

Magnetotellurik zwischen Nienburg/Weser und Lauenburg/Elbe

M. Gurk (Münster, Neuchâtel), A. Jording, H. Jödicke (Münster)

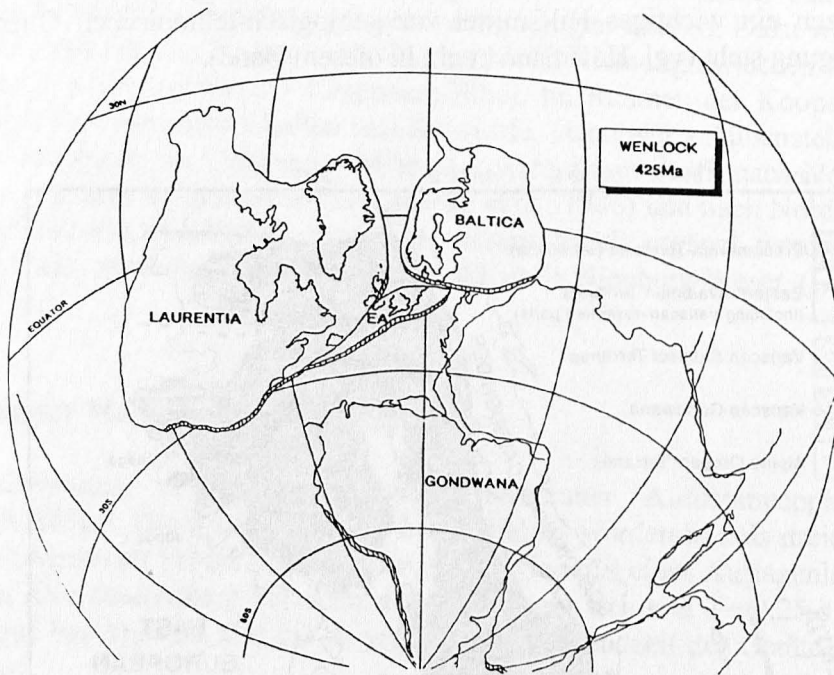


Abb. 1: Paläogeographische Rekonstruktion der Plattenkonfiguration im Wenlock (mittleres Silur) mit EA: East Avalonia; aus Torsvik et al. (1993)

Einleitung

Die geodynamischen Prozesse, die zur Entstehung Nordeuropas beitragen, sind im norddeutschen Raum seit vielen Jahren das Ziel geologischer und geophysikalischer Untersuchungen. Einen wesentlichen Beitrag zur Gestaltung Europas lieferte die kaledonische Gebirgsbildung, deren Hauptfaltungszone in Nord-Süd Richtung bei der Kollision von Laurentia und Baltica entstand. Mikrokontinente (terrane), deren Ursprung weit entfernt von Europa auf der Südhalbkugel in der Nähe von Gondwana vermutet wird, drifteten zur gleichen Zeit gegen die alten Festlandskerne der Nordhalbkugel und bildeten mit ihnen erste mosaikartige Krustenzellen, aus denen sich Nordeuropa entwickelt hat (Abb. 1).

East Avalonia, einer dieser Mikrokontinente, stieß gegen die Südgrenze des Baltischen Schildes. Diese Nahtzone (Abb. 2) wird im südlichen Dänemark vermutet (Berthelsen, 1992). Als Folge dieser zweiten Kollision erstreckt sich ein Seitenarm kaledonischer Gebirgsbildung von England über Norddeutschland bis nach Polen. Damit liegt der tiefere Untergrund Norddeutschlands nahe dem Zentrum der sogenannten kaledonischen "triple junction" (vgl. Ziegler, 1982).

Bei der geophysikalischen Untersuchung des tieferen Untergrundes des nordwestdeutschen Sedimentbeckens spielt die Magnetotellurik seit einiger Zeit eine besondere Rolle. Bereits erste magnetotellurische Arbeiten von Knödel, Losecke und Müller (1979) und Jödicke (1980)

konnten in diesem Raum neben einem oberflächennahen Bereich gutleitender Sedimente auch im Präperm eine flächenhaft verbreitete Zone extrem erhöhter Leitfähigkeit nachweisen. Im Gegensatz dazu liefert z.B. die Reflexionsseismik unterhalb der Zechsteinbasis kaum verwertbare Informationen. Inzwischen hat sich gezeigt, daß mit der Interpretation der Natur speziell dieser tief liegenden gutleitenden Schicht, mit ihrer regionalen Verbreitung und insbesondere mit ihren Verbreitungsgrenzen ein wichtiges Hilfsmittel zur geologisch-tektonischen Gliederung dieses Gebiets zur Verfügung steht (vgl. Hoffmann et al., in diesem Band).

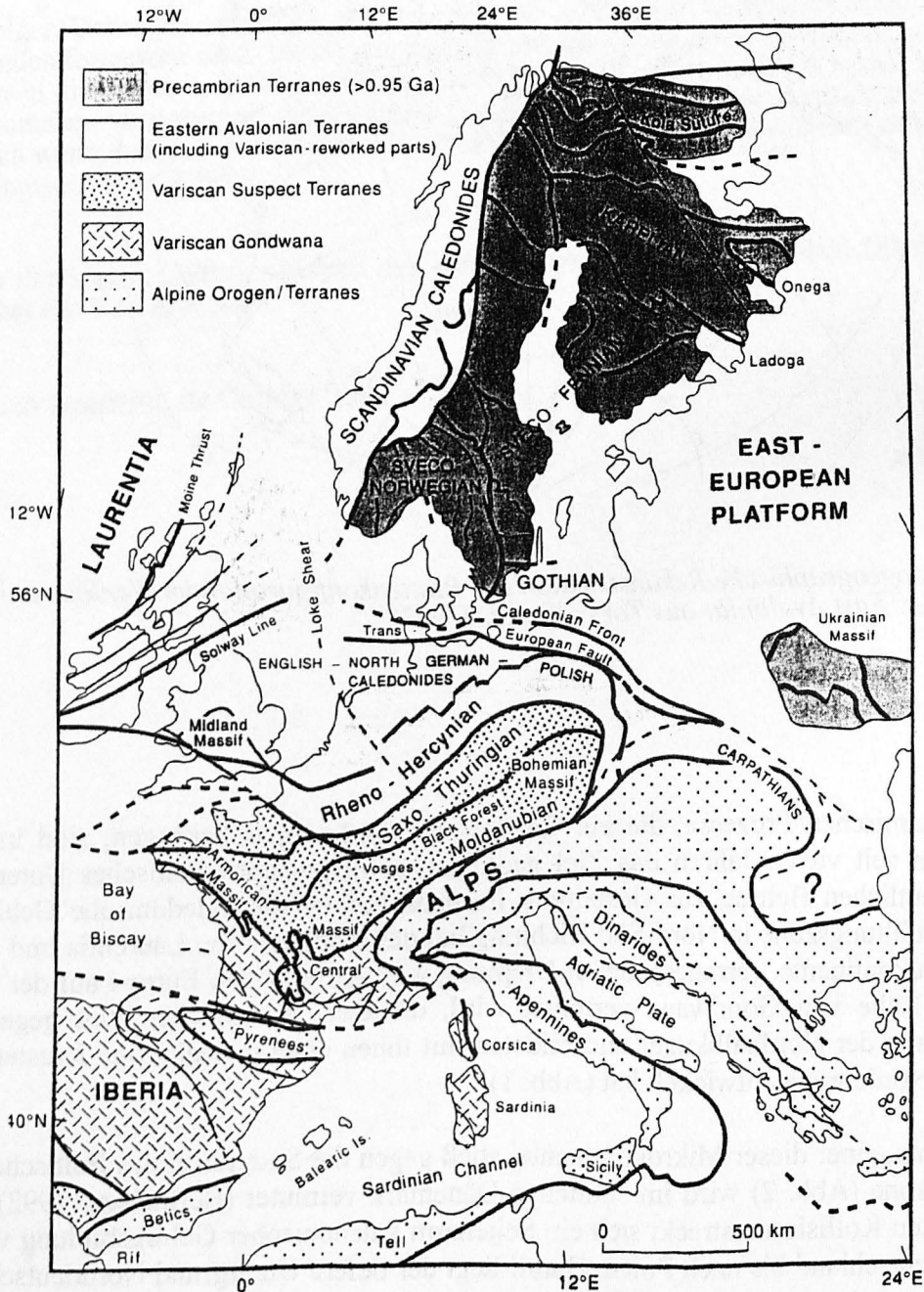


Abb. 2: Das europäische "Puzzle" von Terranes im Präkambrium und Phanerozoikum; aus Berthelsen (1992)

Im Rahmen späterer Arbeiten in Norddeutschland wiesen Losecke et al. (1986) darauf hin, daß die integrierte Leitfähigkeit des guten Leiters im Präperm von maximalen Werten im Bereich des Zusammenflusses von Aller und Weser in nordöstlicher Richtung bei Annäherung an die Elbe stark abnimmt und auf einem sich nach Norden anschließenden Profil von der Elbe nach Fehmarn völlig verschwindet. In einem neuen Meßprojekt sollte dieser damals nur mit wenigen Meßpunkten belegten Beobachtung genauer nachgegangen werden. Dazu wurden 12 Meßpunkte im mittleren Abstand von 10 km (Abb. 3) in SW-NE Richtung zwischen Weser und Elbe vermessen (Profil Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe). Im Rahmen der Kooperation zwischen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover - Außenstelle Berlin -, und dem Institut für Geophysik der Universität Münster konnte dieses Profil nach Norden um die Punkte des bereits erwähnten Fehmarn-Profiles (Losecke et al., 1986) und nach Nordosten um die Punkte des Schwerin-Profiles (Hoffmann et al., in diesem Band) ergänzt werden. Nach Südwesten schließt sich ein weiteres Profil von Versmold nach Nienburg/Weser (Losecke et al., 1986) unmittelbar an.

Auswertung der Magnetotellurik - Messungen

Die Datenerfassung erfolgte über zwei münsteraner Aufnahmeapparaturen des Typs METRONIX 863 μ P. Die Variationen des Magnetfeldes wurden mittels dreier Induktionsspulen, die des erdelektrischen Feldes über Kupfersulfatsonden mit einer Auslagenlänge von jeweils 50 m gemessen. Der auswertbare Periodenbereich erstreckt sich von $T= 0.25$ s bis $T= 4096$ s. Die Meßkampagne dauerte von Mai bis August 1994, die Standzeit der Geräte betrug in der Regel zwei Wochen.

Abb. 4 zeigt drei Beispiele ungedrehter Sondierungskurven des Profils Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe. Zu erkennen ist zum einen eine durchweg gute Datenqualität und zum anderen, wie erwartet, ein Minimum im Periodenbereich 800 - 1000 s, das den bedeutenden Einfluß der präpermischen gutleitenden Zone wiedergibt. Nach Norden verringert sich deren Einfluß, das Minimum schwächt sich entsprechend ab, und nach dem Überschreiten der Elbe wirkt sich der tiefe Leiter offensichtlich nicht mehr auf die Übertragungsfunktionen aus (Abb. 5).

Untersuchungen zur Anisotropie und Skewness belegen, daß für den oberflächennahen Bereich eine eindimensionale Leitfähigkeitsverteilung die Deckschichten des Sedimentbeckens gut beschreibt, während mit größerer Tiefe ein schwacher 2D-Einfluß bemerkbar wird. Der mittlere Drehwinkel von 30° gegenüber Nord ist praktisch identisch mit dem Winkel senkrecht zum herzynischen Streichen (NW-SE), das regionalgeologisch durch den Verlauf von Aller/Weser und Elbe repräsentiert wird.

Die Auswertungen der magnetischen Übertragungsfunktionen (Abb. 6) bekräftigen die herzynische Streichrichtung der Leitfähigkeitsstrukturen im tieferen Untergrund des nordwestdeutschen Sedimentbeckens. Für größere Perioden zeigen die Realpfeile vom Beckeninneren nach außen, d.h. weg vom Zentrum der "norddeutschen Variationsanomalie" (Untiedt, 1970), hin zu den schlechter leitenden Beckenrändern. Der Kreuzungspunkt des Profils mit dem Maximum der norddeutschen Variationsanomalie läßt sich anhand des Umklappens der Realpfeile zwischen den Stationen WOLT und STEI (Walsrode-Soltau) genau festlegen. Der sprunghafte Anstieg der Realpfeile für die Periode $T= 1024$ s auf dem Gebiet nördlich der Elbe (Ostholsteinplattform) weist hier zusätzlich auf eine differenziertere tiefere Geologie hin.

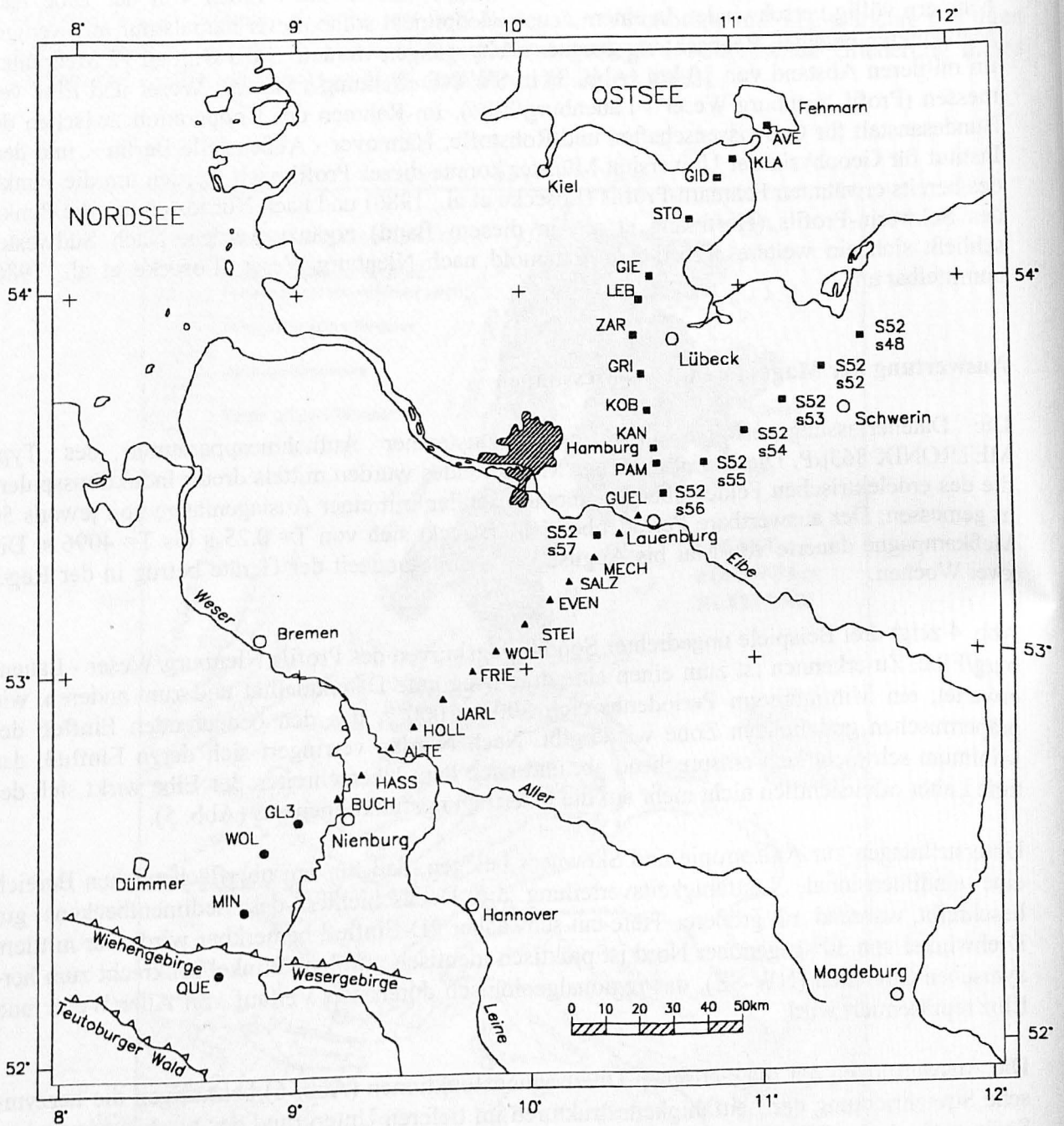


Abb. 3: Die Messpunkte (gefüllte Dreiecke) des Profils Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe und dessen Erweiterungen nach Norden (Fehmarn-Profil) und Nordosten (Schwerin-Profil). Im Süden ist die Lage des Profils 10 (Ostprofil von Knödel et al., 1978) miteingezeichnet (die Stationen QUE bis GL3).

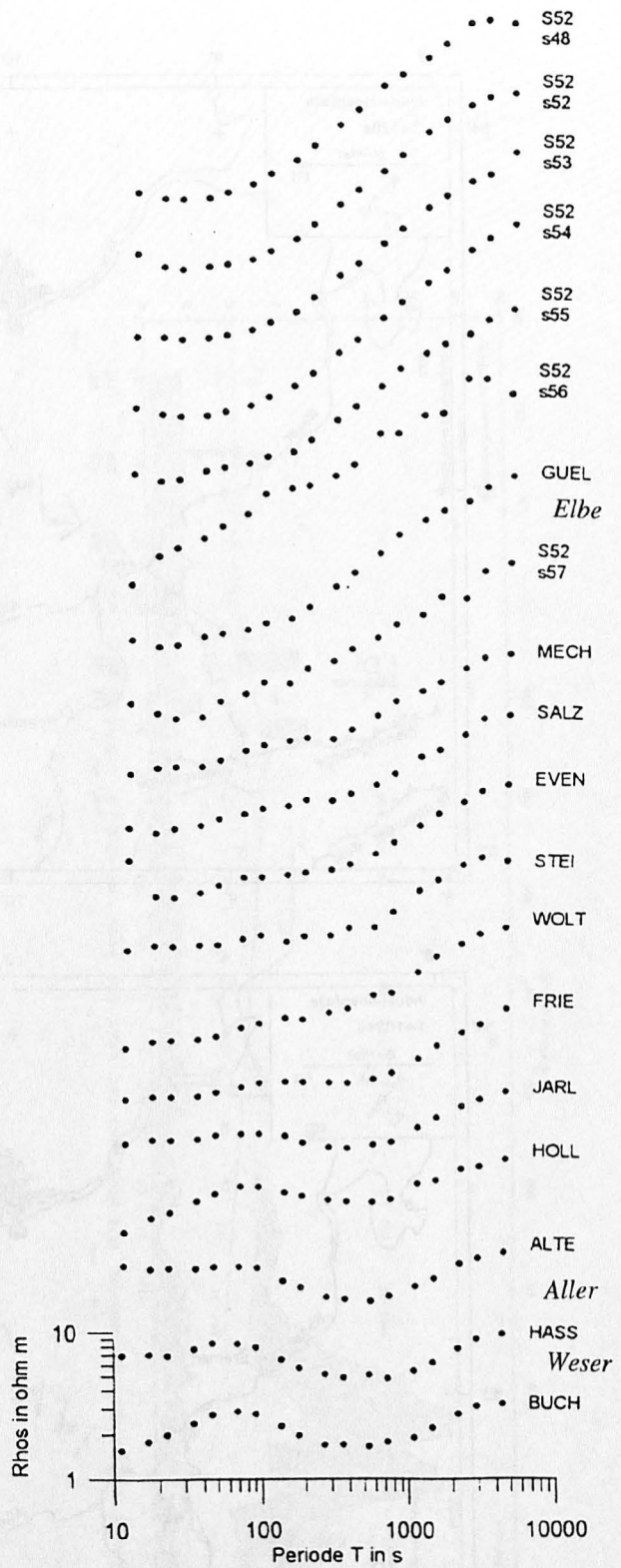
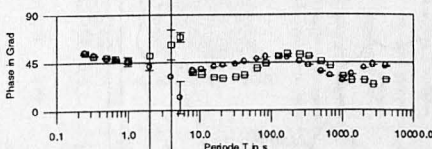
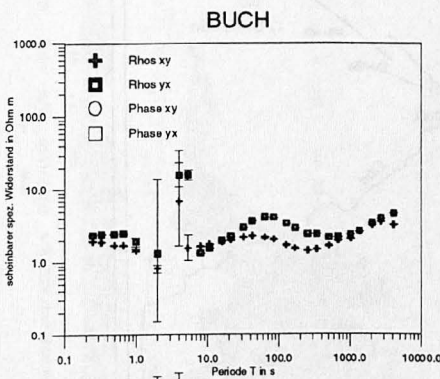
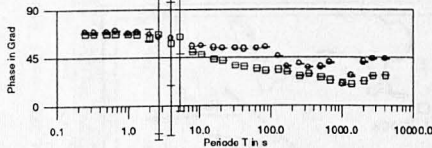
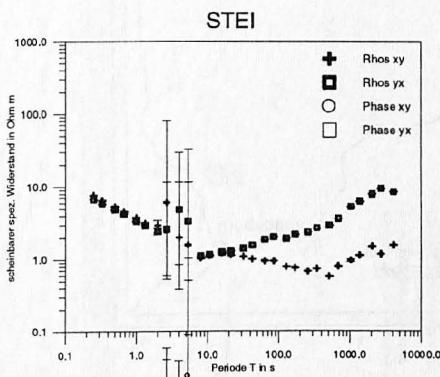
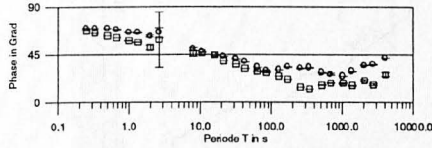
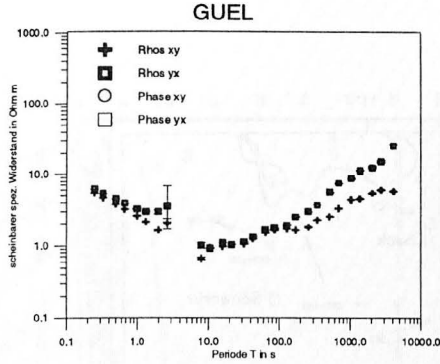


Abb. 4 (links): Ungedrehte Sondierungskurven des Profils Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe.

Abb. 5 (rechts): Die Berdichevsky Invarianten entlang der Profile Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe - Schwerin für den Periodenbereich $T = 10.7$ s bis $T = 4096$ s. Auf eine Fehlerangabe wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

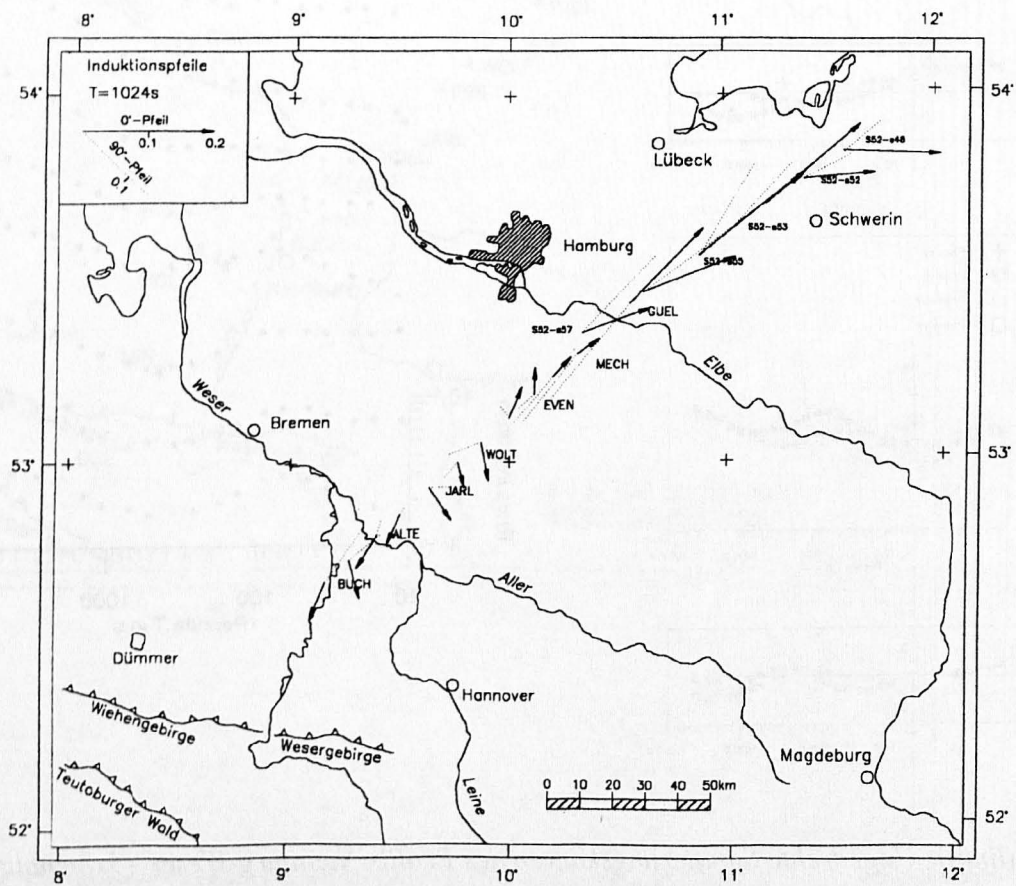
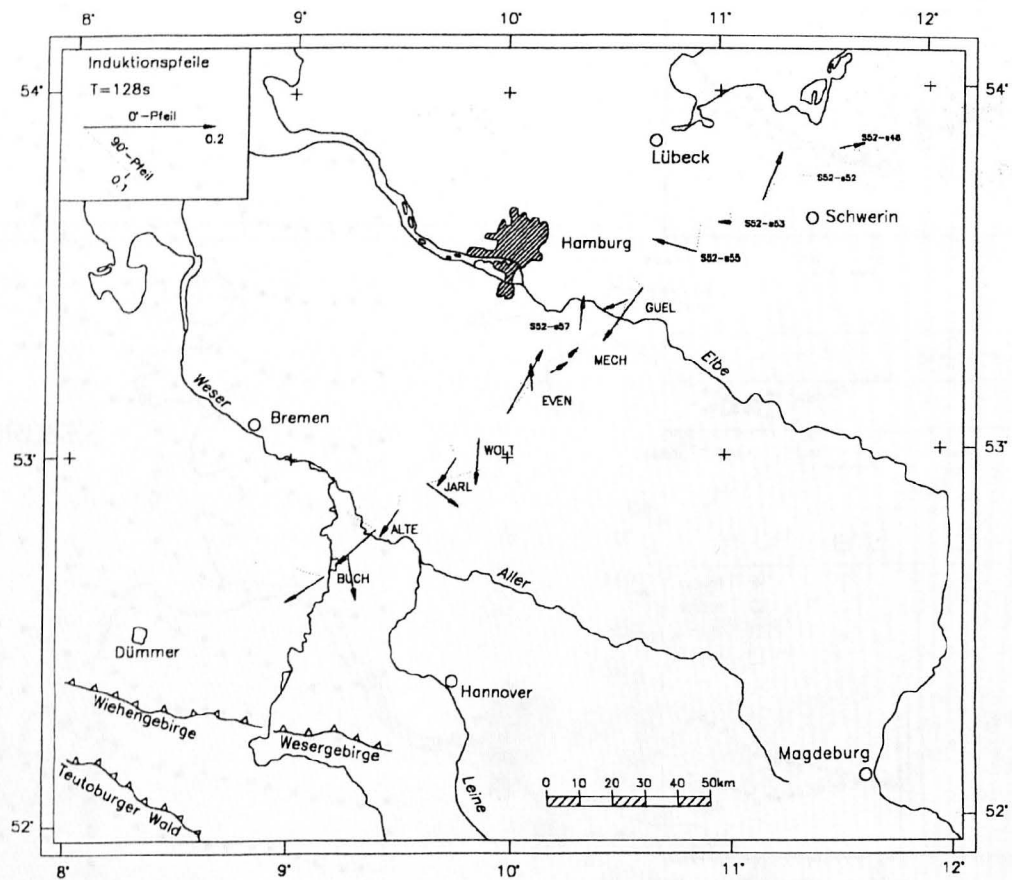


Abb. 6: Induktionspfeile nach Schmucker für die Perioden $T=128\text{ s}$ und $T=1024\text{ s}$ entlang der Profile Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe und Schwerin.

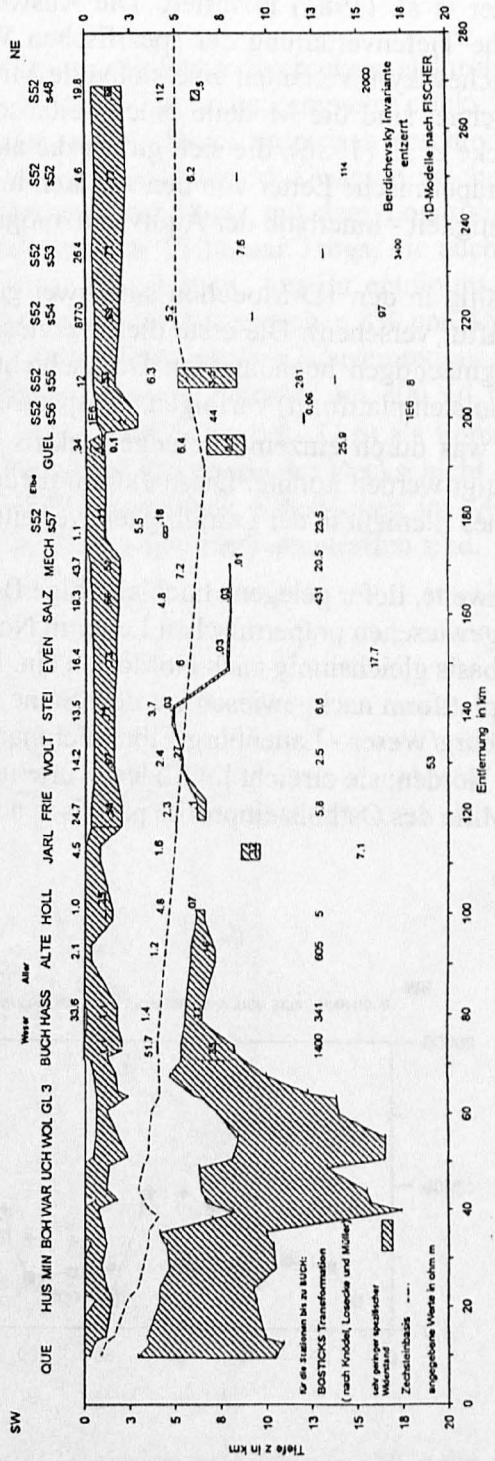
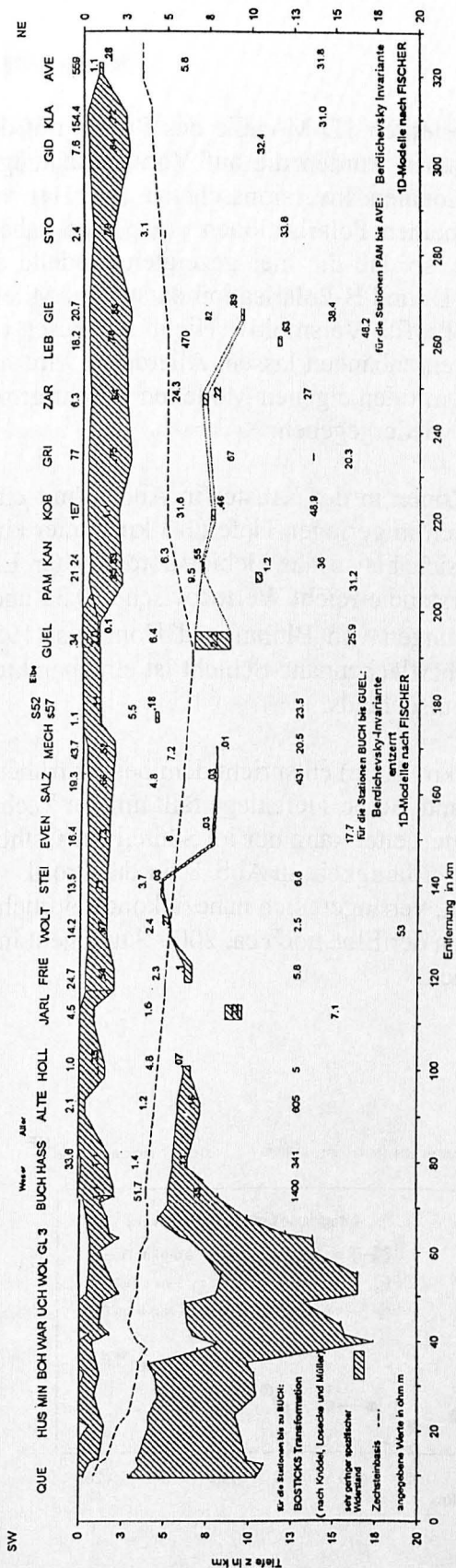


Abb. 7: Eindimensionale Modelle aus der Berdichevsky-Invarianten des Profils Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe und seinen Erweiterungen

Eindimensionale Modellrechnung

Für die in Abb. 7 (vorhergehende Seite) zusammengestellten 1D-Modelle des Profils mit den beiden Profilverlängerungen nach Fehmarn bzw. Schwerin wurden die auf Vorzugsrichtungen gedrehten und entzerrten Daten mit dem eindimensionalen Inversionsschema (MT1D) von Fischer et al. (1981) invertiert. Die Auswertung der beiden Polarisationen ergab eine nahezu gleiche Tiefenverteilung der spezifischen Widerstände, so daß die hier gezeigten Modelle der Berdichevsky-Invarianten eine sinnvolle Mittelung aus E- und B-Polarisation darstellen. Miteingezeichnet sind die Modelle eines Teilabschnitts des Profils Vermold - Nienburg/Weser von Losecke et al. (1986), die sich gut an die aktuellen Daten anhängen lassen. Allerdings wird hier der präpermische Leiter von den Autoren im Vergleich mit den eigenen Modellen in sehr großer Mächtigkeit - innerhalb der Äquivalenzmöglichkeiten - wiedergegeben.

Auffällig in den 1D-Modellen sind zwei gutleitende Zonen in der Kruste (in Abb. 7 mit einer Schraffur versehen). Die erste dieser Zonen befindet sich in geringer Tiefe (1-3 km) unter einer geringmächtigen hochohmigen Deckschicht. Sie läßt sich bis in das Gebiet nördlich der Elbe (Ostholsteinplattform) verfolgen. Ihr spezifischer Widerstand erreicht Werte zwischen 0.35 und 2 Ωm , was durch einzelne tiefengeoelektrische Sondierungen von Blohm und Homilius (1980) bestätigt werden konnte. Diese extrem niederohmige oberflächennahe Schicht ist ein charakteristisches Element in der Leitfähigkeitsverteilung Norddeutschlands.

Der zweite, tiefer gelegene hochleitfähige Bereich (5-9 km Tiefe) entspricht dem bereits früher nachgewiesenen präpermischen Leiter in Norddeutschland. Seine Tiefenlage fällt mit der Zechsteinbasis gleichsinnig nach Nordosten ein. Dieser zweite Leiter kann nur im Südteil der Ostholsteinplattform nachgewiesen werden. Seine integrierte Leitfähigkeit, in Abb. 8 für das Profil Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe - Fehmarn dargestellt, verringert sich nahezu kontinuierlich nach Norden; sie erreicht im Süden Werte um 8000 S, an der Elbe noch ca. 2000 S und geht in der Mitte des Ostholsteinprofils praktisch auf Null zurück.

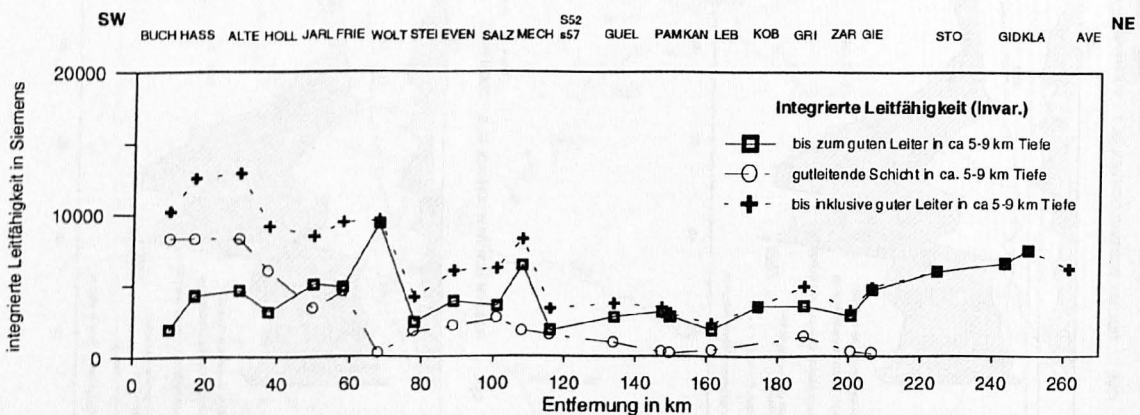


Abb. 8: Die integrierte Leitfähigkeit entlang der Profile Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe und Fehmarn aus den Modellen der Berdichevsky-Invarianten

Diskussion

Von Interesse ist neben der stratigraphischen Eingliederung die Einordnung der zwei gutleitenden Schichten in ein geologisch-tektonisches Konzept sowie die Deutung des Ursprungs der beobachteten extremen Leitfähigkeiten, die, wie nun diskutiert wird, für beide Schichten unterschiedlich ist.

Die Leitfähigkeit des oberen Teufenbereiches wird im wesentlichen durch einen elektrolytischen Leitfähigkeitsmechanismus bestimmt, der nach Archie (1942) über die Parameter effektive Porosität des Gesteins, Salinität der Porenwässer, Temperatur und Druck empirisch beschreibbar ist. Die meisten oberflächennahen, im allgemeinen wenig konsolidierten Gesteine zeichnen sich durch eine hohe effektive Porosität aus. Sie nimmt ungefähr linear mit dem Logarithmus der Tiefe ab, wie die Ausgleichskurve für den Nordwestrand des Gifhorner Trogs, die auch für das Norddeutsche Sedimentbecken Anhaltswerte liefert, in Abb. 9 zeigt. Aus ihr entnimmt man für den Tiefenbereich des oberen guten Leiters (1-3 km) eine Porosität zwischen 8% und 15%. Hinsichtlich der Salinität der Porenfüllung werden z.B. für die Trias mittlere Konzentrationen von 50 g/l bis 360 g/l angegeben. Ab 2 km Tiefe häufen sich Konzentrationen um 300 g/l (Gundel, 1977). Mit diesen übersättigten Salzlösungen (ρ_w im Extremfall bis 0.01 Ωm) als Porenfüllung lassen sich nach Abb. 10 die recht niedrigen spezifischen Widerstände der Deckschicht im Prinzip erklären. Zu berücksichtigen ist, daß wegen der Vielzahl von Salzstöcken im Meßgebiet hochkonzentrierte Salzlauge n möglicherweise bereits in geringer Tiefe anzutreffen sind.

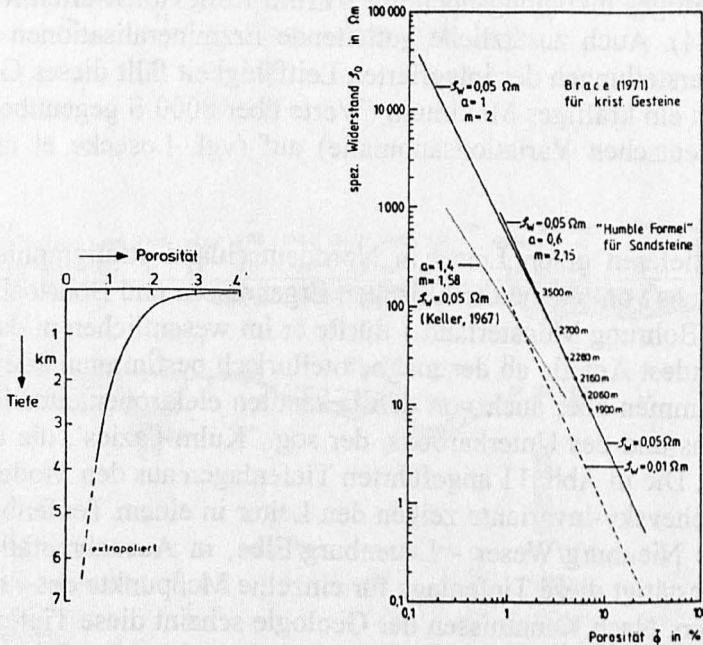


Abb. 9 (links): Tiefenprofil der Porosität (aus Gundel, 1977, nach Matthesius, 1974 für den Nordrand des Gifhorner Trogs).

Abb. 10 (rechts): Der spezifische Widerstand (ρ_0 elektrolytgesättigter Gesteine in Abhängigkeit von der Porosität Φ); aus Jödicke (1990).

Die hohe Leitfähigkeit kann ihre Ursache zusätzlich in Oberflächenleitung der mergel- bzw. tonreichen Schichten von Quartär bis Jura haben. Tongesteine können spezifische Widerstände bis zu $1 \Omega\text{m}$ erreichen, da sie neben der Volumenleitfähigkeit zusätzlich eine dominante Oberflächenleitfähigkeit aufweisen.

Eine genaue stratigraphische Einstufung des oberflächennahen Leiters bleibt schwierig, da keine vergleichende Bohrlochmessungen zugänglich sind. Zu beachten ist, daß z.B. die Unterkante des Leiters wegen des Äquivalenzprinzips nicht unmittelbar als geologische Grenze interpretiert werden darf.

Für die hohe Leitfähigkeit der zweiten Schicht (5-9 km Tiefe) kommt nur ein elektronischer (quasi-metallischer) Leitfähigkeitsmechanismus in kohlenstoffreichen prägraphitisierten Gesteinen, speziell Schwarzschiefern, in Frage. Der Kohlenstoff muß darüber hinaus ausreichend vernetzt sein, was in ehemaligen Erdölmuttergesteinen am ehesten realisiert ist. Die Annahme eines in dieser Tiefenlage überwiegenden elektrolytischen Leitungsmechanismus würde dagegen im Tiefenbereich beginnender Metamorphose eine unrealistisch hohe Porosität von über 7 % für einen (äquivalenten) 2 km mächtigen Leiter erfordern (Jödicke, 1990).

Der Beitrag des tieferen Leiters zur gesamten integrierten Leitfähigkeit ist an den vier südlichsten Meßpunkten (BUCH bis HOLL) besonders groß, größer als der Beitrag der känozoischen und mesozoischen Sedimentbedeckung auf dem übrigen Profil (vgl. Abb. 8: Integrierte Leitfähigkeit 'bis zum guten Leiter in ca. 5-9 km Tiefe'). Als Ursache kommt vermutlich eine zusätzliche thermische Einwirkung auf den tiefen Leiter und damit eine verstärkte Graphitisierung im Bereich der Kontaktaureole des südniedersächsischen basischen Intrusivkörpers bei Uchte in Betracht, der für ein kräftiges Inkohlungshoch mit Vitrinit-Reflexionswerten $R_m > 5\%$ sorgt (M. Teichmüller et al., 1984). Auch zusätzliche gutleitende Erzmineralisationen sind nicht auszuschließen. In Isoliniendarstellungen der integrierten Leitfähigkeit fällt dieses Gebiet ähnlich dem Bramscher Pluton durch ein kräftiges Maximum (Werte über 8000 S gegenüber sonst ca. 5000 S im Zentrum der norddeutschen Variationsanomalie) auf (vgl. Losecke et al., 1979; Jödicke, 1990).

Es ist schwierig, den tieferen guten Leiter in Norddeutschland stratigraphisch einzugliedern. Aufgrund eines Vergleichs von magnetotellurischen Ergebnissen und Bohrlochmessungen in der Umgebung bzw. in der Bohrung Münsterland 1 dürfte er im wesentlichen in das Altpaläozoikum einzustufen sein. Zumindest Anteile an der magnetotellurisch bestimmten integrierten Leitfähigkeit von ca. 2000 S stammen aber auch von den bekannten elektronenleitenden Alaunschiefern des tiefsten Oberkarbons und des Unterkarbons, der sog. 'Kulm-Fazies', die u.a. an Proben gut untersucht worden sind. Die in Abb. 11 angeführten Tiefenlagen aus den Modellen beider Polarisierungen und der Berdichevsky-Invariante zeigen den Leiter in einem Teufenbereich von ca. 5-9 km entlang des Profils Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe, in Ausnahmefällen bis ca. 14 km Tiefe. Jording (1995) bestätigt diese Tiefenlage für einzelne Meßpunkte des Profils mit langperiodischen MT-Messungen. Nach Kenntnissen der Geologie scheint diese Tiefenlage zu gering zu sein, um den Leiter sicher dem Altpaläozoikum zuordnen zu können. Seine Tiefenlage korrespondiert vielmehr eher mit Formationen aus dem Oberkarbon bzw. Unterkarbon. Es liegt somit nahe, den tieferen guten Leiter durch die Folge von Alaunschiefern im tiefsten Oberkarbon und Unterkarbon zu erklären. Aus der flächenhaften Verteilung des guten Leiters könnte somit umgekehrt auf die Verbreitung der leitfähigen Alaunschiefer der Kulm-Fazies geschlossen werden. Wenn diese Überlegung richtig ist, ergäbe sich als Konsequenz, daß sich der Nordrand des Kulm-Beckens viel weiter im Norden befinden würde, als bisher allgemein, z.B. von Ziegler (1982), angenommen wird.

Falls die Mächtigkeit des Devons, des Silurs und des Ordoviziums relativ gering ist, wäre anzunehmen, daß die Gesteinsserie des Altpaläozoikums dem Unterkarbon in nicht zu großem Abstand folgt. Die Magnetotellurik ist jedoch nicht in der Lage, zwei relativ dicht aufeinanderfolgende gutleitende Schichten in dieser Tiefenlage aufzulösen. Die Gesteine der Kulm-Fazies und gutleitende altpaläozoische Alaunschiefer könnten somit - ähnlich der Situation an der Bohrung Münsterland - zusammen die beobachtete integrierte Leitfähigkeit erbringen.

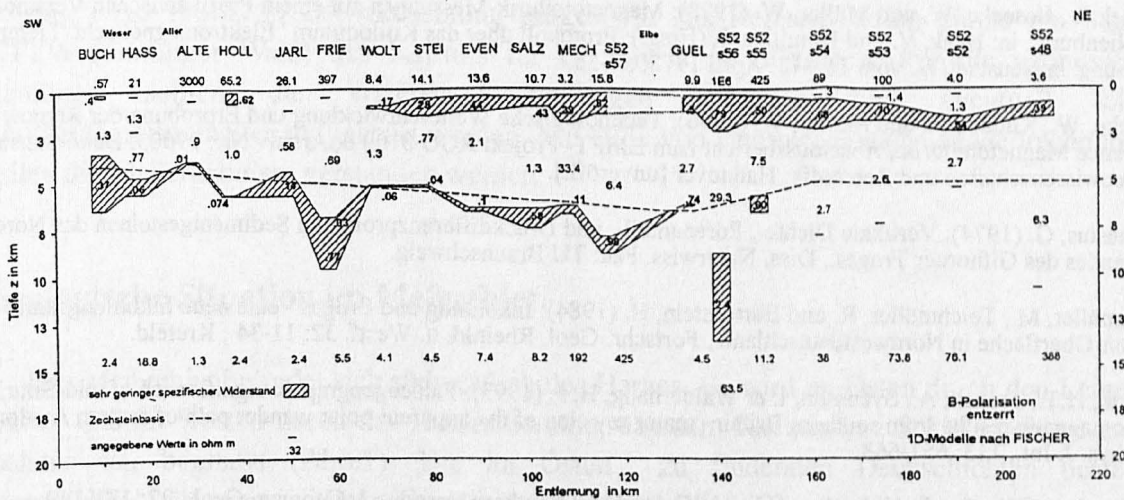
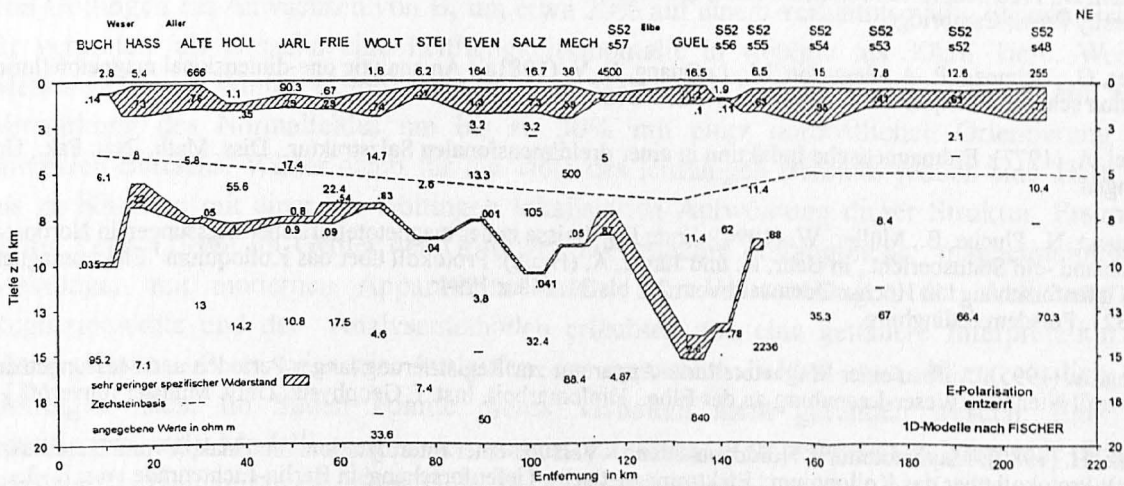


Abb. 11: Eindimensionale Modelle beider Polarisationen für die Profile Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe - Schwerin

Literatur

- Archie, G.E. (1942): The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some Reservoir Characteristics, *Trans. Am. Inst. Min., Metall., Petr. Engrs.* 146: 54-62
- Berdichevsky, M.N. and Dmitriev, V.I. (1976): Basic principles of interpretation of magnetotelluric sounding curves, *KAPG Geophysical Monograph*, Budapest, 165-221.
- Berthelsen, A. (1992): From Precambrian to Variscian Europe., In: Blundell, D., Freeman, R. & Müller, St. (eds.): *A continent revealed. The European Geotraverse.*, Cambridge University Press; 153-164, Cambridge.
- Blohm, E., -K und Homilius, J. (1980): Stand der Geoelektrischen Tiefensondierung. - In: Haak, V. und Homilius, J. (Hrsg.): *Protokoll über das Kolloquium 'Elektromagnetische Tiefenforschung' in Berlin-Lichtenrade vom 1. -3. April 1980: 111- 131; Berlin, Hannover.*
- Blundell, D., Freeman, R. & Müller, St. (eds.) (1992): *A continent revealed. The European Geotraverse.*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Fischer, G., Schnegg, P.-A., Pegurion, M., LeQuang, B. V. (1981a): An analytic one-dimensional magnetotelluric inversion scheme., *Geophys. J.R. astr. Soc.* 67, 257-278.
- Gundel, A. (1977): *Erdmagnetische Induktion in einer dreidimensionalen Salzstruktur.*, Diss. Math. -Nat. Fak., Univ. Göttingen.
- Hoffmann, N., Fluche, B., Müller, W. (1994): Erste Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen in Nordostdeutschland -ein Statusbericht., in Bahr, K. und Junge, A. (Hrsg.): *Protokoll über das Kolloquium 'Elektromagnetische Tiefenforschung' in Höchst/Odenwald vom 28. bis 31. März 1994: 307 -321, Potsdam, Edingburg.*
- Jording, A. (1995): *Aufbau einer Magnetotellurik-Apparatur zur Registrierung langer Perioden und Messungen auf dem Profil Nienburg/Weser-Lauenburg an der Elbe.*, Diplomarbeit, Inst. f. Geophysik, Univ. Münster [unveröff.].
- Jödicke, H. (1980): *Magnetotellurik Norddeutschland - Versuch einer Interpretation.*, in: Haak, V. und Homilius, J. (Hrsg.): *Protokoll über das Kolloquium 'Elektromagnetische Tiefenforschung' in Berlin-Lichtenrade vom 1. -3. April 1980: 271-288 ; Berlin, Hannover.*
- Jödicke, H. (1990): *Zonen hoher elektrischer Krustenleitfähigkeit im Rhenoherzynikum und seinem nördlichen Vorland.*, *Hochschulschriften Bd. 24, Literaturverlag, Münster, Hamburg.*
- Knödel, K., Losecke, W. und Müller, W. (1978): *Magnetotellurik-Messungen auf einem Profil zwischen Vermold und Nienburg.*, in: Haak, V. und Homilius, J. (Hrsg.): *Protokoll über das Kolloquium 'Elektromagnetische Tiefenforschung' in Neustadt/W. vom 11. -13. April 1978: 57-56.*
- Losecke, W., Knödel, K. und Müller, W. (1986): *Technologische Weiterentwicklung und Erprobung der Remote Reference Magnetotellurik.*, Abschlussbericht zum BMFT- Projekt RGG 8109 6; Archiv Nr.: 99003, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover [unveröff.].
- Matthesius, G. (1974): *Vertikale Dichte-, Porenanteil-, und Druckdifferenzprofile an Sedimentgesteinen des Nordwestrandes des Gifhorner Troges.*, Diss. Naturwiss. Fak. TU Braunschweig.
- Teichmüller, M., Teichmüller, R. und Bartenstein, H. (1984): *Inkohlung und Erdgas - eine neue Inkohlungskarte der Karbon-Oberfläche in Nordwestdeutschland.*, *Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf.* 32: 11-34 ; Krefeld.
- Torsvik, H.T., Trench, A., Svensson, I. & Walderhaug, H. J. (1993): *Palaeogeographic significance of mid-Silurian palaeomagnetic results from southern Britain- major revision of the apparent polar wander path of eastern Avalonia.*, *Geophys. J. Int.*, 113: 651-668.
- Untiedt, J. (1970): *Conductivity Anomalies in Central and Southern Europe.*, *J. Geomag. Geol.*, 22: 131-149.
- Ziegler, P.A. (1982): *Geological Atlas of Western and Central Europe*, Shell International Petroleum Maatschapij B.V., distr. by Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.