

A. BERKTOLD, München

"Ergebnisse der Magnetotellurik-Messungen in Äthiopien"

Montag, den 11.03.1974

Im Jahre 1971 wurden vom Institut für Angewandte Geophysik während 4 Monaten Magnetotellurik-Messungen in Äthiopien durchgeführt. Über die Geländemessungen (Profile, Lage der Stationen, Meßgeräte etc.) sowie über erste Ergebnisse wurde bereits im Protokoll über das Kolloquium "Erdmagnetische Tiefensondierung" in Rothenberge/Westf. (14.-16. Sept. 1971) berichtet.

1. Probleme bei der Auswertung der Registrierungen

In Äthiopien sind wegen seiner Nähe zum magnetischen Äquator die Variationen des induzierenden Magnetfeldes stark polarisiert. Die NS-Komponente \tilde{H} der Magnetfeld-Variationen ist meist groß gegenüber der EW-Komponente \tilde{D} . Die Vektordiagramme, gebildet aus den beiden Horizontalkomponenten \tilde{H} und \tilde{D} , sind meist schmal und langgestreckt. Außerdem sind die Polarisationsrichtungen der Magnetfeld-Vektordiagramme nicht - wie in mittleren Breiten - über den gesamten Winkelbereich verteilt. Sie kommen vielmehr nur in einem schmalen Winkelbereich von etwa $\pm 15^\circ$ um (angenähert) magnetisch NS vor. Die mittlere Richtung, um die die Polarisationsrichtungen der einzelnen Vektordiagramme streuen, wird hier die Vorzugsrichtung des Magnetfeldes genannt. Da die zu bestimmenden Größen (Vorzugsrichtung des E-Feldes, scheinbarer spezifischer Widerstand, Phasendifferenz) nur von der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund und nicht von der Vorzugsrichtung des induzierenden Magnetfeldes abhängen sollen, muß beim Meßmaterial aus Äthiopien bei der Auswertung der Einfluß der Vorzugsrichtung des induzierenden Magnetfeldes auf die Meßgrößen eliminiert werden. Dazu sind die Verfahren, die bei der Auswertung von Messungen in mittleren Breiten meist benutzt werden nicht geeignet, da diese Verfahren eine Gleichverteilung der Polarisationsrichtungen des induzie-

renden Magnetfeldes voraussetzen. Bei diesen Verfahren werden zur Bestimmung der Periodenabhängigkeit der Meßgrößen meist längere Intervalle mit einer Anzahl von Variationen unterschiedlicher Periode analysiert. Die Registrierintervalle werden so ausgewählt, daß bei der Auswertung in etwa eine Gleichverteilung der Polarisationsrichtungen der Magnetfeld-Vektordiagramme existiert. Beim Meßmaterial aus Äthiopien ist es dagegen notwendig, die Variationen einzeln zu analysieren. Dadurch kann man die Abhängigkeit der Meßgrößen von der Polarisationsrichtung der Magnetfeld-Vektordiagramme bestimmen und bei der Auswertung eliminieren. Auf diese Weise erhält man für fast alle Stationen in Äthiopien Meßgrößen (wegen der Einschränkung "fast alle" siehe den nächsten Abschnitt), die nur von der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund abhängen, obwohl die Polarisationsrichtungen der Magnetfeld-Vektordiagramme in Äthiopien nur in einem schmalen Winkelbereich vorkommen.

Da in Äthiopien das induzierende Magnetfeld wegen des äquatorialen Electrojets tagsüber räumlich inhomogen ist (siehe dazu den Artikel von V. HAAK in diesem Band), wurden hier nur Variationen ausgewertet, die während der Nachtzeit registriert worden sind.

2. Die Bestimmung der Vorzugsrichtung des induzierten elektrischen Feldes durch Auswertung einzelner Variationen

Aus den beiden horizontalen Komponenten einer zeitlichen Variation des elektrischen oder magnetischen Feldes sei ein Vektordiagramm gezeichnet worden (siehe Figur 1). Die Richtung der großen Halbachse des - meist quasi-elliptischen - Vektordiagrammes nennen wir die Polarisationsrichtung des Vektordiagrammes. (Im Rechenprogramm wird die Polarisationsrichtung eines Vektordiagrammes ermittelt, indem dasjenige Paar zueinander senkrechter Komponenten des horizontalen Feldes gesucht wird, zwischen dem die Korrelation ein Minimum ist. Die Richtung der Komponente mit der größeren Amplitude ist dann gleich der Polarisationsrichtung.)
Die Polarisationsrichtung des einzelnen E-Feld Vektordiagrammes

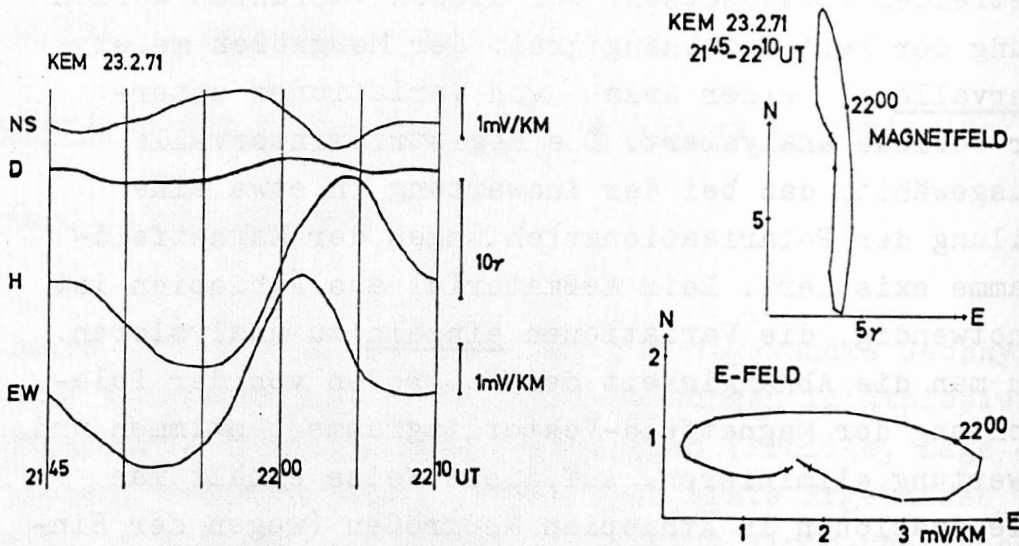


Fig. 1: Vektordiagramm einer Variation des horizontalen magnetischen Feldes und einer zeitgleichen Variation des horizontalen elektrischen Feldes an der Station Kembolcha

kann je nach der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund auf verschiedene Weise von der Polarisationsrichtung des damit korrelierten Magnetfeld-Vektordiagrammes abhängen. Man kann die folgenden Fälle unterscheiden:

- a) Die Polarisationsrichtungen der Magnetfeld-Vektordiagramme kommen im ganzen Winkelbereich vor (wie z.B. in mittleren Breiten).
- α) Die Leitfähigkeit ist im Untergrund homogen verteilt oder der Untergrund ist eben geschichtet.

In diesem Fall ist die Polarisationsrichtung des einzelnen E-Feld Vektordiagrammes immer senkrecht zur Polarisationsrichtung des damit korrelierten Magnetfeld-Vektordiagrammes und zwar unabhängig von der Polarisationsrichtung des Magnetfeld-Vektordiagrammes.

- β) Die Leitfähigkeit ist im Untergrund inhomogen verteilt. In einem gewissen Bereich um den Meßort haben die leitfähigen Strukturen eine Streichrichtung.

In diesem Fall streuen die Polarisationsrichtungen der einzelnen E-Feld Vektordiagramme - je nach Leitfähigkeitsverteilung unterschiedlich stark - um eine mittlere Richtung, die Vorzugs-

richtung des elektrischen Feldes. Benutzt man zur Bestimmung der Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes Vektordiagramme, die mit Magnetfeld-Vektordiagrammen möglichst unterschiedlicher Polarisationsrichtungen korreliert sind, so wird der Einfluß des induzierenden Magnetfeldes auf die Vorzugsrichtung von \vec{E} eliminiert und man erhält eine Vorzugsrichtung des E-Feldes, die nur noch Informationen über die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund enthält. Insbesondere lassen sich aus der Verteilung der Vorzugsrichtungen des E-Feldes in einem Meßgebiet Aussagen über die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit in lateraler Richtung (Streichrichtung von Strukturen etc.) in den obersten km machen.

- b) Die Polarisationsrichtungen der Magnetfeld-Vektordiagramme kommen nur in einem schmalen Winkelbereich vor (wie z.B. in Äthiopien, in der Nähe des magnetischen Äquators).

Wie unter 1. erwähnt, kann man in diesem Fall auch für die Variationen des Magnetfeldes eine Vorzugsrichtung definieren als die mittlere Richtung, um die die Polarisationsrichtungen der einzelnen Magnetfeld-Vektordiagramme in dem schmalen Winkelbereich streuen. Für die unter α) im vorigen Abschnitt angegebene Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit wird wiederum für jedes mögliche Paar von Vektordiagrammen die Polarisationsrichtung des elektrischen Feldes senkrecht sein zur Polarisationsrichtung des magnetischen Feldes. Wegen der Vorzugsrichtung des magnetischen Feldes hat in diesem Fall das elektrische Feld auch eine Vorzugsrichtung. (Eine solche Vorzugsrichtung des E-Feldes, die nicht durch die inhomogene Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund sondern durch die Vorzugsrichtung des Magnetfeldes verursacht wird, findet man in Äthiopien an den Stationen im westlichen und südlichen Escarpment sowie auf den beiden Plateaus. Siehe dazu den Abschnitt 3.)

Im Falle β) der inhomogenen Leitfähigkeitsverteilung gibt es 2 Effekte, an Hand derer man erkennen kann, wie stark die Vorzugsrichtung des E-Feldes an einem Ort durch die Streichrichtung der leitfähigen Strukturen im Untergrund bedingt ist.

Zum einen kann man die Abweichung der Polarisationsrichtung des einzelnen Vektordiagrammes vom Mittel (also von der Vorzugsrichtung) untersuchen. Weicht die Polarisationsrichtung des einzelnen E-Feld Vektordiagrammes um einen geringeren Winkel vom Mittel ab als die Polarisationsrichtung des damit korrelierten Magnetfeld-Vektordiagrammes, so kann man auf leitfähige Strukturen mit einer Streichrichtung in einem gewissen Bereich um den Meßort schließen. Die Winkeldifferenz, um die die Polarisationsrichtung des einzelnen E-Feld Vektordiagrammes weniger vom Mittel abweicht als die Polarisationsrichtung des damit korrelierten Magnetfeld-Vektordiagrammes ist ein Maß für die Inhomogenität bzw. Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit um den Meßort. (In Äthiopien ist z.B. in der Afarsenke die Abweichung der Polarisationsrichtung des einzelnen E-Feld Vektordiagrammes vom Mittel viel geringer als die Abweichung der Polarisationsrichtung des damit korrelierten Magnetfeld-Vektordiagrammes. Daraus schließen wir, daß es in der Afarsenke leitfähige Strukturen mit einer ausgeprägten Streichrichtung geben muß. Siehe dazu Abschnitt 3.) -Ist die Vorzugsrichtung des E-Feldes nicht senkrecht zur Vorzugsrichtung des Magnetfeldes, so ist dies ein weiterer Hinweis auf leitfähige Strukturen im Untergrund mit einer Streichrichtung. Dabei ist zu beachten, daß aus der einzelnen Vorzugsrichtung von \vec{E} meist keine Information über die Streichrichtung der Strukturen am Meßort erhalten werden kann, da die Vorzugsrichtung von \vec{E} an einem Meßort (je nach untersuchtem Periodenbereich) von der Leitfähigkeitsverteilung in einer weiten Umgebung um den Meßort - z.B. mehr als 100 km - abhängen kann. Bestimmt man dagegen die Vorzugsrichtung von \vec{E} an vielen nahe benachbarten Meßorten, so ist aus der Variation der Vorzugsrichtung mit dem Ort durchaus eine Aussage über die lokale Streichrichtung der Strukturen möglich.

Zur Bestimmung der Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes kann man die Abhängigkeit zwischen den Winkeln bestimmen, die die Polarisationsrichtungen der Vektordiagramme des elektrischen und magnetischen Feldes mit einer der Koordinatenachsen einschließen. Dies hat z.B. V.HAAK für einen speziellen Fall in diesem Band beschrieben (Magnetfeld linear polarisiert,

Meß-Koordinatensystem parallel zur Streichrichtung einer zweidimensionalen Struktur). Statt der Winkel kann auch die Abhängigkeit zwischen dem Tangens der Winkel angegeben werden. Die Abhängigkeit zwischen dem Tangens der Winkel scheint gegenüber der Abhängigkeit zwischen den Winkeln selbst durch etwas einfachere Funktionen bevorzugt zu sein. Deshalb wurde hier in den Diagrammen zur Bestimmung der Vorzugsrichtung von \vec{E} der Tangens der Winkel aufgetragen, den die Polarisationsrichtungen der Vektordiagramme des elektrischen bzw. des magnetischen Feldes mit einer der Koordinatenachsen einschließen (siehe z.B. die Diagramme in Fig. 3).

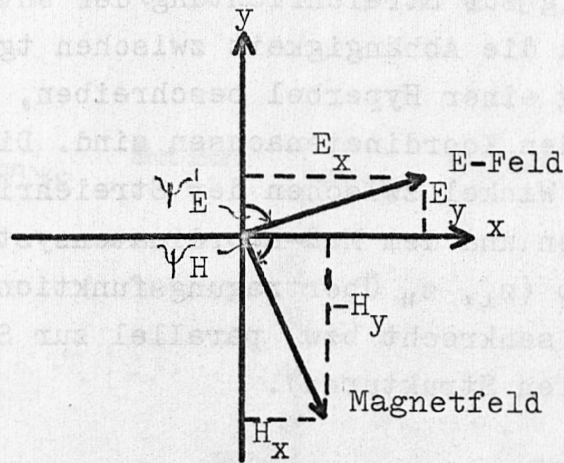


Fig. 2: Orientierung der Winkel, die die Polarisationsrichtungen der Vektordiagramme des elektrischen bzw. des magnetischen Feldes mit den Koordinatenachsen einschließen. Der Strich bei ψ'_E soll bedeuten, daß ψ'_E und ψ_H von verschiedenen Koordinaten aus aufgetragen sind.

Für den Fall, daß die Variationen des elektrischen und magnetischen Feldes linear polarisiert sind, läßt sich die Abhängigkeit zwischen $\text{tg } \psi'_E$ und $\text{tg } \psi_H$ einfach angeben:

Bei einem homogenen oder eben geschichteten Untergrund sind die Polarisationsrichtungen miteinander korrelierter Vektordiagramme des elektrischen und magnetischen Feldes zueinander senkrecht. Daraus folgt:

$$\text{tg } \psi'_E = \text{tg } \psi_H$$

(Von den Meßergebnissen in Äthiopien ist ein Beispiel dazu in den beiden Diagrammen im oberen Teil der Fig. 3 dargestellt.)

Ist der spezifische Widerstand senkrecht zur Streichrichtung der Strukturen im Untergrund viel größer als parallel dazu ($\rho_{\perp} \gg \rho_{\parallel}$), dann ist die Polarisationsrichtung der E-Feld Vektordiagramme konstant und unabhängig von der Polarisationsrichtung der Magnetfeld-Vektordiagramme:

$$\operatorname{tg} \psi_E^i = \text{const.}$$

(Von den Meßergebnissen in Äthiopien ist ein Beispiel dazu in den beiden Diagrammen im unteren Teil der Fig. 3 dargestellt.)

Ist das Verhältnis $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ endlich und ist das Meß-Koordinatensystem schiefwinklig zur Streichrichtung der Untergrundstrukturen, so läßt sich die Abhängigkeit zwischen $\operatorname{tg} \psi_E^i$ und $\operatorname{tg} \psi_H$ durch die Gleichung einer Hyperbel beschreiben, deren Asymptoten parallel zu den Koordinatenachsen sind. Die Form der Hyperbel hängt vom Winkel zwischen der Streichrichtung der Untergrundstrukturen und dem Meß-Koordinatensystem sowie vom Verhältnis z_{\perp}/z_{\parallel} ab (z_{\perp} , z_{\parallel} Übertragungsfunktionen für die E-Feld Komponenten senkrecht bzw. parallel zur Streichrichtung der zweidimensionalen Strukturen).

3. Die Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes im Bereich der Afarsenke.

In der Fig. 3 wird für einige Meßorte im Bereich der Afarsenke die Abhängigkeit zwischen der Polarisationsrichtung von E-Feld Vektordiagrammen und der Polarisationsrichtung der dazugehörigen Magnetfeld-Vektordiagramme gezeigt. Auf der Abszisse ist jeweils der Tangens des Winkels eingezeichnet, den die Polarisationsrichtungen von Magnetfeld-Vektordiagrammen mit der EW-Richtung bilden (von E über S). Entsprechend ist auf den Ordinaten der Tangens des Winkels zwischen NS und den Polarisationsrichtungen der E-Feld Vektordiagramme aufgetragen (von N über E, siehe Fig. 2). An den Stationen Mitikolo (MIT) und Degan (DEG) im höheren Bereich des westlichen Escarpments liegen die Punkte etwa längs der 45° -Geraden. Das bedeutet; daß dort die Polarisationsrichtungen der Vektordiagramme des elektrischen und magnetischen Feldes etwa senkrecht aufeinander stehen und daß sich somit die elektrische Leitfähigkeit in

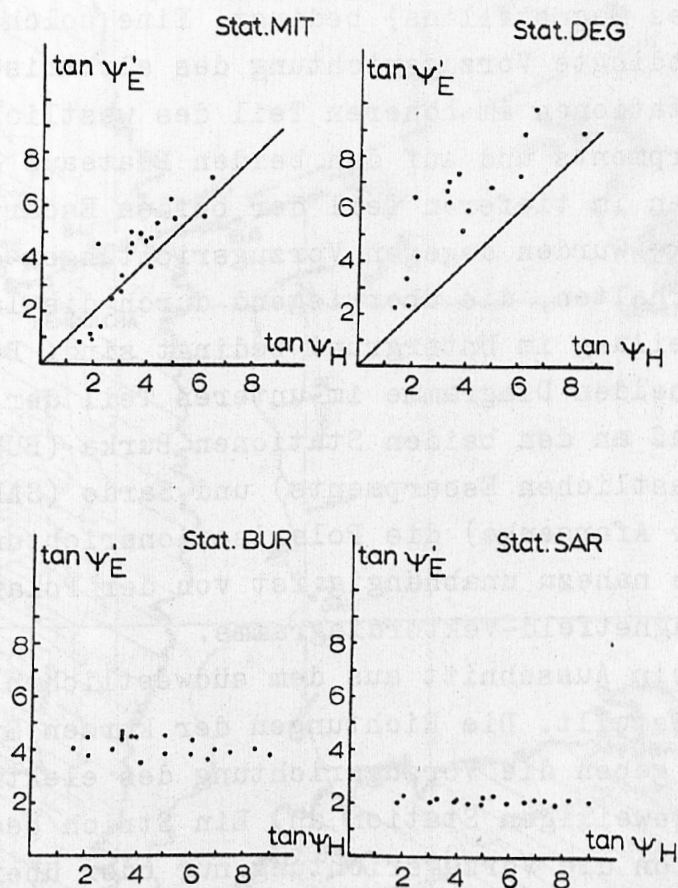


Fig. 3: ψ'_E, ψ_H : Winkel, die die Polarisationsrichtungen einzelner Vektordiagramme des elektrischen Feldes (ψ'_E) und des magnetischen Feldes (ψ_H) mit einer der beiden Koordinatenachsen einschließen (siehe dazu Fig. 2). Liegen die Meßwerte etwa längs der 45° -Geraden, wie in den beiden Diagrammen im oberen Teil der Fig. 3, so bedeutet dies, daß die Polarisationsrichtung jedes E-Feld Vektordiagrammes senkrecht ist zur Polarisationsrichtung des damit korrelierten Magnetfeld-Vektordiagrammes: In einem gewissen Bereich um den Meßort ist die elektrische Leitfähigkeit in lateraler Richtung homogen verteilt. Diagramme im unteren Teil der Figur: Die Polarisationsrichtung der E-Feld Vektordiagramme ist unabhängig von der Polarisationsrichtung der Magnetfeld-Vektordiagramme: Im Untergrund existieren Strukturen mit einer ausgeprägten Streichrichtung.

einem gewissen Bereich um die Meßorte in lateraler Richtung wenig ändert. Die Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes an diesen Orten ist also überwiegend durch die Anregung (Vorzugsrichtung des Magnetfeldes) bedingt. Eine solche, durch die Anregung bedingte Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes wurde an den Stationen im höheren Teil des westlichen und des südlichen Escarpments und auf den beiden Plateaus erhalten. An den Stationen im tieferen Teil der beiden Escarpments und in der Afarsenke wurden dagegen Vorzugsrichtungen des elektrischen Feldes erhalten, die überwiegend durch die laterale Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund bedingt sind. Beispiele dazu zeigen die beiden Diagramme im unteren Teil der Fig. 3. Man erkennt, daß an den beiden Stationen Burka (BUR, im tieferen Teil des westlichen Escarpments) und Sardo (SAR, im östlichen Teil der Afarsenke) die Polarisationsrichtung der E-Feld Vektordiagramme nahezu unabhängig ist von der Polarisationsrichtung der Magnetfeld-Vektordiagramme.

In Fig. 4 ist ein Ausschnitt aus dem südwestlichen Teil der Afarsenke dargestellt. Die Richtungen der kurzen Striche und Doppeldreiecke geben die Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes an der jeweiligen Station an. Ein Strich bedeutet, daß an dieser Station die Vorzugsrichtung nur oder überwiegend durch die Streichrichtung der Strukturen im Untergrund bedingt ist. Ein Doppeldreieck bedeutet, daß an dieser Station die Vorzugsrichtung von \tilde{E} nur oder überwiegend durch die Vorzugsrichtung des Magnetfeldes bedingt ist, daß also dort Untergrundstrukturen mit einer ausgeprägten Streichrichtung fehlen. Der Öffnungswinkel der Doppeldreiecke ist kein quant. Maß für die Streuung der Polarisationsrichtungen von \tilde{E} an den einzelnen Stationen. Mit den Doppeldreiecken soll nur angedeutet werden, daß an diesen Stationen die Streuung der Polarisationsrichtungen der einzelnen E-Feld Vektordiagramme um die Vorzugsrichtung größer ist als an den Stationen mit den Strich-Symbolen. Die Striche und Doppeldreiecke haben an vielen Stationen etwa die gleiche Richtung. Dies ist ein Zufall, da die Vorzugsrichtung des Magnetfeldes etwa senkrecht ist - und damit die durch die Anregung bedingte Vorzugsrichtung von \tilde{E} (Doppeldreiecke) etwa parallel ist - zur durch den Unter-

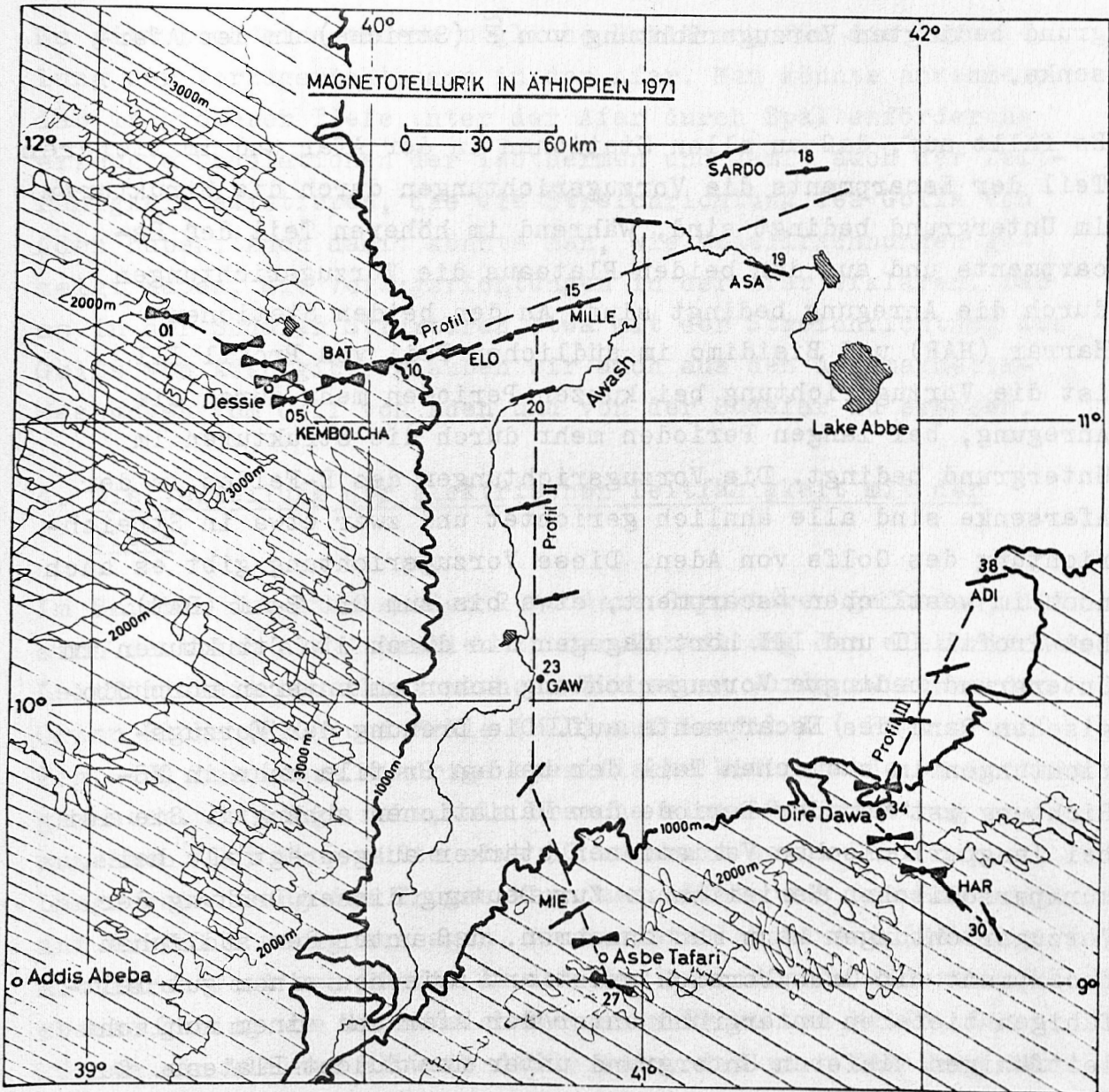


Fig. 4: Verteilung der Vorzugsrichtungen des elektrischen Feldes im Bereich der Afarsenke. Ein Strich bedeutet, daß an dieser Station die Vorzugsrichtung des E-Feldes überwiegend durch die inhomogene Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund bedingt ist (keine Abhängigkeit von der Vorzugsrichtung des Magnetfeldes). Ein Doppeldreieck bedeutet, daß an dieser Station die Vorzugsrichtung von \vec{E} überwiegend durch die Vorzugsrichtung des Magnetfeldes bedingt ist (Leitfähigkeit in lateraler Richtung etwa homogen verteilt). Die Streuung der Einzeleffekte ist an den Stationen mit Doppeldreiecken größer als an Stationen mit Strichen.

grund bedingten Vorzugsrichtung von \tilde{E} (Striche) in der Afarsenke.

Es fällt auf, daß an allen Stationen in der Afar und im tieferen Teil der Escarpments die Vorzugsrichtungen durch die Strukturen im Untergrund bedingt sind, während im höheren Teil der Escarpments und auf den beiden Plateaus die Vorzugsrichtungen durch die Anregung bedingt sind. An den beiden Stationen Harrar (HAR) und Bisidimo im südlichen Teil von Profil III ist die Vorzugsrichtung bei kurzen Perioden mehr durch die Anregung, bei langen Perioden mehr durch die Strukturen im Untergrund bedingt. Die Vorzugsrichtungen des E-Feldes in der Afarsenke sind alle ähnlich gerichtet und zwar etwa in Streichrichtung des Golfs von Aden. Diese Vorzugsrichtung gibt es auch noch im westlichen Escarpment, etwa bis zum Ort Bati (BAT). Bei Profil II und III hört dagegen die durch die Strukturen im Untergrund bedingte Vorzugsrichtung schon am unteren morphologischen Rand des Escarpments auf. Die Drehung der Vorzugsrichtungen im südlichen Teil der beiden Profile mehr in NS-Richtung ist von der Periode der Variationen abhängig. Sie ist bei langperiodischen Variationen stärker ausgeprägt als bei kurzperiodischen Variationen. Zur Deutung dieser Drehung der Vorzugsrichtungen kann man annehmen, daß unter dem südlichen Escarpment ein Grenzbereich existiert zwischen einem gut leitfähigen tieferen Untergrund unter der Afar und einem schlecht leitfähigen tieferen Untergrund unter dem Südost-Plateau. Zur Erklärung der Verteilung der Vorzugsrichtungen in der Afarsenke und deren geringer Streuung muß man annehmen, daß in der Afar langgestreckte Strukturen in größerer Zahl vorkommen, die im Mittel die Streichrichtung des Golfs von Aden haben. Z.B. könnte man als einfaches Modell eine Serie von langgestreckten Körpern aus schlecht leitfähigen Gesteinen (z.B. Spaltenergüsse) annehmen, zwischen die und über denen gut leitfähige Sedimente abgelagert worden sind. Dabei ist es für die Interpretation der Vorzugsrichtungen in der Afarsenke nicht so wichtig, ob diese Spaltenergüsse durch Querstörungen unterbrochen und versetzt sind. Solange die Spaltenergüsse im Mittel langgestreckt sind, werden die Vorzugsrichtungen des E-Feldes so stark ausgeprägt sein, wie es in der Afarsenke gefunden wurde.

Es gibt noch eine andere mögliche Erklärung für die Verteilung der Vorzugsrichtungen in der Afar. Man könnte annehmen, daß in größerer Tiefe unter der Afar durch Spaltenförderung erzeugte Undulationen der Isothermen und damit auch der Leitfähigkeit existieren, die die Streichrichtung des Golfs von Aden haben. Auch damit könnte man, wie Modellrechnungen gezeigt haben, die Vorzugsrichtungen in der Afar erklären. Daß es in der Südafar Strukturen etwa mit der Streichrichtung des Golfs von Aden gibt, glauben wir auch aus den Aeromagnetik-Messungen vom Golf von Aden und von der Südafar zu ersehen.

4. Die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe.

Im Bereich der Afar wurden 2 größere Strukturen gefunden, die sich deutlich als Anomalien in der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bemerkbar machen. Zum einen wurde zwischen den Orten Eloha (ELO) und Mille (MIL) auf Profil I (Fig. 4 und Fig. 10) besonders niedrige spezifische Widerstände um 5 Ohm·m gemessen. Es liegt nahe, als Ursache einen Sedimenttrog anzunehmen. Der Trog müßte etwa 50 km breit sein. Über die Längserstreckung des Troges kann man allein aus den Messungen auf Profil I wenig aussagen. An der Station Gawani (GAW) im mittleren Teil von Profil II ist der spezifische Widerstand ebenso gering wie im Bereich zwischen Eloha und Mille. Das könnte ein kleiner Hinweis dafür sein, daß sich der Trog nach Süden fortsetzt.

Zwischen den Orten Eloha und Bati von Profil I ist auf eine Entfernung von ca. 30 km der scheinbare spezifische Widerstand deutlich größer als in der Umgebung (siehe Fig. 10). Er hat sein Maximum an der Station Burka (BUR) mit mehr als 1000 Ohm·m. (Ein solch hoher spezifischer Widerstand wurde nur an der einen Station gemessen.) Es gibt 2 Möglichkeiten, diesen Effekt zu interpretieren: Zum einen kann man annehmen, daß dort schlecht leitfähiges Material bis nahe an die Erdoberfläche in die Tuffreichen und daher wahrscheinlich besser leitfähigen Trappbasalte eingedrungen ist. Im Bereich dieser Intrusion würde man dann die hohen spezifischen Widerstände messen. Zum anderen

könnten die hohen spezifischen Widerstände aber auch durch einen "Überschwing-Effekt" (anomal große Amplitude der Variationen des elektrischen Feldes) an einem Übergangsbereich zwischen der Leitfähigkeits-Tiefen-Verteilung unter der Afar und derjenigen unter dem westlichen Plateau hervorgerufen werden, wobei der Übergangsbereich etwa unter dem Ort Burka (BUR) liegen würde. Für diese Möglichkeit sprechen auch Ergebnisse der erdmagnetischen Tiefensondierung (H. PORATH, D.J. BENNETT, A. DZIEWONSKI, P. GOUIN, 1974), wonach bei Bati eine starke Anomalie der erdmagnetischen Variationen bei Perioden um 1 Stunde gefunden worden ist. Darüber hinaus wurden keine größeren Anomalien der elektrischen Leitfähigkeit gefunden.

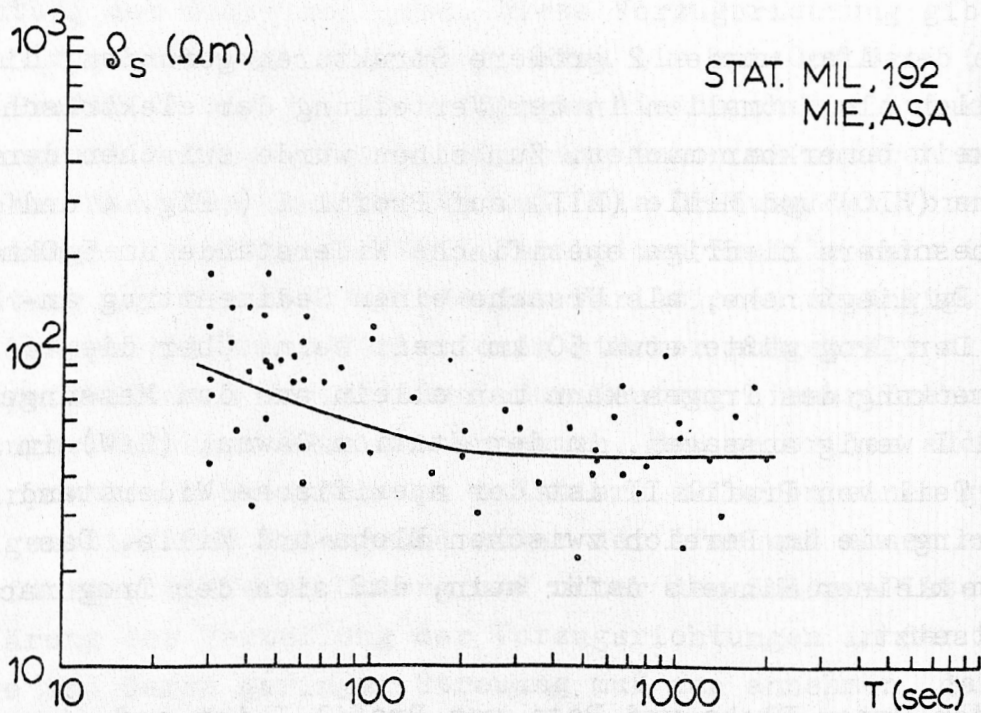


Fig. 5: Abhängigkeit des scheinbaren spezifischen Widerstandes von der Periode der Variationen für 4 Stationen in der Afarsenke. Für die einzelne Station ist die Streuung der Punktwolke geringer als die Streuung in Fig. 5. ϱ_s wurde aus den Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes in Polarisationsrichtung der fast linear polarisierten Vektordiagramme bestimmt.

In Fig. 5 ist der scheinbare spezifische Widerstand in Abhängigkeit von der Periode der Variationen für 4 Stationen in der Afarsenke aufgetragen. ϱ_s wurde aus den Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes in Polarisationsrichtung der fast linear polarisierten Vektordiagramme bestimmt. Die Ergebnisse von den einzelnen Meßorten wurden nicht durch unterschiedliche Symbole unterschieden, um die Homogenität der Ergebnisse zu demonstrieren. Die Streuung der Punktwolke ist allerdings für den einzelnen Meßort deutlich geringer als in Fig. 5. Die Meßorte liegen in verschiedenen Teilen der südlichen Afarsenke (MIL: Mille, im mittleren Teil von Profil I, 192: im mittleren Teil von Profil II, MIE: Mieso, im südlichen Teil von Profil II, ASA: Asaita, im östlichen Teil von Profil I). Fig. 5 enthält einige Ergebnisse, die für die ϱ_s -Kurven an den Stationen in der Afar typisch sind: Zum einen werden für die meisten Stationen in der Afar relativ geringe scheinbare spezifische Widerstände, nämlich zwischen 20 und 200 Ohm·m, erhalten. Zum zweiten nimmt an allen Stationen der scheinbare spezifische Widerstand mit zunehmender Periode der Variationen ab. Und zum dritten nimmt er jedoch an den meisten Stationen mit zunehmender Periode nur gering ab. Es ist interessant, daß HERMANCENCE bei seinen Magnetotellurik-Messungen auf Island die gleichen Ergebnisse erhalten hat. Die genannten Aussagen gelten auch für die Stationen im westlichen Escarpment und auf dem westlichen Plateau, mit Ausnahme der Stationen zwischen Eloha und Bati, wo die lokale Anomalie mit den hohen spezifischen Widerständen liegt. Die Aussagen gelten dagegen nicht für die Stationen auf dem Südost-Plateau (Dort nimmt der scheinbare spezifische Widerstand mit der Periode der Variationen zu.).

Die für kurzperiodische Variationen in der Afarsenke erhaltenen geringen spezifischen Widerstände können eventuell durch die Annahme gut leitfähiger Sedimente an der Oberfläche der Südafar erklärt werden. Eine andere mögliche Erklärung für die geringen spezifischen Widerstände bei kurzperiodischen Variationen gibt HERMANCENCE für seine Magnetotellurik-Messungen auf Island: Er nimmt an, daß bis in größere Tiefen (auf Island etwa bis in 8 km Tiefe) das Gestein infolge der tektoni-

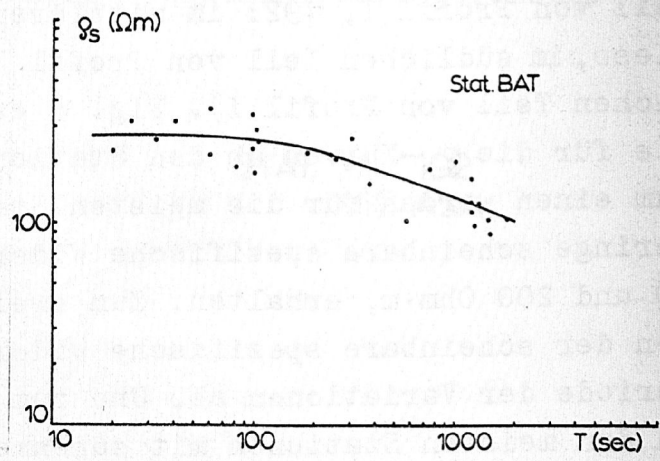
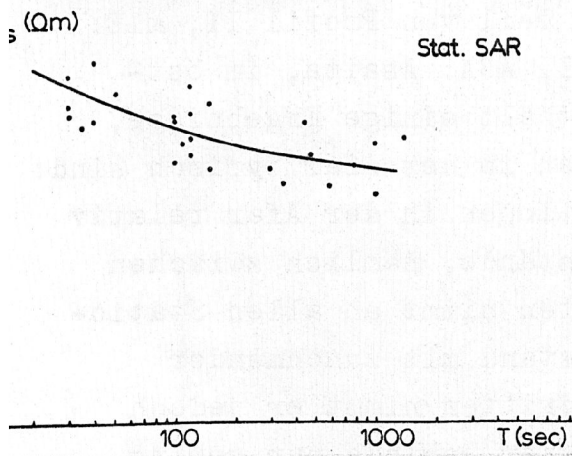
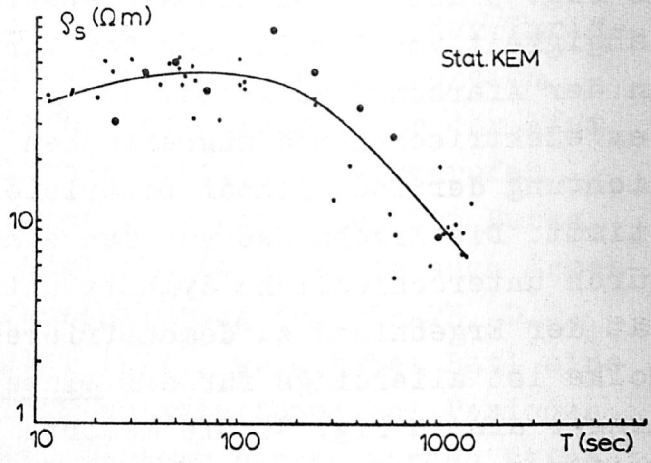
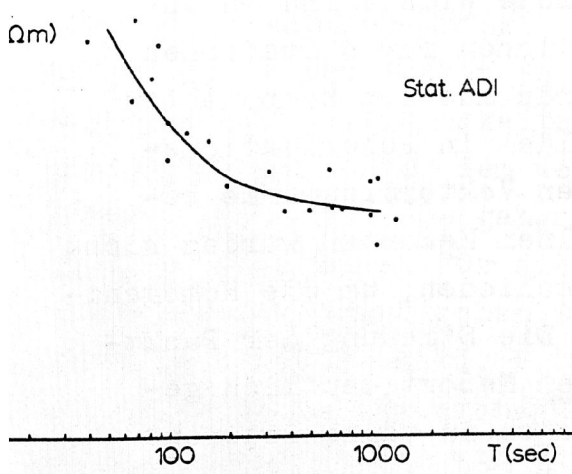


Fig. 6

Fig. 7

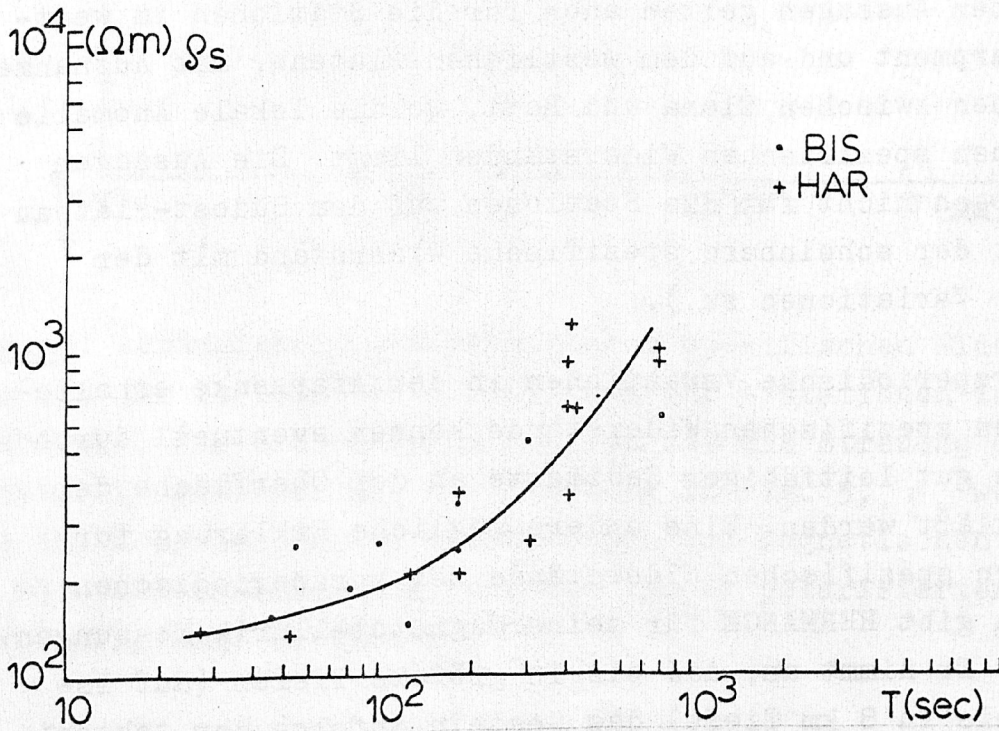


Fig. 8

schen Beanspruchung so zerklüftet ist, daß Wasser von der Oberfläche bis in diese Tiefen vordringen kann. Durch die Erhitzung des Wassers infolge des großen Temperaturgradienten löst das Wasser aus dem Nebengestein in größerer Menge Ionen, so daß es gut leitfähig wird. Das Netz aus gut leitfähigen Lösungen in der Gesteinsklüftung setzt nach seiner Meinung den spezifischen Widerstand der Gesteine in den oberen km von über 1000 Ohm·m auf etwa 100 Ohm·m herab. In Tiefen größer als etwa 10 km wird der niedrige spezifische Widerstand dagegen durch die Halbleitung der Gesteine wegen der anomal erhöhten Temperatur verursacht.

Für einige wenige Stationen in der Afarsenke haben wir ϱ_s -Kurven erhalten, die sich von der in Fig. 5 gezeigten Kurve etwas unterscheiden. 2 Beispiele dafür sind in Figur 6 dargestellt. Zwar nimmt bei beiden Stationen - wie bei allen anderen Stationen in der Afar - der spezifische Widerstand mit zunehmender Periode der Variationen ab. Für die Station Sardo erhält man aber höhere ϱ_s -Werte als für die meisten anderen Stationen in der Afar. An der Station Adigalla nimmt der spezifische Widerstand deutlich stärker mit zunehmender Periode der Variationen ab, als an den meisten anderen Stationen. Diese Ausnahmen lassen sich möglicherweise durch eine Variation des spezifischen Widerstandes in größerer Tiefe vom Ostteil der Afarsenke (wo die beiden Stationen liegen) in Richtung Westen interpretieren.

In Fig. 7 sind Beispiele von ϱ_s -Kurven für die Stationen im westlichen Escarpment und im Randbereich des westlichen Hochlandes dargestellt (Basisstation Kembolcha und Station Bati auf Profil I). Dort nimmt der spezifische Widerstand - ebenso wie in der Afarsenke - mit zunehmender Periode der Variationen

Fig. 6 - 8: Beispiele von ϱ_s -Kurven für verschiedene Stationen in der Afarsenke (ADI, SAR), im westlichen Escarpment (KEM, BAT) und auf dem südlichen Hochland (BIS, HAR).

ab. Das war ein etwas überraschendes Ergebnis, da wir auf den Hochländern (unter Annahme einer normalen Temperatur-Tiefen-Verteilung) spezifische Widerstände über 1000 Ohm·m erwartet hatten. Die Form der ϱ_s -Kurven ist für die Stationen im westlichen Escarpment und auf dem westlichen Plateau etwas anders als in der Afarsenke. In der Senke nimmt der spezifische Widerstand von Beginn der Kurve an mit zunehmender Periode der Variationen ab. D.h., schon die Variationen mit den kurzen Perioden um 30 sec merken etwas von einem besser leitfähigen Bereich in größerer Tiefe. Bei den ϱ_s -Kurven für die Stationen westlich der Afarsenke bleibt der spezifische Widerstand dagegen bis zu Perioden um 100 sec konstant. Erst dann nimmt er mit zunehmender Periode ab. Daraus kann man schließen, daß der Gradient vom schlechter leitfähigen Bereich nahe der Erdoberfläche zum besser leitfähigen Bereich darunter unter dem westlichen Hochland in größerer Tiefe liegen muß als unter der Afarsenke. Da wir nur im Randgebiet des westlichen Hochlandes gemessen haben, läßt sich nicht klären, wie weit die hohe elektrische Leitfähigkeit in größerer Tiefe nach Westen reicht.

In Fig. 8 sind die ϱ_s -Kurven für die beiden Stationen Harrar und Bisidimo auf dem SE-Plateau dargestellt. Der scheinbare spezifische Widerstand nimmt hier - entgegengesetzt wie in der Afarsenke - mit zunehmender Periode der Variationen zu. Eine Zunahme des spezifischen Widerstandes mit zunehmender Periode erhält man auch für die Stationen im SE-Escarpment und zwar sowohl bei Profil II wie auch bei Profil III. Für Variationen mit Perioden unter 100 sec ist der spezifische Widerstand an den genannten Stationen ähnlich wie er im Mittel in der Afarsenke ist.

In Fig. 9 ist die Phasendifferenz (Phase einer Variation des erdmagnetischen minus Phase der gleichzeitigen Variation des erdelektrischen Feldes) in Abhängigkeit von der Periode der Variationen für die Basisstation Kembolcha im westlichen Escarpment und für die Station 192 in der Afarsenke dargestellt. In dem auswertbaren Periodenbereich ist die Phasendifferenz etwa konstant. Sie nimmt von etwa 60° bei Perioden um 30 sec auf etwa 40° bei Perioden um 1000 sec ab. Wenn unser Modell

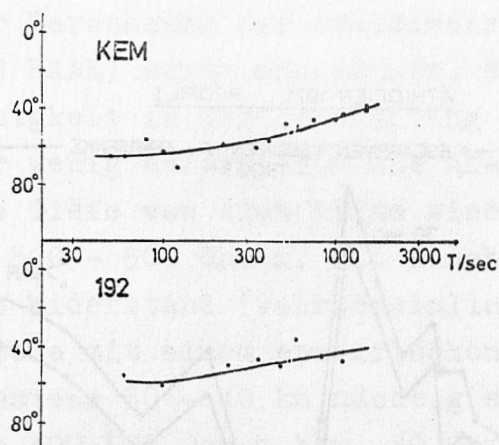


Fig. 9: Abhängigkeit der Phasendifferenz (Phase einer Variation des erdmagnetischen minus Phase der gleichzeitigen Variation des erdelektrischen Feldes, Komponenten in Polarisationsrichtung der Vektordiagramme) von der Periode der Variationen für die Basisstation Kembolcha im westlichen Escarpment und für die Station 192 in der Afarsenke.

stimmt, bei dem die Leitfähigkeit unter der Afar und unter dem Randgebiet des westlichen Plateaus mit der Tiefe zunimmt, bei dem also unter einem schlechter leitfähigen Bereich nahe der Erdoberfläche ein besser leitfähiger Bereich liegt, dann muß mit wachsender Periode die Phasendifferenz von 45° in Richtung auf 90° zunehmen und nach Erreichen eines Maximums langsam wieder gegen 45° konvergieren. Wir erhielten aber im auswertbaren Periodenintervall nur die Abnahme der Phasendifferenz vom Maximalwert auf etwa 45° . Die Zunahme der Phasendifferenz von 45° zum Maximalwert können wir nicht nachweisen, da sie bei Perioden kleiner als etwa 10 sec zu erwarten ist. (Diese Perioden konnten wir nicht mehr registrieren.) Die Abhängigkeit der Phasendifferenz von der Periode unterscheidet sich an den Stationen im Randgebiet des westlichen Plateaus nicht sehr von der an den Stationen in der Afar. Auch das spricht für eine ähnliche Leitfähigkeits-Tiefen-Verteilung unter den beiden Gebieten.

In Fig. 10 ist der scheinbare spezifische Widerstand für die Perioden 30 sec und 1000 sec längs Profil I dargestellt. Da-

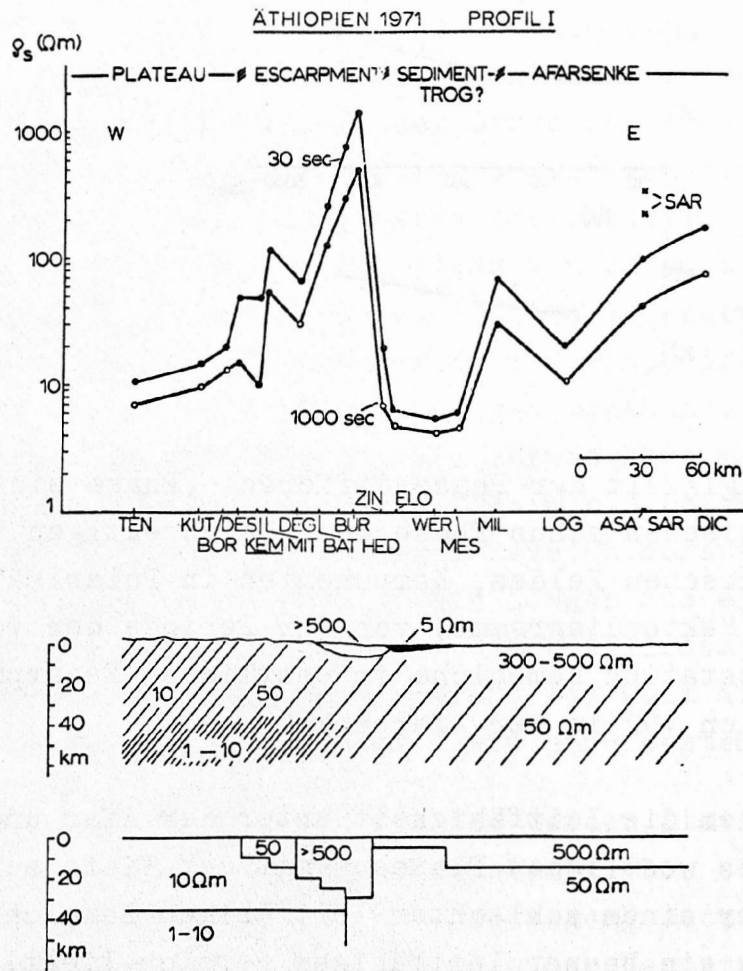


Fig. 10: Diagramm im oberen Teil der Figur: Variation des scheinbaren spezifischen Widerstandes längs des EW-Profiles I, für die Perioden 30 sec und 1000 sec. Darunter sind 2 Modelle (zweidimensional, in NS-Richtung streichend) der Leitfähigkeits-Tiefen-Verteilung längs des Profils gezeichnet (Modellrechnungen nach JONES und HAAK). Der spezifische Widerstand von 10 - 50 Ohm.m ist für den angegebenen Tiefenbereich anomal gering.

runter sind 2 Modelle der Leitfähigkeits-Tiefen-Verteilung gezeichnet. Zur Berechnung der zweidimensionalen Modelle (nach JONES und HAAK) wurde angenommen, daß sich die elektrische Leitfähigkeit in Streichrichtung des westlichen Escarpments nur wenig ändert. Für die Afarsenke erhielten wir bis in eine Tiefe von etwa 15 km einen spezifischen Widerstand von 300 - 500 Ohm·m. Mit zunehmender Tiefe nimmt der spezifische Widerstand (wahrscheinlich stetig) auf 50 Ohm·m ab. Die Zone mit einem spezifischen Widerstand um 50 Ohm·m muß mindestens 30 - 40 km mächtig sein. Die spezifischen Widerstände von 300-500 Ohm·m bzw. 50 Ohm·m sind für die angegebenen Tiefen anomal niedrig. Nimmt man an, daß die niedrigen spezifischen Widerstände durch eine anomal hohe Temperatur in den Tiefen verursacht werden, kann man in einer Tiefe von etwa 15 km eine Temperatur von etwa 800°C erwarten. Das ergibt einen Temperaturgradienten von 50 - 60°C/km. Unter dem westlichen Escarpment und unter dem Randgebiet des westlichen Plateaus erhalten wir ebenfalls anomal niedrige spezifische Widerstände. Die Widerstände sind sogar noch niedriger als in der Afarsenke. Wenn man die niedrigen spezifischen Widerstände in der Afar durch eine anomal hohe Temperatur interpretiert, müßte diese anomal hohe Temperatur auch noch unter den Randgebieten des westlichen Plateaus vorhanden sein. Die Temperatur müßte dort wegen der niedrigeren spezifischen Widerstände sogar noch höher sein als unter der Afar. Dies erscheint unwahrscheinlich. Als andere Erklärung könnte man unter dem westlichen Plateau Material mit einem niedrigeren Schmelzpunkt oder mit einem höheren Gehalt an "flüchtigen Bestandteilen" annehmen. - Das Übergangsgebiet von der Leitfähigkeits-Tiefen-Verteilung unter der Afarsenke zu der Leitfähigkeits-Tiefen-Verteilung unter dem westlichen Hochland wird im Areal der Orte Bati/Burka/Eloha angenommen. Die Art des Überganges ist noch nicht geklärt. So könnte zum einen der besonders niedrige spezifische Widerstand um 5 Ohm·m zwischen den Orten Mille und Eloha und der besonders hohe spezifische Widerstand von über 1000 Ohm·m um den Ort Burka durch Strukturen an der Oberfläche erklärt werden, wie z.B. zum einen durch einen Sedimenttrog, zum anderen durch eine besonders schlecht leit-

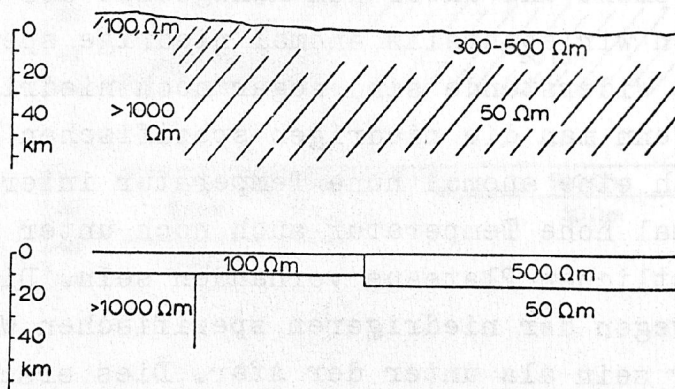
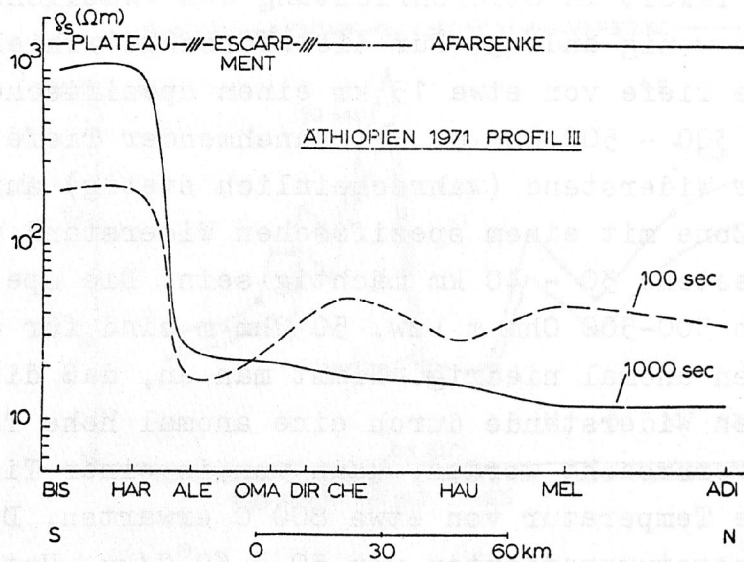


Fig. 11: Variation des scheinbaren spezifischen Widerstandes längs Profil III für die Perioden 100 sec und 1000 sec, darunter 2 dazu berechnete Modelle (zweidimensional, etwa in EW-Richtung streichend). Unter dem südlichen Plateau ist - im Gegensatz zum Untergrund unter dem westlichen Plateau - der spezifische Widerstand mit 1000 Ohm·m für den angegebenen Tiefenbereich normal.

fähige Intrusion. Diese Möglichkeit wird im Modell im Mittelteil der Figur 10 gezeigt. Andererseits könnte man die Ortsabhängigkeit des spezifischen Widerstandes im Areal des Überganges auch durch eine Struktur im tieferen Untergrund erklären, wie z.B. durch eine Aufwölbung der Oberfläche des gut leitfähigen Materials unter der Afar von etwa 15 km Teufe unter dem Ort Mille auf etwa 5 km Teufe unter den nach Westen anschließenden Orten MES, WER und ELO. Ein Modell dafür wird im unteren Teil der Fig. 10 gezeigt.

In Figur 11 ist im oberen Teil die Variation des scheinbaren spezifischen Widerstandes längs Profil III für die Perioden 100 sec und 1000 sec dargestellt. Der scheinbare spezifische Widerstand wurde aus den Komponenten des elektrischen und des magnetischen Feldes in Polarisationsrichtung der Vektordiagramme berechnet. Im unteren Teil der Fig. 11 sind 2 Modelle der Leitfähigkeits-Tiefen-Verteilung längs Profil III gezeichnet (zweidimensional, Streichrichtung längs des SE-Escarpments, berechnet aus der Orts- und Periodenabhängigkeit des oben definierten spezifischen Widerstandes). Für den Bereich unter der Afarsenke wurde etwa die gleiche Leitfähigkeits-Tiefen-Verteilung erhalten wie längs Profil. I. Dagegen hat der Bereich unter dem SE-Plateau - im Gegensatz zum West-Plateau - einen spezifischen Widerstand von mehr als 1000 Ohm·m. Dieser hohe spezifische Widerstand ist bei einem normalen Temperaturgradienten für die Gesteine in dem eingezeichneten Tiefenbereich typisch. Nach unseren Meßergebnissen ist der spezifische Widerstand unter dem Randgebiet des westlichen Plateaus viel geringer als unter dem Randgebiet des SE-Plateaus. Das spricht für einen anomal hohen Temperaturgradienten (50-60°C/km) unter dem Randgebiet des westlichen Plateaus, dagegen für einen normalen Temperaturgradienten unter dem SE-Plateau.

Literatur

GREINWALD, S.: Ein Gerät zur Registrierung von Variationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes und die Bearbeitung der damit gewonnenen Meßwerte, demonstriert an 2 Stationen aus der Afarsenke. Diss. am Inst. f. Angew. Geophys., München, 1972

HERMANCE, J.F.: An electrical model for the sub-Icelandic crust. Geophysics, 38, S. 3 - 13, 1973.

PORATH, H., BENNETT D.J., DZIEWONSKI A., GOUIN P.: Deep electrical conductivity structure about the Afar Depression and the northern section of the East African Rift Valley. Vortrag gehalten auf dem "Symposium on the Afar Region of Ethiopia and Related Rift Problems", Bad Bergzabern, April 1974.