

Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen in Norddeutschland: Neuerkenntnisse zur tektonischen Felderung und zur Verbreitung potentieller Muttergesteine im Präperm

N. Hoffmann (Berlin), B. Fluche (Hannover), H. Jödicke (Münster), A. Jording (Hannover/Münster), W. Müller (Hannover)

1. Geologische Aufgabenstellung

Der tiefere Untergrund des Norddeutschen Beckens hat in den letzten 10 - 15 Jahren mit fortschreitender Verlegung der Kohlenwasserstoffexploration in immer größere Tiefen zunehmend wirtschaftliches Interesse gewonnen. Daraus resultierte die Notwendigkeit, die generellen Kenntnisse über den geologisch-tektonischen Bau des tieferen Beckens und seines Untergrundes zu erweitern und zu versuchen, Gesetzmäßigkeiten des Beckenbildungsprozesses sowie der damit im Zusammenhang stehenden Fragen zur zeitlich-räumlichen Verteilung der Kohlenwasserstoffe besser zu verstehen.

Zu diesem Zwecke wurden durch die deutsche Erdöl-Erdgas-Industrie eine Vielzahl von Tiefbohrungen abgeteuft sowie umfangreiche geophysikalische Tiefenerkundungs-Programme durchgeführt. Dabei konzentrierten sich die geophysikalischen Untersuchungen vorrangig auf seismische Sondierungen, die für die Strukturerkundung und damit für den Ansatz von Bohrungen besonders geeignet sind (DOHR, 1989; H. HOFFMANN et al., 1989). Es zeigte sich jedoch, daß unterhalb des fast überall sehr ausgeprägten Zechsteinbasis (Z)-Horizontes im allgemeinen nur eine unzureichende Reflexionsqualität erzielt werden konnte, so daß versucht wurde, durch die Zusammenführung verschiedener geophysikalischer Methoden, wie Gravimetrie, Magnetik und Magnetotellurik, zusätzliche geophysikalische Daten für die geologische Interpretation des tieferen Untergrundes zu erhalten.

Bereits in den 60er Jahren wurde in NE-Deutschland (PORSTENDORFER, 1975) und in den 70er Jahren in NW-Deutschland (LOSECKE et al., 1979) mit flächendeckenden magnetotellurischen Messungen begonnen. Sie hatten zunächst zum Ziel, den Einfluß der oberflächennahen gutleitenden Sedimente abzuschätzen, erbrachten aber den überraschenden Nachweis von gutleitenden Schichten auch im präpermischen Untergrund, d.h. in Tiefen von ca. 6-12 km. Von KNÖDEL et al. (1979) wurde die extrem hohe integrierte Leitfähigkeit speziell im Bereich des Niedersächsischen Beckens ("Norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie") auf fluidgefüllte Poren und Klüfte in präpermischen Gesteinen zurückgeführt.

Dieser (damals weithin üblichen) Erklärung der hohen Leitfähigkeit durch einen elektrolytischen Leitungsmechanismus, der einen in dieser Tiefe unrealistisch großen Porenraum erfordern würde, wurde später eine Deutung durch Elektronenleitung hochinkohlter organischer, d.h. graphitähnlicher Substanz, gegenübergestellt (JÖDICKE, 1984; DUBA et al., 1988; JÖDICKE, 1990). Graphitähnliche Substanz findet sich vor allem in kohlenstoffreichen pelitischen Gesteinen, insbesondere Schwarzschiefern und Alaunschiefern, sofern deren Inkohlungsgrad das Metaanthrazit-Stadium erreicht hat. Der C_{org} -Gehalt, der im wesentlichen aus Kerogenrest, d.h. aus dem Restbestand organischer Substanz nach weitgehendem Abschluß der Erdöl/Erdgasbildung besteht, muß größer als ca. 3 % sein. Erst dann kann eine ausreichende Vernetzung der graphitähnlichen Substanz innerhalb des Trägergesteins - die entscheidende Voraussetzung zur Entstehung einer hohen elektronischen Leitfähigkeit - erreicht werden. Diese Deutung konnte anhand des Laterologs der Bohrung Münsterland 1 und durch Messungen an Gesteinsproben (BÜCHTER, 1983; JÖDICKE, 1990) belegt werden.

Damit war es naheliegend, den präpermischen guten Leiter der Magnetotellurik in Nordwestdeutschland als einen Horizont hochinkohlter Schwarzschiefer zu identifizieren. Berücksichtigt man die Zunahme der (quasi)elektronischen Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur (DUBA et al., 1988) und denkt sich den Vorgang der Mikrozerrüttung der Bohrkerne als Folge der Dekompression beim Heraufholen aus großer Tiefe, die zur Unter-

brechung von elektrischen "Leiterbahnen" führen dürfte, rückgängig gemacht (Untersuchungen hierzu fehlen noch), dann läßt sich vorsichtig abschätzen, daß die Norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie mit ihren Maximalwerten von über 5000 S durch Schwarzschiefer von ca. 200 m Mächtigkeit (möglicherweise noch weniger) erklärt werden kann. Dabei muß es sich nicht notwendigerweise um einen einzelnen Horizont handeln. Ein magnetotellurisch nicht auflösbarer Summeneffekt entweder von ähnlichen Gesteinen in unterschiedlichen stratigraphischen Niveaus im Präperm oder z.B. auch von tektonisch bedingten Schichtwiederholungen ist ebenfalls denkbar.

Eine genaue stratigraphische Einstufung des gutleitenden Horizont ist schwierig. Ein Vergleich der Bohrlochmessungen der Bohrung Münsterland 1 mit den Ergebnissen einer größeren Zahl von magnetotellurischen Messungen in der unmittelbaren und weiteren Umgebung des Bohrpunktes zeigt, daß die von der MT bestimmte integrierte Leitfähigkeit von 1500 - 2000 S im Zentrum des Münsterlandes in 6 - 8 km Tiefe durch den im Unterkarbon (Kulm) erbohrten gutleitenden Horizont nicht erreicht wird (vgl. GURK et al., in diesem Band). Daraus war zu schließen, daß der Hauptanteil der integrierten Leitfähigkeit von einem nur wenig tiefer gelegenen Horizont im Altpaläozoikum stammt (JÖDICKE, 1990), wobei es es nahelag, einen möglichen Zusammenhang mit den oberkambrisch-unterordovizischen "Skandinavischen Alaunschiefern" zu sehen. Diese Alaunschiefer liegen in großflächiger Verbreitung unmittelbar der Skandinavischen Plattform auf und sind z.B. in Schweden wegen ihrer geringen Inkohlung (Ölschiefer) als wichtige Energiereserve intensiv untersucht (z.B. ANDERSSON et al., 1985).

Im Jahr 1992 gab es für die Magnetotellurik einen bedeutenden Neuanfang durch die Bewilligung des BMBF-Projektes "Erforschung des tieferen Untergrundes der Nordostdeutschen Senke - ein Beitrag der Magnetotellurik zur Untersuchung des präwestfalen Muttergesteinspotentials", für das die BGR verantwortlich ist und das Ende 1996 ausläuft. Die Messungen wurden von den Firmen Metronix (Braunschweig) und Geophysik GGD (Leipzig) durchgeführt, die Interpretation der Daten und die integrative geologisch-geophysikalische Interpretation erfolgten in enger Zusammenarbeit zwischen der BGR und dem Institut für Geophysik der Universität Münster. Mit der gezielten Untersuchung der Muttergesteinsverbreitung hatte ein magnetotellurisches Vorhaben erstmals eine betont geologisch-lagerstättenkundliche Aufgabenstellung. Von besonderer Bedeutung bei der Auswertung und Bewertung der Daten war ein hoher geologischer Kenntnisstand auf der Basis einer großen Anzahl von Tiefbohrungen mit hohem Kernanteil, umfangreicher Seismik und der integrativen Modellierung geologisch-geophysikalischer Ergebnisse auf den vermessenen MT-Profilen.

2. Die magnetotellurischen Messungen

Die magnetotellurischen Geländemessungen im Nordosten des Norddeutschen Beckens wurden in mehreren Zeitabschnitten durchgeführt. Zuerst wurden von Februar bis Mai 1993 die Profile Usedom - Nordbrandenburg (Pkte. A010 - A090) und Rügen - Magdeburg (Pkte. B010 - B270) mit Ergänzungspunkten (C010 - C040) vermessen. Dazu kamen drei Einzelmessungen (z010 - z030), u.a. an der Tiefbohrung Loissin (z010), als Referenzpunkte (Abb. 1). Abgesehen von den jeweils südlichsten Punkten A090, B260, B270 und C040 ist die Datenqualität der Sondierungen an allen Meßpunkten gut bis sehr gut. Der ausgewertete Periodenbereich umfaßt 1/256 bis 4096 s.

Im weiteren Verlauf des Projektes erfolgten von März bis April 1994 magnetotellurische Sondierungen an 12 weiteren Punkten auf den Profilen Wismar - Lübeck (Pkte. G010 - G050) und Wismar - Lüneburg (Pkte. F010 - F070). Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen der BGR und der Universität Münster wurde anschließend das Profil Wismar - Lüneburg bis nach Nienburg (vgl. GURK et al., JORDING et al.; in diesem Band) verlängert (Abb. 1; diese Farbabbildung findet sich zusammen mit weiteren am Ende des Beitrages). Mit Ausnahme der Meßpunkte im Raum südlich von Hamburg kann die Datenqualität der zweiten Meßphase ebenfalls als gut bezeichnet werden.

3. Eindimensionale Auswertung

Angesichts grundsätzlich geringer Skewness-Werte sowie angenäherter Isotropie im Bereich kurzer und mittlerer, und nur schwacher Anisotropie im Bereich langer Perioden wurden alle Daten zunächst eindimensional ausgewertet. Invertiert nach MARQUARDT wurde die Determinante des Übertragungstensors, d.h. die drehinvariante "effektive Impedanz II" nach BERDICHEVSKY und DMITRIEV (1976), um eine gemittelte, von der lokalen Streichrichtung unabhängige Leitfähigkeitsverteilung zu erhalten. Als Startmodell diente das Ergebnis der BOSTICK-Inversion. Als Besonderheit wurde die Inversion auf dem fast 300 km langen Profil B (Rügen - Magdeburg) zusätzlich unter Verwendung von 'a priori'-Informationen durchgeführt, d.h. unter Vorgabe von Schichtgrenzen, die aus Bohrungen, aus der Seismik und aus geologischen Modellen bekannt waren bzw. abgeschätzt werden konnten (HOFFMANN et al., 1994).

Als Ergebnis zeigt sich, daß die Abfolge der elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe in den oberen Kilometern für alle 1D-Modelle in NE-Deutschland im wesentlichen übereinstimmt und folgende Merkmale aufweist:

- Deckschicht geringmächtig, schlechtleitend
- 2. Schicht sehr gut bis gut leitend, Mächtigkeit bis 5 km,
- 3. Schicht schlecht leitend

Unterschiede in den Modellen ergeben sich erst in größerer Tiefe. Innerhalb des Meßgebiets tritt an einigen Meßpunkten eine hohe Leitfähigkeit auch im Tiefenbereich von 6 - 12 km, z.T. auch von 13 - 17 km auf, darunter folgt dann als Abschluß ein hochohmiger Halbraum. An anderen Punkten fehlt dieser tiefliegende gute Leiter, hier gibt es einen nicht genau auflösenden Übergang von der dritten, schlechtleitenden Schicht in den hochohmigen Halbraum.

Um diese Unterschiede am Beispiel des Profils Rügen - Magdeburg zu verdeutlichen, sind in Abb. 2 die integrierten Leitfähigkeiten der 1D-Modelle als Säulendiagramme aufgetragen, aufgeteilt in einen Anteil von der Erdoberfläche bis zur Zechsteinbasis und einen zweiten von der Zechsteinbasis bis zur vermuteten Tiefe der Kristallin-Oberfläche. Die integrierte Leitfähigkeit wird dargestellt, weil dieser robuste Wert von der möglichen Vielfalt äquivalenter Lösungen kaum beeinflusst und erfahrungsgemäß weitgehend unabhängig von dem eingesetzten Modellierungsverfahren ist. Eine Aufteilung in die beiden Anteile Post- und Präzechstein wurde gewählt, weil zum einen der Zechsteinbasis-Horizont aus der Seismik in der Regel gut bekannt ist und zum anderen eine Trennung hinsichtlich des zugrundeliegenden Leitungsmechanismus erreicht werden kann, d.h. eine Trennung zwischen den elektrolytischen guten Leitern des Känozoikum/Mesozoikums und den - sofern vorhanden - elektronischen guten Leitern des Paläozoikums. Da die Zechsteinbasis bereits im Tiefenbereich der dritten, schlechtleitenden Schicht liegt (im oberflächennahen Bereich treten gute Leiter etwa bis zum Buntsandstein auf, unterhalb der Zechsteinbasis folgen in NE-Deutschland vielerorts mächtige schlechtleitende Vulkanitserien), ist die genaue Kenntnis ihrer Tiefenlage im Prinzip nicht einmal erforderlich. Die integrierte Leitfähigkeit ist demzufolge für Präperm und Präzechstein nahezu identisch, aus elektrischer Sicht haben beide Begriffe praktisch gleiche Bedeutung. Entsprechendes gilt auch für die Tiefenlage des Kristallins. Wegen der geringen Leitfähigkeit des tieferen Untergrunds spielt es keine große Rolle, ob die integrierte Leitfähigkeit ab 20 km Tiefe oder ab der vermuteten Kristallin-Oberfläche berechnet wird.

Wie Abb. 2 zeigt, stammt der überwiegende Teil der integrierten Leitfähigkeit an den meisten Punkten des Profils aus dem Postzechstein. Die Abnahme der Werte nach Süden und nach Norden steht im Einklang mit einer entsprechenden Abnahme der Mächtigkeit der känozoisch-mesozoischen Sedimente (vgl. auch Abb. 7). Von besonderem Interesse für die vorliegenden Untersuchungen sind jedoch die erhöhten Leitfähigkeiten im Präzechstein, vor allem im Norden (B010 - B070), im Bereich der Potentialfeldanomalie von Pritzwalk (B160 - B190) und im Süden des Profils (B270). Auch an den übrigen Punkten geht die integrierte Leitfähigkeit im Präzechstein nicht völlig auf Null zurück. Dies ist vermutlich eine Folge

Profil B: Rügen - Magdeburg

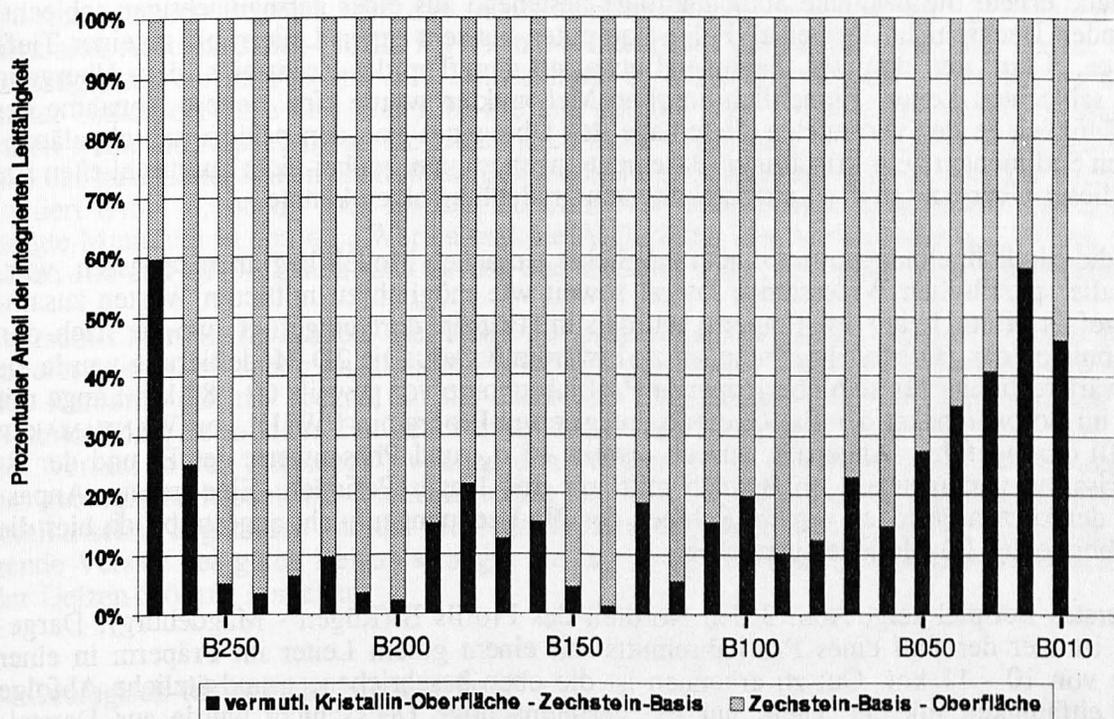
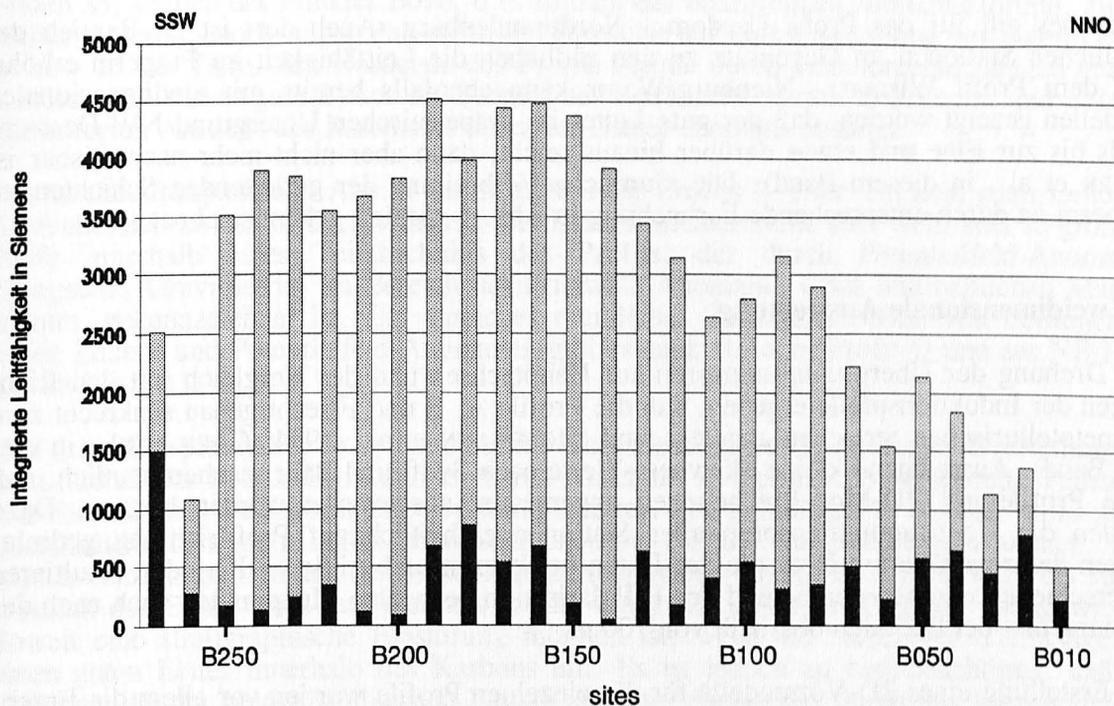


Abb. 2: Integrierte Leitfähigkeit der 1D-Modelle, aufgeteilt in Post- und Präzechsteinanteil

des dominierenden Einflusses der gutleitenden Deckschichten, der zu insgesamt geringen Leitfähigkeitskontrasten auch noch im tieferen Bereich der Modelle führt. Die Existenz eines guten Leiters in größerer Tiefe im Norden des Profil bis zum Punkt B070 kann dagegen eindeutig durch das ausgeprägte Verhalten der Phase belegt werden (HOFFMANN et al., 1994).

Ähnliches gilt für das Profil Usedom - Nordbrandenburg. Auch dort ist im Bereich der nördlichen Stationen im Gegensatz zu den südlichen die Leitfähigkeit im Präperm erhöht. Auf dem Profil Wismar - Nienburg/Weser kann ebenfalls bereits mit eindimensionalen Modellen gezeigt werden, daß der gute Leiter im präpermischen Untergrund NW-Deutschlands bis zur Elbe und etwas darüber hinaus reicht, dann aber nicht mehr nachweisbar ist (GURK et al., in diesem Band). Die räumliche Verbreitung der gutleitenden Schichten im Präperm ist durch entsprechende Farbgebung in Abb. 1 speziell gekennzeichnet.

4. Zweidimensionale Auswertung

Die Drehung der Übertragungstensoren auf Hauptachsen und der Vergleich mit den Richtungen der Induktionspfeile ergeben, daß die Profile A, B und F recht genau senkrecht zum magnetotellurischen Streichen angelegt sind (HOFFMANN et al., 1994; GURK et al., in diesem Band). Ausreichend kleine Skewness-Werte nach Swift und Bahr machen deutlich, daß diese Profile mit 2D-Modellrechnungen angemessen ausgewertet werden können. Dazu wurden die Übertragungstensoren aller Stationen einheitlich auf Profilrichtung gedreht. Wegen der angenäherten Isotropie der Daten bei kurzen und mittleren Perioden resultieren Unterschiede zwischen der E- und der B-Polarisation bei vielen Meßpunkten auch nach der Drehung erst bei Perioden oberhalb von 100 s.

Zur Erstellung eines 2D-Vormodells für die einzelnen Profile wurden vor allem die Ergebnisse der 1D-Modellrechnungen berücksichtigt. Vorstellungen aus geologischen Modellen, die wiederum wesentlich auf Ergebnissen von Bohrungen, Seismik sowie Potentialverfahren (Magnetik, Gravimetrie) beruhen, kamen ergänzend hinzu. Daraus ergab sich für die 2D-Modelle erneut die bekannte Schichtenfolge bestehend aus einer geringmächtigen schlechtleitenden Deckschicht über einer Folge von guten bis sehr guten Leitern bis zu einer Tiefe von ca. 5 km, und darunter, beginnend etwa mit dem Top des Zechsteins, dem Übergang zum schlechten Leiter. Einheitlich an allen Meßpunkten wurde eine weitere Abnahme der Leitfähigkeit in der vermuteten Tiefenlage des Übergangs von den paläozoisch-altpaläozoischen Sedimenten zum kristallinen Basement angenommen, wobei nicht auszuschließen ist, daß dieser Übergang in der Leitfähigkeit auch graduell erfolgen könnte.

Um die Modellrechnungen mit einem möglichst einfachen Modell beginnen zu lassen, wurden alle spezifischen Widerstände lateral soweit wie möglich zu mittleren Werten zusammengefaßt. Gute Leiter im Präperm wurden im Prinzip dort eingefügt, wo sie nach den Ergebnissen der 1D-Modellrechnungen zu erwarten waren. Die 2D-Modellierung wurde als Vorwärtsrechnung für sich überlappende Profilabschnitte von jeweils 60 - 80 km Länge mit dem im Softwarepaket der Fa. Geotools integrierten Programm PW2DI von WANNAMAKER (1990) durchgeführt. Angepaßt wurden jeweils 15 q_a - und Phasenwerte der E- und der B-Polarisation vorzugsweise im Bereich mittlerer und langer Perioden. Eine genaue Anpassung der kurzen Perioden war im Rahmen der 2D-Rechnungen nicht angestrebt, da hier die Ergebnisse der 1D-Modelle ausreichen.

Als erstes Beispiel zeigt Abb. 3 den Nordteil des Profils B (Rügen - Magdeburg). Dargestellt ist hier der Fall eines Profilabschnitts mit einem gutem Leiter im Präperm in einer Tiefe von 10 - 11 km. Gut zu erkennen ist die oben beschriebene grundsätzliche Abfolge der Leitfähigkeit mit der Tiefe, nur die geringmächtige Deckschicht wurde aus Darstellungsgründen weggelassen. Die Abnahme der Mächtigkeit des oberflächennahen guten Leiters von SW nach NE steht sehr gut im Einklang mit der Abnahme der Mächtigkeit der mesozoischen Sedimente, die durch Bohrungen und aus der Geologie gut bekannt ist. Mit größerer Tiefe wird der geologische Kenntnisstand naturgemäß geringer, aus der Seismik gibt es jedoch Hinweise zur stratigraphischen Abfolge und zur Lage von Tiefenstörungen.

Dabei zeigt sich, daß der präpermische gute Leiter jeweils dicht oberhalb der vermuteten Tiefenlage der Oberkante des Kristallins auftritt. In den Meßkurven tritt dieser gute Leiter durch eine Abflachung im Anstieg der q_{axy} -Kurven im Bereich von 100 s deutlich hervor (Abb. 3, obere Bildleiste). Ohne die Annahme eines guten Leiters in dieser Tiefe ist eine angemessene Datenanpassung nicht zu erreichen. Seine integrierte Leitfähigkeit nimmt nach Süden ab; südlich des Punktes B070, d.h. südlich der bedeutenden Anklam-Störung, gibt es weder in den q_a - noch in der Phasenkurven Hinweise auf eine Fortsetzung des guten Leiters in 10 - 11 km Tiefe. Am Nordende des Profils konnte durch Detailuntersuchungen gezeigt werden, daß dieser gute Leiter im Bereich des markanten, durch Bohrungen und Seismik gut belegten Anstiegs des Basements unter der Ostsee ebenfalls ansteigt.

Als zweites Beispiel zeigt Abb. 4 den Mittelteil des Profils B. Hier tritt kein guter Leiter im Tiefenbereich zwischen Zechsteinbasis und Kristallin-Oberfläche auf, wohl aber in größerer Tiefe innerhalb eines Teilabschnitts des Profils, der durch Potentialfeld-Anomalien (Magnetik, Gravimetrie) im Bereich der Pritzwalk-Anomalie, eines mutmaßlichen Manteldiapirs, gekennzeichnet ist. Ein ähnliches räumliches Zusammentreffen von tiefliegenden guten Leitern und Potentialfeld-Anomalien gibt es auch auf dem Profil G und am NE-Ende des Profils F.

Das dritte Beispiel (Abb. 5) verdeutlicht die Veränderungen der Leitfähigkeitsverteilung auf dem Südteil des Profils B im unmittelbaren Anschluß an das in Abb. 4 gezeigte Teilstück. Die Struktur der Deckschichten wird komplizierter; das grundlegende Muster, wonach die oberflächennahen guten Leiter im wesentlichen bis zur Oberkante Zechstein reichen, wird jedoch beibehalten. An den beiden südlichen Meßpunkten (B260, B270) - d.h. 20 bis 30 km westlich der Elbe - wird nun erstmals wieder ein guter Leiter im Präperm nachgewiesen. Soweit eine stratigraphische Einstufung möglich ist, weist die berechnete Tiefenlage auf einen guten Leiter innerhalb des Karbons hin. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Datenqualität der beiden südlichsten Punkte und ihre Anpassung durch das vorgelegte 2D-Modell (Abb. 5) sehr unbefriedigend sind, die Modelle stammen hier im wesentlichen aus der 1D-Interpretation.

In einem letzten Beispiel wird das (noch nicht vollständig ausgewertete) 2D-Modell des zentralen Abschnitts des Profils F (Wismar - Nienburg) dargestellt (Abb. 6). Hierin wird bestätigt, daß der im Präperm NW-Deutschlands so dominierende gute Leiter wenige Kilometer östlich der Elbe bzw. der Elbe-Störung aufhört (vgl. GURK et al., in diesem Band). Auch wenn die Anpassung an die Daten noch nicht vollständig gelungen ist, wird deutlich, daß der gute Leiter seinen Einfluß auf den Verlauf der Sondierungskurven von SW nach NE verliert (Abb. 6, oben): Das für das Zentrum NW-Deutschlands charakteristische ausgeprägte Minimum in den q_{ayx} -Werten und die Abflachung des Anstiegs der q_{axy} -Werte zwischen 100 und 1000 s gehen stark zurück und sind ab Punkt F050 nicht mehr nachweisbar.

Betrachtet man die berechnete Tiefenlage des präpermischen guten Leiters des Profils F, so scheint es sich wie schon im südlichen Abschnitt des Profils B um einen Horizont innerhalb des Karbons, diesmal speziell an der Basis des Oberkarbons oder im Tiefenbereich des Unterkarbons, zu handeln. Für den Verlauf des Leiters ist darüber hinaus von Interesse, daß der Versatz in der Tiefenlage zwischen den Punkten F100 und F110 keine Anpassung an das geologische Modell ist. Vielmehr stellte sich erst beim Zusammenzeichnen der magnetotellurischen Ergebnisse und der Geologie heraus, daß dieser aus der Modellrechnung folgende Versatz des guten Leiters sehr gut mit der Lage und dem vermutetem Versatzbetrag der Uelzen-Störung korreliert.

5. Geologisch-tektonische Modellierung

Die in den letzten Jahren im Bereich des Norddeutschen Beckens durchgeführten intensiven Erdöl-Erdgas-Explorationsarbeiten haben die Kenntnisse über den stratigraphischen Aufbau, die lithofazielle Entwicklung und die tektonische Felderung des präpermischen Sedimentkomplexes beträchtlich erweitert. Auf Grund des umfangreichen geologisch-geophysikalischen Datenmaterials ist es nun möglich, relativ detaillierte geologische Modelle zur zeit-

lich-räumlichen Entwicklung des tieferen Untergrundes Norddeutschlands abzuleiten, die eine wesentliche Voraussetzung für die geologische Interpretation der magnetotellurischen Messungen bilden. Derartige Modelle können aber nur entwickelt werden, wenn man durch Analogievergleiche versucht, aus besser aufgeschlossenen Nachbargebieten auf die Verhältnisse in den noch unerforschten Bereichen zu schließen.

Der derzeitige geologisch-tektonische Kenntnisstand für das Gebiet Nordostdeutschlands wird in einem NE-SW orientierten geologischen Schnitt von der Offshore-Bohrung G 14 in der südlichen Ostsee bis zum Harz wiedergegeben (Abb. 7). Basierend auf diesem geologischen Grundkonzept wurden entlang der magnetotellurisch vermessenen Trassen Usedom - Nordbrandenburg (Profil A), Rügen - Magdeburg (Profil B) und Wismar - Nienburg/Weser (Profil F) detaillierte geologische Schnitte erarbeitet, in die, wie beschrieben, die magnetotellurischen Ergebnisse eingetragen wurden (Abb. 3 - 6). Aus den noch nicht vollständig abgeschlossenen Untersuchungen lassen sich neue Erkenntnisse zur regionalen Verbreitung gutleitender Schichten sowie zur tektonischen Felderung des tieferen Untergrundes ableiten (vgl. Abb. 1):

- Auf den Inseln Rügen und Usedom sowie im nördlichen Festlandsbereich (bis zur Anklam-Störung) wurden gutleitende Schichten nachgewiesen. Mit Hilfe von 2D-Modellrechnungen bei ausreichend dichtem Meßpunktabstand konnte für das Profil B (Abb. 3) wie auch für das benachbarte Profil A gezeigt werden, daß es sich hierbei wahrscheinlich um die in größere Tiefen (ca. 8-12 km) abtauchenden altpaläozoischen Skandinavischen Alaunschiefer handelt, die in der Offshore-Bohrung G 14 in ca. 1800 m Tiefe erbohrt wurden (FRANKE et al., 1994). Die ca. 30 m mächtigen, mittel- bis oberkambrischen Alaunschiefer weisen dort einen hohen TOC-Gehalt von bis zu 9 % auf, sind hoch inkohlt (6,3 - 7,7 R₀ %) sowie durch Pyrit-Imprägnationen charakterisiert. Erste Messungen an Proben ergaben eine hohe elektronische Leitfähigkeit mit spezifischen Widerständen von z.T. unter 1 Ω (JÖDICKE und HOFFMANN, 1995). Auf Rügen werden diese Alaun-(Schwarz)schiefer im Liegenden der in mehreren Bohrungen aufgeschlossenen turbiditischen und intensiv deformierten ordovizischen Grauwacken (Llanvirn-Llandeilo) erwartet. Das Vorherrschen von Chromit, primitivem tholeiitischen Clinopyroxen sowie Bruchstücken basischer Vulkanite am Gesteinsaufbau der Grauwacken weist auf ein ultrabasisches bis basisches Ausgangsgestein hin (KATZUNG et al., 1993, 1995). Daneben kommen noch Bestandteile von sauren Magmatiten sowie z.T. von geschieferten und anchizonal metamorphen Sedimentgesteinen vor (GIESE et al., 1994).

Geht man davon aus, daß die Schüttung des turbiditischen Grauwackenmaterials nur aus südlichen Richtungen erfolgt sein kann, so ist zu vermuten, daß das Erosionsgebiet wahrscheinlich am aktiven Nordrand von Ost-Avalonia lag (KATZUNG et al., 1995). Zwischen der Osteuropäischen Plattform (= Kontinent Baltica) und Ost-Avalonia lag der Tornquist-Ozean. Nach FRANKE et al. (1996) und HOFFMANN und FRANKE (1996) erfolgte im Initialstadium der Schließung des Tornquist-Ozeans, etwa an der Wende Kambrium/Ordovizium, zunächst eine südgerichtete Subduktion ozeanischer Kruste unter den Nordrand von Ost-Avalonia, begleitet von einem Inselbogen-Magmatismus, der durch das heutige Anomaliengebiet des sogenannten "Ostelbischen Massivs" gekennzeichnet sein könnte. Dessen Produkte wurden bald nach ihrer Generierung teilweise wieder abgetragen und bilden heute die beschriebenen Bestandteile der ordovizischen Grauwacken von Rügen.

Im Zuge der weiteren Konvergenz zwischen ostavalonischer und baltischer Platte scheint ein Polaritätswechsel erfolgt zu sein mit nordgerichteter Subduktion vorwiegend ozeanischer Kruste unter Baltica. In gleicher nordwärtiger Richtung erfolgte eine Obduktion der ostavalonischen Grauwacken, die bei diesem Vorgang tektonisch stark deformiert wurden und über die Plattformsedimente von Baltica geschoben wurden. Die Skandinavischen Alaunschiefer könnten dabei als Überschiebungsbahn (basales kaledonisches Detachment) gedient haben. Der Prozeß war im Grenzbereich Silur/Devon abgeschlossen. Die Avalonia/Baltica-Suturzone (ABS) liegt vermutlich im Bereich des heutigen Stralsund-Anklam-Störungssystems (HOFFMANN und FRANKE, 1996), das möglicherweise Teil der annähernd NW-SE streichenden Transeuropäischen Störung (BERTHELSEN, 1992) ist.

- Südlich der Anklam-Störung schließt sich ein Gebiet an, das keine gutleitenden Schichten in präpermischen Sedimenten aufweist (Abb. 1). Dieses erstreckt sich bis zum Unterelbe-Lineament, d.h. bis zur südwestlichen Begrenzung des ostelbischen Anomaliengebietes (Abb. 4, 5, 6). Das Fehlen gutleitender Schichten könnte mit der geodynamischen Entwicklung dieses Raumes in engem Zusammenhang stehen. Geht man von der Deutung des Ostelbischen Massivs als möglichem kaledonischen Inselbogen mit entwickelten Magmen, d.h. magmatischen Bögen, die sich über aktiven Kontinentalrändern bilden, aus, so sind dort auf Grund der paläogeographischen Situation sicherlich keine Schwarzschiefer sedimentiert worden. Die Schwarzschieferfazies kommt im allgemeinen in tektonisch weitgehend ruhigen, epikontinentalen Arealen zur Ablagerung (JÖDICKE, 1990). Die spätere variszische Entwicklung dieses Gebietes ist gekennzeichnet durch die Ausbildung einer Karbonatplattform im Unterkarbon (Kohlenkalk) sowie die Sedimentation der Vorlandsmolasse im Oberkarbon (FRANKE, 1990), d.h. einer schwarzschiefer-feindlichen Fazies.

Bedeutungsvoll erscheint jedoch für dieses Gebiet der Nachweis gutleitender Schichten in Teufen von größer ca. 13 - 17 km (Abb. 1, 4), die sich in ihrer Lage in auffallender Weise mit markanten gravimetrischen, magnetischen und seismischen Anomalien weitgehend decken. Die Ursache für diese Anomalien sehen HOFFMANN und STIEWE (1994) und BACHMANN und HOFFMANN (1995) in ultrabasischen bis basischen Intrusivkörpern (Manteldiapiren), die während des Beginns der Bildung des Norddeutschen Rotliegendbeckens im höheren Oberkarbon (Stefan) bis Unterrotliegend intrudierten ("pull apart basin"). Die nachgewiesenen guten elektrischen Leiter liegen wahrscheinlich nicht innerhalb des hochohmigen Intrusivgesteins, sondern eher in der Kontaktaureole, wo sich Ilmeniterze, Pyrite, Graphite u.a. gebildet haben könnten. Als ein Beleg für diese Annahme wird der Nachweis von Ilmeniterzen in zahlreichen Xenolithen mafischer Eruptivgesteine gesehen, die in einem unterrotliegenden Basalt der Bohrung Schwerin 1 im Zentrum des Ostelbischen Massivs gefunden wurden (KÄMPF et al., 1994).

- Südlich der Unterelbe-Störung setzen gutleitende Schichten im nordöstlichen Niedersachsen und im südwestlichen Mecklenburg, d.h. im Bereich der variszischen Außenzonen in Teufen von ca. 7-10 km erneut ein (Abb. 1, 5, 6). Die Bohrung Pröttlin 1, abgeteuft in SW-Mecklenburg, erbohrte im Teufenintervall von 5148-7008 m (Endteufe) pelagische Stillwassersedimente (FRANKE et al., 1996) des tiefsten Namur, die eine Wechsellagerung von schwarzen bis grauen marinen Tonsteinen mit siltigen bis feinsandigen Horizonten (distale Turbidite) beinhalten. Diese teilweise in Schwarzschieferfazies vorliegenden Sedimente sind als stratigraphische Äquivalente zu den Schwarzschiefern der Kulmfazies des Unterkarbons bzw. des tiefsten Namurs der Bohrung Münsterland 1 anzusehen ("Hangende Alaunschiefer"). Wegen der großen Mächtigkeit könnten sie die gutleitenden Horizonte in den magnetotellurischen Modellen erklären.

Da bekanntlich Schwarzschiefer als wichtige Muttergesteine für die Bildung von Kohlenwasserstoffen angesehen werden, ergeben sich aus der abgeleiteten Felderung nach dem Auftreten gutleitender Schichten (Abb. 1) wichtige Hinweise auf die Verbreitung potentieller präpermischer Muttergesteine im tieferen Untergrund des Norddeutschen Rotliegendbeckens. Die erzielten magnetotellurischen Ergebnisse sind somit für die Einschätzung der Kohlenwasserstoff-Höffigkeit der paläozoischen Sedimente von besonderem Interesse.

6. Danksagung

Wir danken G. Kallaus (Hannover) und J. Rätz (Berlin) für die Erstellung der Abbildungen.

7. Literatur

- ANDERSSON, A., DAHLMAN, B., GEE, D.G., and SNÄLL, S. (1985): The Scandinavian alum shales. - Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. Ca Nr. 56; Uppsala.
- BACHMANN, G.H. und HOFFMANN, N. (1995): Bildung und Entwicklung des Norddeutschen Rotliegendbeckens. - In Plein (ed.): Stratigraphie von Deutschland I. - Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg 183: 156-169.

- BERDICHEVSKY, M.N. and DMITRIEV, V.I. (1976): Basic principles of interpretation of magnetotelluric sounding curves. - KAPG Geophysical Monograph: 165-221; Budapest.
- BERTHELSEN (1992): From Precambrian to Variscan Europe. - In: BLUNDELL, D., FREEMAN, R., and MUELLER, ST. (eds.): A continent revealed. The European Geotraverse: 153 - 164; Cambridge.
- BÜCHTER, CHR. (1983): Die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Bereich der Bohrung Münsterland 1: ein Vergleich zwischen magnetotellurischen Untersuchungen, elektrischen Bohrlochmessungen, geoelektrischen Tiefensondierungen sowie Messungen der Leitfähigkeit an Gesteinsproben. - Diplomarbeit, Inst. f. Geophys. Univ. Münster. [unveröff.]
- DOHR, G. (1989): Ergebnisse geophysikalischer Arbeiten zur Untersuchung des tieferen Untergrundes in Norddeutschland. - Nds. Akad. Geowiss. Veröffl. 2: 4-47; Hannover.
- DUBA, A., HUENGES, E., NOVER, G., WILL, G., and JÖDICKE, H. (1988): Impedance of black shale from Münsterland 1 borehole: an anomalously good conductor? - Geophys. J. 94: 413 - 419.
- FRANKE, D. (1990): Der präpermische Untergrund der Mitteleuropäischen Senke. Fakten und Hypothesen. - Nds. Akad. Geowiss. Veröffentl. 4: 19-75; Hannover.
- FRANKE, D., GRÜNDEL, J., LINDERT, W., MEISSNER, B., SCHULZ, E. und ZAGORA, K. (1994): Die Ostseebohrung G 14, eine Profilübersicht. - Z. geol. Wiss. 22, 1/2:235-240; Berlin.
- FRANKE, D., HOFFMANN, N., and LINDERT, W. (1996): The Variscan Deformation Front in East Germany Part 2: Tectonic Interpretation. - Z. angew. Geol. 42, 1: 43-55.
- GIESE, U., KATZUNG, G., and WALTER, R. (1994): Detrital composition of Ordovician sandstones from the Rügen boreholes: implications for the evolution of the Tornquist Ocean. - Geol. Rdsch. 83: 293-308; Heidelberg.
- HOFFMANN, H., BÖLSCHKE, J., HORST, W., LANGE, W., PALESCH, F., POMERANCEVA, V. und WRUCK, K. (1989): Tiefenseismische Untersuchungen in der DDR durch den VEB Kombinat Geophysik - Stand und Ergebnisse. - Z. angew. Geol. 35, 10/11: 308-314; Berlin.
- HOFFMANN, N. und FRANKE, D. (1996): The East Avalonia-Baltica suture - new constraints and alternative interpretations. - Paper, TESZ spring meeting, Wrocław.
- HOFFMANN, N. und STIEWE, H. (1994): Neuerkenntnisse zur geologisch-geophysikalischen Modellierung der Pritzwalker Anomalie im Bereich des Ostelbischen Massivs. - Z. geol. Wiss. 22: 161-171.
- HOFFMANN, N., FLUCHE, B. und MÜLLER, W. (1994): Erste Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen in Nordostdeutschland - ein Statusbericht. - In: BAHR, K. und JUNGE, A. (Hrsg.): Prot. 15. Koll. Elektromagnetische Tiefenforschung, Höchst im Odenwald, 28. - 31.3.1994: 307-321; Frankfurt, Edinburgh.
- JÖDICKE, H. (1984): Zur Deutung magnetotellurisch nachgewiesener guter Leiter im tieferen Untergrund Nordwestdeutschlands. - In: HAAK, V. und HOMILIUS, J. (Hrsg.): Protokoll über das 10. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung" in Grafrath/Oberbayern vom 19. - 23. März 1984: 331 - 334; Berlin, Hannover.
- JÖDICKE, H. (1990): Zonen hoher elektrischer Krustenleitfähigkeit im Rhenoherynikum und seinem nördlichen Vorland. - Diss. Math.-Nat. Fak. Univ. Münster; Hochschulschriften Bd. 24, Lit-Verlag, Münster, Hamburg.
- JÖDICKE, H. und HOFFMANN, N. (1995): Leitfähigkeitsmessungen an Schwarzschieferproben der Bohrung G 14 und ihre Bedeutung für die Interpretation magnetotellurischer Daten in Norddeutschland. - Vortrag mit Kurzfassung, S. 152, 59. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 20. - 24. März 1995; Hamburg.
- KÄMPF, H., KORICH, D. und BRAUSE, H. (1994): Anorthosit-, Gabbro- und Ilmeniterz-Xenolithe in permischen Basalten der Tiefbohrung Schwerin 1 - ein petrographisches Indiz für das Ostelbische Massiv. - Z. geol. Wiss. 22, 1/2: 115-128; Berlin.
- KATZUNG, G., GIESE, U., WALTER, R., and v. WINTERFELD, C. (1993): The Rügen Caledonides, northeast Germany. - Geol. Mag. 130: 725-730; Cambridge.
- KATZUNG, G., GIESE, U., MALTZ, J., SERVAIS, TH., and VAN GROOTEL, G. (1995): The eastern end of Avalonia: continuation into northern Central Europe. - In: COOPER, J.D., DROSER, M.L., and FINEY, ST.C. (eds.): Ordovician Odyssey; Short Papers for the 7th Int. Symp. on the Ordovician System, Las Vegas, USA, June 1995: 233-236; Fullerton.
- KNÖDEL, K., LOSECKE, W., and WOHLBERG, J. (1979): A Comparison of Results of Geothermal and Magnetotelluric Investigations in Northwestern Germany. - J. Geophys. 45: 199 - 207.
- LOSECKE, W., KNÖDEL, K. and 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.
- PORSTENDORFER, G. (1975): 20 Jahre Anwendung tellurischer und magneto-tellurischer Meßmethoden in der DDR. - Zeitschrift f. angew. Geol. 21: 405-410.
- WANNAMAKER, P.E. (1990): PW2DI-v1.00 - Finite element program for magnetotelluric forward modeling and parameterized inversion of two-dimensional earth resistivity structure. - User Documentation, Univ. of Utah, Research Inst., Earth Science Lab., Salt Lake City.

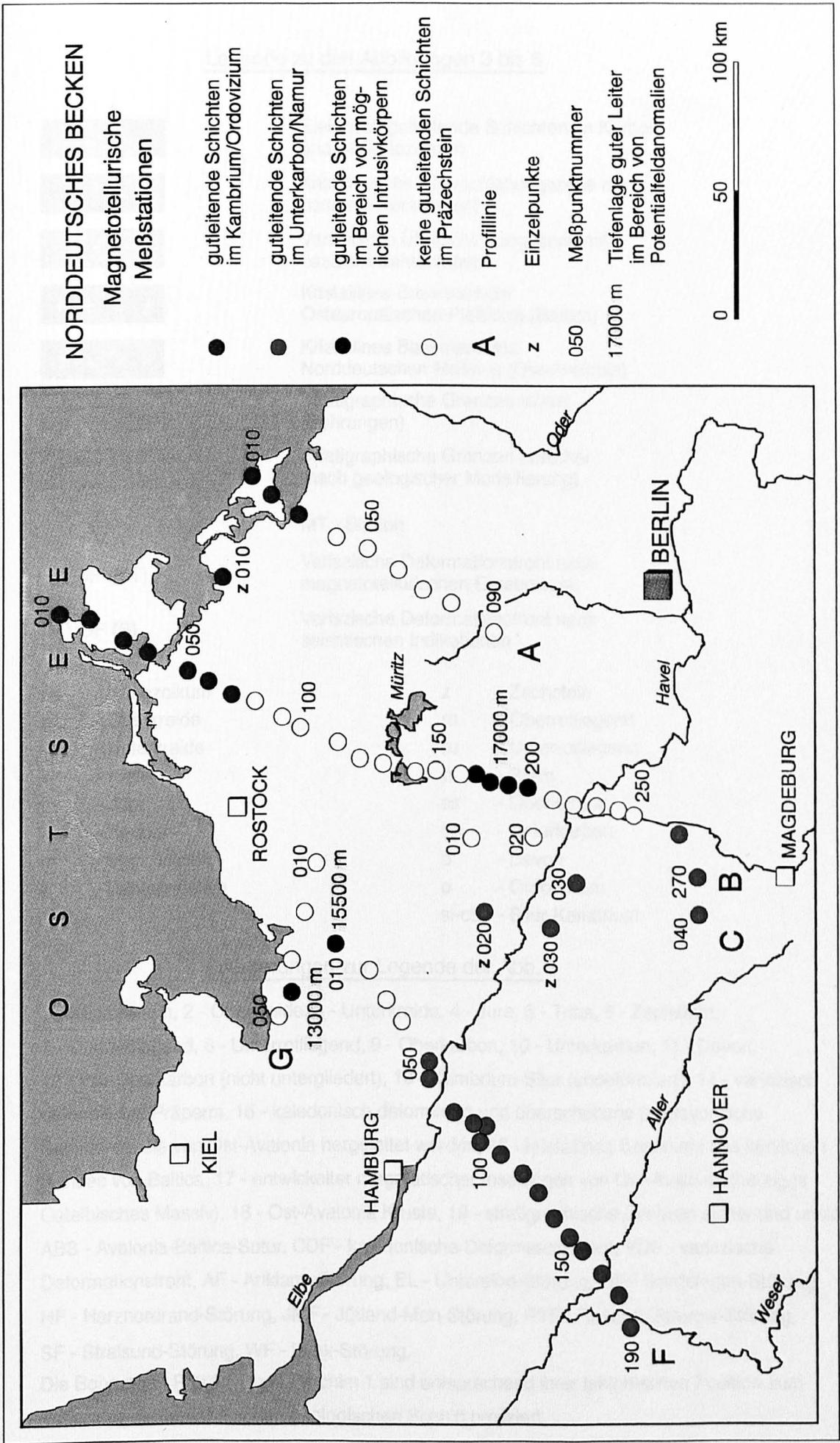
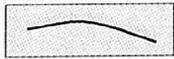


Abb. 1: Magnetotellurische Meßstationen

Legende zu den Abbildungen 3 bis 6

	Elektrisch gutleitende Schichten im Karbon und Altpaläozoikum
	Kaledonische Überschiebungszone mit basalem Detachment
	Variszische Überschiebungszone mit basalem Detachment
	Kristallines Basement der Osteuropäischen Plattform (Baltica)
	Kristallines Basement des Norddeutschen Massivs (Ost-Avalonia)
	Stratigraphische Grenzen sicher (Bohrungen)
	Stratigraphische Grenzen unsicher (nach geologischer Modellierung)
	MT - Station
VDF (MT)	Variszische Deformationsfront nach magnetotellurischen Ergebnissen
VDF (S)	Variszische Deformationsfront nach seismischen Indikationen
ne - Känozoikum	z - Zechstein
kro - Oberkreide	ro - Oberrotliegend
kru - Unterkreide	ru - Unterrotliegend
kr - Kreide	p - Perm
j - Jura	cs - Oberkarbon
k - Keuper	cd - Unterkarbon
m - Muschelkalk	d - Devon
s - Buntsandstein	o - Ordovizium
	si-cb - Silur-Kambrium

Erläuterungen zur Legende der Abb. 7

1 - Känozoikum, 2 - Oberkreide, 3 - Unterkreide, 4 - Jura, 5 - Trias, 6 - Zechstein, 7 - Oberrotliegend, 8 - Unterrotliegend, 9 - Oberkarbon, 10 - Unterkarbon, 11 - Devon, 12 - Prä-Oberkarbon (nicht untergliedert), 13 - Kambrium-Silur (undeformiert), 14 - variszisch deformiertes Präperm, 15 - kaledonisch deformierte und überschobene prädevonische Sedimente, die von Ost-Avalonia hergeleitet werden, 16 - kristallines Basement des südlichen Randes von Baltica, 17 - entwickelter magmatischer Inselbogen von Ost-Avalonia (heutiges Ostelbisches Massiv), 18 - Ost-Avalonia Kruste, 19 - stratigraphische Grenzen sicher und unsicher, ABS - Avalonia-Baltica-Sutur. CDF - kaledonische Deformationsfront, VDF - variszische Deformationsfront, AF - Anklam-Störung, EL - Unterelbe-Störung, GF - Gardelegen-Störung, HF - Harznordrand-Störung, JMF - Jütland-Møn-Störung, RTF - Rostock-Teterow-Störung, SF - Stralsund-Störung, WF - Wiek-Störung. Die Bohrungen Pröttlin 1 und Parchim 1 sind entsprechend ihrer tektonischen Position zum Varisziden-Außenrand in den geologischen Schnitt projiziert.

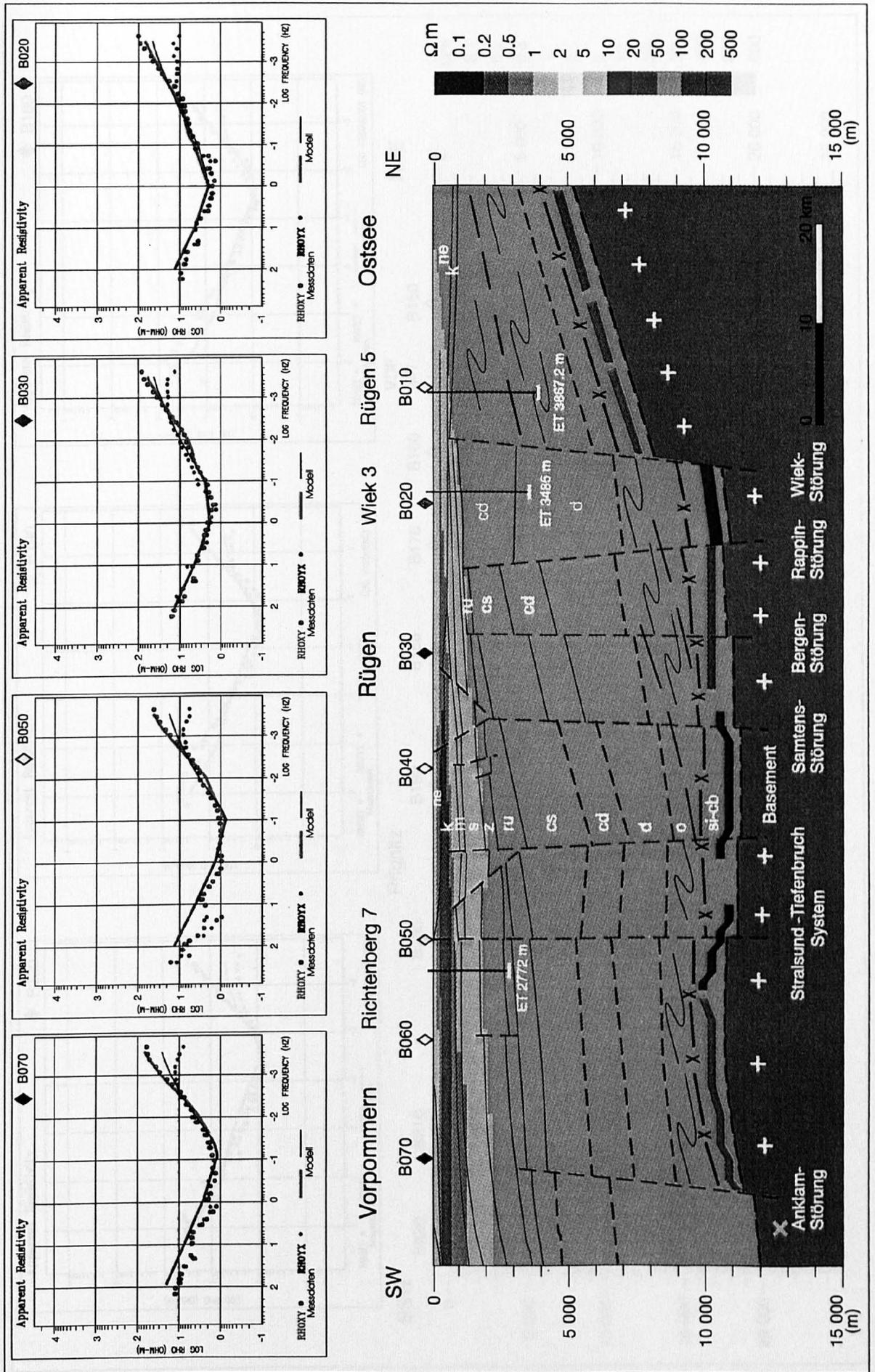


Abb. 3: Profil B, Rügen - Magdeburg (Stationen B010 - B070)

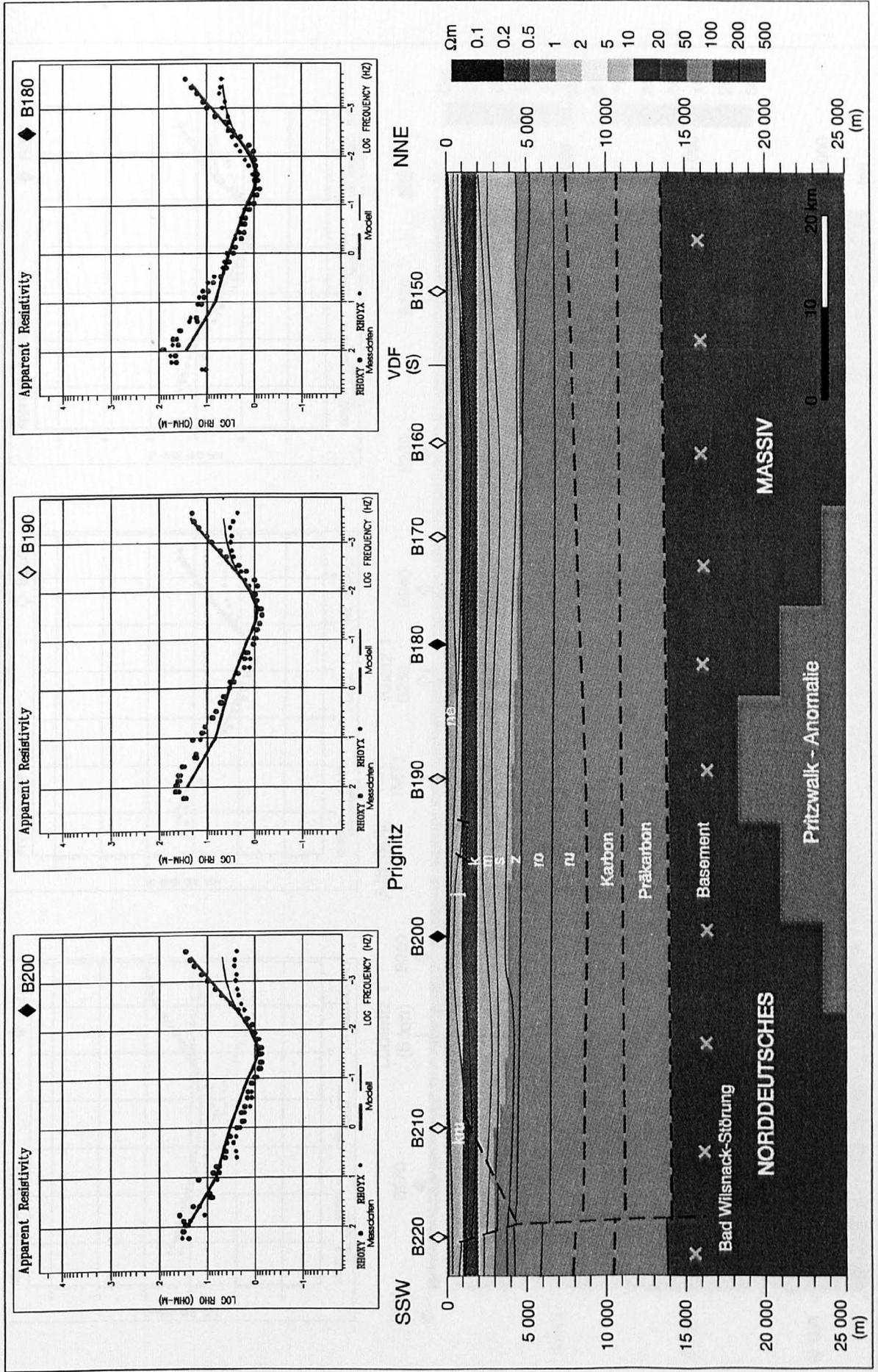


Abb. 4: Profil B, Rügen - Magdeburg (Stationen B150 - B220)

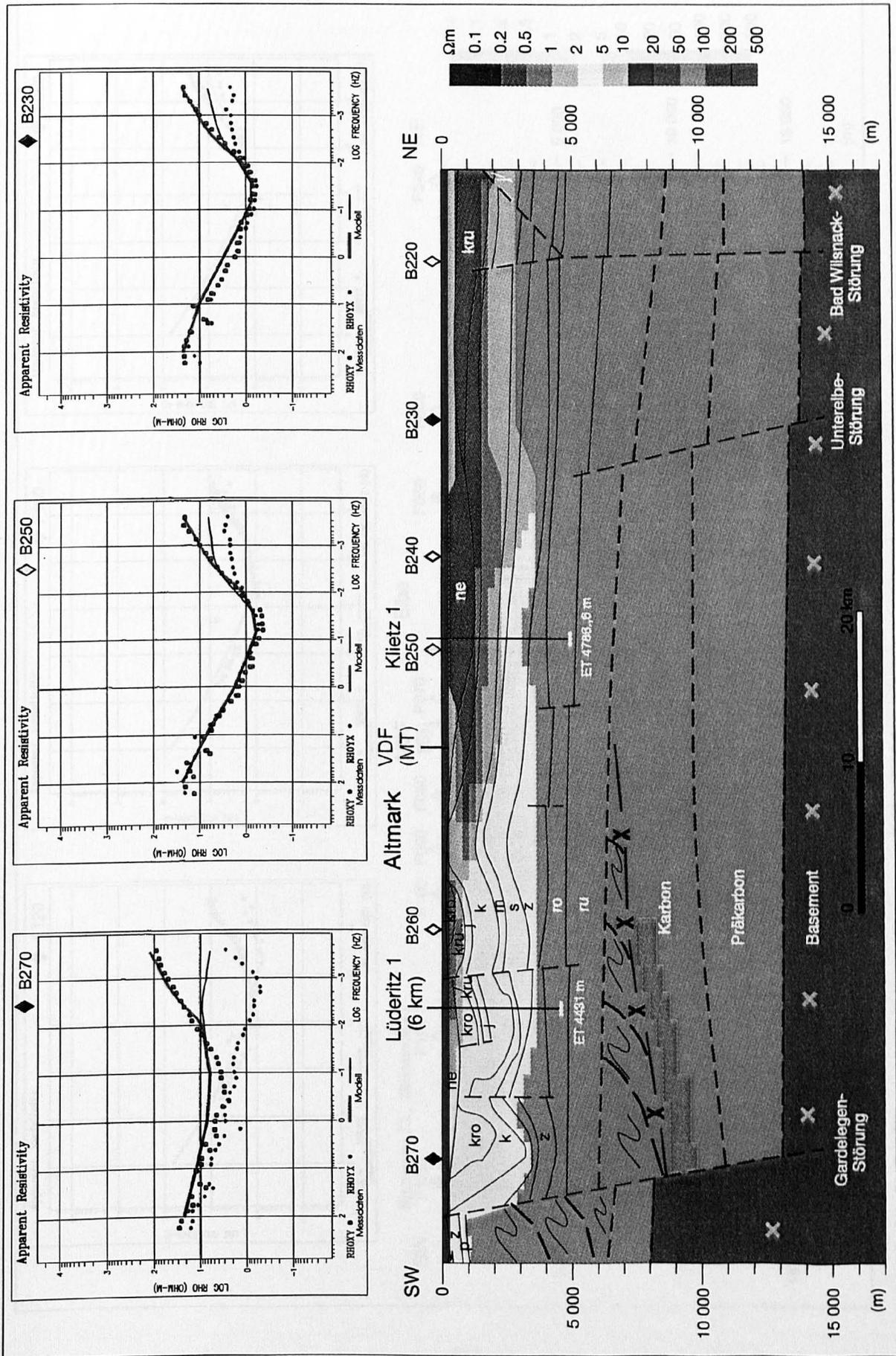


Abb. 5: Profil B, Rügen - Magdeburg (Stationen B220 - B270)

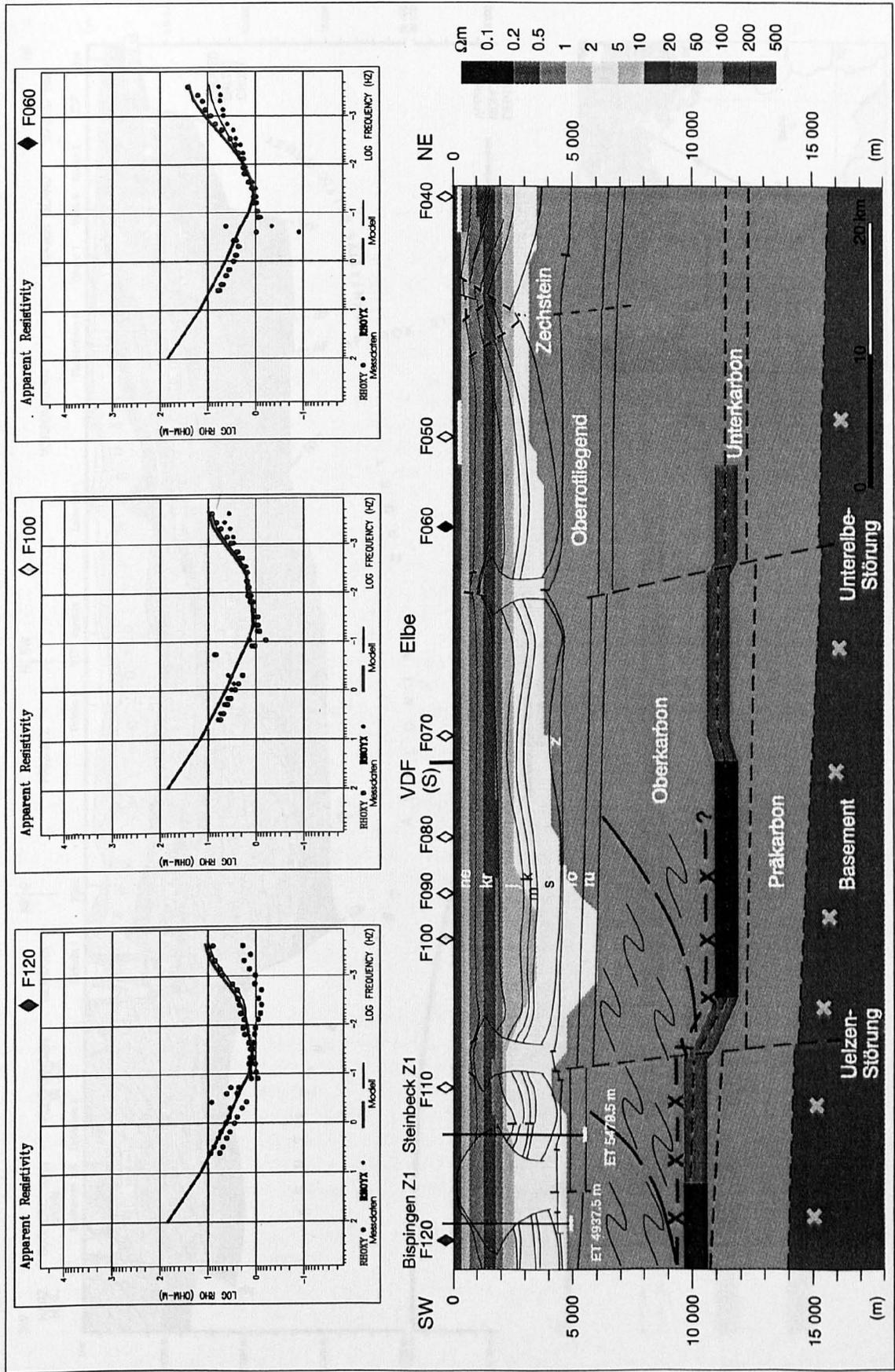


Abb. 6: Profil E, Wismar - Nienburg (Stationen F40 - F120)

