

Magnetotellurische Messungen im Südural

R.-U. Börner, Chr. Oelsner, K. Vygodner (TU Bergakademie Freiberg)

email: rub@geophysik.tu-freiberg.de

1 Einleitung

Im Rahmen des URSEIS-Programmes wurden im Sommer 1996 auf 30 Stationen magnetotellurische und transient-elektromagnetische Sondierungen durchgeführt. Das Profil beginnt im Westen in der Prä-Ural-Vorsenke, quert die Baschkirische Antiklinale sowie die morphologisch bestimmenden Elemente des Uralgebirges, Ural-Tau. Die Traverse endet im Osten in der Ost-Magnitogorsker Zone.

Bei einer Gesamtlänge von etwa 220 km beträgt der mittlere Stationsabstand 7 km und übertrifft damit die in diesem Gebiet bisher erzielte räumliche Messdichte von MT-Profilen deutlich (DYAKONOVA 1994).

Die Tatsache, dass die Messungen an den 30 Stationen unter den gegebenen Umständen planmäßig zum Abschluss gebracht werden konnten, ist bereits für sich als Erfolg zu werten.

Geologischer Hintergrund

Die Uraliden stellen mit einer Nord-Süd-Erstreckung von 2500 km und einer Breite von ca. 400 km eine der größten strukturellen Diskontinuitäten der Erde dar und bilden gleichermaßen die geographische sowie geologische Grenze zwischen Europa und Asien. Vergleicht man den Ural aus geologischer Sicht mit anderen paläozoischen Orogenen, fällt eine gewisse Sonderstellung auf: Unbeeinflusst von mesozoischem und tertiärem spreading kann der Ural als ein verhältnismäßig intaktes Orogen bezeichnet werden.

Dies eröffnet Wege zu signifikanten Fortschritten im Studium von orogenetischen Prozessen.

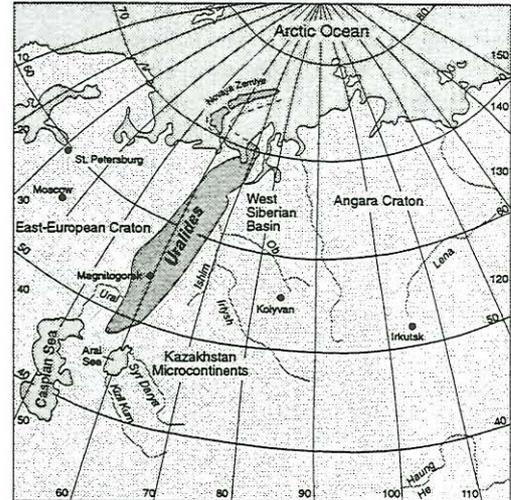
Projekt Europrobe

Die Grundidee des bereits 1989 ins Leben gerufenen Projektes EUROPROBE besteht in der multidisziplinären geowissenschaftlichen Untersuchung der Struktur und Herausbildung des Ural-Orogens. Neben der Schlüsselfrage nach dem Aufbau und der Bildung des Orogens stehen verschiedene weitere Aspekte im Vordergrund:

- Untersuchungen der anomalen Krustenmächtigkeit entlang des Orogens sind verbunden mit der Fragestellung nach Bildung und Erhalt von Gebirgsurzeln.
- Außergewöhnlich guterhaltene Ophiolite und Vulkanbogenbildungen, welche über die Gesamterstreckung der Gebirge hinweg zu finden sind, erlauben die Untersuchung von Prozessen im Zusammenhang mit paläozoischer ozeanischer Krustenbildung und -subduktion.
- Mechanismen der Hebung von Krustenmaterial aus großen Tiefen (50–80 km) durch Untersuchung hochmetamorpher Gesteinsaufschlüsse.
- Die gut belegte jurassische Einebnung und die relativ junge Hebung des Gebirgsgürtels ermöglichen Untersuchungen post-orogener Freilegungs- und Hebungsprozesse.
- Geophysikalische Untersuchungen sollen eine generelle Möglichkeit schaffen, oberflächengeologische Elemente mit krustalen Strukturelementen in plausible Beziehungen zu setzen.

Projekt URSEIS

Das Uraliden-Projekt fußt auf einer koordinierten, multidisziplinären Forschungsarbeit zur Untersuchung der geowissenschaftlichen Natur und Geschichte des Urals. Umfassende Arbeiten zum raumzeitlichen Gefüge des Urals sollen den Wissensstand im Hinblick auf Struktur und tektonische Entwicklung verbessern und Schlüsselinformationen über die Bildung und den Erhalt von Gebirgsurzeln liefern. Eine große Anzahl geologischer, geophysikalischer und geochemischer Forschungsprojekte wurde geplant und absolviert.



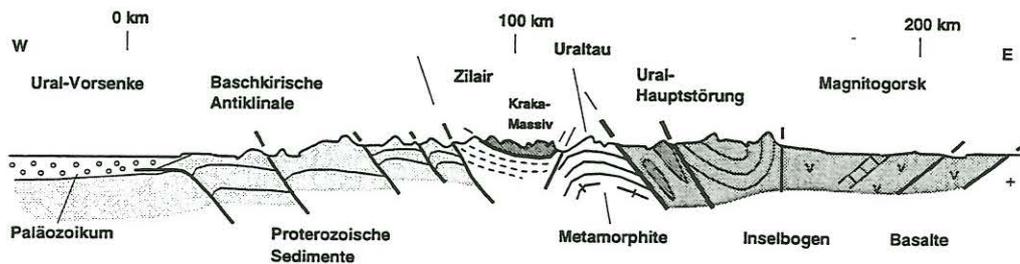


Abbildung 1.1: Geologischer Schnitt längs des Profils (nach (ECHTLER 1996)).

Eine der weltweit umfassendsten tiefenseismischen Untersuchungen wurde 1995 im Rahmen des URSEIS-Experiments durchgeführt. Die wesentlichen Ziele dieses Projektes bestehen in der Herstellung von Zusammenhängen zwischen Oberflächengeologie und Strukturen in Unterkruste und Oberem Mantel. Insbesondere interessieren Verknüpfungen zwischen paläozoischer Tektonik und der Entwicklung und Stabilisierung der Krustenwurzel.

Die Magnetotellurik als Methode der elektromagnetischen Tiefenforschung kann in diesem Zusammenhang neben Seismik, Gravimetrie, Magnetik und Geothermie durch Nutzung eines weiteren petrophysikalischen Parameters zusätzliche Hinweise liefern.

2 Profil und instrumentelle Ausrüstung

Das Profil verläuft entlang des westlichen Teils der URSEIS-Trasse zwischen 56°17'E und 59°23'E. Wegen der erwarteten (und schließlich bestätigten) hohen Noisepegel im Gebiet um Magnitogorsk (Stahlindustrie) wurde dort vom URSEIS-Profil in südöstliche Richtung abgewichen (vgl. Abb. 2.1).

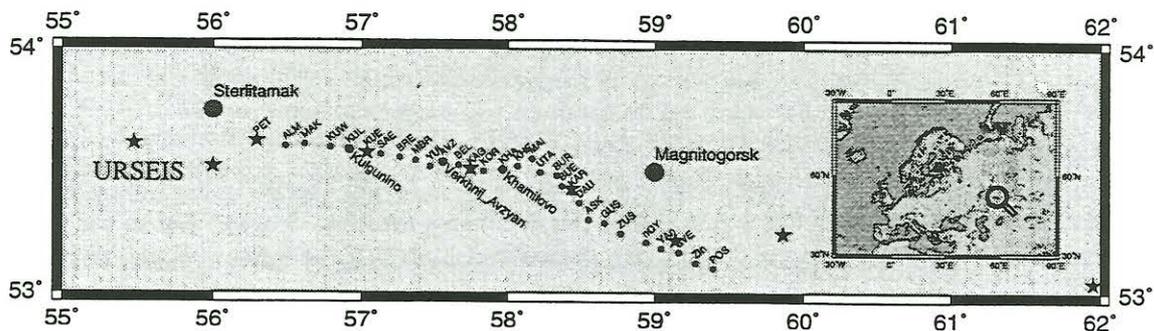


Abbildung 2.1: Profillage

Als magnetotellurische Registrierstationen kamen fünf Apparaturen des Typs PDAS (Teledyne) zum Einsatz. Die magnetischen Felder wurden mit jeweils drei METRONIX-Induktionsspulen, die elektrischen Felder über Silber-Silberchlorid-Elektroden mit einer Auslagenlänge von 50 m registriert. Die gewählte Abtastfrequenz von 20 Hz begrenzt den nutzbaren Periodenbereich auf 0.2 bis etwa 1000 s. Eine einheitliche Zeitbasis wurde über GPS-Synchronisation realisiert. Aus logistischen Gründen betrug die Registrierzeit der Einzelstationen lediglich 4 Tage. Auf die Einrichtung einer längerregistrierenden Basistation musste ebenso verzichtet werden.

3 Processing und Interpretation

Zum Processing der Zeitreihen gelangten überwiegend *remote-reference*-Auswertungen mittels robuster Methoden zur Anwendung (EGBERT und BOOKER 1986; EGBERT 1989). Während im Westteil des Profils bereits für *single-site*-Auswertung überwiegend erfreuliche Datenqualität vorlag, war die Qualität insbesondere der elektrischen Felder im östlichen Drittel des Profils derart mangelhaft, dass verwertbare magnetotellurische Impedanzen lediglich für 23 von 30 Stationen bestimmt werden konnten. Die östlichsten Stationen zeigen ausnahmslos das typische Bild von unter 45° ansteigenden ρ_a -Kurven bei gleichzeitiger Nulllage der Phasen. Die Ursache dafür ist in der zu optimistischen Abschätzung der elektromagnetischen Reichweite des Industriegebietes um Magnitogorsk zu finden. Andererseits musste der Profilverlauf wegen der generellen Unzugänglichkeit

des Geländes der Uralquertrasse folgen. Stark gestörte Stationen (z.B. KHA, AVZ, BUR) korrelieren daher auffällig mit den Ortschaften Khamitovo, Verkhniy Avzyan und Burangulovo.

3.1 Induktionspfeile

Abbildung 3.1 stellt die Induktionspfeile für 50 und 100 Sekunden im Profilverlauf dar. Offenbar liegen keine reinen 2D-Verhältnisse vor, was aus dem gleichmäßigen Richtungswechsel von süd- über nord- nach ostweisend ersichtlich ist. Eine Reihe von Stationen im Westteil des Profils zeigen eine deutliche Periodenabhängigkeit der Induktionspfeile, wie in Abb. 3.2 exemplarisch dargestellt wird.

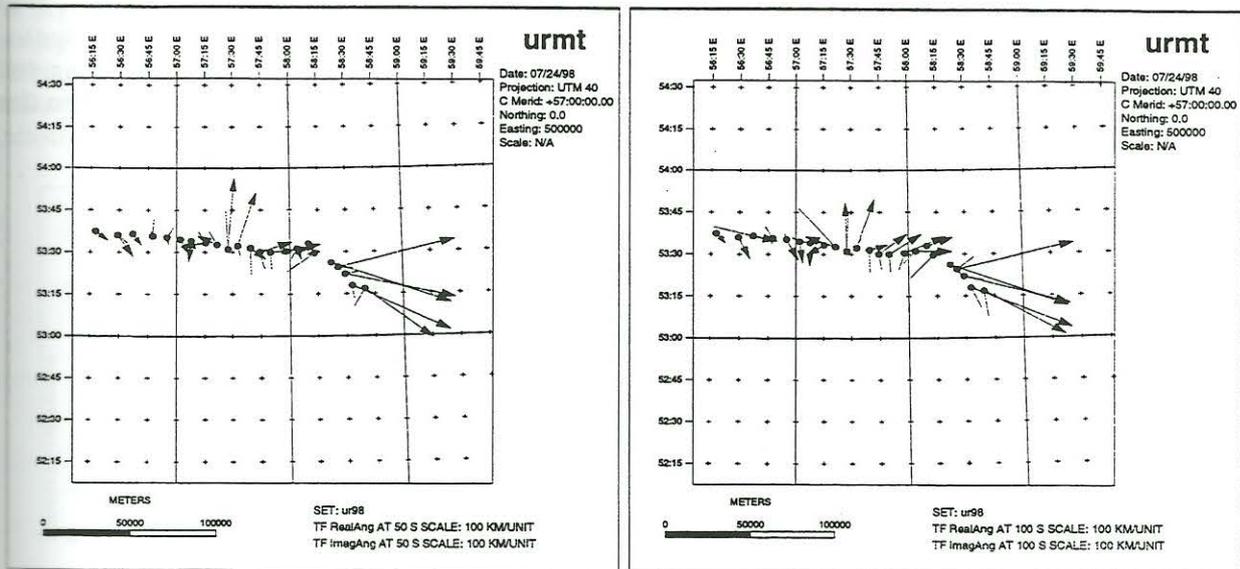


Abbildung 3.1: Induktionspfeile (Schmucker) für 50 bzw. 100 s (Realteil: \rightarrow , Imaginärteil: \dashrightarrow); Amplitude 1 entspricht 100 km

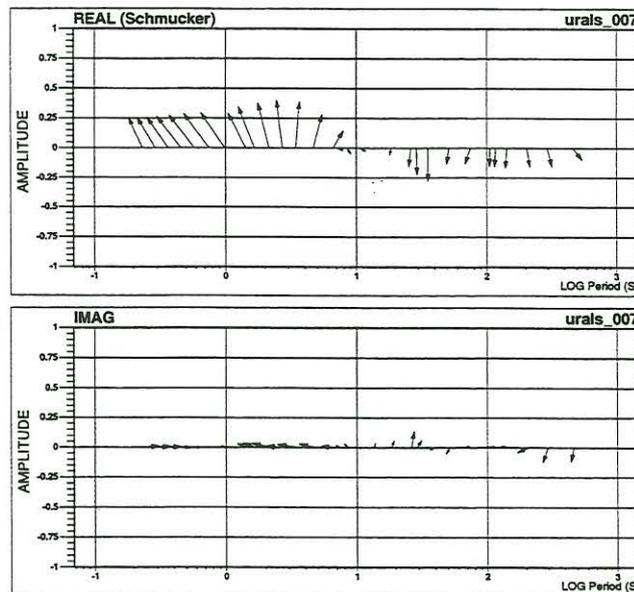


Abbildung 3.2: Induktionspfeile für Station SAE (007)

3.2 Magnetotellurische Übertragungsfunktionen

Die Bewertung der im Processing erhaltenen Übertragungsfunktionen hinsichtlich der Plausibilität zweidimensionaler Interpretation erfolgte zunächst nach verschiedenen Gesichtspunkten, die folgendermaßen umrissen werden können:

1. Untersuchung der Impedanzensorelemente – Skewness
2. Entzerrung des Tensors zur Ableitung der 2D-Impedanzen

Skewness und Swift-Winkel

Die Untersuchung der Skewness $S = (Z_{xx} + Z_{yy}) / (Z_{xy} - Z_{yx})$ liefert ein indikatives Maß für die Dimensionalität der untersuchten Struktur. Eine Analyse zeigt eine nahezu periodenunabhängige Abweichung von zweidimensionalen Verhältnissen mit Werten von 0.3 und darüber. Dies ist zunächst mit dem Verhalten der Induktionspfeile vereinbar.

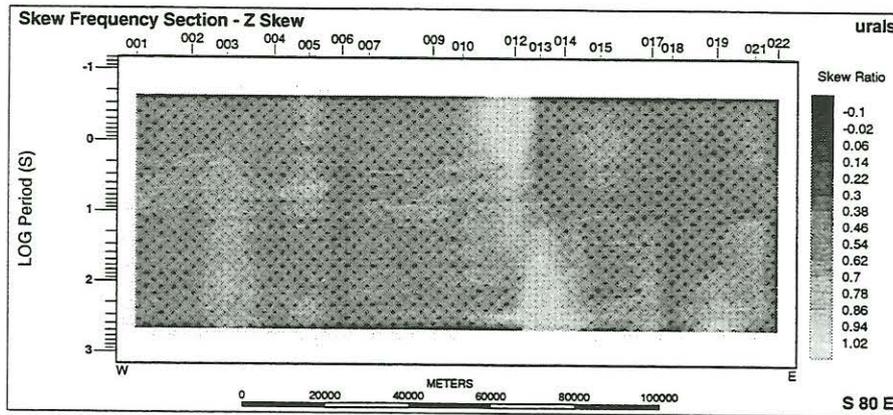


Abbildung 3.3: Pseudosektion der Skewness

Unter der Annahme zweidimensionaler Verhältnisse liefert die Minimierung der Summe der Hauptdiagonalelemente des Impedanztensors die Streichrichtung der Struktur.

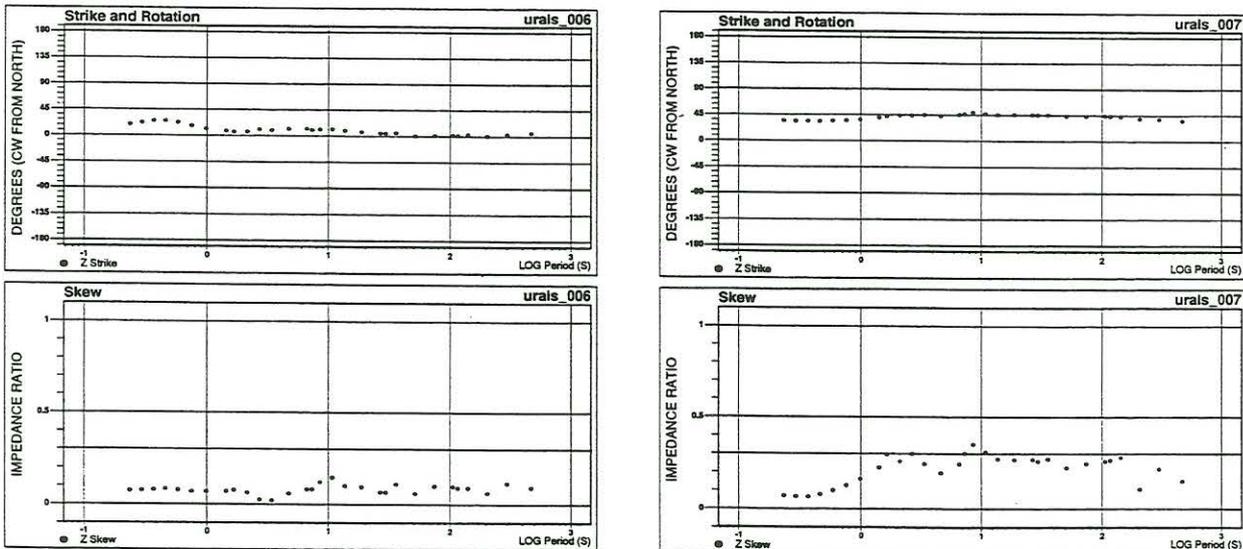


Abbildung 3.4: Swiftwinkel und konventionelle Skewness für die benachbarten Stationen KUE (006) und SAE (007)

Auf dem gesamten Profil ist eine Variation der Swiftwinkel von -30° bis 45° zu beobachten, was eine 2D-Modellierung in Frage stellen würde, da hierfür offenbar kein gemeinsames Koordinatensystem gefunden werden kann.

Groom-Bailey-Zerlegung

Mit der Zerlegung des Impedanztensors nach GROOM & BAILEY (1989) wird versucht, eine periodenabhängige Anpassung zwischen den 8 reellen Zahlen des Impedanztensors und 7 Parametern eines Modells zu erreichen, welches die Wirkung einer lokalen 3D-Struktur auf die regionale 2D-Struktur beschreibt. Die 7 Parameter sind im einzelnen die regionale Streichrichtung, die Nebendiagonalelemente des regionalen Impedanztensors sowie die Größen *twist* und *shear* zur Quantifizierung der Verzerrungseffekte der 3D-Struktur.

Die Ergebnisse der Groom-Bailey-Analyse (GB) sollen wiederum exemplarisch an Station SAE gezeigt werden. Im Gegensatz zur konventionellen Swiftwinkelbestimmung (mit einer Streichrichtung von etwa 45°) liefert die GB hier bei einer regionalen Streichrichtung von 12° die geforderte Periodenunabhängigkeit von *twist* und *shear*. Darüberhinaus ist zu beobachten, dass durch die Beseitigung der durch die lokale Struktur hervorgerufenen Anisotropie selbige in den ρ_a -Kurven stark verringert wird (vgl. Abb. 3.6).

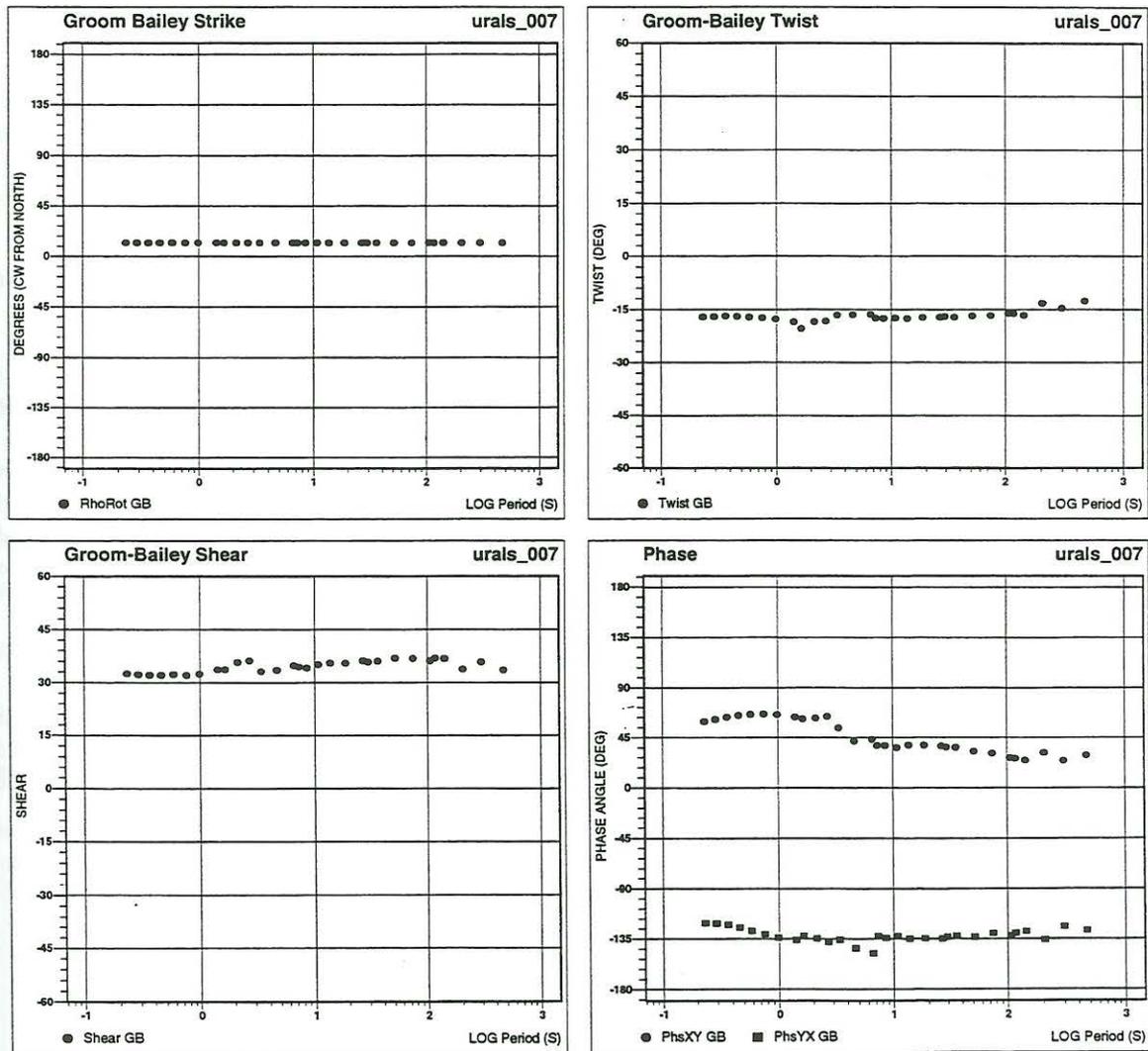


Abbildung 3.5: Regionale Streichrichtung, Twist, Shear und GB-Phasen für feste Streichrichtung (12°)

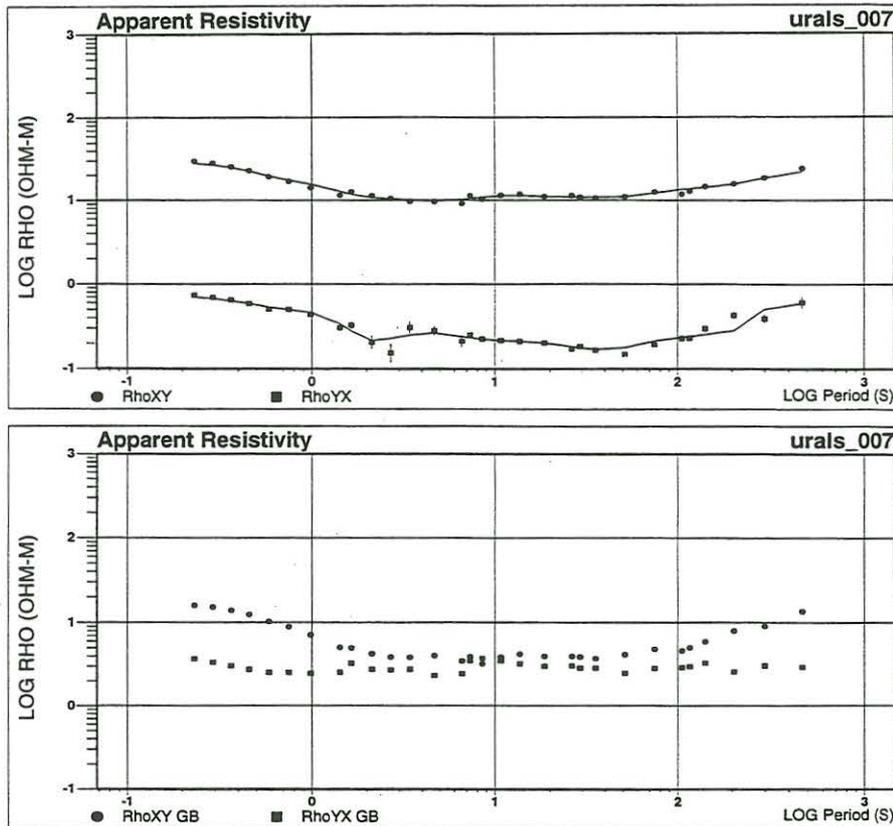


Abbildung 3.6: ρ_a -Kurven der Station SAE nach konventioneller Swiftrotation (oben) und GB-Analyse (unten)

Zusammenfassend ist zu erwähnen, dass nicht jede Station einheitliche GB-Parameter liefert. Im Profilverlauf ist ein tendenzielles Anwachsen der regionalen Streichrichtung von 12° auf 45° zu verzeichnen. Ob das zugrundegelegte Modell einer lokalen galvanischen 3D-Verzerrung Gültigkeit besitzt oder weitere zwei- oder dreidimensionale Strukturen induktiv wirksam sind, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht schlüssig belegt werden.

3.3 2D-Modellierung

Obwohl die bei der GB-Analyse gefundene regionale Streichrichtung nicht einheitlich ist und – auch aufgrund der Induktionspfeile – eine 2D-Interpretation ohne Berücksichtigung von Leitfähigkeitsanisotropie fragwürdig erscheint, wurde vorläufig versucht, ein 2D-Modell zu finden, welches die GB-Phasen beider Polarisationsrichtungen anpasst.

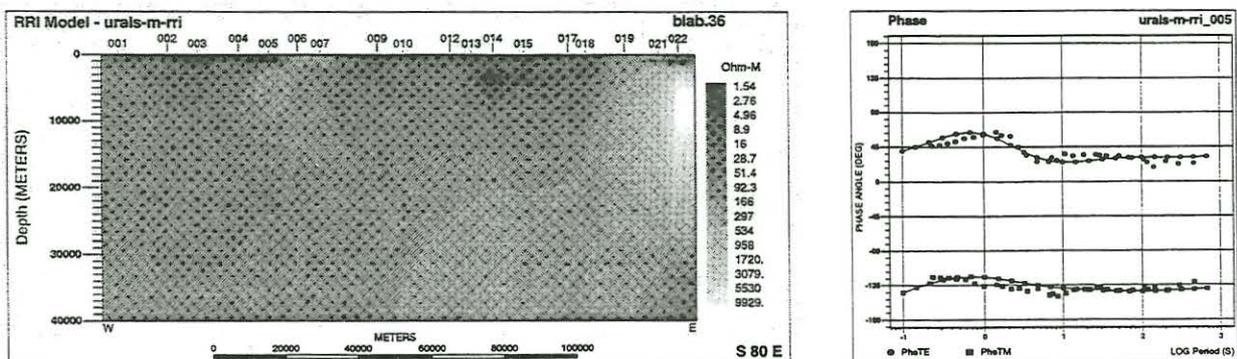


Abbildung 3.7: 2D-Modell und Phasen Anpassung für Station KUL (005)

Das mittels RRI (SMITH und BOOKER 1991) auf der Basis von 16 Perioden für die Phasen beider Polarisati-

onsrichtungen abgeleitete Modell zeigt mit einem RMS-misfit von 4.5 überwiegend gute Anpassung. Vergleicht man das Leitfähigkeitsmodell mit dem geologischen Schnitt in Abb. 1.1, fallen eine Reihe von Strukturen auf:

1. Im westlichen Profilteil (Stationen 001-005) zeichnet sich ein Abschnitt hoher elektrischer Leitfähigkeit ab, welcher geologisch mit proterozoischen Sedimenten der Baschkirischen Antiklinale korreliert.
2. Die allmähliche Zunahme der Krustenleitfähigkeit von Station 006 bis 018 findet an der strukturell prägenden Uralhauptstörung ihr Ende.
3. Weiter östlich (019 - 022) schließt sich eine Zone geringer Leitfähigkeit an, die aus dem geologischen Kontext heraus zunächst mit den dort anstehenden Basalten in Zusammenhang gebracht werden kann.

Die Ergebnisse seismischer Untersuchungen im Rahmen des URSEIS-Projektes lassen aufgrund der gefundenen Reflexionsmuster auf ein relativ intaktes Orogen schließen. Die Analyse des Reflexionscharakters im Profilverlauf berechtigt zur Abgrenzung des seismischen Profils in drei Teilbereiche. Eine dieser Grenzen stellt die Uralhauptstörung dar, welche auch magnetotellurisch zumindest im Ansatz nachgewiesen werden kann.

4 Zusammenfassung

Die zweidimensionale Inversion der entzerrten Phasen für beide Polarisationsrichtungen liefert ein Modell der Krustenleitfähigkeit, das mit der aus seismischen Experimenten abgeleiteten Zonengliederung korreliert. Die genaue Analyse der Rohdaten legt allerdings nahe, detaillierte Untersuchungen zu 3D-Leitfähigkeitsverhältnissen und Anisotropie einfließen zu lassen.

Dank

Die Autoren danken den Kollegen der Uralabteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften, Ekaterinburg, für die Unterstützung während der Feldarbeiten im Sommer 1996. Für die freundliche Bereitstellung der PDAS-Apparaturen sowie die vielfältige Unterstützung in Vorbereitung der Feldmessungen gilt den Kollegen der EM-Arbeitsgruppe des GFZ Potsdam Dank und Anerkennung. Das Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft als Teil eines Bündelantrages im Rahmen von URSEIS finanziell gefördert.

Literatur

- BÖRNER, R.-U., F. DONNER und C. OELSNER (1997). *URMT 96 - Magnetotelluric Investigation of the Southern Urals*. In: *EUG 9 Abstracts, Strasbourg, Frankreich*.
- DYAKONOVA, A. G. (1994). *Peculiarities of the construction tectonosphere of the Ural's Region according to electromagnetic data*. *Physics of the Earth*, N6:97-101. Moscow.
- ECHTLER, H.-P. ET AL. (1996). *Preserved collisional crustal structure of the Southern Urals revealed by vibroseis CMP profiling*. *Science*, 274:220-221.
- EGBERT, G. D. (1989). *Multivariate analysis of geomagnetic array data. II random source models..* *J. Geophys. Res.*, 94(B10):14249-15162.
- EGBERT, G. D. und J. R. BOOKER (1986). *Robust estimation of geomagnetic transfer functions*. *Geophys.J.R.astr.Soc.*, 87:173-194.
- GROOM, R. W. und R. C. BAILEY (1989). *Decomposition of the magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion*. *J. Geophys. Res.*, 94(B2):1913-1925.
- SMITH, J. T. und J. R. BOOKER (1991). *Rapid Inversion of Two- and Three-Dimensional Magnetotelluric Data*. *J. Geophys. Res.*, 96:3905-3922.