

G. REITMAYR, München

"Räumliche Verteilung und Periodenabhängigkeit der Vorzugsrichtung  
des erdelektrischen Feldes und erste Ergebnisse der Auswertung  
von magneto-tellurischen Messungen auf einem Profil über den  
Rheingraben"

Mittwoch, den 15.9.1971

In den Jahren 1967 - 69 hat die Arbeitsgruppe "Goelektrik" des Instituts für Angew. Geophysik, München längs eines Profils über den Oberrhein-Graben an 26 Meßstationen die Variationen des erdelektrischen und an zwei als Basisstationen gedachten die des erdmagnetischen Feldes registriert. Einen Überblick über das Meßgebiet und die Lage der bisher zur Auswertung herangezogenen Meßstationen bietet die Fig. 1. (Die dicken Striche geben die Vorzugsrichtungen für mittlere Perioden an; s.u.)

Die Registrierungen erfolgten im Falle des E-Feldes mit am Institut entwickelten und gebauten Elektrographen; das Magnetfeld wurde mit Förstersonden und Askania-Variographen gemessen.

Für jede Meßstation (im Rahmen der bisherigen Auswertung sind dies 17) wurden etwa 20 bis 35 Intervalle der Länge zwei Minuten bis 5,5 Stunden ausgewählt, und diese sowie die jeweils gleichzeitigen Registrierungen des Magnetfeldes an einer der beiden Basisstationen digitalisiert. Mit Hilfe einer elektronischen Rechenanlage wurde jede so erhaltene Zeitfolge einer harmonischen Analyse unterworfen. Die dabei berechneten Fourier-Koeffizienten (jeweils zwei für die NS und die EW- bzw. H- und D-Spur) wurden für jede Harmonische mit der Periode und der Stations- und Intervallnummer (u.a.) in Form einer Lochkarte ausgedruckt. Die Gesamtheit der Karten wurde anschließend für jede Station in Perioden-Bereiche - in unserem Fall 14 - eingeteilt. Mit diesen damit erhaltenen Kartenstapel, die sich durch die Gemeinsamkeit der Stationsnummer und des Perioden-Bereichs auszeichnen, konnten nun weitere Rechen-

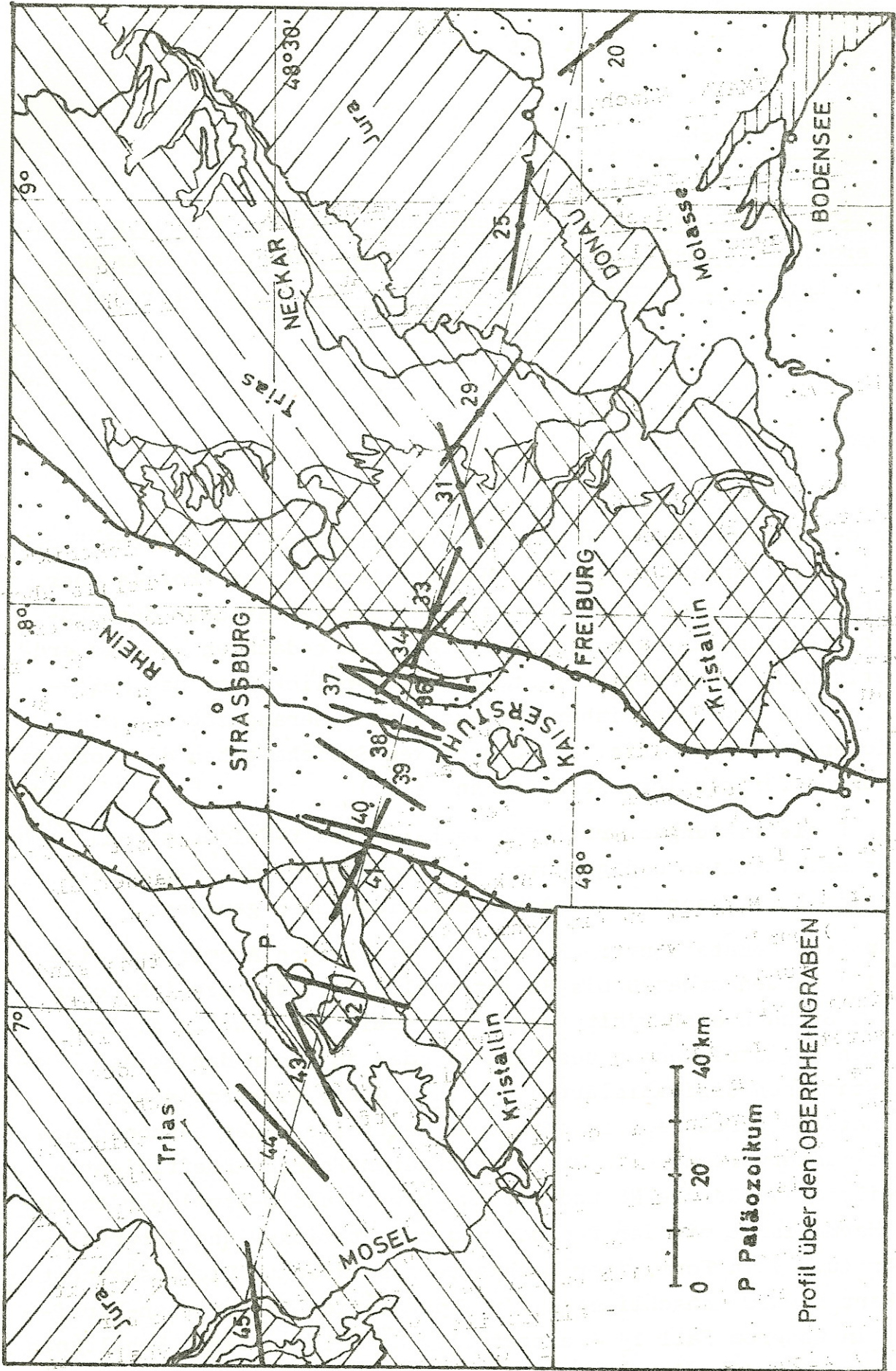


Fig. 1

operationen (in erster Linie solche nach Gesichtspunkten der Statistik) durchgeführt werden.

### Die Vorzugsrichtungen

Als erstes wurden die bevorzugten Polarisations-Richtungen des E-Feldes - kurz Vorzugsrichtung VZ - untersucht. Diese Größe, die eigentlich selten in der Literatur erwähnt wird, scheint gut geeignet zu sein für erste qualitative Interpretationen.

Die Vorzugsrichtung läßt sich ermitteln durch Zeichnen von Vektor-Diagrammen. Die Spitze des Vektors der Horizontalfeld-Variationen beschreibt Figuren, die Ellipsen ähneln. Die Richtungen der großen Achsen dieser im Fall des E-Feldes meist schlanken Ellipsen können sich von Ort zu Ort stark ändern, schwanken aber für eine feste Meßstation mit Einschränkungen um einen festen Wert. Diese Richtung soll als VZ bezeichnet werden.

Eine andere Möglichkeit und damit eine zweite Definition ergibt sich aus der Berechnung der Richtungen der großen Achsen der durch die Fourier-Koeffizienten bestimmten Schwingungsellipse. Die Fourier-Koeffizienten wurden, wie oben erwähnt, für jede Harmonische auf eine Lochkarte gestanzt. Man kann somit die Polarisationswinkel für jede auf einer Karte fixierte Schwingungs-Ellipse berechnen, dann im Perioden-Intervall mitteln und erhält so die VZ in ihrer Perioden-Abhängigkeit.

Eine dritte und die bei dieser Auswertung angewandte Methode der Bestimmung der VZ ist die über die Berechnung der Koordinatensysteme, in denen die Kohärenz  $Koh$  zwischen den orthogonalen Komponenten des E-Feldes minimal wird. Die  $Koh$  ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, ob zwei Folgen voneinander linear abhängig sind. Sei  $X$  eine Folge von in einer Perioden-Gruppe zusammengefaßten Fourier-Koeffizienten der EW-Spur,  $Y$  die analoge Folge der NS-Spur eines der an einem Meßpunkt gemessenen Felder, dann läßt sich die  $Koh$  zwischen  $X$  und  $Y$  berechnen. Transformiert man die Koeffizienten in ein gegen das erste gedrehte Koordinatensystem, so ist die  $Koh$  im allgemeinen eine andere. Es stellt sich heraus, daß ein Koordinatensystem ausgezeichnet ist, in dem die  $Koh$  ein meist scharf

ausgeprägtes Minimum besitzt. HAAK hat gezeigt, daß eine der beiden Achsen dieses ausgezeichneten Koordinaten-Systems im Falle des E-Feldes mit der VZ zusammenfällt. Nach dieser Methode wurden die VZ für alle Stationen und alle dort erfaßten Perioden-Intervalle berechnet. Die Fig. 2 zeigt die Ergebnisse.

Unter der Voraussetzung, daß alle Polarisations-Richtungen des als anregend betrachteten Magnetfeldes statistisch verteilt sind, können die VZen nur durch Strukturen im Untergrund bedingt sein. Sie werden etwas aussagen über Anisotropien bzw. scheinbare Anisotropien.

Im folgenden sollen einige Dinge besprochen werden, die in der Übersicht über die VZen in der Fig. 2 auffallen.

Einige Stationen zeichnen sich durch nahezu konstante (hinsichtlich der Perioden-Abhängigkeit) VZ aus. Dazu gehören die Stationen 29, 33 und die im Graben gelegenen (hauptsächlich im westlichen Teil) 37, 38 (ab der Periode 50 sec), 39, 40 und 41. Es sind solche Meßpunkte, an denen eine bestimmte Richtung durch die Geologie oder Tektonik - in unserem Fall den Rheingraben - vorgegeben ist. Am östlichen Grabenrand sind offensichtlich die Verhältnisse wesentlich komplizierter als am westlichen, wo der Abbruch zwischen 41 und 40 erfolgt. Im Osten liegen die Stationen 34 und 36 (35 wurde noch nicht ausgewertet) auf einzelnen Schuppen einer Trümmerzone. Bei kurzen Perioden sieht es so aus, als verlief die Grenze zwischen den gut leitenden Grabensedimenten und dem Kristallin zwischen den Stationen 33 und 34. Mit zunehmender Periode dreht die VZ in 34 in eine Richtung mehr senkrecht zur Grabenachse und in 36 eher senkrecht dazu. Die Hauptstörung scheint nun zwischen 34 und 36 zu verlaufen. Geologen (D. ORTLAM) haben strukturell zwei übereinander gelagerte Grabensysteme unterschieden; sie werden als Ortho- und als Para-Graben bezeichnet. Mit diesen Bezeichnungen läßt sich sagen, daß die Grenze des Orthograbens zwischen 36 und 34 verläuft, die des Paragrabens zwischen 34 und 33. Oben gesagtes kann bestätigt werden, wenn man die Lage der Stationen auf der Fig. 1 und dem Profilschnitt der Fig. 3 berücksichtigt.

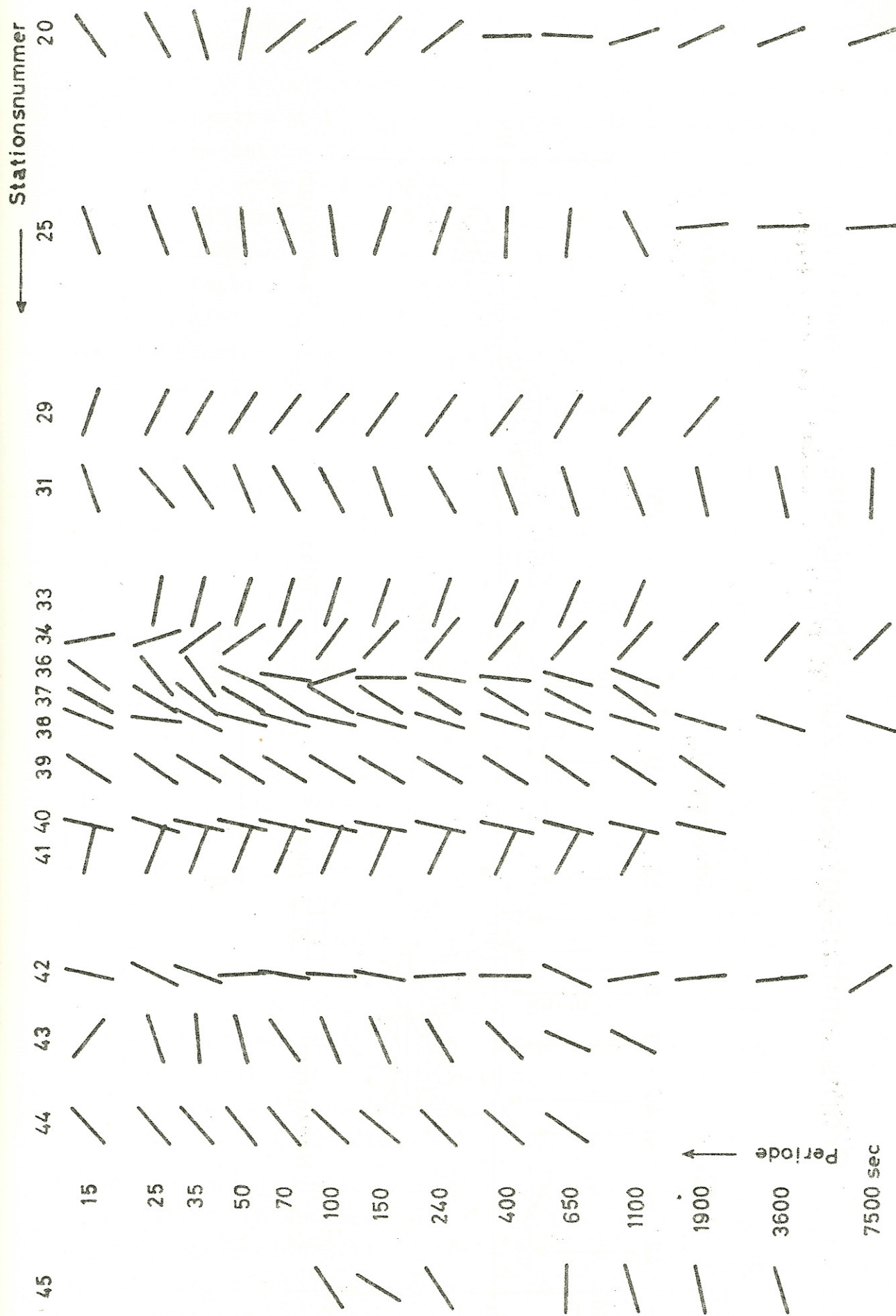


Fig. 2: Vorzugs-Richtung in Abhängigkeit von der Periode

# Profilschnitt senkrecht zum Rheingraben (schematisiert)

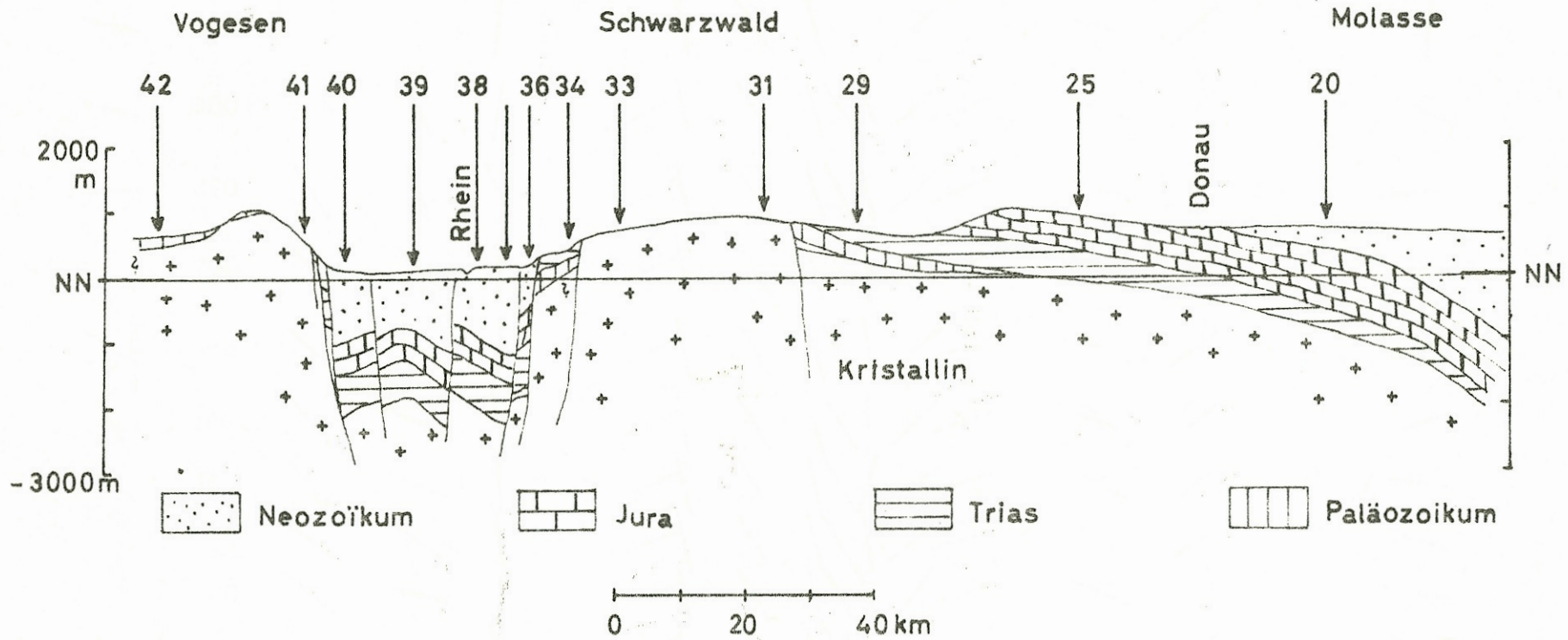


Fig. 3

Ein weiterhin interessantes Verhalten hinsichtlich der Periodenabhängigkeit der VZ findet man an den drei westlichsten Stationen. Man erkennt an Station 43 und abgeschwächt an 44 mit zunehmender Periodendauer ein Drehen in eine zur Grabenachse  $\pm$  parallele Richtung. Man könnte geneigt sein, dies mit einer mit wachsender Tiefe dominant werdenden Richtung der Anisotropie parallel zum Graben in Verbindung zu bringen. Bei der letzten Station im Westen läßt sich mit Einschränkungen ein gegensinniges Drehen in EW-Richtung konstatieren. Wenn tatsächlich die Drehungen der VZ im westlichen Teil des Profils mit einer gutleitenden Schicht in größerer Tiefe in Verbindung gebracht wird, dann müßte eben die Begrenzung oder das Auskeilen dieser Schicht zwischen den Stationen 44 und 45 verlaufen. Eine andere Möglichkeit die Periodenabhängigkeit der VZ hier zu erklären, wäre, an eine Beeinflussung durch das sich im Westen anschließenden Pariser Beckens zu denken.

An der östlichsten Station 20 kommen mit sich ändernder Periode etwa alle Richtungen vor. Die Station scheint, was auch andere Ergebnisse andeuten, die Voraussetzungen des CAGNIARD'schen Modells der eindimensionalen Leitfähigkeitsverteilung ganz gut zu erfüllen. Eventuell ermittelte VZen können bei diesem Modell nichts über Anisotropien in horizontalen Richtungen im Untergrund aussagen, weil sie eben nach Voraussetzung nicht existieren. Die unterschiedlichen VZen für verschiedene Perioden sind, zumindest z.T., ganz einfach in der unterschiedlichen Häufigkeit der Anregungsrichtungen zu suchen. Bei meinen Untersuchungen stelle ich Maxima der Häufigkeit in NS und EW fest bei kürzeren und mittleren Perioden. Die VZen können theoretisch nicht parallel zur Anregungsrichtung liegen, sie werden bei unserer Statistik in Richtungen zeigen, die mit unterdurchschnittlicher Häufigkeit bei der Anregung vertreten sind: bei kürzeren Perioden sind die VZen in NE-SW, bei den mittleren in SE-NW; bei langen Perioden findet man Anregungsmaxima nur in EW - die VZen liegen mehr NS.

Eine weitere in diesem Zusammenhang bemerkenswerte Tatsache soll zuletzt noch erwähnt werden. Die VZen an den beiden benachbarten Grabenstationen 39 und 40 zeigen praktisch keine Periodenabhängigkeit, sie bilden aber einen Winkel von knapp  $20^\circ$  miteinander. Zieht man einen Plan zu Rate, der die Sedimentmächtigkeiten

im Graben angibt, etwa den Tiefenlinienplan der Tertiär-Basis (DOEBL, 1970, Fig. 10), so erkennt man sofort, daß die VZen an den beiden Stationen durch die Richtung zunehmender Sedimentmächtigkeit wesentlich beeinflußt sind. Die VZen zeigen hier also offensichtlich in Richtungen, in denen die Änderungen der integrierten Leitfähigkeit maximal ist.

### Die Impedanzen

Der nächste Punkt meiner Auswertungen ist die Beziehung zwischen E- und F-Feld, die Methode der Magnetotellurik. Diese Beziehungen müssen zunächst durch eine Tensorgleichung formuliert werden

$$\vec{E} = Z \cdot \vec{F}$$

Aus bekannten Gründen beschränkt man sich, oder hat sich zu beschränken, auf die Horizontalkomponenten der beiden Felder. Wie weit dies erlaubt ist soll hier nicht erörtert werden. Z hat also die Form

$$\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{pmatrix}$$

In dieser allgemeinen Form ist, ebenfalls wie bekannt, eine Interpretation gegenwärtig nicht möglich. Es müssen bestimmte Voraussetzungen über die Leitfähigkeitsverteilung gemacht werden, was für den Impedanztensor bedeutet, daß er gewisse Symmetrieeigenschaften aufzuweisen hat. Einmal steht uns eine eindimensionale Leitfähigkeitsverteilung zur Verfügung, etwa das Modell von CAGNIARD. Mit seiner Größe des spez. Widerstandes  $\rho_s : = 0,2 \cdot T \cdot \left(\frac{E}{F}\right)^2$  nimmt der Impedanztensor die Form an

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\frac{\rho_s}{0,2 T}} \\ -\sqrt{\frac{\rho_s}{0,2 T}} & 0 \end{pmatrix},$$



d.h. die Beziehung zwischen E und F kann im wesentlichen durch den Skalar  $\rho_s$  beschrieben werden.

Die andere Möglichkeit ist, ein Modell mit zweidimensionaler Leitfähigkeitsverteilung zu nehmen (Änderung von  $\sigma$  außer in vertikaler Richtung auch in einer horizontalen). Der Impedanztensor sieht dann folgendermaßen aus

$$\begin{pmatrix} 0 & Z_1 \\ Z_2 & 0 \end{pmatrix}.$$

Eine eindimensionale Leitfähigkeitsverteilung wird nun speziell in unserem Meßgebiet nicht zu erwarten sein; somit besteht eine der Hauptaufgaben darin, die Koordinaten-Systeme zu finden, in denen sich am besten die Zweidimensionalität beschreiben läßt, oder besser gesagt, die Richtungen zu finden, in denen sich die Leitfähigkeit nicht oder möglichst wenig ändert.

Nun wurden aus den bei der Frequenz-Analyse erhaltenen Fourier-Koeffizienten für die einzelnen harmonischen Anteile des E- und F-Feldes die TensorKomponenten für verschiedene Koordinaten-Systeme berechnet. Sie wurden jeweils mit Hilfe der oben erwähnten Lochkarten-Stapel für das E- und F-Feld (die sich durch die Gemeinsamkeit des Perioden-Intervalls auszeichneten) nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

Zunächst wurde ein für alle Stationen festes rechtwinkeliges und, wie sich anbietet, nach der ausgezeichneten Richtung der Grabenachse orientiertes Koordinaten-System verwendet. Es stellt sich dabei heraus, daß bei den meisten Stationen die Anpassung an eine zweidimensionale Struktur damit schlecht ist, daß die in der Hauptdiagonalen stehenden Komponenten, die verschwinden sollten, dies im allgemeinen keineswegs tun. Häufig sind ihre Werte in der Größenordnung der mit ihnen korrespondierenden  $Z_2$  und  $Z_3$ , manchmal sind sie sogar größer. In der Fig. 4 sind Ergebnisse für ein Perioden-Intervall gezeigt: Die Komponenten, die nicht verschwinden sollen, werden durch die beiden Kurvenzüge repräsentiert, die beiden anderen durch Punktsignaturen. Auf der Abszisse ist die Lage der Meßstationen markiert; die Einheit der Ordinate ist  $(\text{mV/km})/\gamma$ . Interpretationen etwa mit Hilfe von Modellrechnungen, die nicht alle vier Komponenten berücksichtigen, die eben bei

# BETRAEGE DES IMPEDANZTENSORS

in festem rechtwinkligen, nach der Grabenrichtung orientierten (N 15° E) Koordinaten-System

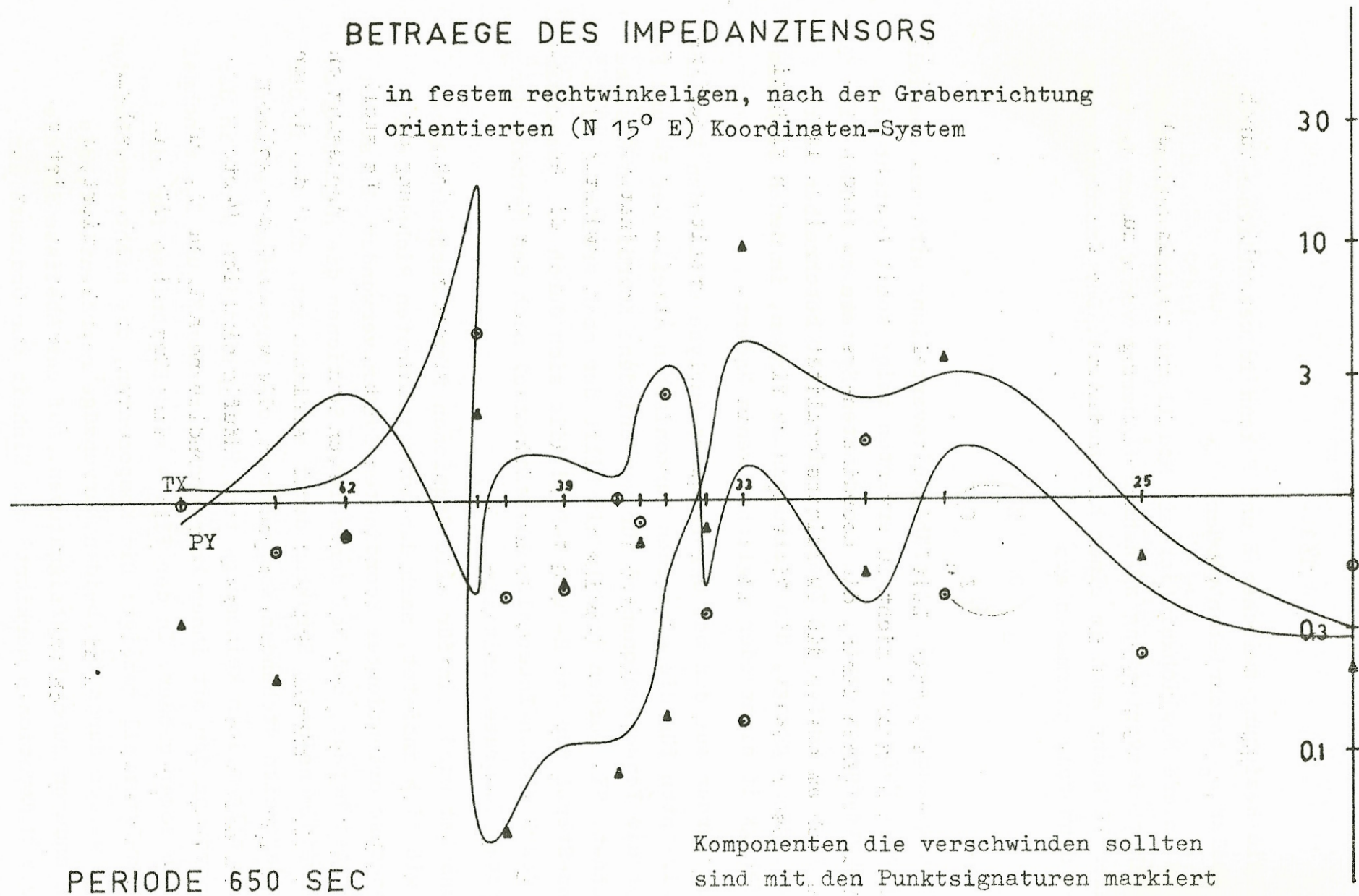


Fig. 4

dieser Wahl der Koordinaten-Systeme alle wesentlich vertreten sind, erscheinen mir nicht allzu sinnvoll.

Es wurde daher im weiteren eine andere Methode versucht, die im wesentlichen am Institut in München entwickelt wurde. Auf Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden, ausführliche Abhandlungen finden sich in den Diplomarbeiten von HAAK und KESSLING. Kurz zusammengefaßt wird folgendermaßen vorgegangen: Das E-Feld wird in ein Koordinaten-System transformiert, das durch die VZ und die Richtung senkrecht dazu bestimmt ist. Nun erfolgt eine Transformation des Magnetfeldes in ein System, das mit einer Schrittweite von  $2^\circ$  gedreht wird. Bei jedem Drehwinkel wird die Kohärenz zwischen  $E_x$  und  $F_x$  und zwischen  $E_y$  und  $F_y$  berechnet. Die Richtungen werden für das Magnetfeld als ausgezeichnet betrachtet, in denen seine Komponenten maximale Kohärenz zu den jeweils entsprechenden E-Feld-Komponenten haben, was mathematische bedeutet, daß die Wahrscheinlichkeit, daß die Komponenten jeweils kausalen Zusammenhang haben - den sie nach den Vorstellungen vom Induktionsvorgang haben müssen - am größten ist. Diese ausgezeichneten Koordinaten-Systeme für das Magnetfeld sind im allgemeinen nicht mehr rechtwinkelig.

In diesen so gefundenen Koordinaten-Systemen - sie mußten für jede Station und dort für jedes Perioden-Intervall gesondert gesucht werden - wurden nun mit oben erwähnter Ausgleichsrechnung die Tensorcomponenten berechnet. Die nächsten beiden Fig. 5 und 6 geben ähnlich wie Fig. 4 für zwei Perioden-Intervalle die Beträge der Komponenten längs des Profils wieder, nun für die nach der Methode der maximalen Kohärenz optimal angepaßten Koordinaten-Systeme. (Obere Kurve Verhältnis von E-Feld-Komponente in VZ zur dazu maximal kohärenten F-Feld-Komponente, untere Kurve E-Feld-Komponente senkrecht zur VZ zur dazu ...; Punkte markieren wieder die theoretisch verschwindenden Komponenten in der Hauptdiagonalen). Man erkennt nun, daß die in der Hauptdiagonalen stehenden Komponenten fast immer kleiner sind als die mit ihnen korrespondierenden in der Nebendiagonalen, häufig sind sie sogar wesentlich kleiner. Jetzt erst erscheint es sinnvoll, von hier aus weitere Interpretationen z.B. mit Hilfe von Modellrechnungen durchzuführen, also etwa  $\rho_s$ -Kurven - ein  $\rho_{s\parallel}$  (parallel zur VZ) und ein  $\rho_{s\perp}$  - zu

# BETRAEGE DES IMPEDANZTENSORS

in nach der Methode der maximalen Kohärenz optimal angepaßten Koordinaten-Systemen

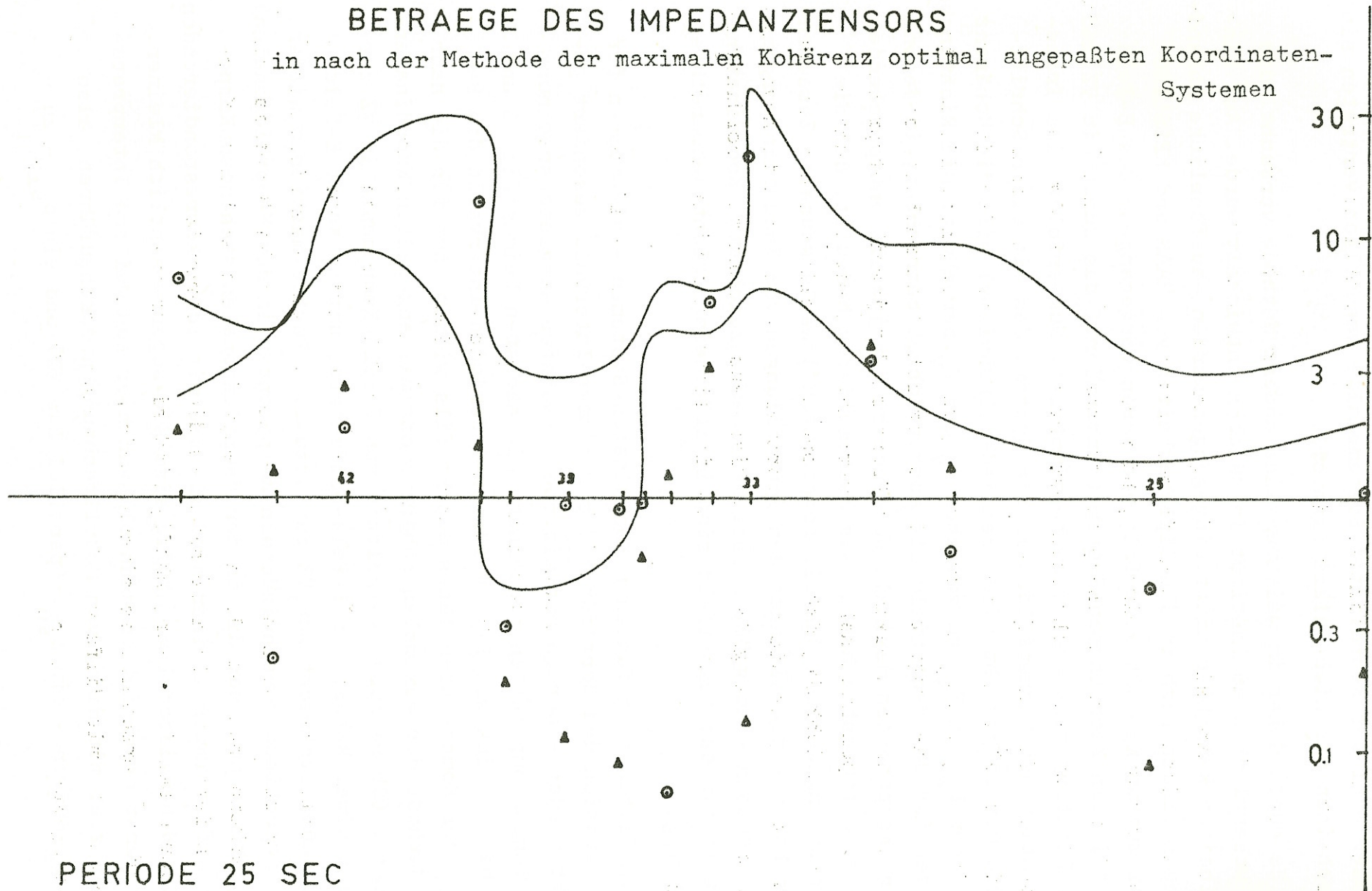
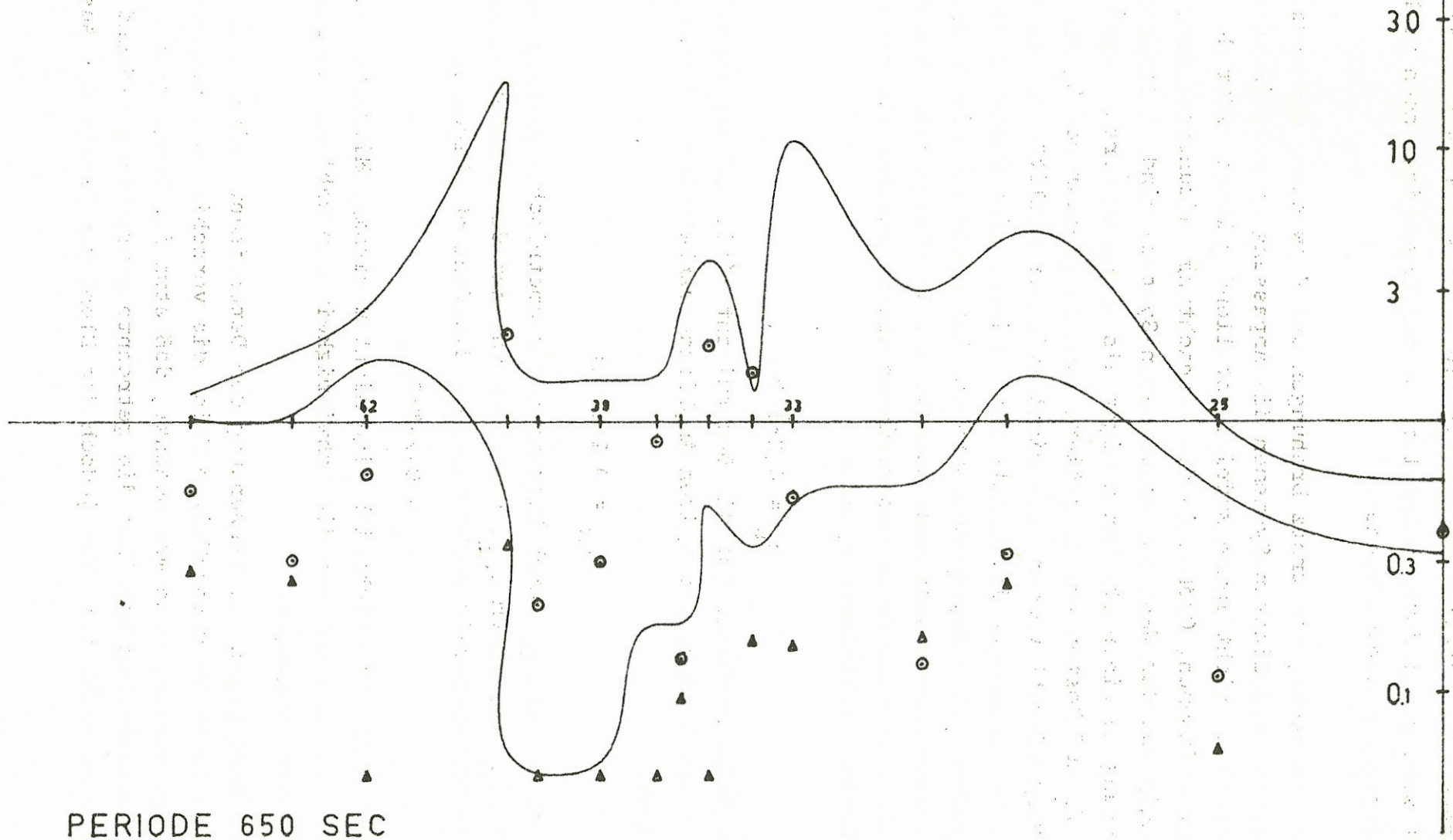


Fig. 5

# BETRAEGE DES IMPEDANZTENSORS

in nach der Methode der maximalen Kohärenz optimal angepaßten Koordinaten-Systemen



PERIODE 650 SEC

Fig.6

zeichnen. Die Arbeiten an quantitativen Interpretationen sind noch nicht weit genug fortgeschritten, so daß Ergebnisse noch nicht wiedergegeben werden können.

Die Tatsache, daß trotz Drehungen und Verwendung von schiefwinkligen Koordinaten-Systemen die Anpassung an zweidimensionale Verhältnisse nicht immer zufriedenstellend gelingt, läßt den Wunsch aufkommen, Größen in die Betrachtung aufzunehmen, die unabhängig von der Wahl der Koordinaten-Systeme sind. Gelingt die Anpassung an einer Station weniger als an benachbarten, wird also z.B.  $Z_1$  auf Kosten von  $Z_2$  größer, kann im Verlauf von  $Z_2$  ein Minimum vorgetäuscht werden, das nichts mit der Realität zu tun hat. Als gegen Drehungen invariante Größe bietet sich zunächst die Determinante des Impedanztensors an. Sehen wir uns einmal die Determinante für verschiedene Modelle an. Im eindimensionalen Fall ist die Determinante im wesentlichen nichts anderes als das durch die Periode dividierte  $\rho_s$  oder

$$\rho_s = 0,2 \cdot T \cdot \text{Det} .$$

Im Zweidimensionalen ist die Determinante (bis auf das Vorzeichen) gleich dem Produkt der beiden Amplitudenverhältnisse. Wenn man definiert

$$\rho_s = 0,2 \cdot T \cdot \text{Det} ,$$

bekommt man ein  $\rho_s$  durch Bildung des geometrischen Mittels aus einem  $\rho_{s1}$  und einem  $\rho_{s2}$ . Erweitert man nun diese Gedanken analog auf dreidimensionale Verhältnisse und definiert allgemein

$$\rho_s = 0,2 \cdot T \cdot \text{Det} ,$$

so wird doch offensichtlich eine nicht unsinnige Mittelung durchgeführt und zum anderen die Schwierigkeit der Wahl der Koordinaten-Systeme umgangen.

Man kann gegen die Verwendung der Determinante einwenden, daß dadurch in nicht vernünftiger Weise die verschiedenen Komponenten vermennt werden, wenn man bedenkt, daß etwa für Rechnungen mit zweidimensionalen Modellen die getrennte Betrachtung (TM- und TE-Mode) wesentlich ist. Wer jedoch das Elend der Praxis der Aus-

wertung kennt, wünscht sich zunächst einmal gemittelte (nicht im Widerspruch zur Realität stehende)  $\rho_s$ -Kurven, die sich nach CAGNIARD auswerten lassen. Tatsächlich werden gegenwärtig die meisten Auswertungen noch so durchgeführt, daß mit  $\rho_{s\parallel}$  und  $\rho_{s\perp}$  CAGNIARD sche Modelle berechnet werden, und die Wahrheit dazwischen gesucht wird.

In der Fig. 7 werden berechnete  $\rho_s$ -Kurven für drei Stationen gezeigt: Punktirt  $\rho_{s\parallel}$  (obere Kurve) und  $\rho_{s\perp}$  (untere), fest ausgezogen das mittelnde  $\rho_{Det}$  (Die Determinanten wurden in festen, rechtwinkligen Koordinaten-Systemen, die für E- und F-Feld identisch sind, berechnet). Es soll hier vor allem demonstriert werden, daß tatsächlich gemittelt wird. In der nächsten Fig. 8 sind für eine Reihe von Stationen diese gemittelten  $\rho_s$ -Kurven gezeichnet. Auch ohne Modelle scheint man eine interessante Tatsache bereits erwähnen zu dürfen: Bei westlichen und Graben-Stationen zeigt sich eine Einbuchtung der Kurven zwischen 15 und 30 km. Es könnte sich da eine gutleitende Schicht andeuten.

Eine Gesamtübersicht über alle gemittelten  $\rho_s$ -Werte gibt die Fig. 9. Sie sind in der Orts-Perioden-Ebene aufgetragen und es wurden Linien gleicher Werte gezeichnet. Die Einheit ist  $\Omega m$ .

Bei der bisherigen Besprechung der ermittelten Übertragungsfunktionen war nur von den Beträgen die Rede. Die Untersuchungen der Phasen sind noch nicht weit genug gediehen, um hier Ergebnisse vorstellen zu können. Man kann aber sagen, daß die Streuungen meist wesentlich größer sind als bei den Beträgen, daß also die Phasen viel anfälliger sind gegen eine Verletzung der Voraussetzungen, die eine zweidimensionale Modellstruktur auszeichnet. Auch bei den Phasen verbessern sich die Ergebnisse erheblich, wenn man an Stelle fester Koordinaten-Systeme solche nimmt, die nach der Methode der maximalen Kohärenz optimal angepaßt wurden.

Ein doch überraschendes Ergebnis wird in der letzten Abbildung (Fig. 11) vorgestellt. Die Phasen der Determinanten, deren Bedeutung von der Theorie her noch unklar ist, scheinen sinnvolle Größen zu sein. Ihre Werte liegen (mit kleinen Einschränkungen) zwischen Null und  $90^\circ$ , also in dem Bereich, in dem die Phasen der Amplitudenverhältnisse bei ein- und zweidimensionalen Modellen liegen

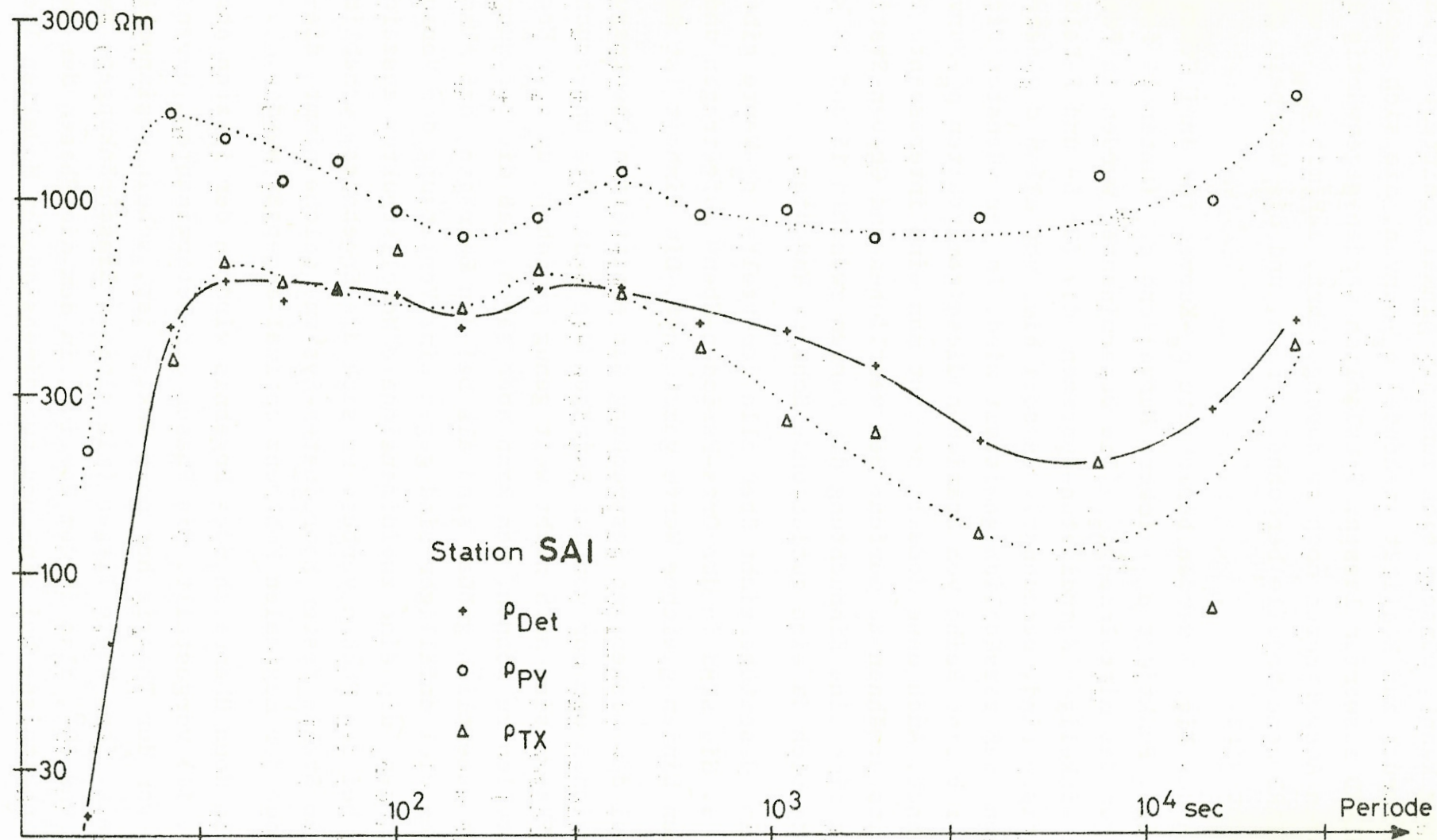


Fig. 7a



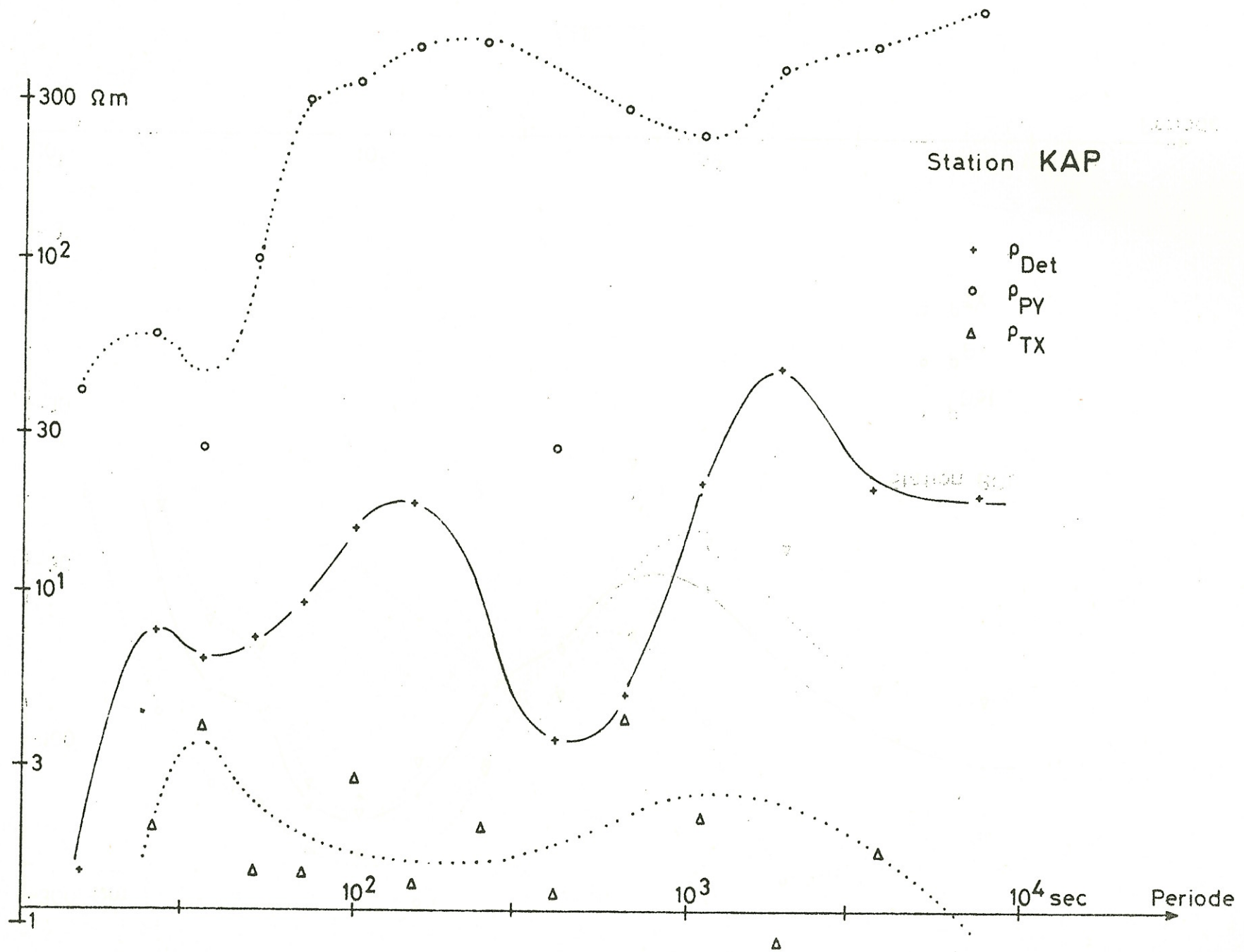


Fig. 7b

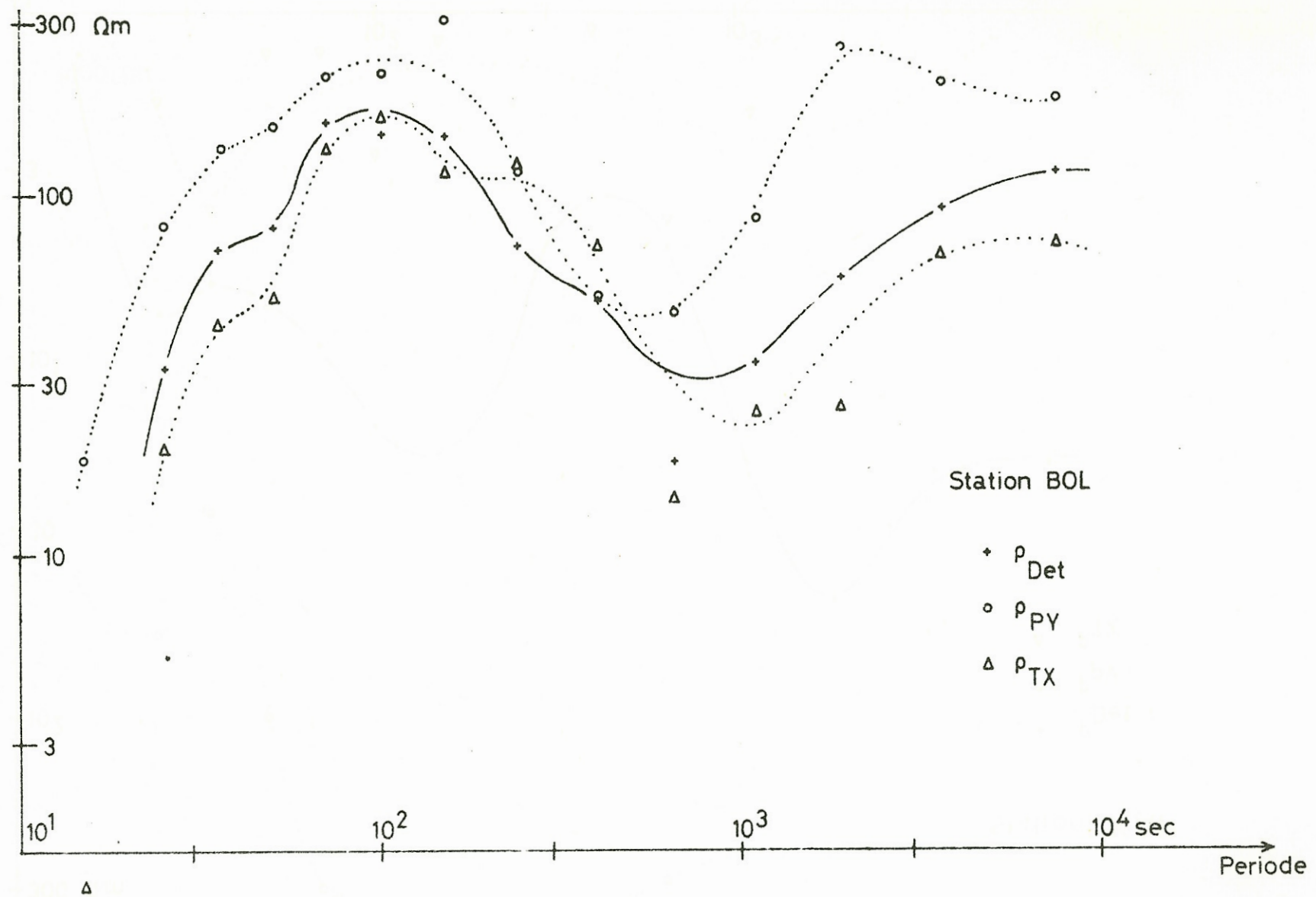


Fig. 7c

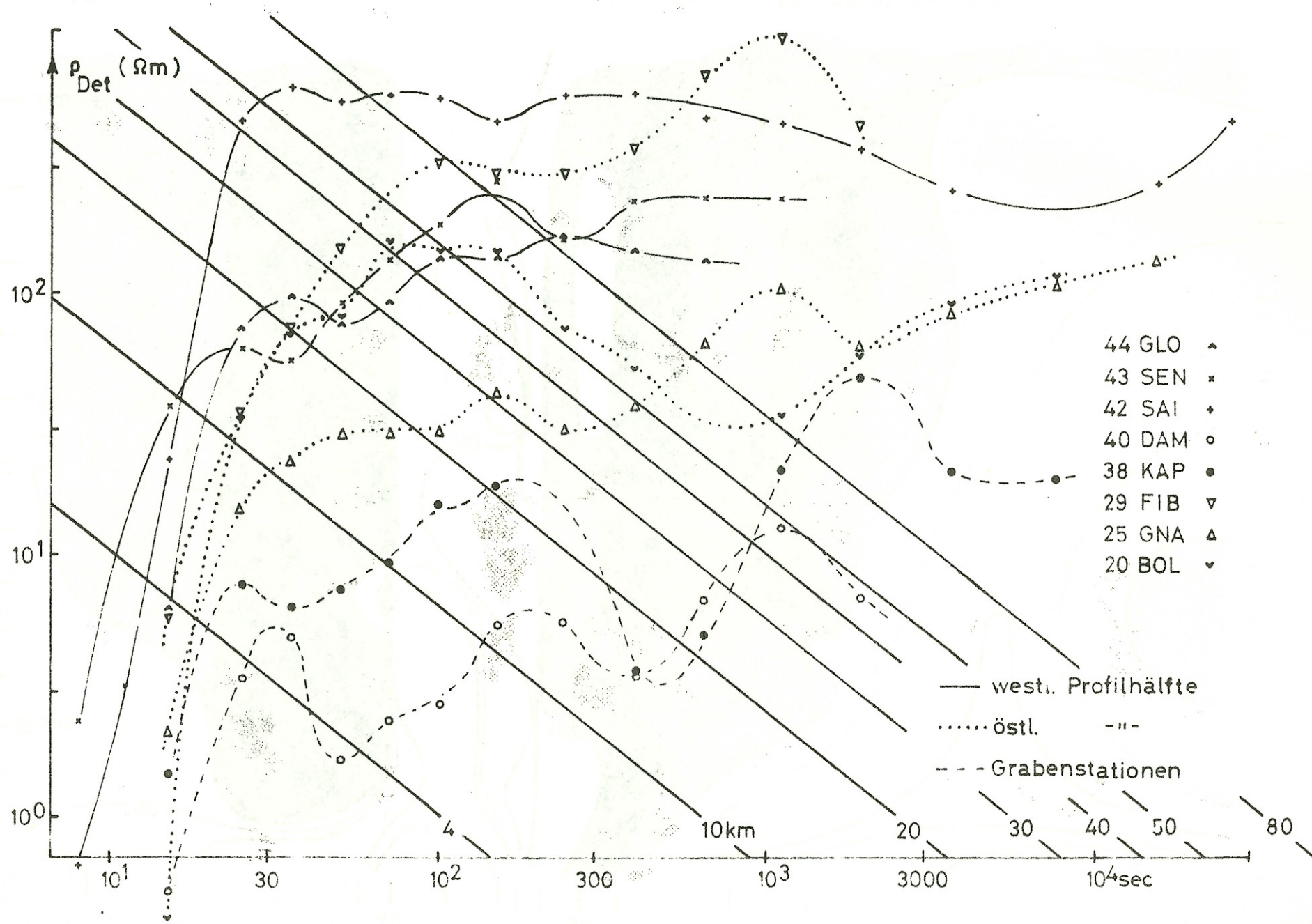


Fig. 8

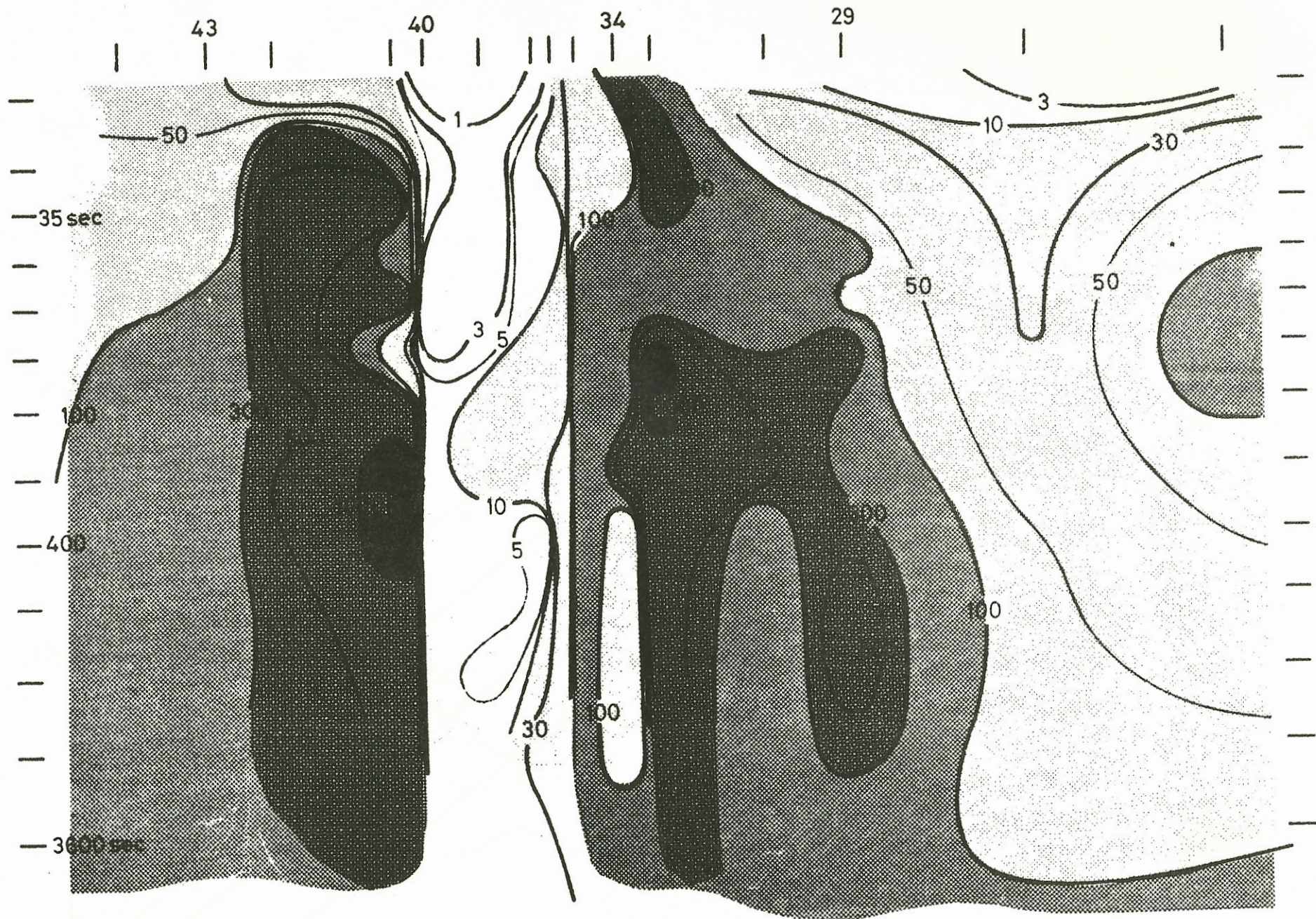


Fig. 9:  $\rho_s$  in Abhängigkeit von der Periode längs des Rheingraben-Profiles II.

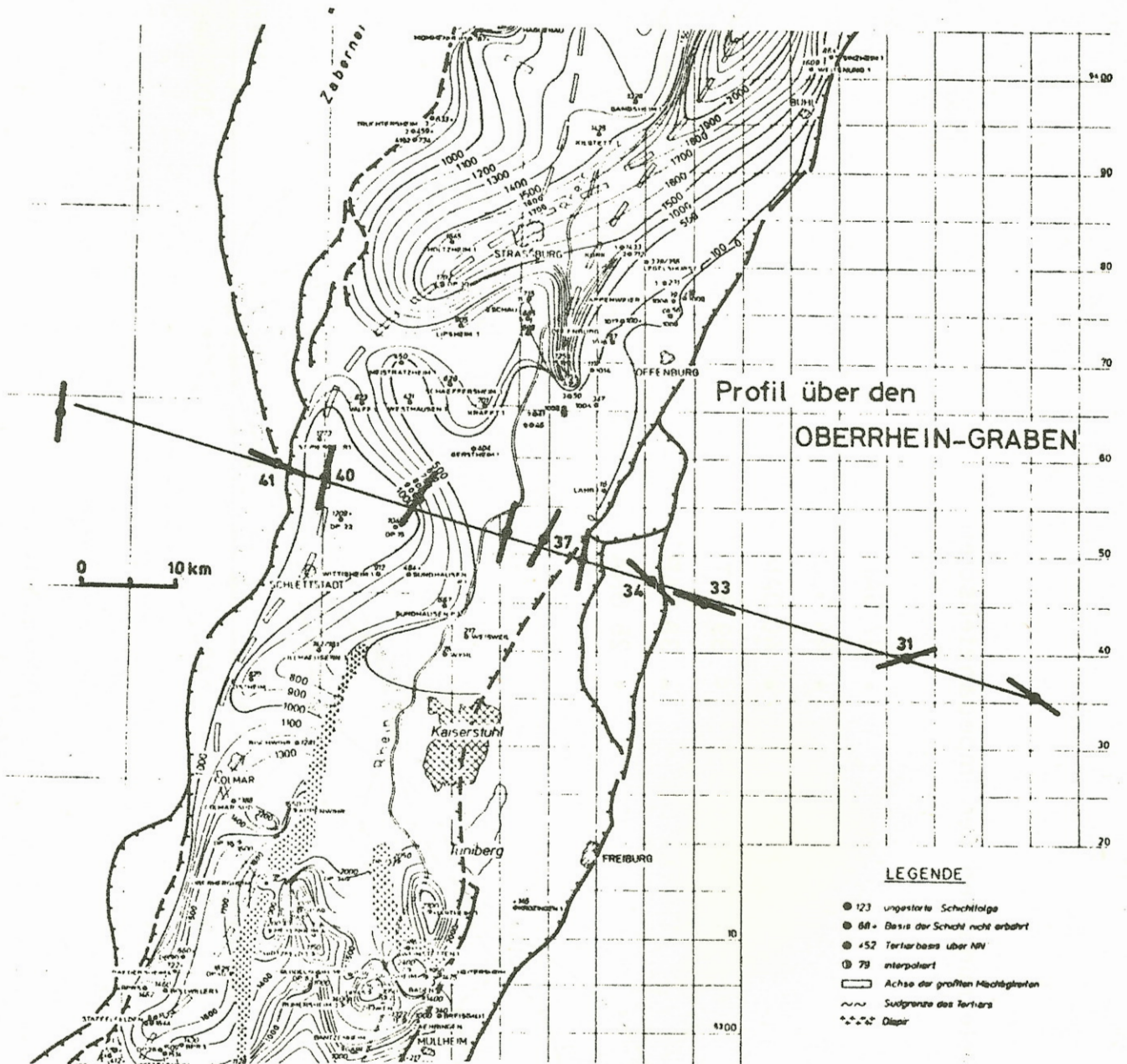


Fig. 10: Tiefenlinien-Plan der Tertiär-Basis (bez. auf NN) (F. DOEBL, 1970) sowie Vorzugsrichtungen für mittlere bis lange Perioden (>500 sec) an Stationen des mittleren Teils des Profils R II.

Phasen der Determinanten der Impedanztensoren

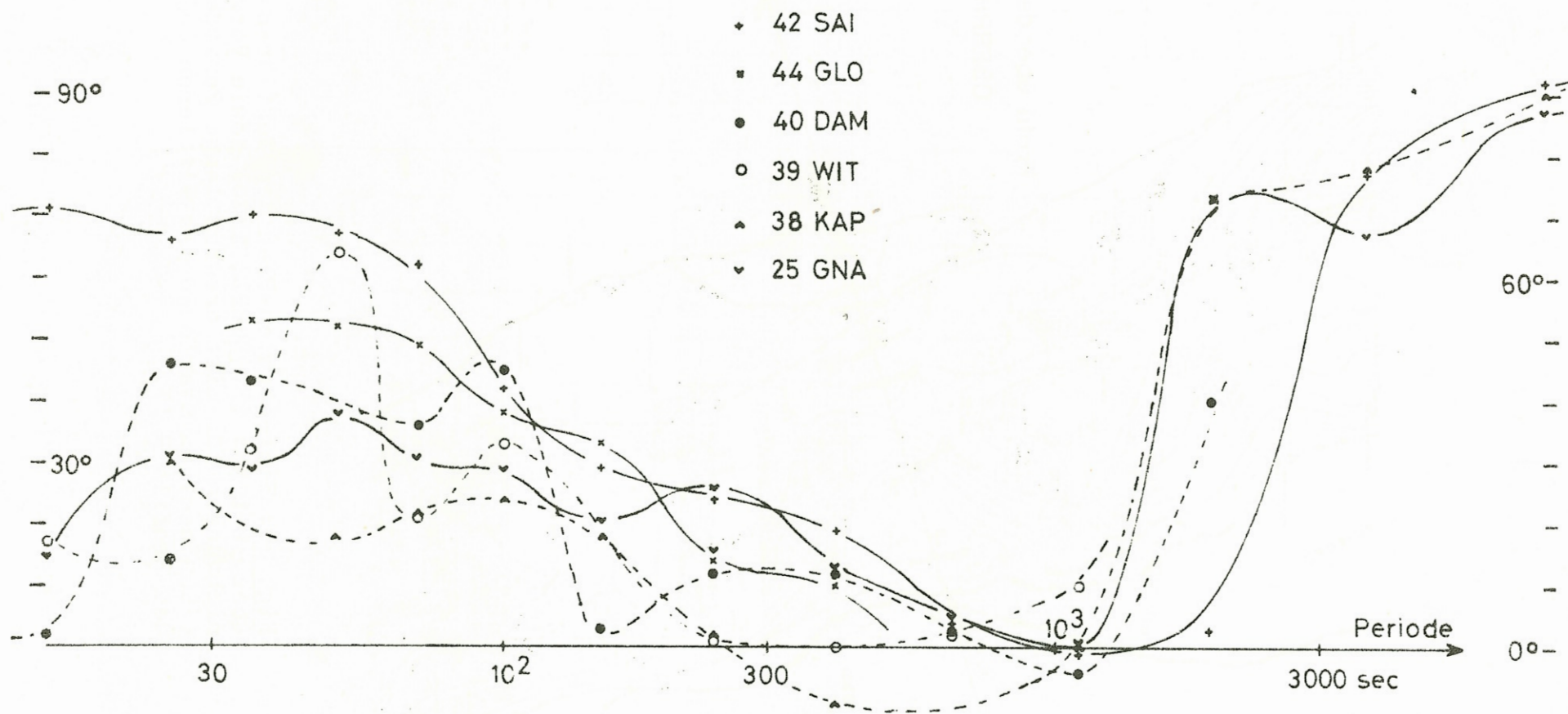


Fig. 11

müssen. Tatsächlich aber nehmen bei den bisherigen Auswertungen die Phasen der einzelnen Komponenten des Impedanztensors häufig alle denkbaren Werte zwischen Null und  $360^\circ$  an (oben als Streuung bezeichnet). Diese Erkenntnis möchte ich noch als Argument für die Berechtigung einer weiteren Beschäftigung mit der Determinante des Impedanztensors anführen.