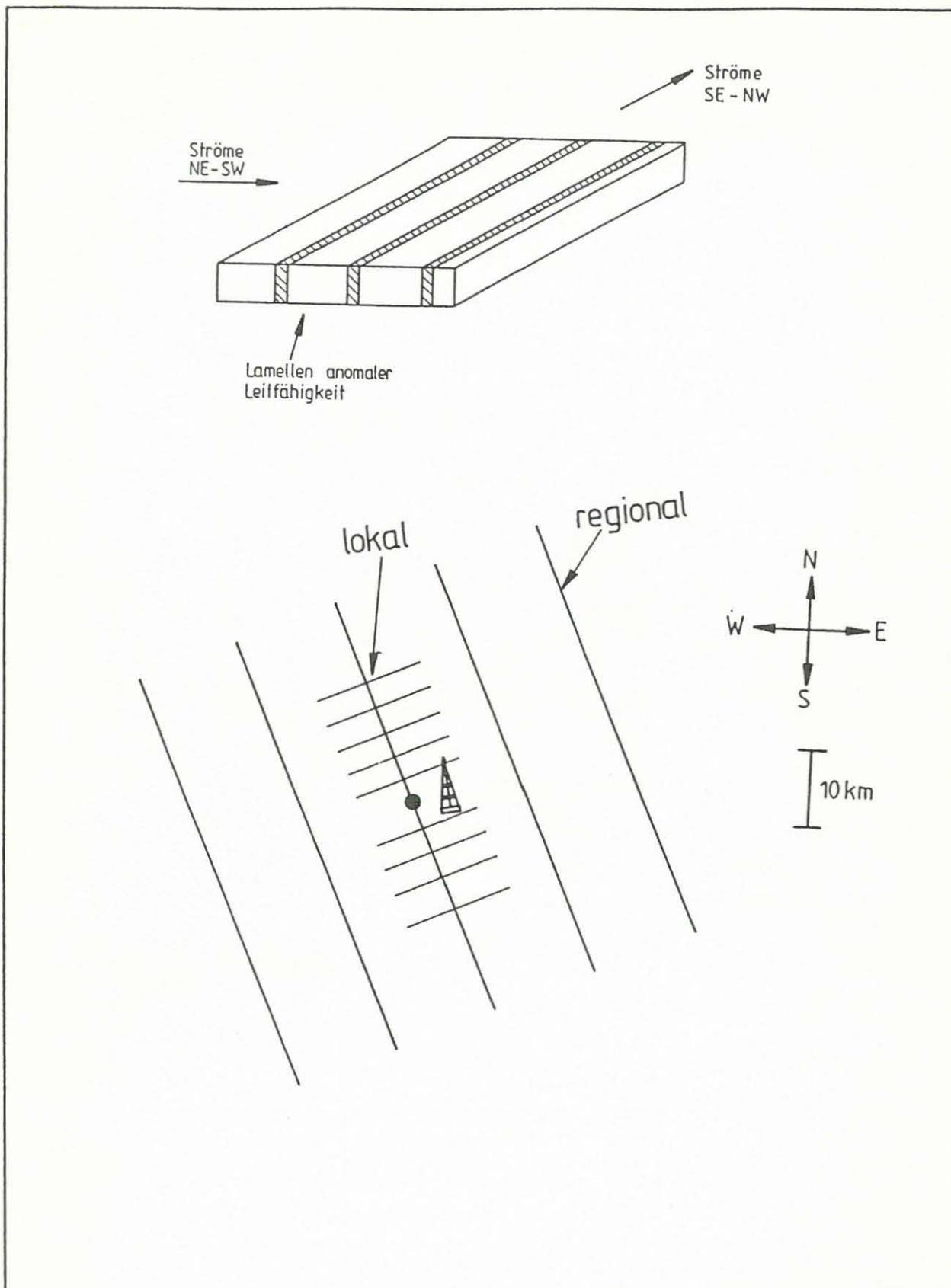


Abb.: 5.13
oben : Graphische Darstellung einer Lamellenstruktur
unten: Lokales und regionales Streichen für das Meßgebiet (Frequenz ≥ 1 Hz)



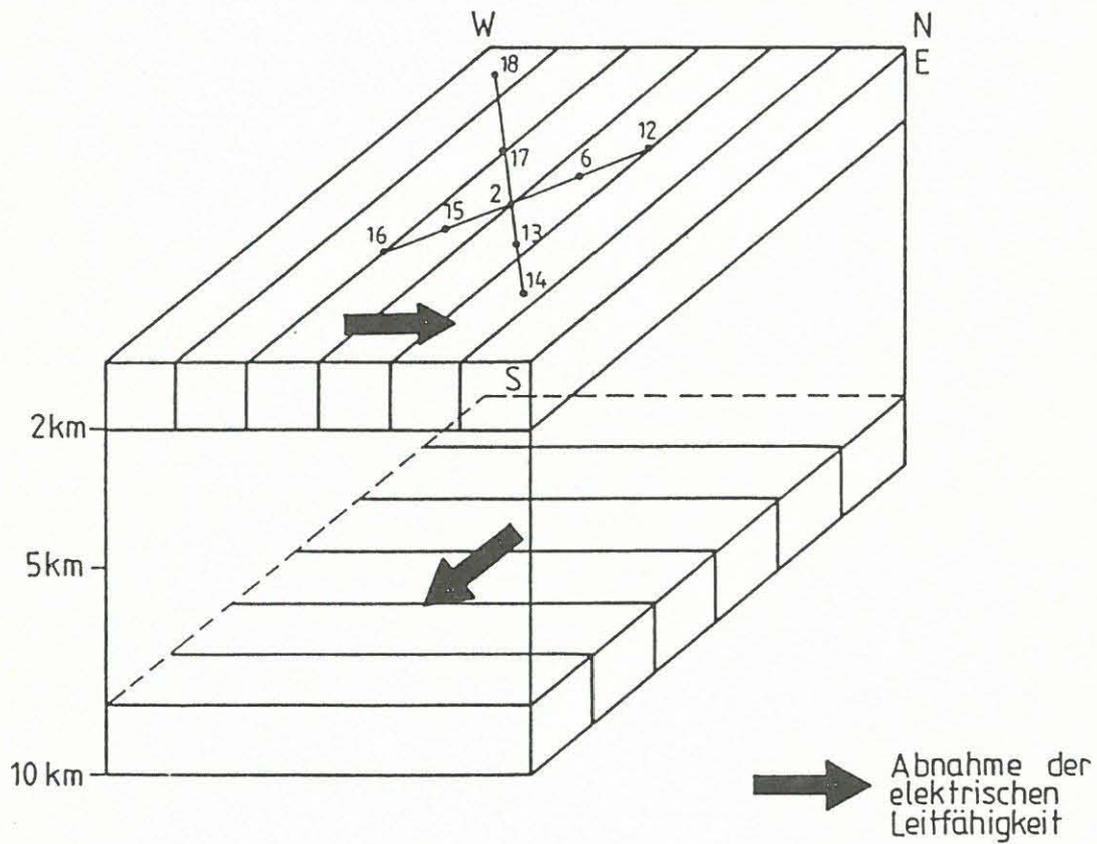
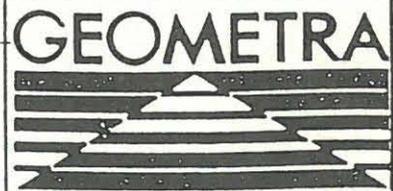


Abb.: 5.14
Schichten mit unterschiedlichen Leitfähigkeits-
gradienten, abgeleitet aus Induktionspfeilen.
0 - 2 km oberflächennahe Schichten mit nicht
gezeichneten lokalen Anomalien; 8 - 10 km:
guter Leiter Mittelkruste



• **Perioden > 59 s (7 - 8 km)**

Es existiert eine großräumige, sehr konsistente Abnahme der Leitfähigkeit von Norden nach Süden (s. Abb. 5.14). Eine Ausnahme hiervon bildet nur noch die Station 13, an der sich ein Bereich anomaler Leitfähigkeit unterhalb der Station andeutet. Diese lokale Anomalie liegt oberflächennah (< 5 km), zeigt aber wegen ihrer Intensität auch Auswirkungen auf längere Perioden.

• **Perioden 5 - 30 s**

Der Periodenbereich 5 - 30 s ist ein Übergangsbereich.

Zusammenfassend ergeben die MT-Ergebnisse:

- Station 12 ist auffallend hochohmig,
- Indikatoren für einen guten anisotropen Leiter Mittelkruste (7 - 9 km) sind reichlich vorhanden,
- Stationen 1 und 19 (auf mesozoischen Sedimenten) sind wie zu erwarten niederohmig,
- Indikatoren für guten Leiter im Mantel,
- die Grenze Kruste/Mantel wird erkannt (s. Abb. 5.15),
- starke Verzerrungen an Station 15 (!),
- bis 2 - 3 km Tiefe regionales Streichen NNW-SSE,
- ab 7 - 8 km Tiefe regionales Streichen W-E, dazwischen Übergangsbereich,
- markante Anomalie erhöhter Leitfähigkeit an der Station 13 (Graphiteinlagerung?) (< 5 km),
- oberflächennah teilweise lokales Streichen W-E, vor allem auf Stationen des Profils 1,
- starke Leitfähigkeitssprünge oberflächennah zwischen den Stationen 1 und 16 bzw. 2 und 12.

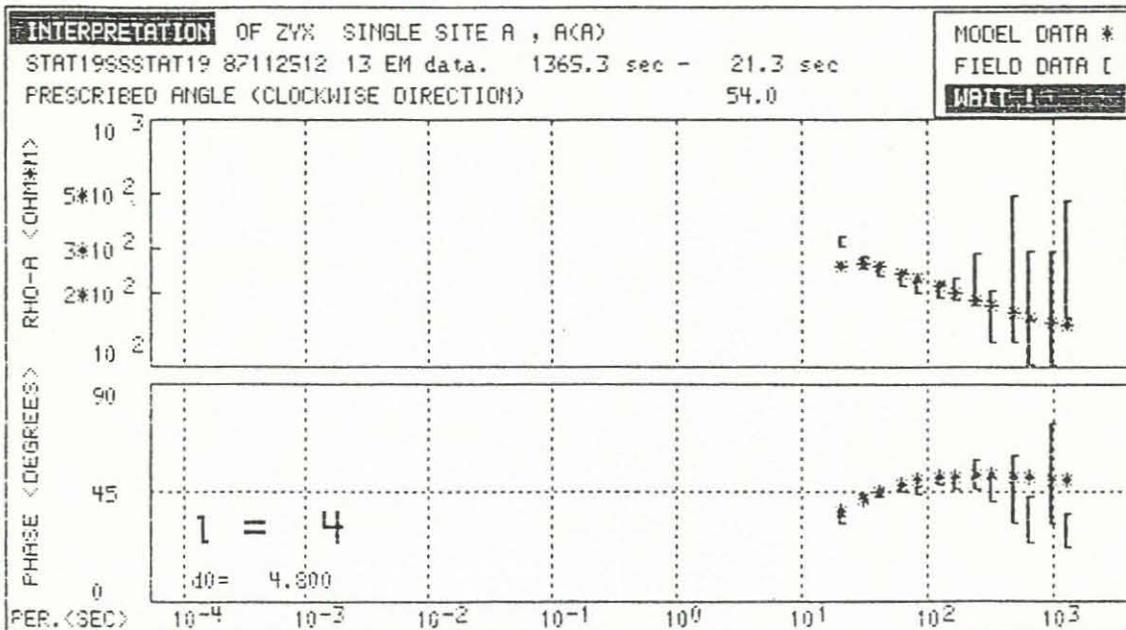
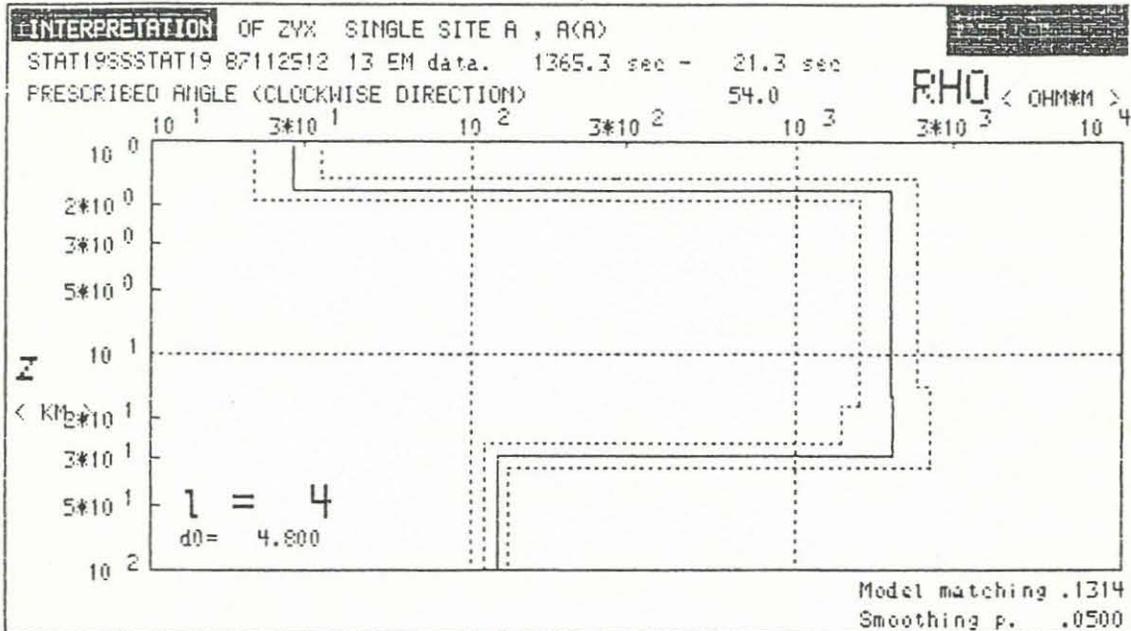
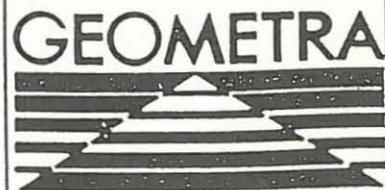


Abb.: 5.15
 1-D-Modell Station 19
 In 30 km Tiefe wird die Moho erkannt
 Anzahl der Schichten : 1
 mittlere Schichtdicke: d0



5.4 2-D-ECRE-Modellrechnung

5.4.1 Die Eingabemodelle und die Modellentwicklung

Es wurden 2-D-ECRE-Modelle für die Profile 1 und 2 berechnet.

Bei **Profil 1** wurden betrachtet:

- die Ströme NE-SW (magnetotellurische Übertragungsfunktion),
- die Komponenten der Induktionspfeile in Richtung des Profils 1 (vertikales Magnetfeld),
- die anomalen horizontalen Magnetfelder in Richtung des Profils 1.

Entsprechend für **Profil 2**:

- die Ströme NW-SE,
- die Komponenten der magnetischen Übertragungsfunktionen in Richtung des Profils 2.

Als Anforderungen an das 2-D-ECRE-Modell aus der 1-D-MT-Auswertung ergaben sich:

- Strukturierung der oberen 7 - 8 km in einer Deckschicht mit 100 - 200 Ohm-Metern und einen mächtigen anisotropen Block mit 3 - 10mal höherem Widerstand,
- guter Leiter Mittelkruste mit 1 - 100 Ohm-Metern in einer Tiefe von etwa 8 km,
- schlechtleitender Block bis etwa 30 km,
- darunter Übergang zu oberem Mantel mit höherer Leitfähigkeit.

Die Auswertung der Induktionspfeile stellte folgende Forderungen an die Modelle:-

- Abnahme der Leitfähigkeit oberflächennah von W nach E mit lokalen Anomalien,
- Abnahme der Leitfähigkeit in der Mittelkruste von N nach S.

Der prinzipielle Verlauf der magnetischen Übertragungsfunktion z_H an den meisten Stationen ist der Abb. 5.16 zu entnehmen.

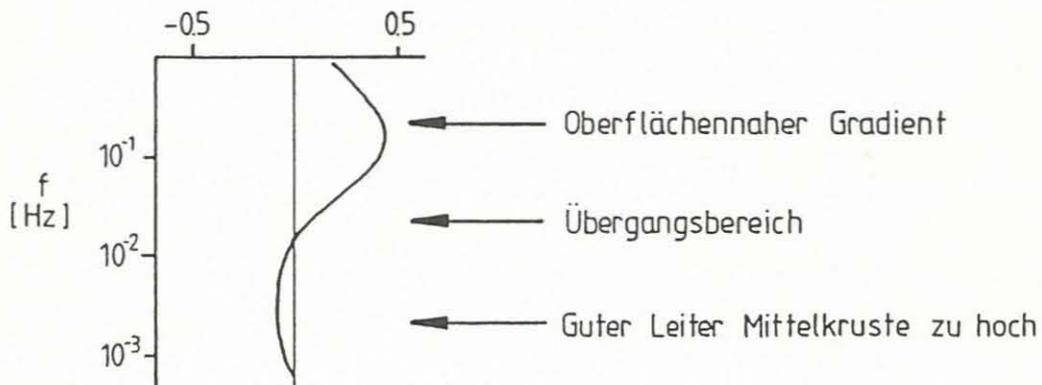
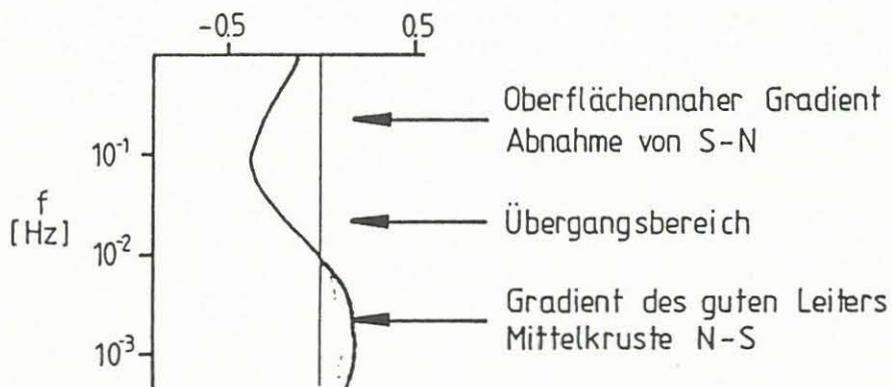
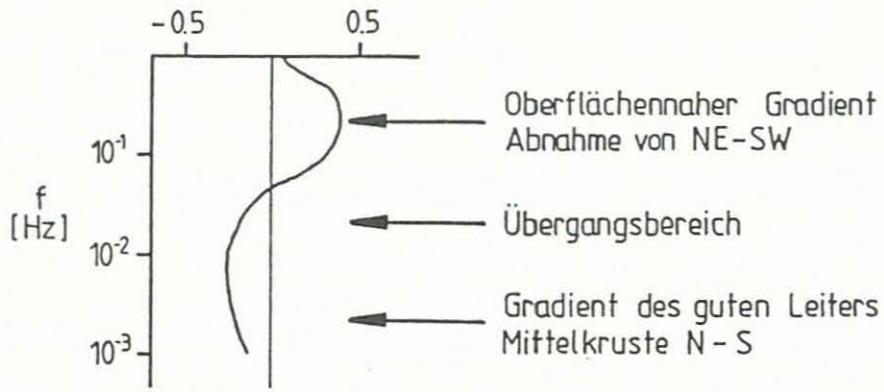
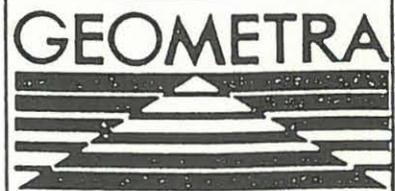


Abb.: 5.16
Prinzipielle Frequenzverläufe von der
magnetischen Übertragungsfunktion z_H .
oben : Profil 2, Mitte: Profil 1,
unten: Modell für Profil 2



Das Eingabemodell für die ECRE-2-D-Auswertung kombinierte demnach

- die vertikale Untergliederung, die durch das 1-D-Profiling erhalten wurde, wobei für den schlechtleitenden Block (2 - 7 km) Mittelwerte genommen wurden, mit
- der lateralen Untergliederung des oberflächennahen Bereichs und dem guten Leiter in der Mittelkruste.

Im Verlauf der ECRE-2-D-Auswertung wurden ca. 40 Modelle gerechnet. Folgende Veränderungen des Eingabemodells mußten durchgeführt werden, um eine Verbesserung der Anpassung aller vier (1 MT, 3 GDS) Übertragungsfunktionen zu erreichen:

- Einführung einer einheitlichen Deckschicht bis in eine Tiefe von etwa 1,5 km auf dem Profil 1,
- Festhalten eines schlechtleitenden Blocks an der Oberfläche bei Station 12 (Granitblock, bekannt auch aus der AMT-Modellrechnung),
- Einbau eines gut leitfähigen Anomaliebereichs unter den Stationen 13 und 14 in 2 - 4 km Tiefe,
- Festlegen einer tieferen Lage des guten Leiters Mittelkruste, als in den 1-D-Inversionsmodellen gefordert. Dieses ist erforderlich, um auf dem Profil 2 die beiden entgegengesetzt gerichteten Leitfähigkeitsgradienten zu "entkoppeln". Liegt der gute Leiter in einer Tiefe von etwa 8 km, so überwiegt der Effekt des oberflächennahen Gradienten (s. Abb. 5.16 unten).

5.4.2 2-D-Endmodelle

Bei dem Profil 2 gelang die Anpassung der Modell- an die Felddaten gut, d. h. z_H und h_H konnten durch ein Modell über einen großen Frequenzbereich gut angepaßt werden (s. Abb. 5.19).

Die Anpassung von z_H und h_H war für das Profil 1 befriedigend, da es zwar gelang, z_H gut anzupassen, die Anpassung von h_H jedoch nur qualitativ in der Tendenz des Kurvenverlaufs erfolgte (s. Abb. 5.20).

Hier noch einmal die markantesten und wichtigsten Ergebnisse der Endmodelle (s. Abb. 5.17 und 5.18):

- z_H und h_H erfordern für das Profil 2 (SW nach NE), daß oberflächennah (< 4 km) die Leitfähigkeit von SW nach NE abnimmt, während für die Mittelkruste (etwa 10 km) ein genau entgegengesetzt gerichteter Leitfähigkeitsgradient existiert.

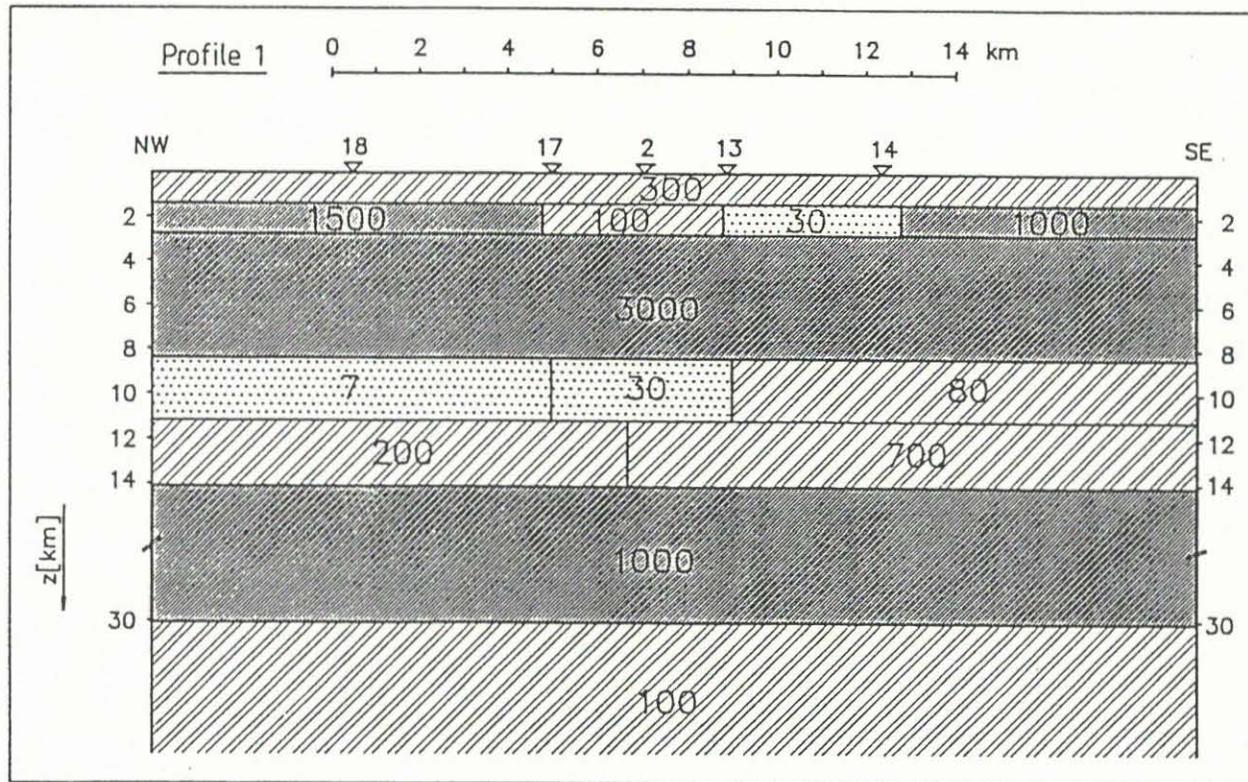
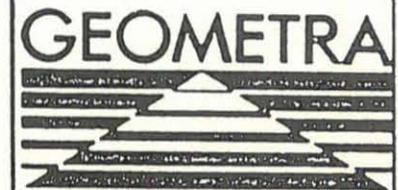


Abb.: 5.17
2-D-ECRE-Vorwärtsmodell für Profil 1



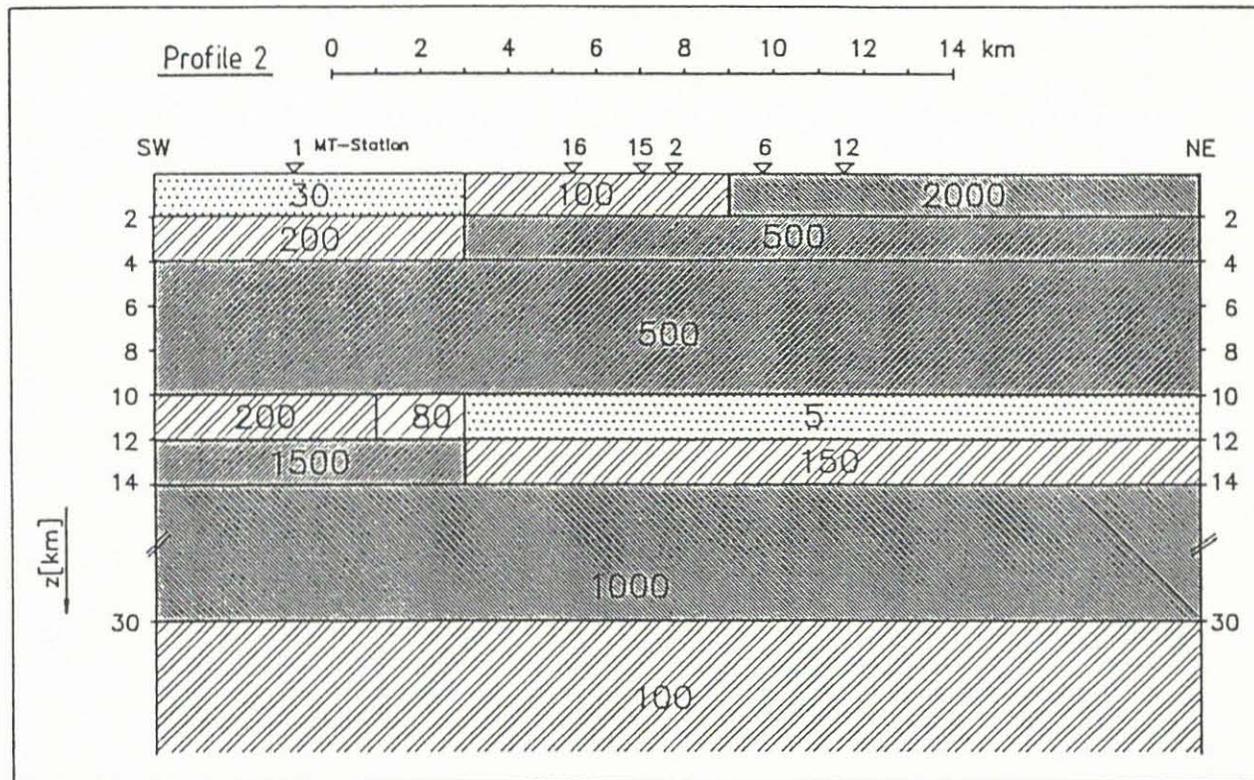
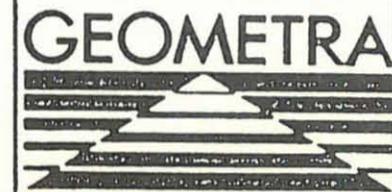


Abb.: 5.18
2-D-ECRE-Vorwärtsmodell für Profil 2



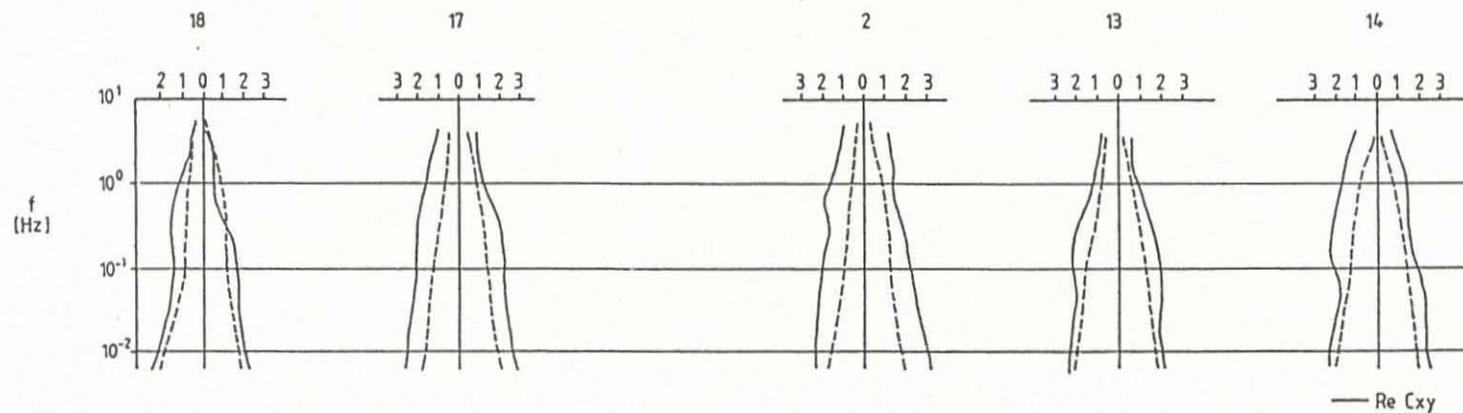
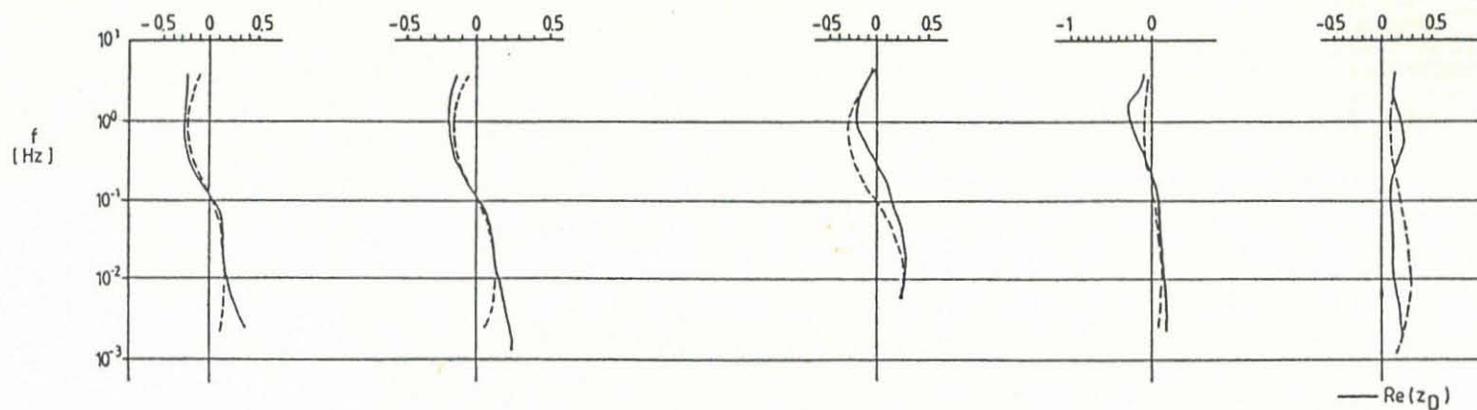
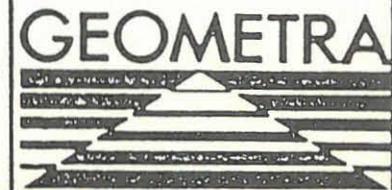


Abb.: 5.19

Anpassung von z_H (oben) und C_{xy} (unten; $C_{xy} = -iw Z_{xy}$) der Modelldaten (gestrichelte Linie) an die Felddaten (durchgezogene Linie) für das Profil 1. Bei C_{xy} ist deutlich die statische Verzerrung der Daten erkennbar.
 Entzerrfaktoren: Stat. 2: 3 - 7; Stat. 13: 1,5 - 2; Stat. 14: 2 - 3; Stat. 17: 3 - 6



- z_H und h_H des Profils 1 fordern eine Abnahme der Leitfähigkeit in der Mittelkruste von NW nach SE.
- Insgesamt ergibt sich also eine Abnahme im Bereich der mittleren Kruste von N nach S.
- Die Daten erfordern es außerdem, daß der gute Leiter Mittelkruste in etwas größerer Tiefe als bei den 1-D-MT-Modellen liegt (etwa 8 km für 1-D, 8,5 - 12 km für 2-D). Der Grund für diese Differenz liegt in der Anwendung der statischen Entzerrung bei der 2-D-ECRE-Auswertung.

5.4.3 Das räumliche Endmodell

Der zentrale Meßpunkt an der Bohrlokation (Station 2) liegt auf beiden 2-D-Profilen. Die vertikale Modellierung dieses Meßpunktes ähnelt sich in den prinzipiellen Strukturen in beiden Modellen.

Es gibt jedoch folgende Unterschiede:

- in der Strukturierung der oberen 4 km,
- in dem Widerstand des Bereichs zwischen 3 - 4 und 8 km (Faktor 6),
- in der Leitfähigkeit des guten Leiters (Faktor 6).

Diese sind erklärbar durch:

- ein 3-D-Verhalten an der Station in den oberen 2 km,
- eine Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit des Gesteins im Bereich 4 - 12 km vom Faktor 6.

Um zu einer graphisch anschaulichen Darstellung der durch die beiden 2-D-Modellrechnungen erkennbaren 3-D-Aussagen zu gelangen, wurde ein Kreuzprofil entworfen, das für die Station 2 ein gemittelttes vertikales Modell annimmt (s. Abb. 5.21).

Nachfolgend einige Bemerkungen zu den Ergebnissen:

Sicher ist:

- eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit in den oberen 2 - 4 km von SW nach NE, jedoch sprunghaft zwischen 1 und 16 durch die Fränkische Linie zwischen 2 und 6 (oder 6 und 12 durch Granitblock!);
- eine deutlich höhere Leitfähigkeit bedingt durch die Sedimente der oberen 2 - 4 km an der Station 1 verglichen mit allen anderen Stationen;

2-D results relating to space

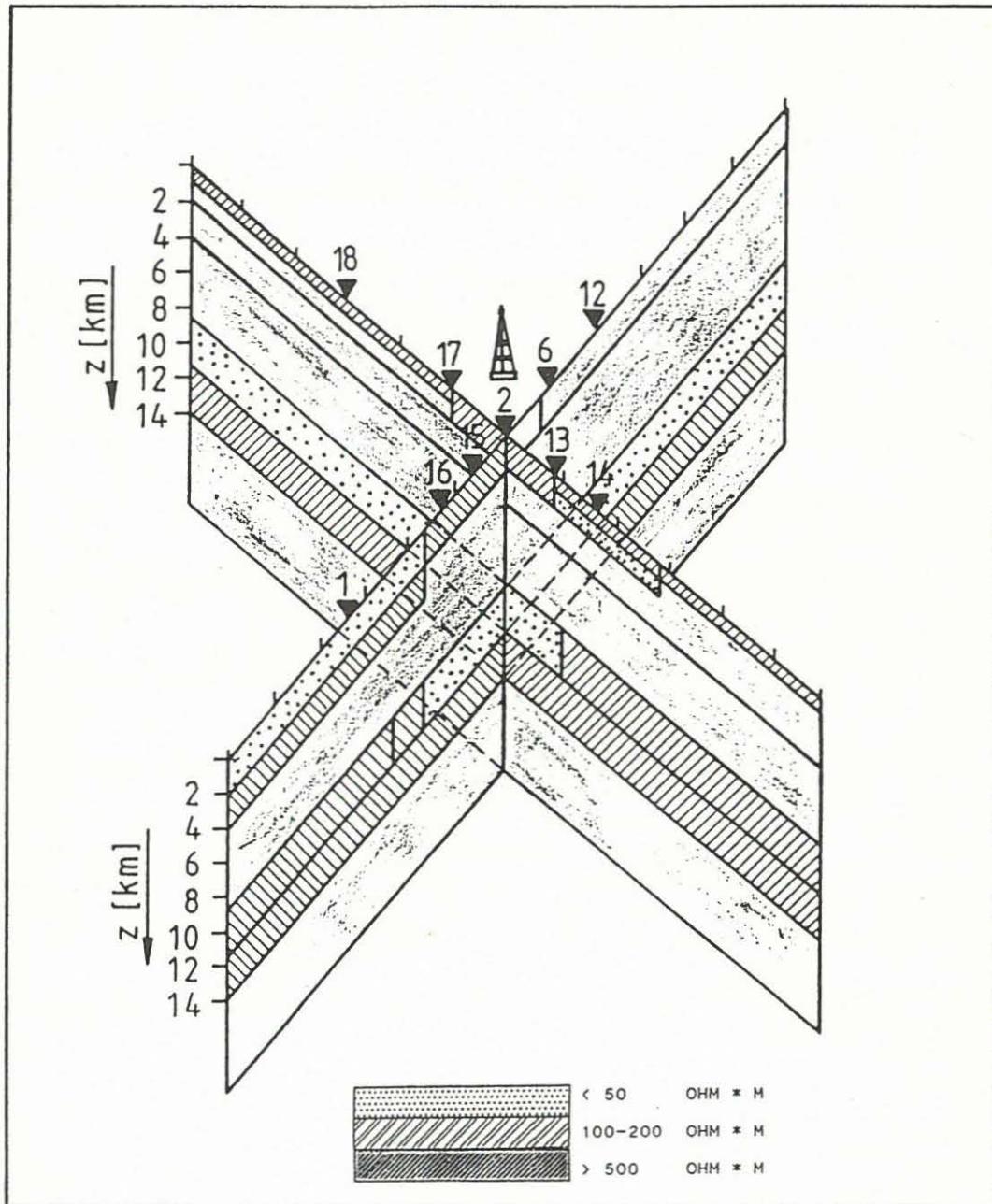


Abb.: 5.21
Räumliche Darstellung der 2-D-Modelle.
Beide Profil-Modelle sind angeglichen,
um eine einheitliche Tiefenstruktur unter
der Station 2 (Bohrlokation) zu erhalten.

- eine eingelagerte Schicht guter integrierter Leitfähigkeit (30 - 200 Siemens) in einer Tiefe zwischen 8,5 und 12 km (guter Leiter in mittlerer Kruste);
- eine Abnahme der Leitfähigkeit dieser Schicht von NE nach SW und von NW nach SE, d. h. insgesamt von N nach S. Eine Überlagerung der Abnahme durch ein Abtauchen der gutleitfähigen Schicht nach S ist möglich;
- ein Bereich geringer Leitfähigkeit in der Tiefe 12 - 30 km;
- ein Übergang zu erhöhter Leitfähigkeit unterhalb dieses Blocks;
- eine Abnahme der integrierten Leitfähigkeit der oberen 3 - 4 km von der Bohrlokation aus nach NW, NE und SE;
- eine ungewöhnlich gutleitfähige Schicht unter den Stationen 13 und 14 in 1 - 4 km Tiefe (größere Ansammlung von Graphit?).

Als Fragestellungen bleiben:

- Feststellung des Überganges zum hochohmigen Granit in nordöstlicher Richtung;
- die genaue Lage der Grenzfläche zwischen den Stationen 1 und 16 in den obersten 4 km;
- die genaue Tiefe der Oberfläche des guten Leiters (möglich sind 8,5 - 10 km);
- ob die gutleitfähige Schicht nach S abtaucht (gleich wahrscheinlich wie der gezeigte horizontale Leitfähigkeitsgradient). Ein Ansteigen nach S kann ausgeschlossen werden (genauer nur durch weitere Messungen!);
- die genaue Lokation des anomal gutleitfähigen Körpers bei den Stationen 13 und 14.

6 ABSCHLUSSBETRACHTUNG

Schon in einem frühen Stadium der Auswertung zeigte sich eine 3-Dimensionalität der Verteilung des elektrischen Widerstandes der Gesteine im Meßgebiet im Bereich der Bohrlokation bis zu einer Tiefe von etwa 1,5 km. Demgegenüber steht das gut interpretierbare Verhalten der Stationen 1, 19 und 12, die auf Sedimentstrukturen bzw. auf einem Granitblock liegen.

Dieses ist der Grund, daß die eindimensionale Modellrechnung der AMT/CSAMT-Daten für den inneren Bereich nur grobe Strukturen aufzeigen kann. Die Induktionspfeile sind im Frequenzbereich von 16 kHz - 300 Hz von lokalen Strukturen geprägt. Für den inneren Bereich ist eine 2-D- oder 3-D-Interpretation zu empfehlen.

Eine mehrdimensionale Auswertung der CSAMT-Daten erfolgt im Rahmen eines DFG-Vorhabens von Herrn Prof. Weidelt.

In größeren Tiefen von 1,5 km bis hin zu 150 km erscheinen die Strukturen weniger komplex.

Im Bereich von 2 - 3 km ist, abgesehen von lokalen Anomalien guter Leitfähigkeit, ein regionales Streichen in NS-Richtung erkennbar, das über einen anisotropen Bereich von 3 - 8 km in eine EW-Richtung dreht. Letztere prägt auch die für diese Tiefe markanteste Struktur eines guten Leiters.

Auf die Fragestellung, ob dieser gute Leiter söhllich liegt oder nach S abtaucht, können nur ergänzende großräumige Messungen mit anschließender 2-dimensionaler Auswertung der magnetotellurischen und magnetischen Übertragungsfunktionen Antwort geben.

In noch größeren Tiefen bleiben als aufgelöste Strukturen die Grenze Kruste/Mantel (ca. 30 km) und ein guter Leiter im Mantelbereich in etwa 100 - 120 km Tiefe.

7 ANHANG

7.1 Koordinaten der Meßpunkte und Registrierzeiten

Tab. 7.1: Gauß-Krüger-Koordinaten der Meßstationen

Stat.No.	KTB-Benennung	Gauß-Krüger-Koordinaten	
		Hochwert	Rechtswert
1		55 18 71	45 02 47
2	470S/520E	55 19 93	45 08 68
3	800S/800E	55 19 83	45 09 09
4	520S/830E	55 20 09	45 08 96
5	800S/500E	55 19 65	45 08 86
6		55 20 60	45 09 73
7	210S/230E	55 19 98	45 08 31
8	430S/330E	55 19 84	45 08 51
9	880S/140E	55 19 38	45 08 61
10	200S/600E	55 20 20	45 08 61
11	200S/840E	55 20 33	45 08 80
12		55 21 55	45 10 48
13		55 19 14	45 09 24
14		55 17 28	45 09 87
15		55 19 46	45 07 98
16		55 18 70	45 06 84
17		55 20 79	45 08 23
18		55 23 10	45 06 86
19		55 15 81	44 74 62
SENDER E-W:			
	E-Elektrode	55 26 75	45 16 60
	W-Elektrode	55 26 85	45 15 50
SENDER N-S:			
	N-Elektrode	55 26 75	45 16 60
	S-Elektrode	55 26 00	45 16 70

Tab. 7.2: Registrierzeiten der Stationen (ohne Logistik)

Stat. No.	KTB-Benennung	MT	AMT	CSAMT
1		27 d (16.03. - 25.03.) (23.04. - 07.05.) (05.07. - 09.07.)	2 h (27.04.)	4 h (27.04.)
2	470S/520E	11 d (17.03. - 22.03.) (13.05. - 18.05.)	9 h (23.03. - 24.03.) 3 h (22.04.)	3 h (22.04.)
3	800S/800E		18 h (18.03. - 20.03.) 3 h (26.04.)	4 h (26.04.)
4	520S/830E		6 h (21.03.) 6 h (24.04., 25.04.)	5 h (25.04.)
5	800S/500E		6 h (23.03.) 3 h (29.04.)	4 h (29.04.)
6		9 d (23.03. - 25.03.) (01.07. - 07.07.)	4 h (25.03.) 2 h (07.05.)	3 h (07.05.)
7	210S/230E		8 h (28.04., 29.04.)	8 h (28.04., 29.04.)
8	430S/330E		6 h (01.05., 02.05.)	9 h (01.05., 02.05.)
9	880S/140E		6 h (01.05., 04.05.)	8 h (01.05., 04.05.)
10	200S/600E		3 h (27.04.)	4 h (27.04.)
11	200S/840E		3 h (26.04.)	4 h (27.04.)
12		6 d (09.05. - 12.05.) (08.07. - 09.07.)	2 h (07.05.)	3 h (07.05.)
13		4 d (19.05. - 22.05.)	3 h (06.05.)	4 h (06.05.)
14		5 d (23.04. - 27.04.)	2 h (05.05.)	3 h (05.05.)
15		4 d (28.05. - 31.05.)	2 h (04.05.)	3 h (04.05.)
16		4 d (27.04. - 01.05.)	3 h (03.05.) 2 h (05.05.)	4 h (03.05.) 3 h (05.05.)
17		4 d (23.05. - 26.05.)	2 h (08.05.)	3 h (08.05.)
18		5 d (25.06. - 30.06.)	2 h (08.05.)	4 h (08.05.)
19		35 d (02.05. - 26.05.) (25.06. - 04.07.)	3 h (11.05.)	

7.2 Datenweitergabe und Format

Die von Geräteeinflüssen korrigierten und gemittelten Spektren sind auf einem Magnetband (1/2 Zoll, 9 Spur, 1 600 bpi, Rekordlänge 80 Zeichen) im ASCII-Code gespeichert. Sie stehen Interessenten zur Verfügung und können über die Projektleitung KTB angefordert werden.

Eine tabellarische und graphische Darstellung der Übertragungsfunktionen ist zur Zeit in Vorbereitung und kann als Extraband bei der Firma GEOMETRA angefordert werden.

Filebezeichnung, Filestruktur und Formatierung sind im folgenden beschrieben:

Filebezeichnung:

MT + AMT: ?? . mtx : Auswertung von Zxy
 ?? . mty : Auswertung von Zyx
 ?? . Stationsnummer (z. B. 06, 12)

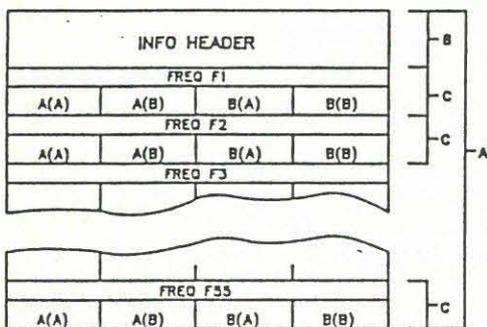
AMT : ?? . amx : Auswertung von Zxy
 ?? . amy : Auswertung von Zyx
 ?? . Stationsnummer

CSAMT : ?? . aan : Senderauslage NS
 ?? . aao : Senderauslage OW

Filestruktur:

Der Aufbau eines Datenfiles ist in Abb. 7.1 gezeigt.

Grobe Struktur der MT-Schnittstelle



Struktur Stations-Kombinations-Block (SCB)

FREQ	CODE		NUE
Hx Hz °	Hx Hy °	Hy Hy °	Hx Hz °
Hx Hy °	Hx Hz °	Ex Hx °	Ex Hy °
Ex Ex °	Ey Hx °	Ey Hy °	Ex Ey °
Ey Ey °			

Abb. 7.1: Übersicht des Datenfile-Aufbaues

Formatierung:

Info-Header:

- * Datum der Messung (12 character)
- * 4 zweistellige GEOMETRA-interne Kennungen (I2-FORTRAN-FORMAT)
- * 2 Leerstellen
- * Name der Stationsmessung (I4 character)

Frequenz-Block C:

- * besteht aus 24 Zeilen
- * ist in 4 gleichgroße Stations-Kombinations-Blöcke aufgeteilt
 - . single site A(A): Wanderstation (Wanderstation)
 - . Referenz A(B): Wanderstation (Normalstation)
 - . Referenz B(A): Normalstation (Wanderstation)
 - . single site B(B): Normalstation (Wanderstation)

Stations-Kombinationsblock:

- * 1. Zeile : ** Frequenz (F 14.8)
 - ** 5 Leerzeichen
 - ** Stations-Komb.-Code (11, 12, 21, 22) (I2-Format)
 - ** 5 Leerzeichen
 - ** Anzahl der Freiheitsgrade
- * 2. - 5. Zeile : 26 Weite mit Real- und Imaginärteilen der Spektren (je E 12.6)

