

N. Hoffmann, B. Fluche, W. Müller (BGR):

***Erste Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen in Nordostdeutschland
- ein Statusbericht***

Vorbemerkungen:

In Nordostdeutschland wurden magnetotellurische Messungen in den 60er Jahren bis Anfang der 70er Jahre durch den ehemaligen VEB Geophysik Leipzig auf einem Profil Rügen - Harz sowie auf einem kürzeren Profil in Mecklenburg-Vorpommern durchgeführt. In den späteren Jahren erfolgte die wissenschaftliche Bearbeitung der magnetotellurischen Ergebnisse vorwiegend an der Bergakademie Freiberg unter Leitung von Prof. G. PORSTENDORFER. Eine Zusammenfassung und Bewertung der erzielten Ergebnisse publizierten in jüngster Zeit GÖTHE (1990) und RITTER (1990).

Die Tiefensondierungen ergaben jedoch bald, daß es unter dem schlechtleitenden Zechsteinsalinar im Präsalinar gutleitende Schichten gibt (PORSTENDORFER, 1975), die entsprechend den damals vorhandenen Tiefbohraufschlüssen als gutleitende Zonen im sedimentären Rotliegenden gedeutet wurden. Eine Zuordnung der gesamten Präzechstein-Restlängsleitfähigkeit auf das sedimentäre Rotliegende würde jedoch bedeuten, daß mit hohen Porositäten und Mächtigkeiten gerechnet werden müßte, die durch Bohrungen bisher nicht bestätigt werden konnten. Daher wurde die Ursache für höhere Restlängsleitfähigkeiten bereits auch früher in tieferen Schichtenfolgen gesucht. Als derartige Schichten könnten die z.T. hoch inkohlten organischen Substanzen des Karbon und/oder thermisch aktivierte Gesteine in der tieferen kristallinen Kruste und im oberen Mantel in Frage kommen (PORSTENDORFER et al., 1976).

Flächendeckende magnetotellurische Sondierungen in Nordwestdeutschland, die in den Jahren 1971 bis 1985 von der BGR Hannover durchgeführt wurden (Abb. 1), führten zu neuen Erkenntnissen über die Existenz und Deutung von Restlängsleitfähigkeiten (KNÖDEL et al. 1978, LOSECKE et al. 1979).

Nach neueren Untersuchungen an präpermischen Proben aus Tiefbohrungen wird eine Ursache für das Auftreten gutleitender Schichten in der regionalen Verbreitung mächtigerer unterkarbonischer und/oder oberkambrisch/unterordovizischer Schwarzschiefer, die einen hohen Kohlenstoff- und Pyritgehalt aufweisen, gesehen (JÖDICKE 1990, HOFFMANN & JÖDICKE 1993). Ziel der Neuvermessung in Nordostdeutschland ist es, Gebiete mit erhöhten elektrischen Restlängsleitfähigkeiten im tieferen präpermischen Untergrund nachzuweisen, die möglicherweise auf die Existenz von altpaläozoischen Schwarzschiefern zurückzuführen sind. Diese können als potentielle Muttergesteine für die Entstehung von Tiefengas angesehen werden. Es ist unbestritten, daß zur Erklärung erhöhter elektrischer Leitfähigkeiten auch andere Ursachen eine Rolle spielen können (JÖDICKE 1990).

Feldmessungen:

Im Zeitraum von Februar bis Mai 1993 wurden entlang der geplanten Meßprofile (Rügen - Flechtinger Scholle, Usedom - Woldegk sowie Raum Wittenberge) von der Fa. Metronix GmbH (Braunschweig) und Geophysik GGD (Leipzig) magnetotellurische Messungen im Auftrag durchgeführt. Die Messungen wurden im Frühjahr 1994 um weitere zwölf Stationen im Raum Wismar-Schwerin sowie entlang eines Profils von Wismar nach Lüneburg ergänzt. Somit liegen Registrierungen von 57 Meßorten vor (Abb. 1).

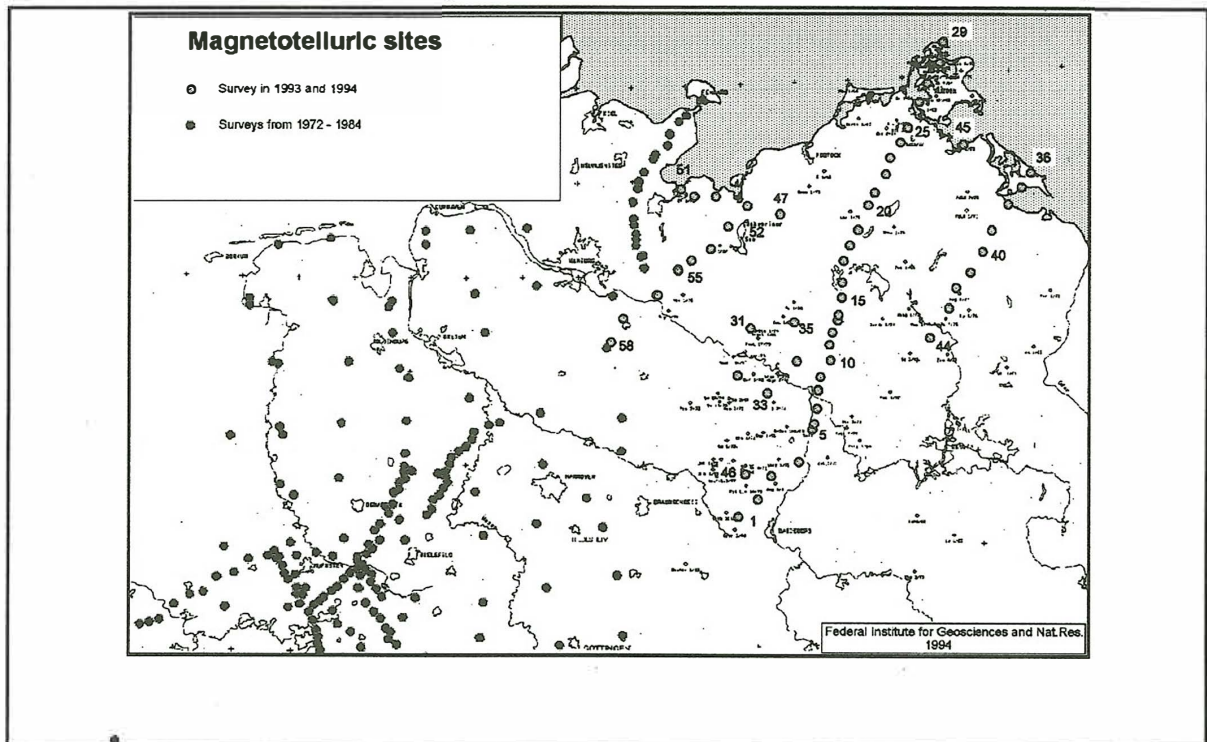


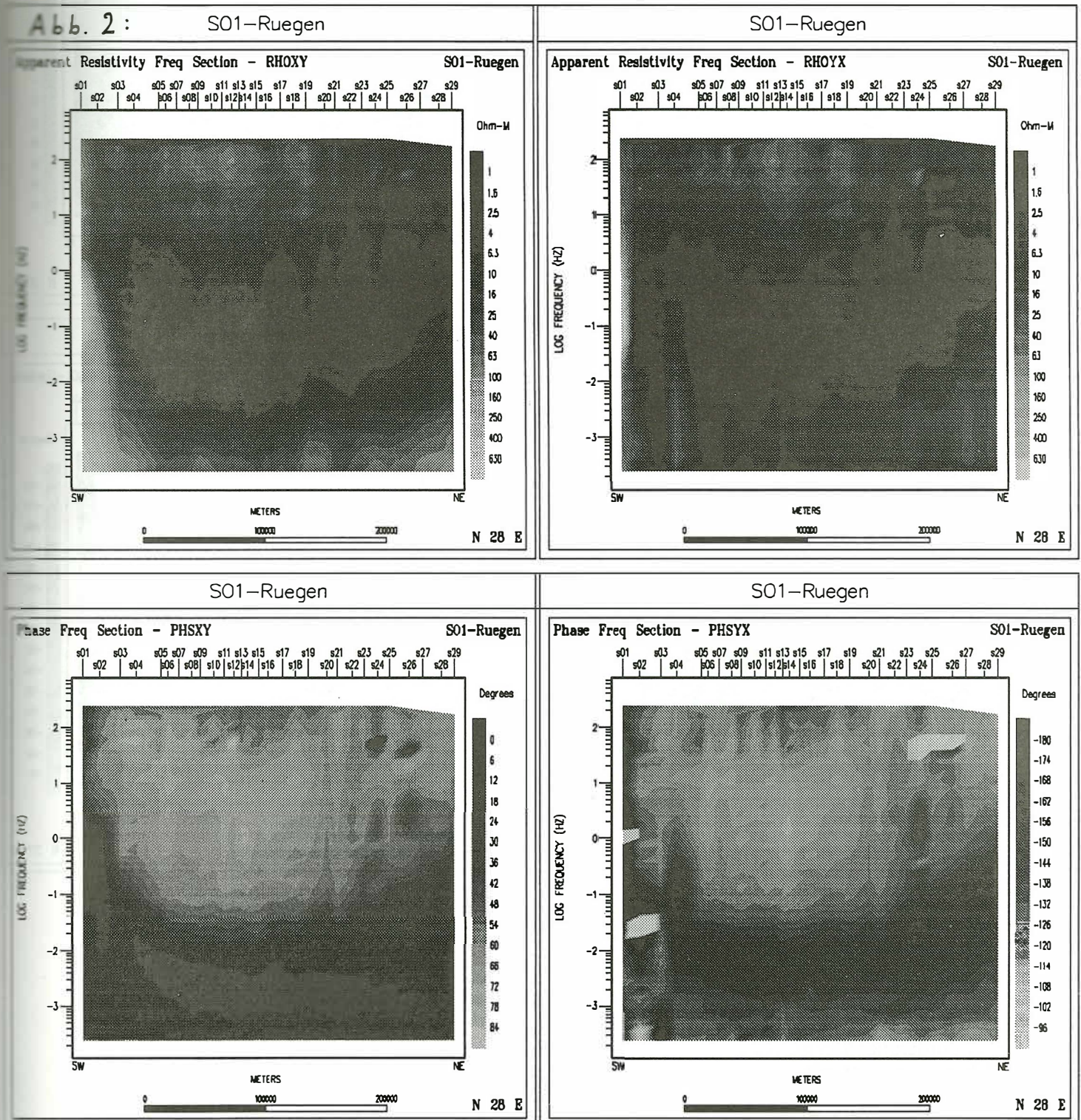
Abb. 1: Übersichtskarte der magnetotellurischen Messungen. Die neuen Stationen mit den Messungen von 1993 und 1994 sind durch Nummern gekennzeichnet, auf die im weiteren Text Bezug genommen wird.

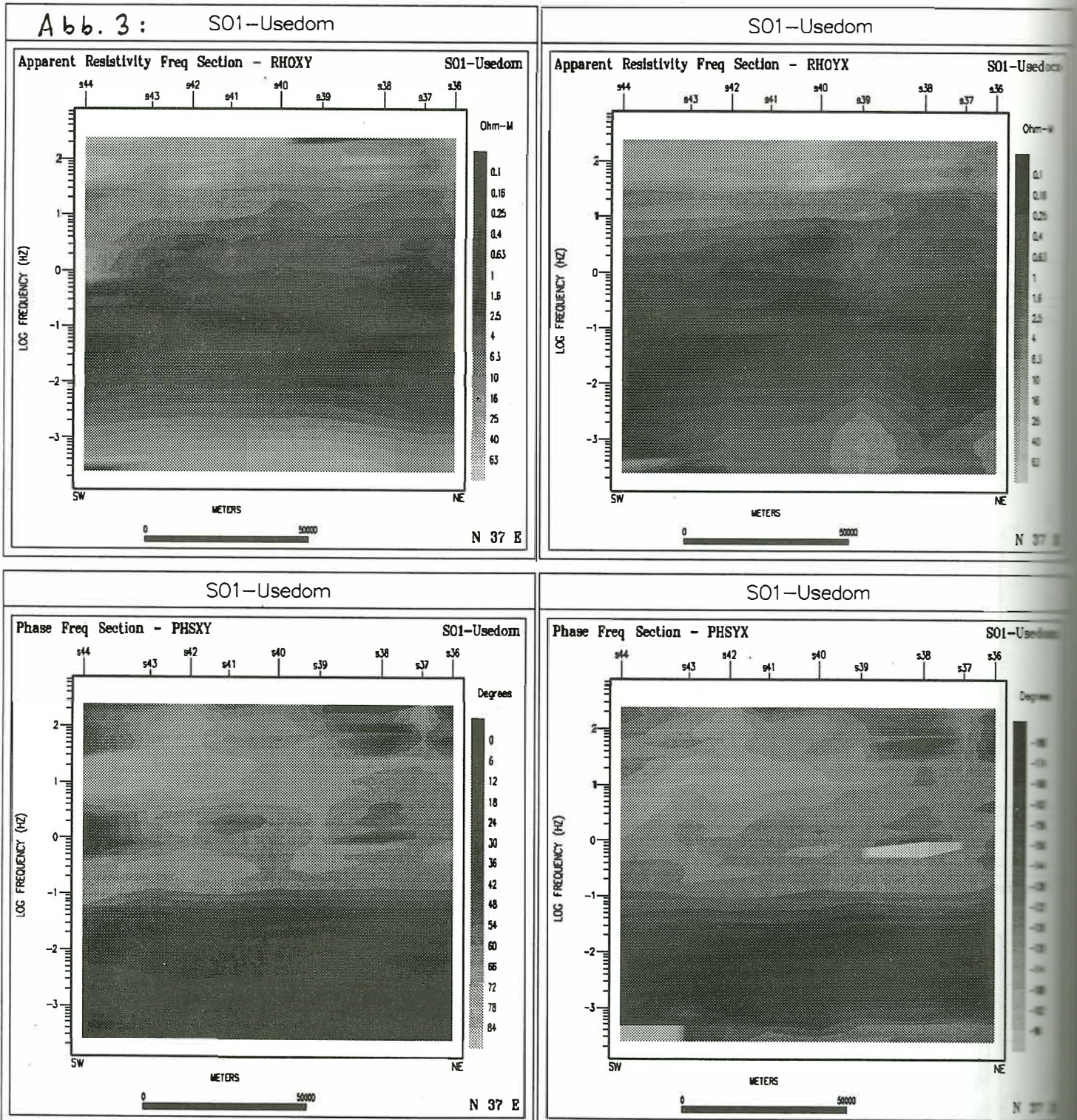
Die durchschnittliche Registrierdauer betrug etwa eine Woche pro Meßpunkt; es wurden bis zu fünf Meßstationen gleichzeitig eingesetzt. Die Datenqualität war - abgesehen von drei Stationen, die glücklicherweise am Rand der Meßprofile lagen - zumindest brauchbar, häufig gut bis sehr gut. Die Rohdaten wurden von der Fa. Metronix prozessiert und standen uns für die weitere Auswertung in Form von Spektren zur Verfügung. Diese wurde mit der Auswertungs- und Interpretationssoftware GEOTOOLS durchgeführt.

Bisherige Ergebnisse:

Der Verlauf der großräumigen geologischen Strukturen (Abb. 10) läßt erwarten, daß die Streichrichtung im Süden des Profils genau Ost-West ist. Durch die um etwa 20° geneigte strike-slip-Störung dürfte dies dort allerdings in der Bestimmung der Vorzugsrichtung zu Schwierigkeiten führen (3D-Effekte). Einfacher sieht es im Bereich der Insel Rügen aus: Hier konnte aus Impedanz- und Tipperwerten ein Drehwinkel von ca. 20° (bzw. -70°) ermittelt werden, der auch als Wert für die Drehung des gesamten Profils angesetzt wurde.

Abb. 2 zeigt den Verlauf des scheinbaren Widerstandes ρ_a und der Phase φ entlang des Rügen-Profils, in Abb. 3 sind dieselben Parameter für das Usedom-Profils dargestellt. Dabei wurden die Daten auf die bereits erwähnte Vorzugsrichtung gedreht.





Der Verlauf von ρ_a und φ hat die für eine Beckenstruktur typische Charakteristik: Bis zu einer Periode von einigen hundert Sekunden ähnelt sich der Verlauf in beiden Polarisationen. Für die langen Perioden steigt ρ_{axy} an, während ρ_{ayx} betragsmäßig unterhalb von ρ_{axy} bleibt. Prägend für den Gesamt-Widerstandsverlauf ist das Nordostdeutsche Sedimentbecken, das offenbar in der Lage ist, tiefer liegende gute Leiter abzuschirmen, so daß zur Auflösung solcher Strukturen hohe Anforderungen an die Datenqualität gestellt werden müssen. Einen ähnlichen Verlauf weist auch das Usedom-Profil auf.

Abb. 4 zeigt einige ausgewählte ρ_a -Kurven im Norden des Meßgebietes: An den Stationen 26 bis 29 ist mit zunehmender Deutlichkeit ein lokales Minimum im Verlauf von ρ_{axy} zu erkennen. Dies deutet auf einen guten Leiter im tieferen Untergrund hin. Das gleiche gilt für die beiden nördlichsten Stationen 36 und 37 im Bereich der Insel Usedom (hier nicht abgebildet).

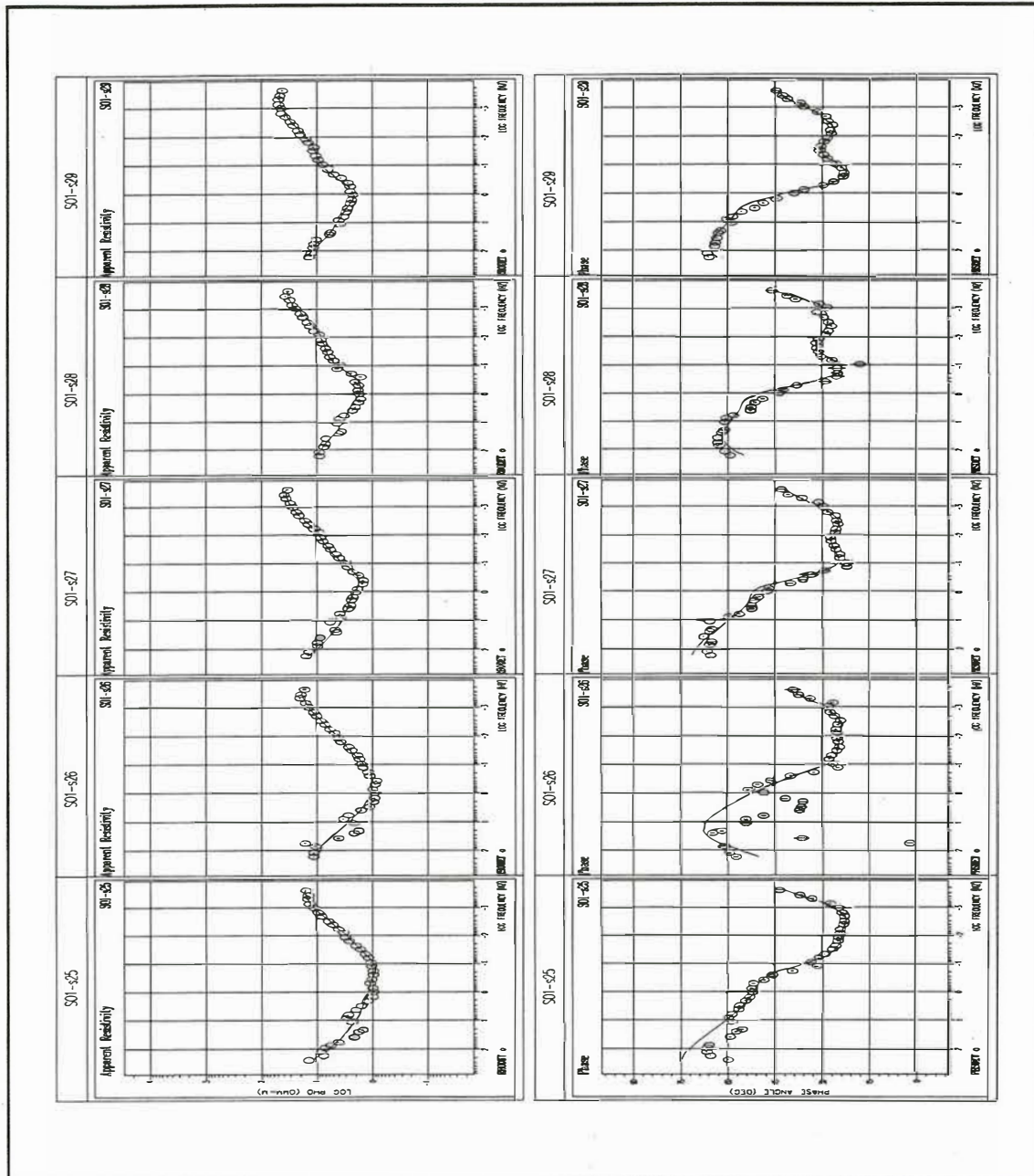


Abb. 4: Magnetotellurische Sondierungskurve für den scheinbaren Widerstand ρ_a und die Phase φ an den fünf nördlichsten Stationen des Rügen-Profiles. Auf einen guten tief liegenden Leiter deuten sowohl das lokale Minimum in der ρ_a -Kurve als auch - im direkten Zusammenhang damit - die deutliche Aufwölbung in den Phasenkurve im Periodenbereich von etwa 100 s - 500 s hin. Dieser Effekt beginnt bei Station 26 und nimmt nach Norden hin zu.

Die ρ_a -Kurven sämtlicher Stationen wurden mit dem OCCAM-Verfahren invertiert, um die Konsistenz von ρ_a und φ zu überprüfen; dieser Test verlief in den meisten Fällen erfolgreich (Abb. 5):

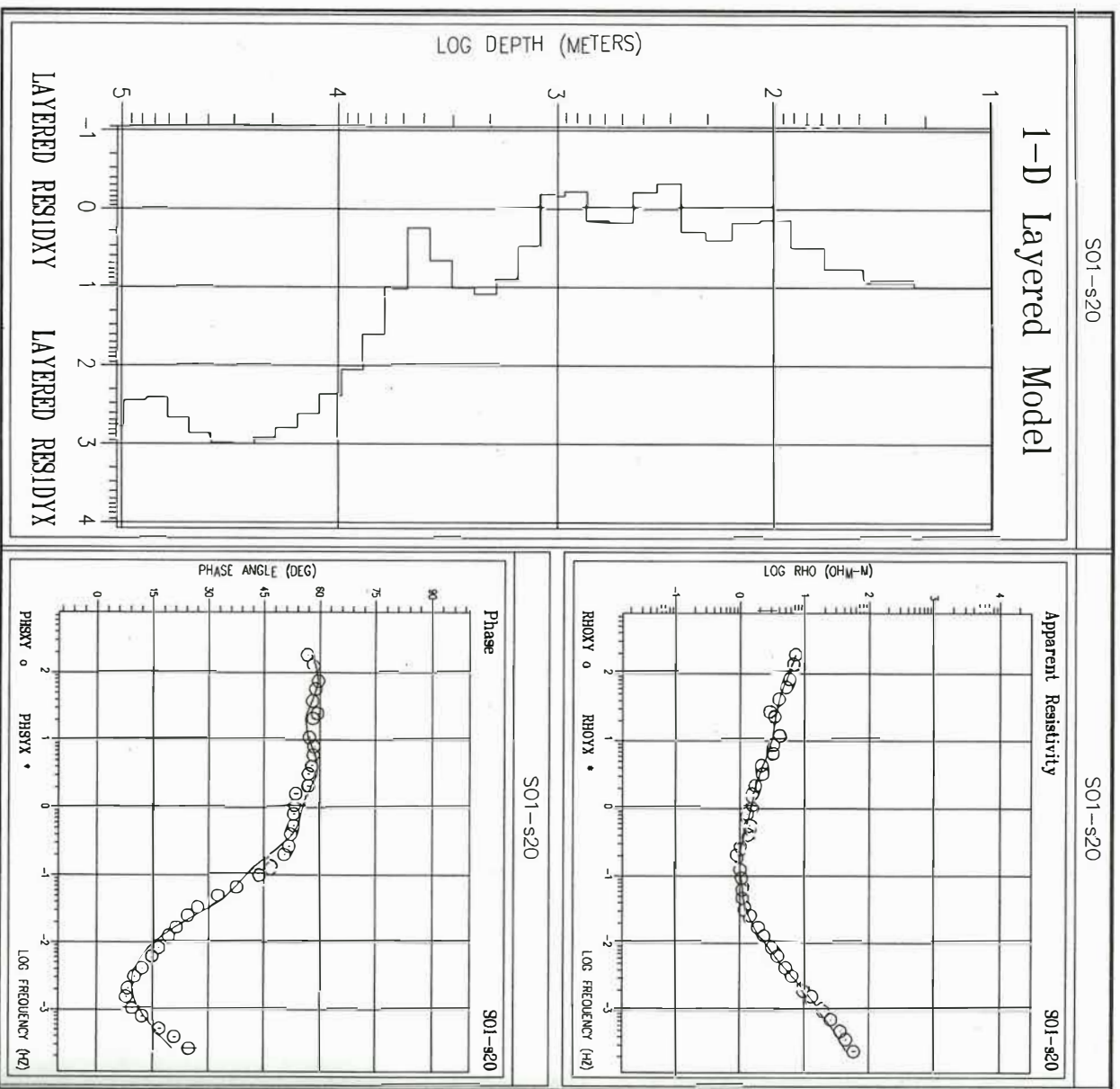


Abb. 5: Inversion der ρ_a -Kurve nach OCCAM für eine Station (Nr. 20) auf dem Rügen-Profil zur Überprüfung der Konsistenz zwischen den Kurven des scheinbaren Widerstandes und der Phase. Die hier gezeigte gute Übereinstimmung ist an fast allen ungestörten Stationen gegeben.

Darüber hinaus wurden für dieses Profil die *integrierten Restlängsleitfähigkeiten* unterhalb des Zechsteins bestimmt. Dazu wurden - beim kristallinen Basement beginnend - für die einzelnen stratigraphischen Schichten das Produkt aus Schichtmächtigkeit d_i und der Leitfähigkeit $\sigma_i = 1/\rho_i$ berechnet und additiv nach oben aufgetragen (Abb. 7). Dabei ist deutlich zu sehen, daß im Bereich der Insel Rügen der Hauptbeitrag zu der Gesamt-Restlängsleitfähigkeit bereits von den "untersten" altpaläozoischen Schichten stammt. Nach Süden hin nimmt die Leitfähigkeit generell ab, wobei sich die leitfähigen Schichten offenbar zu immer geringeren Tiefen verlagern.

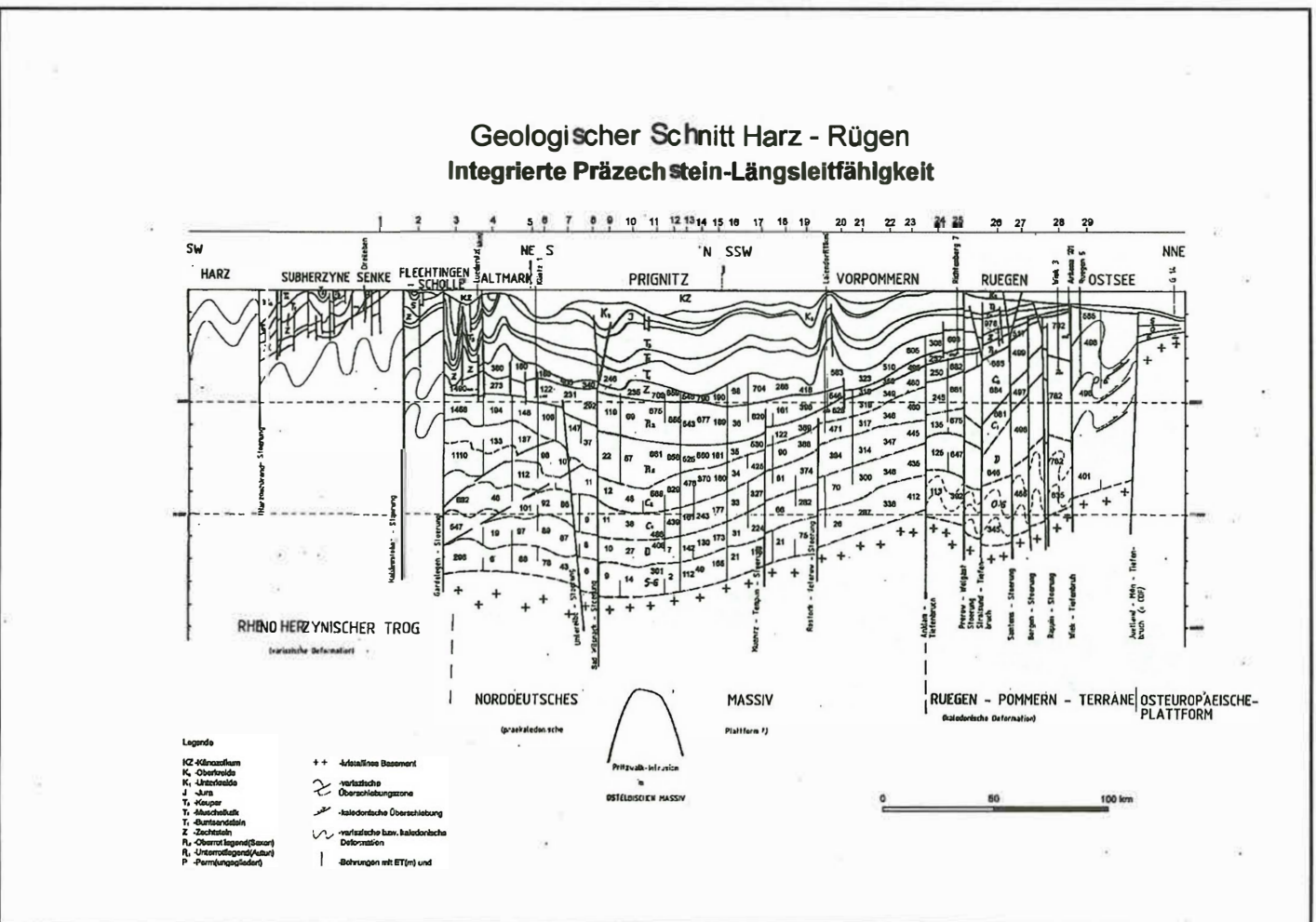


Abb. 7: Restlängsleitfähigkeiten des Präzechstein in Siemens

Da die relativ mächtige Sedimentbedeckung mögliche gute tieferliegende Leiter abschirmt, müssen diese eine gewisse Mindestmächtigkeit bzw. einen entsprechenden Leitwert besitzen, um erkannt zu werden. Dies ist nur bei einer hohen Datenqualität möglich.

Recht deutlich ragt der Bereich des Pritzwalk-Massivs (Potentialfeldanomalie) heraus, wo aufgrund der Inversionsergebnisse im Bereich Oberkarbon-Unterrotliegend eine im Vergleich zur Umgebung erhöhte Leitfähigkeit angenommen werden kann. Was dies für die geologische Interpretation der Pritzwalk-Anomalie zu bedeuten hat (Manteldiapir oder Aufwölbung der Moho), die auch mit magnetischen, gravimetrischen und tiefenseismischen Messungen nachgewiesen wurde (HOFFMANN & STIEWE 1994), muß noch anhand weiterer Meßergebnisse modelliert werden.

Für das Usedom-Profil wurde ebenfalls eine 1D-MARQUARDT-Inversion durchgeführt, wobei hier allerdings - noch - keine Schichtgrenzen vorgegeben wurden. Dennoch lassen die Ergebnisse Rückschlüsse auf die Existenz eines - allerdings in zu großer Tiefe liegenden - guten Leiters zu (Abb. 8). Dies muß wie beim Rügen-Profil durch die Einbeziehung von stratigraphischen Informationen noch präzisiert werden:

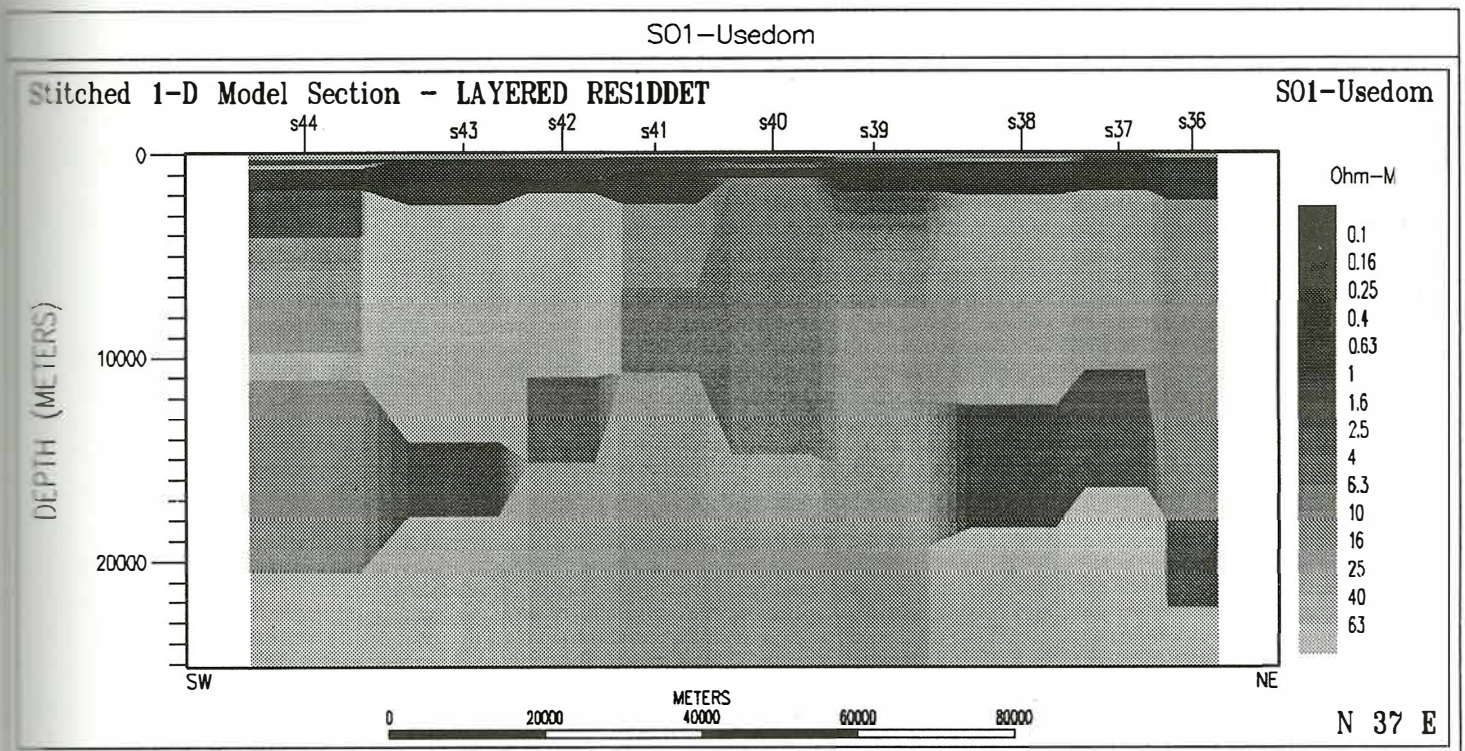


Abb. 8: Eindimensionale Widerstandsmodelle entlang des Usedom-Profiles

Die Auswertung des vertikalen Magnetfeldes H_z erfolgt als Darstellung von Induktionspfeilen: Hier sind die Perioden 256s, 1024s und 4096s ausgewertet (Abbn. 9a-c). Während die kürzeste Periode zeigt, daß- wie erwartet - im oberen Tiefenbereich des Nordostdeutschen Beckens eine weitgehend eindimensionale Leitfähigkeitsverteilung vorherrscht, lassen die längeren Perioden auf heterogene Leitfähigkeitsverhältnisse schließen. Als Ursache kommen möglicherweise Prozesse, die mit der Entstehung des Norddeutschen Beckens in Zusammenhang stehen, in Betracht (BACHMANN & HOFFMANN 1994).

Die Induktionspfeile haben bei langen Perioden zum Teil recht große Pfeillängen, und es ist vor allem auf dem Rügen-Profil ein großräumiges Umklappen der Richtungen zu erkennen. Diese Ergebnisse stimmen sehr gut mit denen von PORSTENDORFER und GÖTHE aus den 60er Jahren überein. Da die Induktionspfeile immer vom guten Leiter wegzeigen, läßt ihre Richtung auf einen gutleitenden Bereich (Norddeutsches Becken) schließen, der im Norden und im Süden von Gebieten mit geringerer Leitfähigkeit begrenzt wird. Besonders interessant ist der Verlauf der Induktionspfeile an den fünf singulären Stationen im Raum Wittenberge: Die beiden nördlichen Stationen zeigen deutlich kürzere Pfeillängen als die drei südlichen, was auf eine trennende Leitfähigkeitsgrenze hindeutet. Eine Ursache hierfür könnte in Zusammenhang mit "strike-slip"-Bewegungen am Arendsee-Tiefenbruch (Abb. 10) stehen.

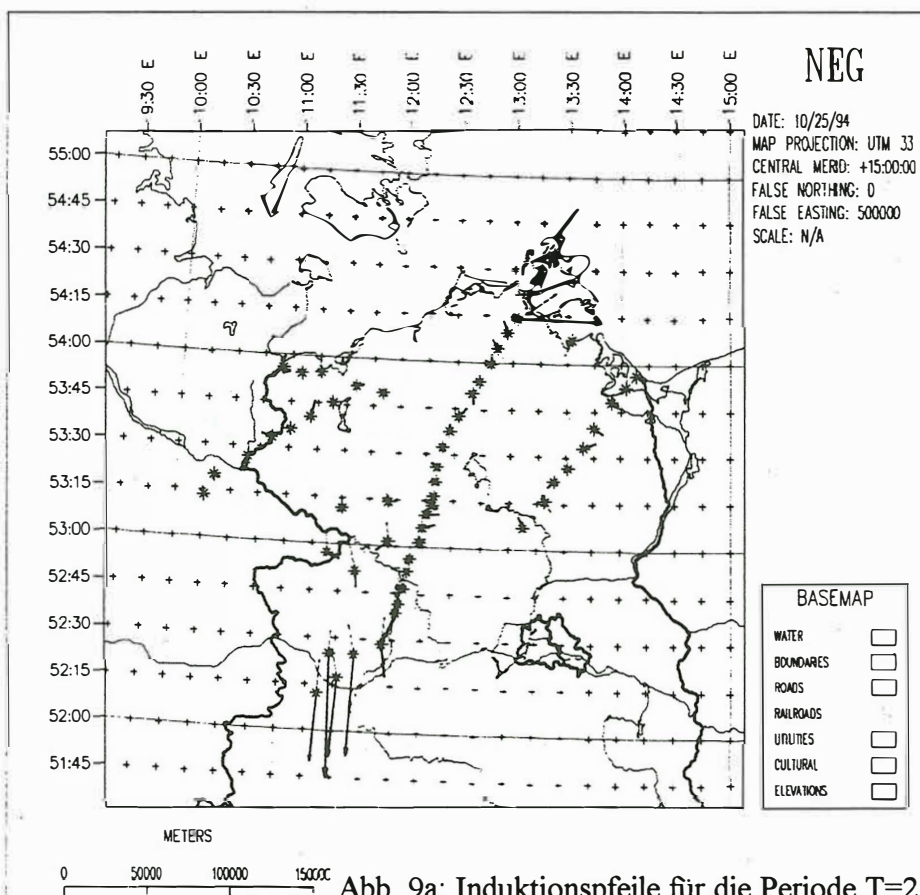


Abb. 9a: Induktionspfeile für die Periode $T=256$ s

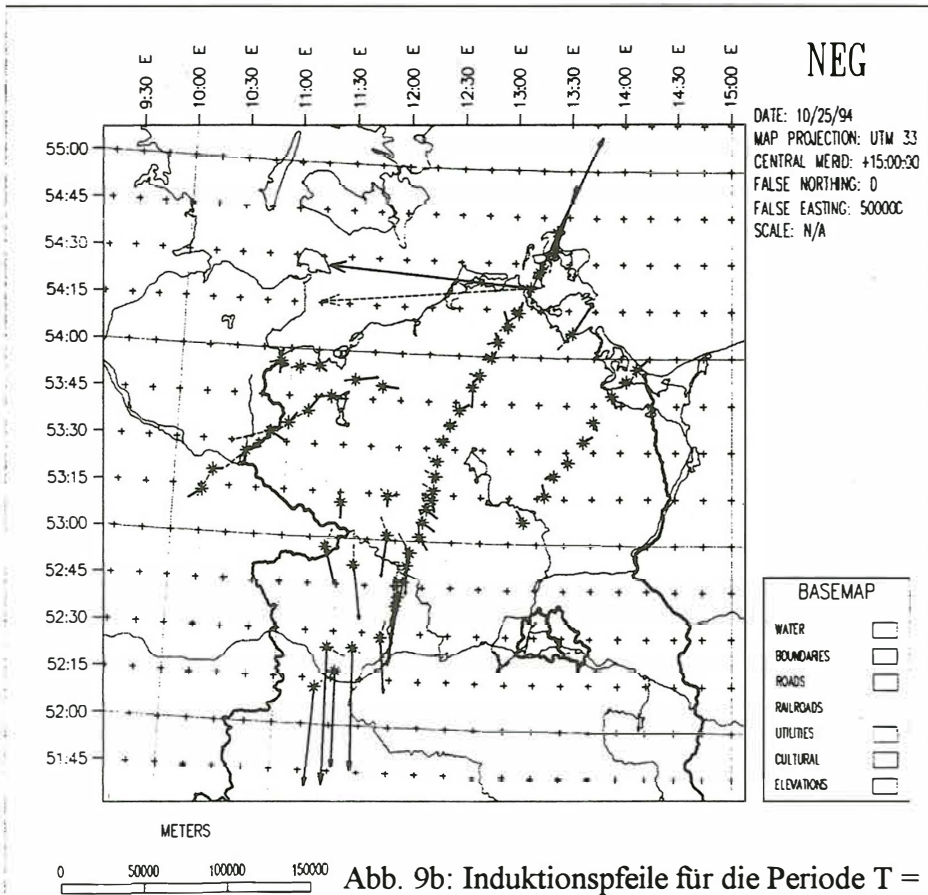


Abb. 9b: Induktionspfeile für die Periode $T = 1024$ s

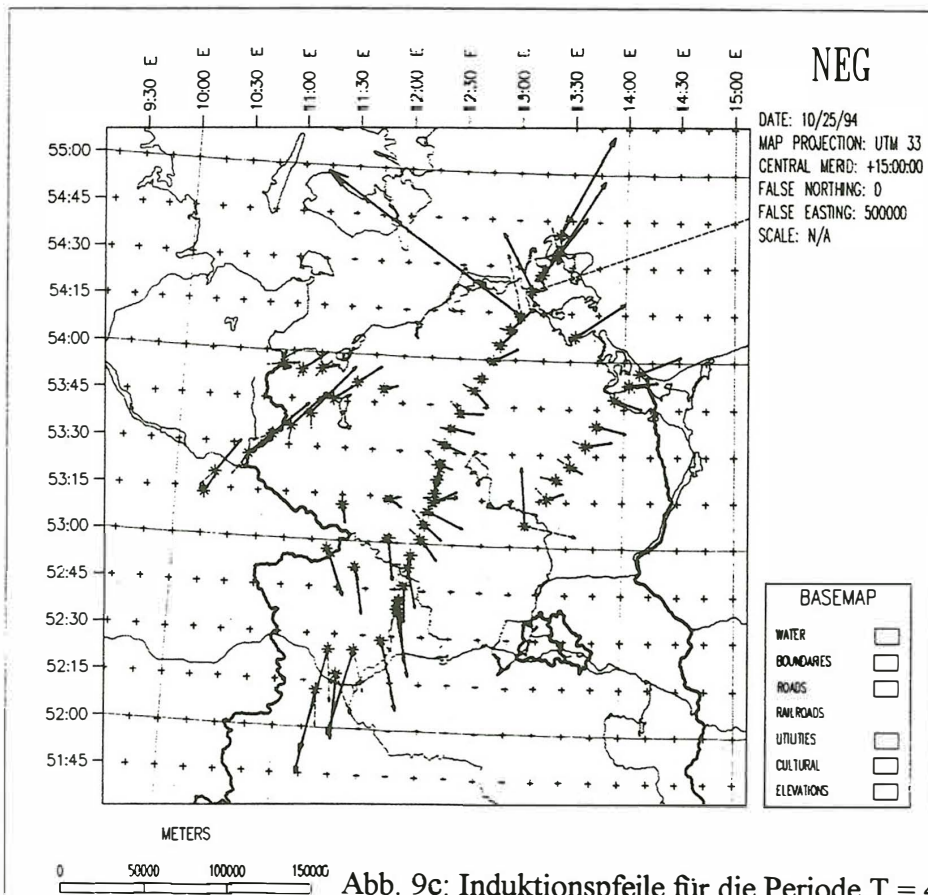


Abb. 9c: Induktionspfeile für die Periode $T = 4096$ s

Eine erste geologische Modellierung von MT-Ergebnissen

Die integrative Modellierung der geologisch-geophysikalischen Daten aus dem tieferen Untergrund des Norddeutschen Beckens ergibt, daß das Basement als eine eigenständige tektonische Einheit zwischen dem Rand der Osteuropäischen Plattform (OEP) und einer das Varistikum im Süden begrenzenden Mitteleuropäischen Suture (FRANKE 1990) anzusehen ist (Abb. 10). Für diese tektonische Einheit finden sich in der neueren internationalen Literatur verschiedene Bezeichnungen (Norddeutsches Massiv - HOFFMANN et al. 1989, East Avalonia - u.a. TORSVIK & TRENCH 1991, Cadomia - MEISSNER 1992). Einigkeit besteht jedoch darin, daß diese Einheit weitgehend als präkambrisch konsolidiertes (cadomisch?) Terrane anzusehen ist, das im Verlauf des Altpaläozoikums von Süden (Gondwana) an die OEP andockt wurde. Unterschiedliche Ansichten ergeben sich hinsichtlich der tektonischen Linie, die die Grenze zwischen dem Terrane und der OEP widerspiegelt.

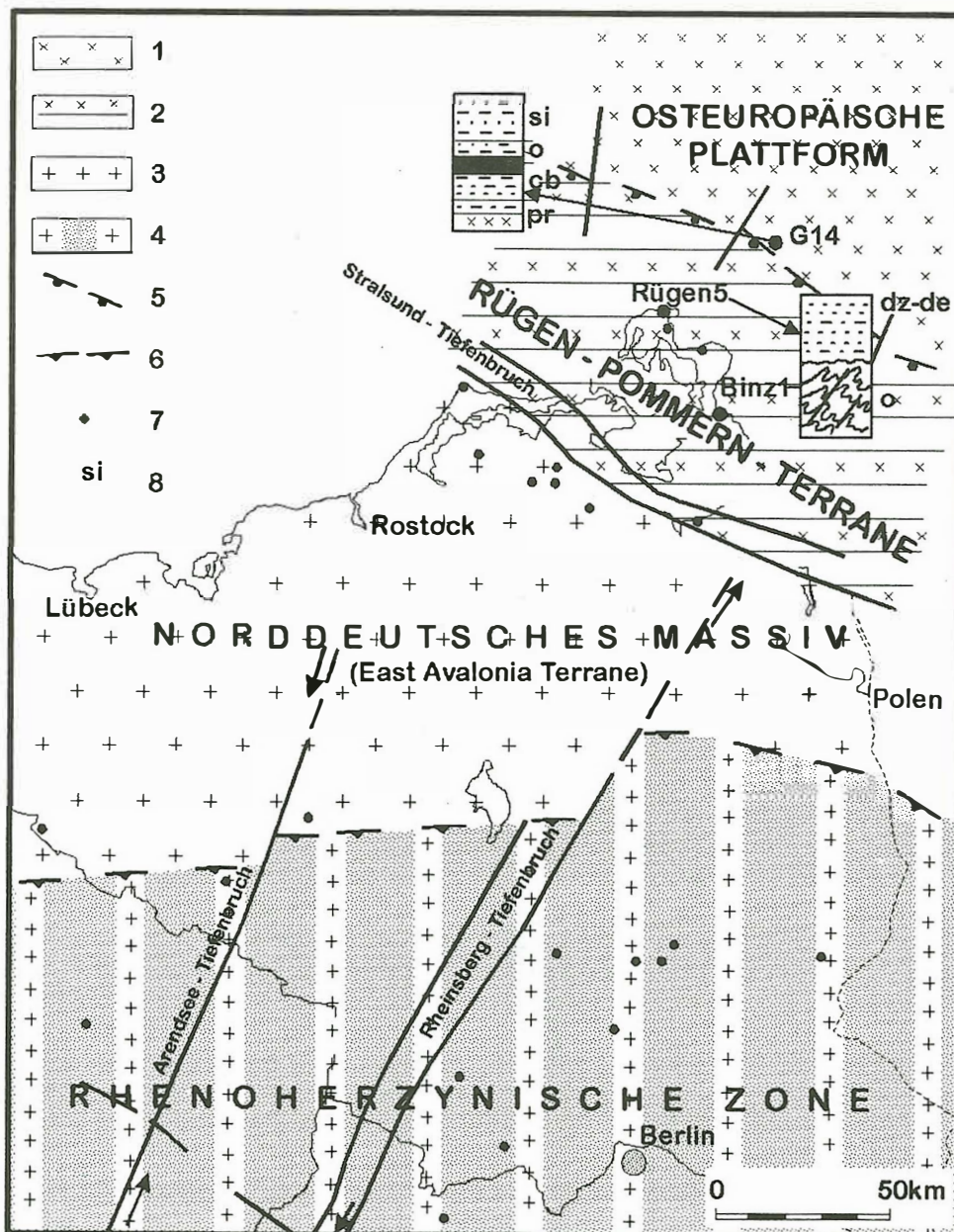


Abb. 10: Schema der tektonischen Felderung nach dem Alter des Grundgebirges (Erläuterungen umseitig)

Erläuterungen zu Abb. 10

- 1 - Basement präkambrisch konsolidiert
- 2 - kaledonisches Faltingsgebiet (Überschiebungsgürtel?), Basement vermutlich präkambrisch konsolidiert (=OEP)
- 3 - prävariszisch konsolidiertes Basement (cadomisch?), überlagert von kaledonischen(?) und variszischen Plattformsedimenten, Oberkarbon in molassischer Entwicklung
- 4 - variszisches Faltingsgebiet (Überschiebungsgürtel), Oberkarbon mit flyschoider Entwicklung, prävariszisch konsolidiertes Basement (cadomisch?) des Norddeutschen Massivs, überlagert von kaledonischen Plattformsedimenten (?)
- 5 - Außenrand der kaledonischen Faltings- und Überschiebungs-(Stapelungs-)Tektonik (CDF)
- 6 - Außenrand der variszischen Faltings- und Überschiebungs-(Stapelungs-)Tektonik (VDF)
- 7 - wichtige Präpermbohrungen, pr - Präkambrium, cb - Kambrium, o - Ordovizium, si - Silur, dz-de - Ems-Eifel

Zu dieser Fragestellung können die MT-Ergebnisse möglicherweise einen Beitrag liefern: Es zeigt sich, daß auf Rügen im Teufenintervall von ca. 9-11 km (Abb. 5 u. 6) ein guter elektrischer Leiter vorhanden ist. In Analogie zu den Ergebnissen der Bohrung G14, die ca. 40 km nordöstlich von Rügen im Bereich der Ostsee abgeteuft wurde (FRANKE et al. 1994) und ca. 70 m oberkambrische/unterordovizische Schwarzschiefer mit hohem TOC-Gehalt (ca. 9%) und dispers verteilten Pyrit (ca. 23%) aufgeschlossen hat, könnte die gute elektrische Leitfähigkeit im tieferen Untergrund Rügens ebenfalls auf Schwarzschiefer zurückzuführen sein. Messungen an letzteren aus dieser Bohrung zeigen, daß nicht unbedingt reiner Graphit notwendig ist, um hohe Leitfähigkeiten zu erreichen. Die gemessenen Werte liegen bei max. 2 Ω m (JÖDICKE, pers. Mittlg.).

Die auf Rügen abgeteufte Bohrung Rügen 5 (ET 3892 m) und Binz 1 (ET 5220 m) haben ordovizische Sedimente in grauacknähhlicher Fazies aufgeschlossen, die tektonisch intensiv deformiert sind (KATZUNG et al. 1993). Diese werden faziesbedingt keine höheren elektrischen Leitfähigkeiten aufweisen. Demzufolge ist damit zu rechnen, daß im Liegenden dieser deformierten Sedimente undeformierte altpaläozoische Plattformablagerungen auftreten können.

Sollte diese lithofazielle Interpretation der MT-Ergebnisse zutreffen, so liegt der Rand der OEP wesentlich weiter südlich als bisher allgemein angenommen und zwar im Bereich des Stralsund-Tiefenbruchsystems, das als Teilelement der Transeuropäischen Störung angesehen wird (BERTHELSEN 1992).

Im Ergebnis des postulierten Andockens des Terrane East Avalonia (=Norddeutsches Massiv) an die OEP im Grenzbereich Silur/Devon kam es auch zur Überschiebung der ordovizischen grauacknähhlichen Sedimente, deren Ablagerungsraum südlich des vermuteten Südrandes der OEP - d.h. im Raum Mecklenburg-Vorpommern - anzunehmen ist (GIESE et al. 1994), auf die altpaläozoischen Plattformablagerungen der OEP. Die basalen Überschiebungsflächen (sole thrust, detachment) könnten in den Schwarzschiefern liegen. Als unmittelbare Folge dieses Vorgangs

kam es wahrscheinlich zu Veränderungen der p-T-Bedingungen, die ihren Ausdruck auch in einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeiten gefunden haben.

Die heutige Nordgrenze der kaledonischen Überschiebung (CDF) liegt nördlich von Rügen (Abb. 10).

Der Bereich der kaledonischen Deformation wurde von FRANKE et al. (1989) gesondert als Rügen-Pommern-Terrane bezeichnet. Die MT-Ergebnisse bestätigen somit weitgehend die postulierte Untergliederung des tieferen Untergrundes von Nordostdeutschland. Es folgen demnach von Norden nach Süden das Rügen-Pommern-Terrane, das Norddeutsche Massiv sowie die variszische Außenzone des Rhenoherynikums (Abb. 10).

Zusammenfassung und Ausblick:

Die bisherige Auswertung der MT-Messungen in Nordostdeutschland führt zu folgenden Ergebnissen:

- Es gibt vorwiegend im Norden des Meßgebietes Hinweise auf gute Leiter im Altpaläozoikum.
- Die geologische Felderung im Nordostdeutschen Becken kann durch den Verlauf der Induktionspfeile eindeutig bestätigt werden.

Die Existenz eines guten Leiters kann zweifelsfrei nur durch entsprechende Modellrechnungen nachgewiesen werden. Erste Modellierungsversuche haben gezeigt, daß der im langperiodischen Ast der ρ_a -Kurve auftretende Hinweis auf hohe Leitfähigkeit eindeutig echt ist und nicht durch eventuelle Rand- oder Überschwingeffekte durch zu hohe Leitfähigkeitskontraste an den Grenzflächen erklärt werden kann.

Als nächste Schritte sind die Einbeziehung der Widerstandsprofile der hauptsächlich im Norden des Meßgebietes zahlreich vorhandenen Tiefbohrungen sowie - analog zum Rügen-Profil - die 1D-Interpretation der Usedom-Daten mit Hilfe eines geologischen Schnittes geplant. Außerdem sollen neu entwickelte Kriterien zur Bestimmung der Dimensionalität angewendet werden, um die Interpretierbarkeit der auf den beiden Hauptprofilen gemessenen Daten durch 2D-Modelle zu testen. Wo möglich, sollen dann für diese Daten zweidimensionale Modelle gerechnet bzw. die bereits vorhandenen verfeinert werden.

Danksagung:

Unser besonderer Dank für intensive und hilfreiche Diskussionen gilt den Herren Prof. Dr. G. PORSTENDORFER, Dr. W. GÖTTE (beide Bergakademie Freiberg), Dr. E. RITTER (GFZ Potsdam - Adolf-Schmidt-Observatorium Niemegk) und Dr. H. JÖDICKE (Universität Münster). Die Messungen wurden im Rahmen des vom BMFT geförderten Projektes "Erforschung des tieferen Untergrundes der Nordostdeutschen Senke - ein Beitrag der Magnetotellurik zur Untersuchung des Muttergesteinspotentials im Prä-Westfal") durchgeführt.

Literatur:

BACHMANN, G.H. & HOFFMANN, N. (1994): Manteldiapirismus und Genese des Norddeutschen Beckens im Rotliegend. - Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 1993, 9/10; Stuttgart (im Druck)

BERTHELSEN, A. (1992): From Precambrian to Variscan Europe. In: BLUNDELL, D., FREEMAN, R. & MÜLLER, St. (eds.): A continent revealed. The European Geotraverse. - Cambridge University Press; 153-164; Cambridge

- FRANKE, D. (1990): Der präpermische Untergrund der Mitteleuropäischen Senke - Fakten und Hypothesen. - Nds. Akad. Geowiss. Veröföftl., 4; 19-75; Hannover
- & HOFFMANN, N., KAMPS, J. (1989): Alter und struktureller Bau des Grundgebirges im Nordteil der DDR. Z. angew. Geol., 35; 289-296; Berlin
- GIESE, U., KATZUNG, G. & WALTER, R. (1994): Detrital composition of Ordovician sandstones from the Rügen boreholes: implications for the evolution of the Tornquist ocean. - Geol. Rundschau, 83; 293-308; Heidelberg
- GÖTBE, W. (1990): Zur elektrischen Leitfähigkeit des tieferen Untergrundes im Norden der DDR. In: HAAK, V., RODEMANN, H. (eds.): Prot. 13. Koll. Elektromagnetische Tiefenforschung in Hornburg v. 19.-23.3.1990; 13-21
- HOFFMANN, N., KAMPS, H.-J. & SCHNEIDER, J. (1989): Neuerkenntnisse zur Biostratigraphie und Paläodynamik des Perms in der Nordostdeutschen Senke - ein Diskussionsbeitrag. - Z. angew. Geol., 35, 7: 198-207; Berlin
- & JÖDICKE, H. (1993): Das Norddeutsche Massiv - eine prävariszische Plattform im tieferen Untergrund der Norddeutschen Senke.- Vortrag u. Kurzfassung, 53. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 22.3-27.3.1993, Kiel
- & STIEWE, H. (1994): Neuerkenntnisse zur geologisch-geophysikalischen Modellierung der Pritzwalker Anomalie im Bereich des Ostelbischen Massivs. - Z. geol. Wiss., 22, 1/2: 161-171, Berlin
- JÖDICKE, H. (1990): Zonen hoher elektrischer Krustenleitfähigkeit im Rhenoherynikum und seinem nördlichen Vorland. Diss. Math.-Nat. Fak. d. Univ. Münster, Hochschulschriften Bd. 24
- KATZUNG, G., GIESE, U., WALTER, R. & v. WINTERFELD, V. (1993): The Rügen Caledonides, northeast Germany. Geol. Mag., 130, 5: 725-730, London
- KNÖDEL, K., LOSECKE, W., MÜLLER, W. (1978): Magnetotellurische Erkundung des Präzechsteins in Norddeutschland. - Erdöl u. Kohle, Erdgas, Petrochemie, Ergänzungsband 1978/79, 1, 84-101; Leinfelden-Echterdingen
- LOSECKE, W., KNÖDEL, K., MÜLLER, W. (1979): The conductivity distribution in the North German sedimentary basin derived from widely spaced areal magnetotelluric measurements. Geophys. J.R. astr. Soc. 58; 169-179; Oxford
- MEISSNER, R. (1992): BABEL-SW: synthesis of geophysics and geological implications. - In: MEISSNER, R., SNYDER, D., BALLING, N., STAROSTE, E.: The BABEL-Project, First Status Report, Commission of the European Communities, Brüssel.
- PORSTENDORFER, G. (1975): 20 Jahre Anwendung tellurischer und magnetotellurischer Meßmethoden in der DDR. - Z. angew. Geol. 21, 9: 405-410; Berlin.
- & GÖTBE, W., LENGNING, K., OELSNER, C., TANZER, R., RITTER, E. (1976): Nature and possible causes of the anomalous behaviour of electric conductivity in the north of the GDR, Poland and FRG. In: ADAM, A.: (ed.): Geoelectric and Geothermal Studies, Akademiai Kiado; 487-500; Budapest.
- RITTER, E. (1990): Geomagnetische Tiefensondierungen am Adolf-Schmidt-Observatorium für Erdmagnetismus in Niemegek. In: HAAK, V., RODEMANN, H. (ed.): Prot. 13. Koll. Elektromagnetische Tiefenforschung, Hornburg, 19.-23.3.1990; 13-21
- TRENCH, A. & TORSVIK, A. (1991): A revised Paleozoic apparent polar wander path ocean in Britain: new paleomagnetic constraints. - J. Geol. Soc. London, 104, 227-233; London.