

H.-G. Mehl, F. Ramdani, V. Rath, G. Schwarz

Magnetotellurik und erdmagnetische Tiefensondierung im marokkanischen Atlas

Die hier beschriebenen Messungen in marokkanischen Atlas wurden im Frühjahr 1988 im Rahmen des Projektes 'Mobilität aktiver Kontinentalränder' durchgeführt. Sie sind die Fortsetzung der magnetotellurischen Untersuchungen aus dem Jahr 1983 (Schwarz et al. 1986) und fanden mit Unterstützung durch das marokkanische Bergbauministerium und die Universität Mohammed V statt. Außer den hier vorgestellten magnetotellurischen Messungen wurden auch seismische sowie geologische Untersuchungen durchgeführt (für eine Übersicht siehe: Jacobshagen 1988). Die Verdichtung der geologisch-geophysikalischen Informationen aus dem Atlassystem sollte weitere Rückschlüsse auf die Entstehungsgeschichte dieses Gebirges erlauben, das den Geowissenschaftlern bis heute immer noch große Rätsel aufgibt.

Es wurden insgesamt drei Profile angelegt (Abb. 1): Im Norden vom Rif-Atlas bis in den Mittleren Atlas (im folgenden Profil N genannt), im Süden vom Anti-Atlas über den Hohen Atlas bis in den Mittleren Atlas (Profil S, mit einer versetzten Überlappung), sowie ein Querprofil von der Haute Moulouya in die Meseta (Profil M). Die magnetotellurischen Messungen fanden an insgesamt 51 Stationen statt (Abb. 2). Die erdmagnetischen Variationen wurden an 37 Orten mit Fluxgatemagnetometern (Periodenbereich: 40 bis 30000 s) aufgezeichnet, an den anderen Stationen wurden Induktionsspulenmagnetometer mit einem Periodenbereich von 3 bis 3000 s eingesetzt. Die weitere Ausstattung der Apparaturen und Einzelheiten der Messungen beschreibt Mehl (in Vorber.).

Der aktuelle Stand der Auswertung sieht folgendermaßen aus: Vom Nordteil des Meßgebiets (Profil N) liegen erdmagnetische und magnetotellurische Übertragungsfunktionen, 1D-Widerstandsmodelle sowie ein erstes 2D-Modell vor. Die Auswertung des Profiles M ist noch im Gange. Bisher liegen erdmagnetische Induktionspfeile sowie MT-Impedanzen für die meisten Stationen vor. Da in diesem Bereich (Haute Moulouya-Mittlerer Atlas) die Krustenstrukturen aber anscheinend kleinräumiger sind und sich im Verlauf des Profiles stark ändern, ist noch keine zusammenhängende Darstellung entstanden. Die Ergebnisse des Profils S wurden bereits früher gezeigt (Schwarz et al. 1986).

## Ergebnisse der Erdmagnetischen Tiefensondierung

Der Realteil der erdmagnetischen Induktionspfeile ist für Perioden von 100, 300 und 2000 s dargestellt (Abb. 3). Auffällig bei kurzen Perioden (100 s) sind die großen Beträge (bis 0.6) und die ausgeprägte Richtungsumkehr im Profil N nördlich von Fes. Im Bereich des Mittleren Atlas bis in den zentralen Hohen Atlas sind die Verhältnisse uneinheitlich. Während sich im westlichen Teil des Mittleren Atlas ein deutlicher Trend in S-Richtung zeigt, ist der östliche Teil durch Richtungen in ENE und durch relativ hohe Beträge gekennzeichnet. Bei einer Periode von 300 s sind die Beträge allgemein kleiner geworden, die Richtungen aber weitgehend stabil geblieben. Die Trendumkehr im Profil N hat sich etwas nach Norden in Richtung der Station ISI verschoben und weist hier auf das Zentrum der Induktionsanomalie hin. Am Südrand des Hohen Atlas nehmen die Beträge der magnetischen Übertragungsfunktionen mit wachsender Periode zu. Bei einer Periode von 2000 s hat sich das Bild im Bereich des Mittleren Atlas sowie des Hohen Atlas deutlich vereinheitlicht. Im Rif divergieren die Richtungen der Pfeile dagegen etwas stärker als bei den kürzeren Perioden. Grob gesehen streichen die leitfähigen Strukturen in EW-Richtung. Die bereits erwähnte Richtungsumkehr im Profil N nördlich des mittleren Atlas bleibt auch bei langen Perioden erhalten. Die Beträge der magnetischen Übertragungsfunktionen sind hier sowie bei Er Rachidia am Südrand des Hohen Atlas maximal. Die vom Gesamttrend abweichende Richtung der Pfeile an drei Stationen in der Nähe von Fes ist wohl auf lokal begrenzte, gut leitende Strukturen im Osten des Prärif zurückzuführen, die sich in ihrer Wirkung der großräumigen Anomalie überlagern. Ein Küsteneffekt, genauer gesagt, ein Wegzeigen der Induktionspfeile von der Küste ist an den nördlichen Stationen AGA und KET trotz des geringen Abstandes von ca. 30 km zum Mittelmeer nicht festzustellen. Daran ist zu erkennen, daß die integrierte Leitfähigkeit der Krustenstrukturen im Rif deutlich größer ist als die des Mittelmeeres.

## Ergebnisse der Magnetotellurik

Die Registrierungen der erdelektrischen und erdmagnetischen Felder zeichnen sich durch geringe künstliche Störungen aus. Andererseits litten die Messungen teilweise unter Beschädigungen der Apparaturen bzw. unter angebissenen Kabeln. Insgesamt konnten aber qualitativ gute Daten und stabile magnetotellurische Übertragungsfunktionen gewonnen werden.

Da sich auf den Profilen N und S der EW-Trend der leitfähigen Strukturen sowohl in den Induktionspfeilen als auch in den Vorzugsrichtungen des elektrischen Feldes recht deutlich zeigt, ha-

ben wir für beide Profile die EW-Komponente des elektrischen Feldes als der E-Polarisation zugehörig angenommen. Die Auswertung wurde in einem festen NS-EW-Koordinatensystem vorgenommen. Dieses wird auch dadurch gerechtfertigt, daß eine Tensordrehung nach dem Swift-Kriterium bei allen Stationen keine nennenswerten Änderungen in Widerstand und Phase verursacht. Ein Vergleich der Ergebnisse an den einzelnen Stationen wird dadurch vereinfacht. Abbildung 4 zeigt als Beispiel die Ergebnisse jeweils einer Station mit Fluxgate- sowie mit Induktionsspulenmagnetometer. Die Tatsache, daß die Kurven für Determinante und Invariante des Tensors praktisch deckungsgleich liegen, zeigt, daß die Leitfähigkeitsstrukturen im Atlassystem annähernd zweidimensional sind. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Ergebnisse auf Profil N. Auffällig sind große Versatzbeträge in den Widerstandskurven der EW-Komponente (hier E-Polarisation) zwischen benachbarten Stationen (z.B. bei AGA und KET: 1.5 Dekaden) bei annähernd gleicher Phase und gleicher Form der Widerstandskurven. Diese Sprünge werden vermutlich durch Gleichstromverzerrung hervorgerufen. Über das ganze Profil hinweg läßt sich ein steiler Anstieg der Widerstandskurve für die EW-Richtung nach einem Minimum feststellen. Schon ein Vergleich der Widerstands- und Phasenkurven von verschiedenen, typischen Stationen des Nord- und des Südprofils (Abb. 6) zeigt, daß sich die elektrisch leitfähigen Strukturen in der Kruste von Norden nach Süden deutlich ändern. Die Form der Widerstandskurven variiert stark mit den strukturellen geologischen Einheiten. An einigen Stationen fällt eine starke Anisotropie der magnetotellurischen Impedanz auf. Der gute Leiter, der anhand der Induktionspfeile in der Kruste des Hohen Atlas angenommen werden muß, ist in den Magnetotellurik-Ergebnissen nicht sehr stark ausgeprägt.

Für einen schnellen Überblick der Leitfähigkeitsstrukturen entlang des Profils N haben wir die Phasen der E-Polarisation an den einzelnen Stationen auf einem Netz interpoliert und geglättet dargestellt (Abb. 7). Die Phasen werden nicht so stark von Oberflächeneffekten verzerrt wie die Widerstandswerte und können deshalb als Originalwerte ohne weitere Veränderung sinnvoll interpretiert werden. Recht deutlich zu erkennen sind für kurze Perioden die Bereiche mit Phasen unter  $45^\circ$  (schraffiert), die auf einen sehr oberflächennahen guten Leiter hinweisen. Innerhalb des Mittleren Atlas weisen hohe Phasenwerte auf eine schlechter leitende Oberflächenbedeckung hin.

Aus den eindimensionalen Widerstandsmodellen der einzelnen Stationen des Profils N haben wir einen Pseudo-2D-Schnitt zusammengestellt (Abb. 8). Als Beispiel für die Modellierung sind die Stationen AGA und SEF nochmals mit den angepassten Wi-

derstands- und Phasenkurven sowie der Bostick-Transformierten im Vergleich mit dem Modell abgebildet. Eine sehr gut leitende Struktur in der Oberkruste ist bei beiden Stationen zu sehen. Für den Profilschnitt sind die Widerstandswerte der einzelnen Stationen alle so weit parallelverschoben worden, daß sich damit für die 1D-Modelle ein Wert von 100 Ohm m in 100 km Tiefe ergibt. Diesen Wert nehmen wir für einen homogenen oberen Mantel als repräsentativ an. Der Widerstand des guten Leiters in der Kruste ergibt sich daraus zu Werten zwischen 0,2 und 1 Ohm m. Dieser Wertebereich erscheint für Schichtmächtigkeiten des Modells bis zu 8 km als sehr niedrig. Es lassen sich vielleicht geologisch sinnvollere Modelle finden, wenn man für den elektrischen Widerstand des oberen Mantels höhere Werte annimmt. Eine Bestimmung der integrierten Leitfähigkeit aus den Meßergebnissen ergab an der Station ISI einen Wert von etwa 7000 Siemens. Die beobachtete Richtungsumkehr der Induktionspfeile an dieser Station weist darauf hin, daß die integrierte Leitfähigkeit der Krustenstrukturen an dieser Station ihr Maximum erreicht. Ein Bereich erhöhter Leitfähigkeit, der an einigen Stationen in einer Tiefe von mehr als 100 km liegt, ist in den Rho-Bostick Werten nicht zu erkennen, läßt sich aber aus dem Anstieg der Phase vermuten.

Den oben beschriebenen Pseudo-2D-Schnitt (Abb. 8) haben wir als Grundlage für eine erste 2D-Auswertung genommen. Die Modellierung basiert auf einem Rechenprogramm nach der Methode der finiten Elemente (Wannamaker 1987). Das Modell sowie die Ergebnisse von Widerstand und Phase zeigt Abbildung 9. Die Anpassung von Modell an Meßdaten ist bisher noch nicht befriedigend gelungen. Die Form der gemessenen Kurven ist an einigen Stationen zwar recht gut durch das Modellergebnis angepaßt, an anderen Stationen weicht aber das Modellergebnis vor allem in der B-Polarisation stark von den Meßdaten ab. Auch treten Werte wie z.B. Phasen größer als 90° oder Widerstände von 0 Ohm m auf, die vermutlich durch numerische Ungenauigkeiten erzeugt werden. Schwierigkeiten im Modell machen in dieser Hinsicht vor allem starke Kontraste in der Leitfähigkeit sowie Strukturen, die räumlich zu klein bzw. durch zu wenige Elemente im Modell repräsentiert sind.

#### Diskussion

Als Ursache der gut leitenden Strukturen im Bereich des Rif und des Prä-Rif sind Sedimente anzunehmen. Da in der Gegend um Fes salzhaltige Quellen existieren, könnte die extrem hohe integrierte Leitfähigkeit der Sedimente auf einen mit Salzwasser gefüllten Porenraum zurückzuführen sein.

Im Mittleren Atlas sind für die Tiefen der gut leitenden Struk-

turen keine wasserführenden Sedimente mehr zu erwarten. Hier muß also eine andere geologische Interpretation gefunden werden. Zur Zeit gibt es im wesentlichen zwei Erklärungsmodelle für hohe Leitfähigkeiten im tiefen Untergrund: Graphit oder Fluide. Welches von beiden (oder ob überhaupt eines davon) hier zutrifft, ist noch nicht klar. Für beide gibt es aber Anhaltspunkte. Bohrungen haben ergeben, daß im Mittleren Atlas Schwarzschiefer existieren: Der notwendige Kohlenstoff für das Auftreten von Graphit wäre also vorhanden. Es ist aber zweifelhaft, ob die für seine Bildung nötigen Temperaturbedingungen existiert haben. Andererseits geben geologische Untersuchungen in diesem Bereich auch Hinweise auf eine tiefreichende Tektonik. Entlang von Abscherungsbahnen könnten Fluide aus dem oberen Mantel nach oben gelangen und sich als gute Leiter ausprägen. Weiter westlich im Mittleren Atlas tritt junger Vulkanismus auf, der auf eventuelle Aufschmelzungen und erhöhte Temperaturen in der Kruste hindeutet - einer weiteren Quelle für erhöhte elektrische Leitfähigkeiten. Leider liegen aus diesem Gebiet keine Wärmeflußmessungen vor, mit denen sich diese Interpretation erhärten ließe.

Zur Zeit werden 2D-Modelle für das Südprofil berechnet. Eines der Modelle, das den Realteil der Induktionspfeile und auch die Phase der magnetotellurischen Impedanz recht gut anpaßt, ist in Abbildung 10 gezeigt. Das Modell enthält besonders gut leitende Strukturen (1 Ohm m) in der Kruste bei Azrou und bei Er Rachidia. Als Interpretation der Modellstrukturen bietet sich eine Überschiebungsbahn an, die sich aus einer listrischen Störung entwickelt haben könnte. Zur Erklärung der hohen integrierten Leitfähigkeiten bieten sich die gleichen Modelle an wie für die Strukturen im Mittleren Atlas. Mit dem derzeitigen geologischen Wissen kann aber auch hier nicht zwischen Graphiten und Fluiden als Ursache der hohen Leitfähigkeiten unterschieden werden. Die magnetotellurischen Ergebnisse werden in zwei, demnächst erscheinenden Arbeiten (Mehl, in Vorber.; Ramdani, in Vorber.) ausführlicher diskutiert.

#### Literatur

Jacobshagen, V. (ed.): The Atlas System of Morocco. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer, Berlin, 15, 499 S., 1988

Michard, A.: Elements de geologie marocaine. Notes Mem. Serv. geol., 252, 1-408, 1976

Schwarz, G., Rath, V., Haak, V.: Magnetotellurische und erdmagnetische Sondierungen im marokkanischen Atlas. Berliner Geowiss. Abh. (A), 66, 289-300, 1986

Wannamaker, P.E.: Finite Element Program for Solution of Magnetotelluric Responses of Two-Dimensional Earth Resistivity Structure. Earth Science Lab. University of Utah, 1987

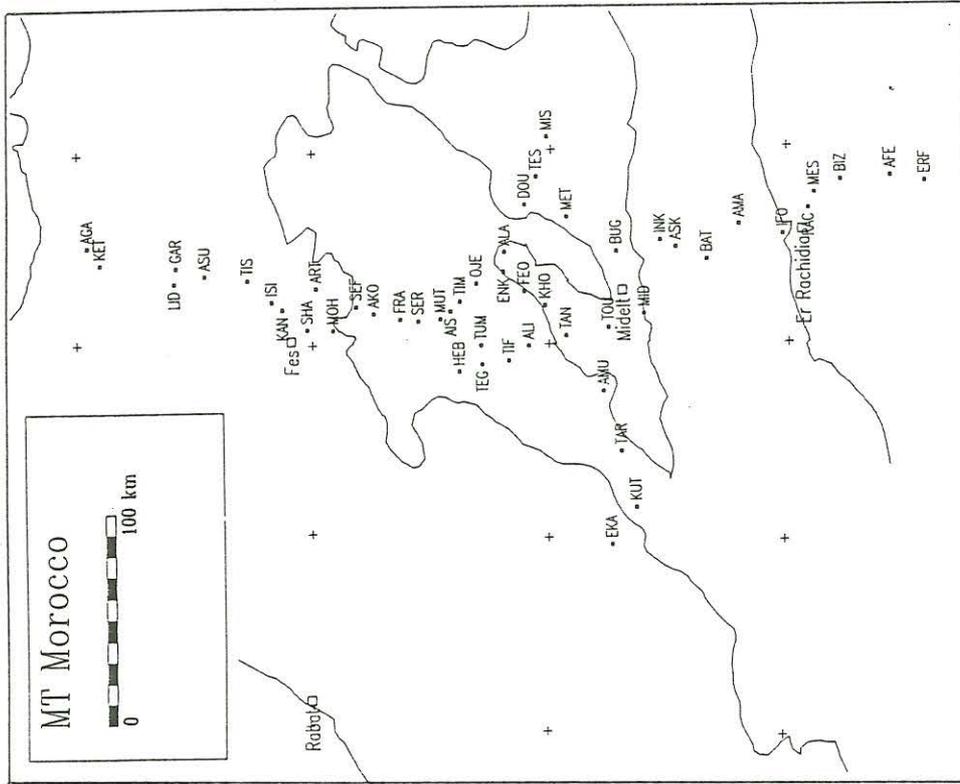


Abb. 2: Stationsplan der erdmagnetischen und magnetotellurischen Sondierungen aus den Jahren 1983 und 1988. Der Kartenausschnitt entspricht dem in Abb. 1 gestrichelt eingezeichneten Bereich.

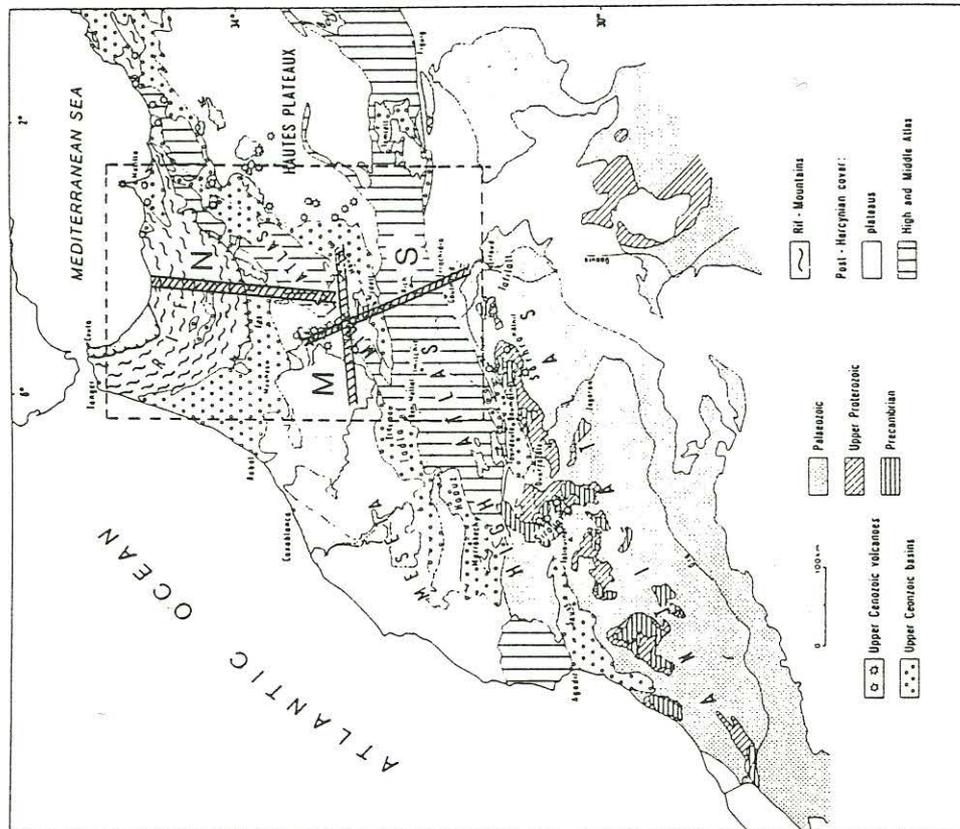


Abb. 1: Geologische Karte von Marokko (nach MICHARD 1976). Der gestrichelt umrandete Bereich zeigt das Meßgebiet vom Anti Atlas bis in das Rif. Eingezeichnet sind die Profile N und M der Messungen aus dem Jahr 1988 und das Profil S aus dem Jahr 1983 (Schwarz et al. 1986).

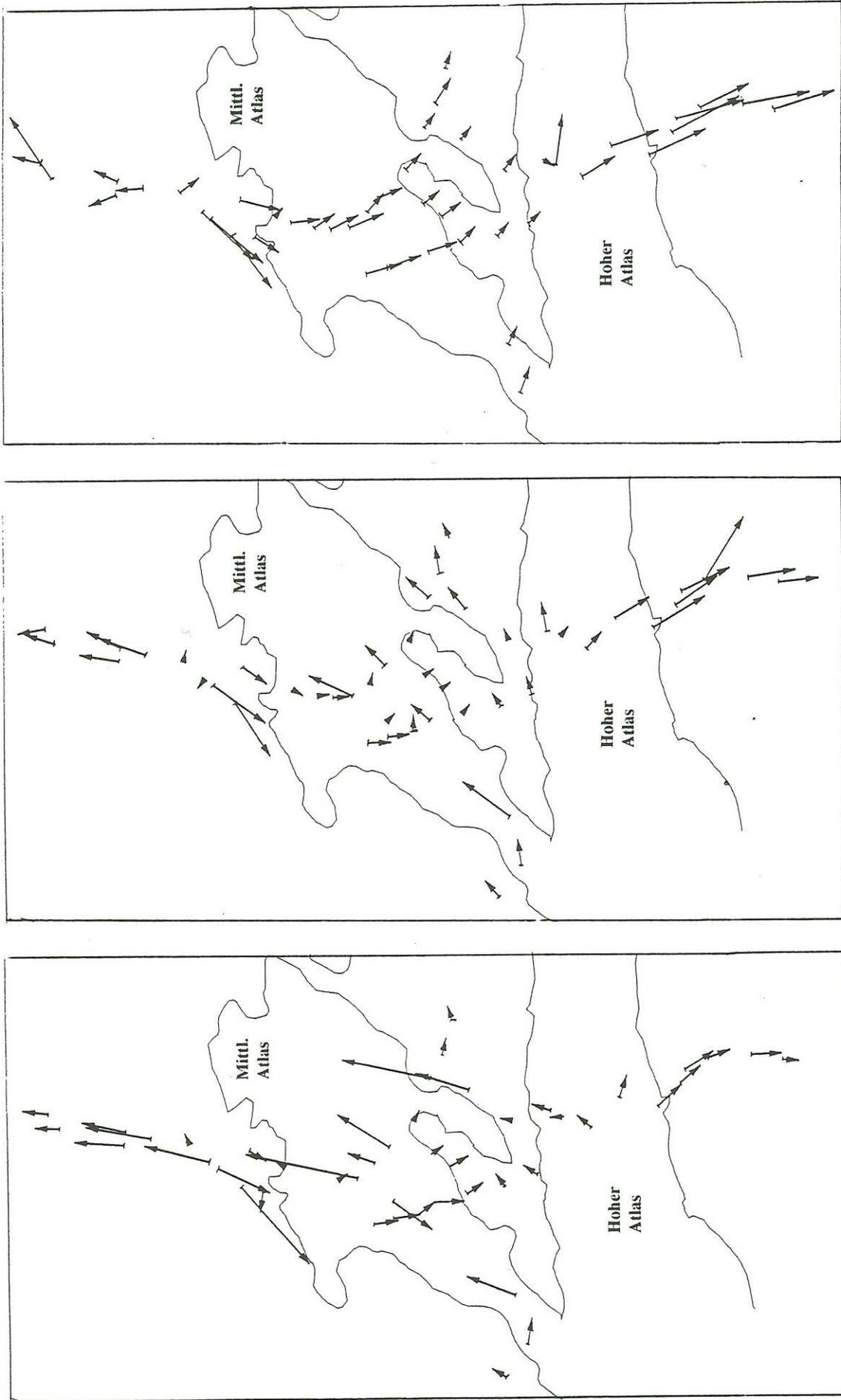
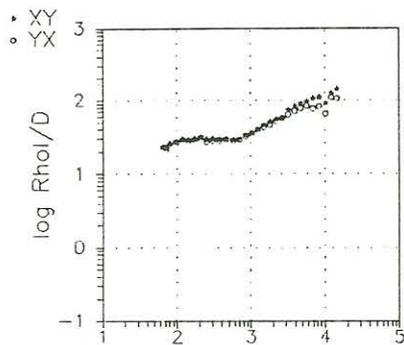
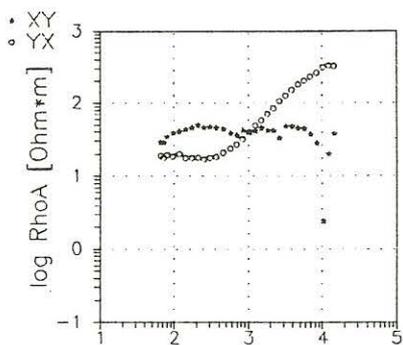
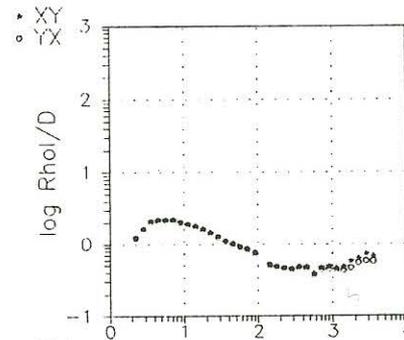
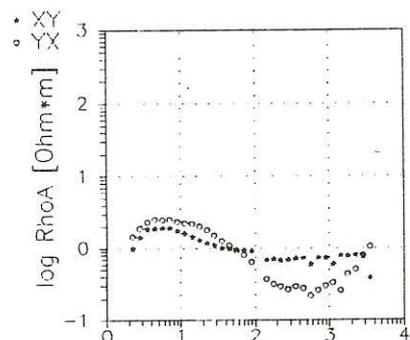
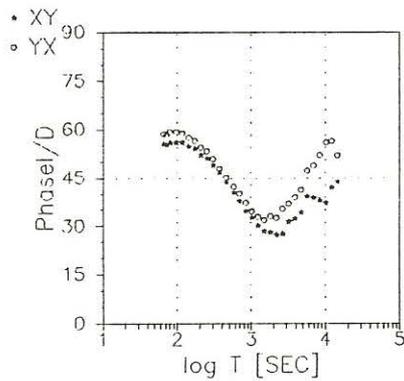
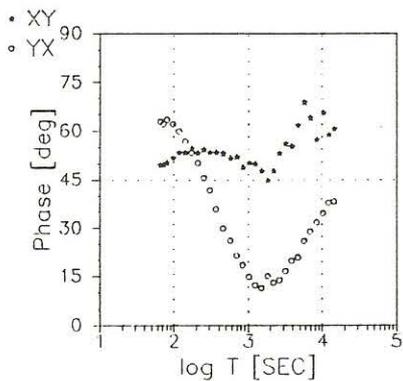


Abb. 3: Realteile der erdmagnetischen Induktionspfeile für Perioden von 100, 300 und 2000 s (von links nach rechts). Zwei Bereiche mit hohen Kontrasten der elektrischen Leitfähigkeit zeichnen sich ab: a. das Prä-Rif nördlich des Mittleren Atlas; b.



Station AGA  
(mit Fluxgate-  
magnetometer)



Station SEF  
(mit Induktionsspulen-  
magnetometer)

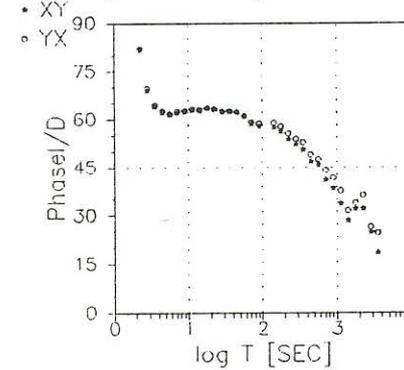
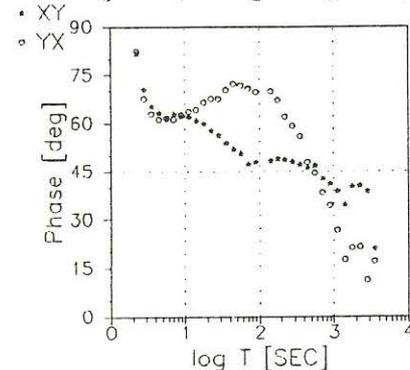


Abb. 4: Widerstands- und Phasenkurven als Beispiele für Meß-  
ergebnisse aus dem Rif (AGA) und dem Mittleren Atlas (SEF).  
links: in einem festen NS-EW-Koordinatensystem berechnete Kurven;  
rechts: Kurven von Invariante/Determinante des Impedanztensors  
zur Abschätzung der Dimensionalität des Induktionsraumes. Da die  
Kurven praktisch deckungsgleich liegen, kann eine  
zweidimensionale Untergrundstruktur angenommen werden.

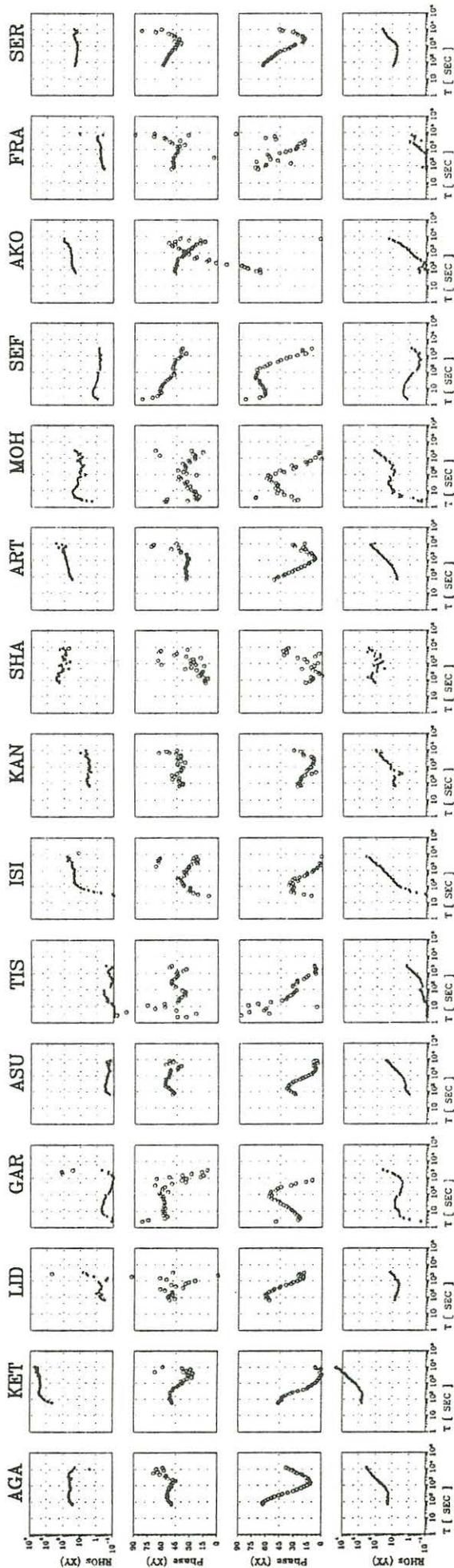


Abb. 5: Ein Überblick über die Meßergebnisse auf dem Profil N vom Rif (Station AGA) bis in den Mittleren Atlas (Station SER). Es fallen große Versätze in den Widerstandskurven der E-Polarisation (YX) zwischen benachbarten Stationen (z.B. bei AGA und KET: 1.5 Dekaden) bei annähernd gleicher Phase und gleicher Form der Widerstandskurven auf. Diese Sprünge werden vermutlich durch Gleichstromverzerrungen hervorgerufen.

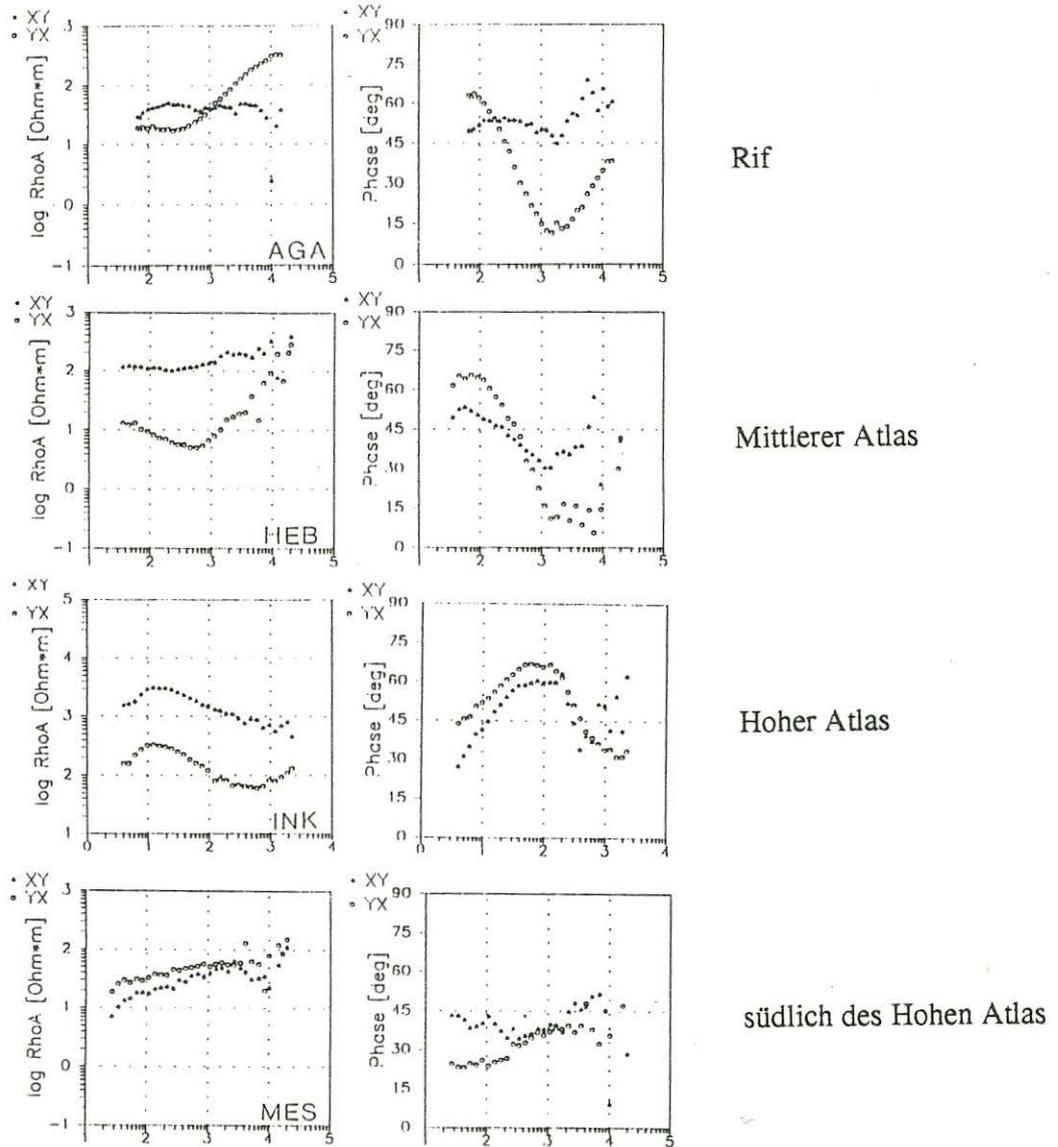


Abb. 6: Vergleich von typischen Ergebnissen von Stationen aus den verschiedenen strukturellen Einheiten des Meßgebietes von N nach S. Das Minimum in den Widerstandskurven (YX-Komponente) der Stationen AGA, HEB und INK verschiebt sich von N nach S von kurzen zu langen Perioden, d.h. die Struktur erhöhter Leitfähigkeit liegt im S des Untersuchungsgebietes offensichtlich tiefer als im N. Südlich des Hohen Atlas wird dieser gute Leiter nicht mehr beobachtet.

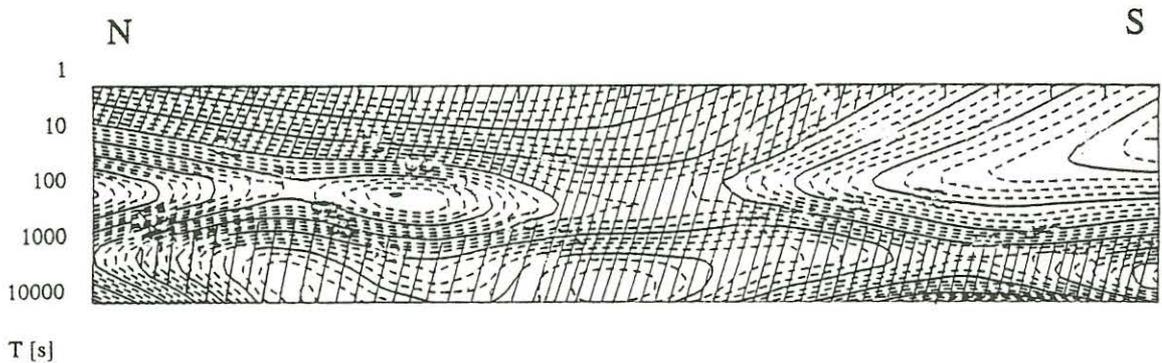


Abb. 7: Interpolierte Phasenwerte der E-Polarisation auf dem Profil N. Bereiche mit Phasen unter  $45^\circ$  sind schraffiert.

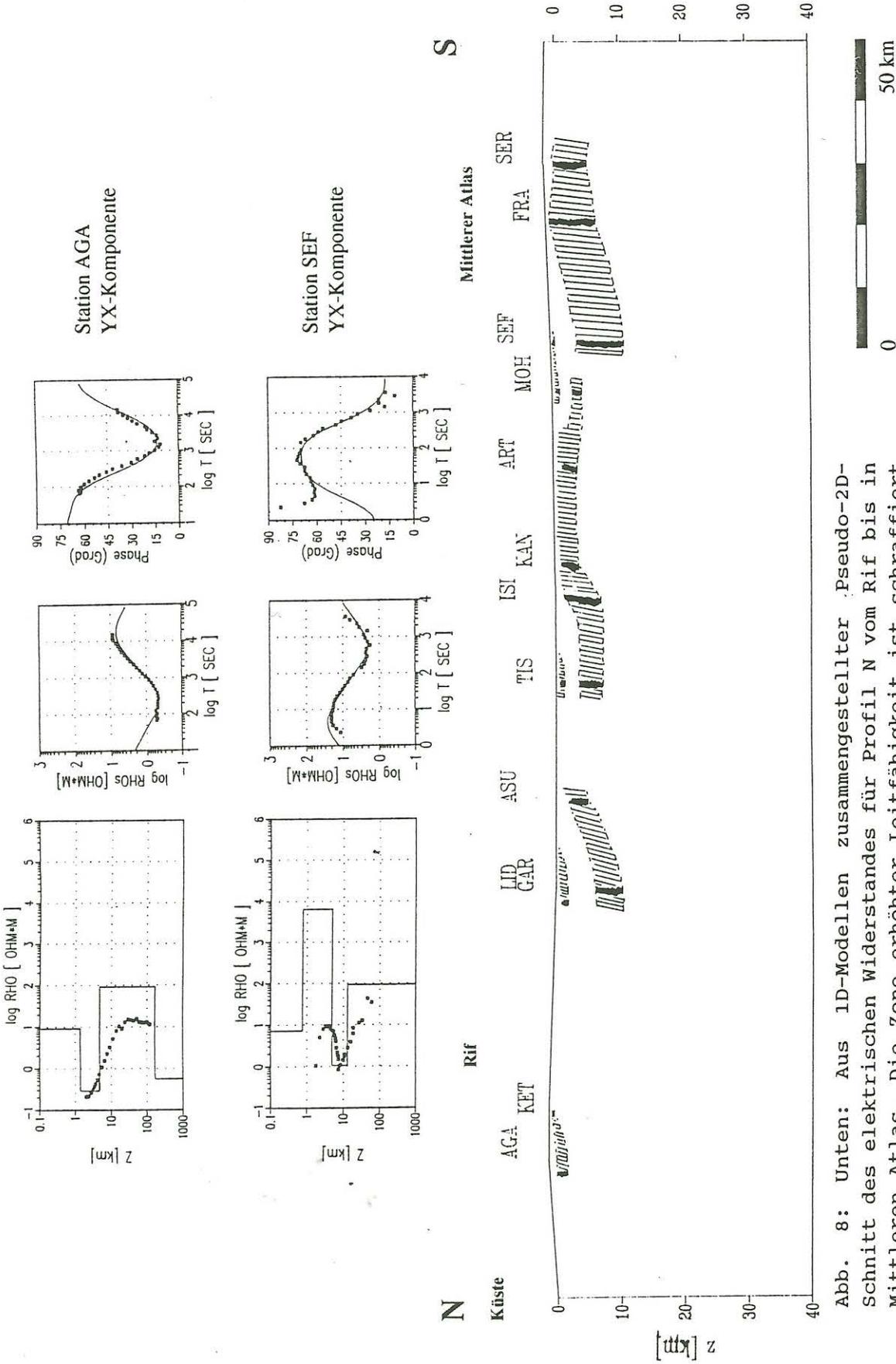


Abb. 8: Unten: Aus 1D-Modellen zusammengestellter Pseudo-2D-Schnitt des elektrischen Widerstandes für Profil N vom Rif bis in Mittleren Atlas. Die Zone erhöhter Leitfähigkeit ist schraffiert gezeichnet. Der geschwärtzte Bereich an jeder Station zeigt den guten Leiter des jeweiligen 1D-Modells an. Oben: Zwei Beispiele für durch 1D-Modelle angepasste Meßwerte (rechts). Zusammen mit dem Modell ist die Bostick-Transformierte dargestellt (links).

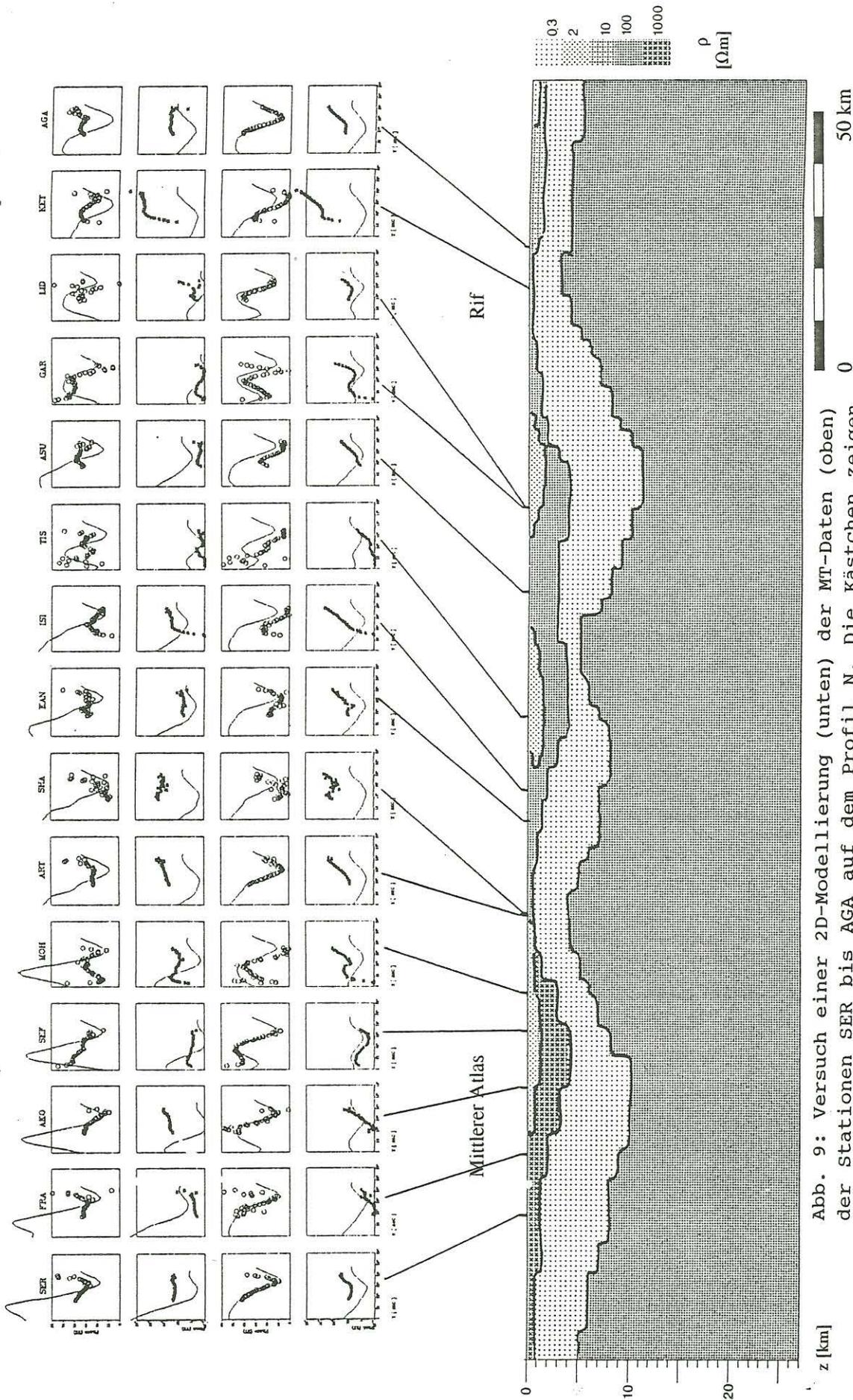


Abb. 9: Versuch einer 2D-Modellierung (unten) der MT-Daten (oben) der Stationen SER bis AGA auf dem Profil N. Die Kästchen zeigen von oben nach unten jeweils Phase und Widerstand für die YX- (E) und XY-Richtung (B-Polarisation). Große Leitfähigkeitskontraste im Bereich des Mittleren Atlas führen zu numerischen Effekten und damit zu starken Ausreißern in den Modelldaten von Widerstand und Phase.