

Aktive Audiomagnetotellurik
im KTB-Zielgebiet Oberpfalz



AKTIVE AUDIOMAGNETOTELLURIK IM KTB-ZIELGEBIET OBERPFALZ

Chr. Drews

Zusammenfassung

In der Vorerkundungsphase des Kontinentalen Tiefbohrprogrammes wurden in der Oberpfalz Messungen mit aktiver Audiomagnetotellurik zweier etwa NW-SE gerichteter Profile durchgeführt. Die Auswertung der Daten erfolgte eindimensional mit einem Inversionsprogramm.

Die ermittelten Leitfähigkeitsverteilungen lassen sich in drei Gruppen einteilen:

1. Granite und das Kristallin des Moldanubikums zeichnen sich durch hohe Widerstände ($> 400 \text{ Ohm m}$) aus.
2. Im nördlichen Teil der ZEV nimmt der Widerstand in einigen hundert Metern Tiefe von $200 - 600 \text{ Ohm m}$ bis auf Werte um 10 Ohm m ab.
3. In der südlichen ZEV, in Bereichen westlich der Fränkischen Linie und an einem im Saxothuringikum gelegenen Meßpunkt erklären eine oder mehrere gut leitende Zwischenschichten in hochohmiger Umgebung die Meßdaten.

Chr. Drews
Institut für Geophysik und Meteorologie
Technische Universität Braunschweig
Mendelssohnstr. 3
3300 Braunschweig

Einleitung

In der Vorerkundungsphase des Kontinentalen Tiefbohrprogramms wurden vom Institut für Geophysik und Meteorologie der TU Braunschweig im Zielgebiet Oberpfalz Messungen mit Aktiver Audiomagnetotellurik durchgeführt. In dem Bestreben, eine möglichst vollständige Überdeckung eines großen Tiefenbereichs zu erreichen, bildet dieses Verfahren einen Übergang zwischen der oberflächennahen Schlumbergergeoelektrik und der erst bei größeren Eindringtiefen beginnenden passiven Magnetotellurik. In dem bei unserem Verfahren genutzten Frequenzbereich von 2500 bis ca. 0.1 Hz ist die natürliche Anregung gering und die technischen Störungen sind groß. Deshalb bietet sich hier die künstliche Anregung an, was bei unserer Apparatur mit einem geerdeten Dipol geschieht.

Die Messungen in der Oberpfalz und ihre Auswertung waren das Thema meiner Diplomarbeit. Die wichtigsten Ergebnisse sollen nun hier noch einmal zusammengefasst werden.

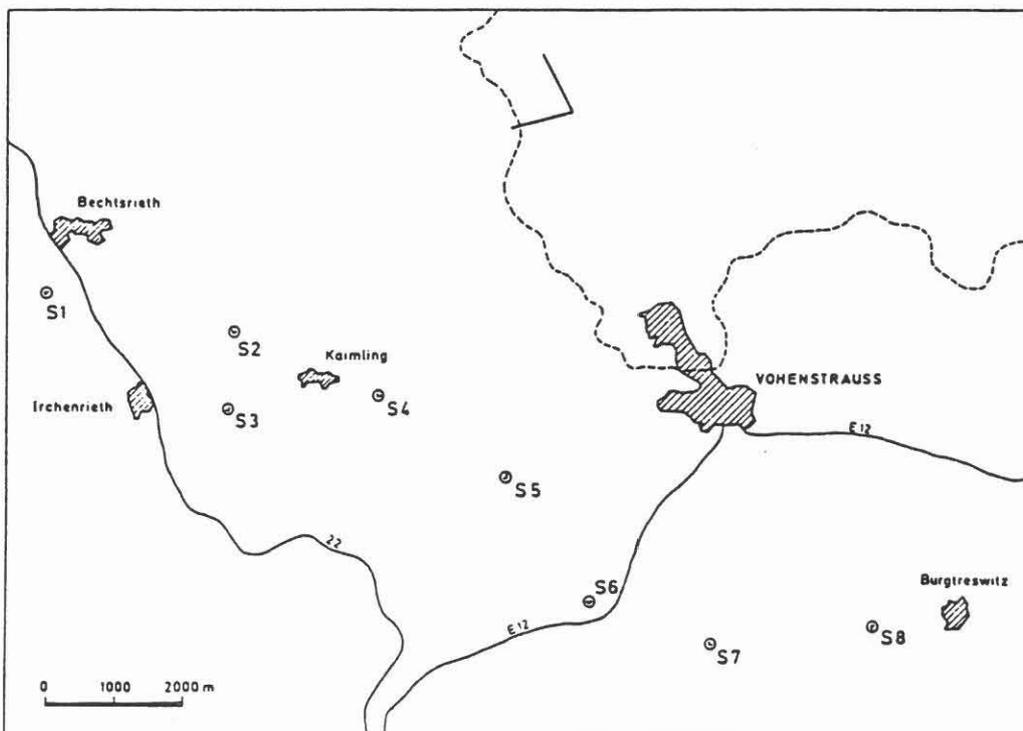


Abb.1a: Skizze des Meßgebietes, südlicher Teil

Messungen

Die Meßpunkte liegen auf zwei Profilen, die beide etwa parallel zur B22 im Umfeld der KTB-Bohrung liegen (Abb.1a,b). Der Abstand zwischen den Profilen beträgt ungefähr 25 km, so daß zwei Senderaufbauten nötig waren. Denn selbst bei sehr guten Bedingungen für den Dipol, soll heißen bei geringen Übergangswiderständen der Erder, sind mit unserer Anlage größere Abstände zwischen Sender und Empfänger als etwa 10 km unrealistisch, da dann die Signale am Empfänger zu klein werden.

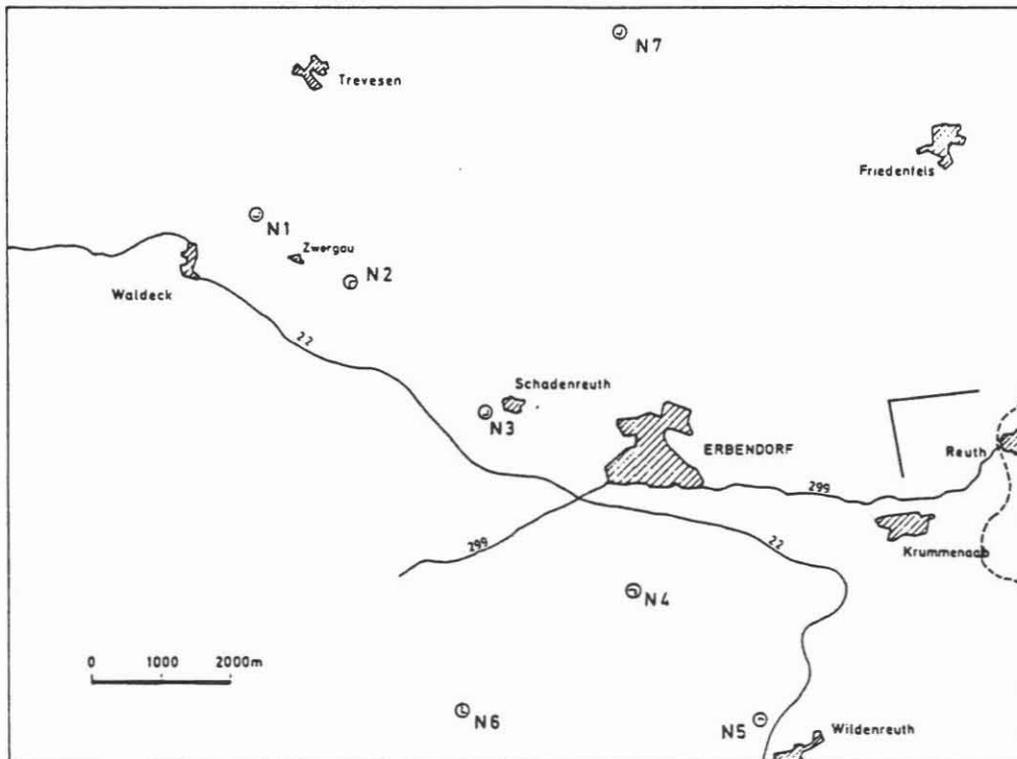


Abb.1b: Skizze des Meßgebietes, nördlicher Teil

Beide Profile überqueren die Zone Erbdorf - Vohenstrauss (ZEV). Das südliche Profil beginnt westlich der Fränkischen Linie im Mesozoikum, überquert innerhalb der ZEV den Leuchtenberger Granitkomplex und endet im Osten auf dem kristallinen Grundgebirge, dem Moldanubikum *senso stricto*. Bei dem nördlichen Profil wird das Saxothuringikum angeschnitten. Hier reichen die Meßpunkte allerdings nicht nach Osten über die ZEV hinweg. Der östlichste Punkt N5 liegt ungefähr 4 km westlich der Bohrlokation. Hinzu kommen hier noch ein nördlicher Punkt auf dem Steinwaldgranit und ein weiterer westlich der Fränkischen Linie.

Abb.2 zeigt den prinzipiellen Meßaufbau. An jedem Meßpunkt wurde nacheinander mit zwei zueinander orthogonalen Dipolen gemessen, so daß insgesamt $4 \cdot 15 = 60$ f_s - und Phasenkurven aufgenommen wurden.

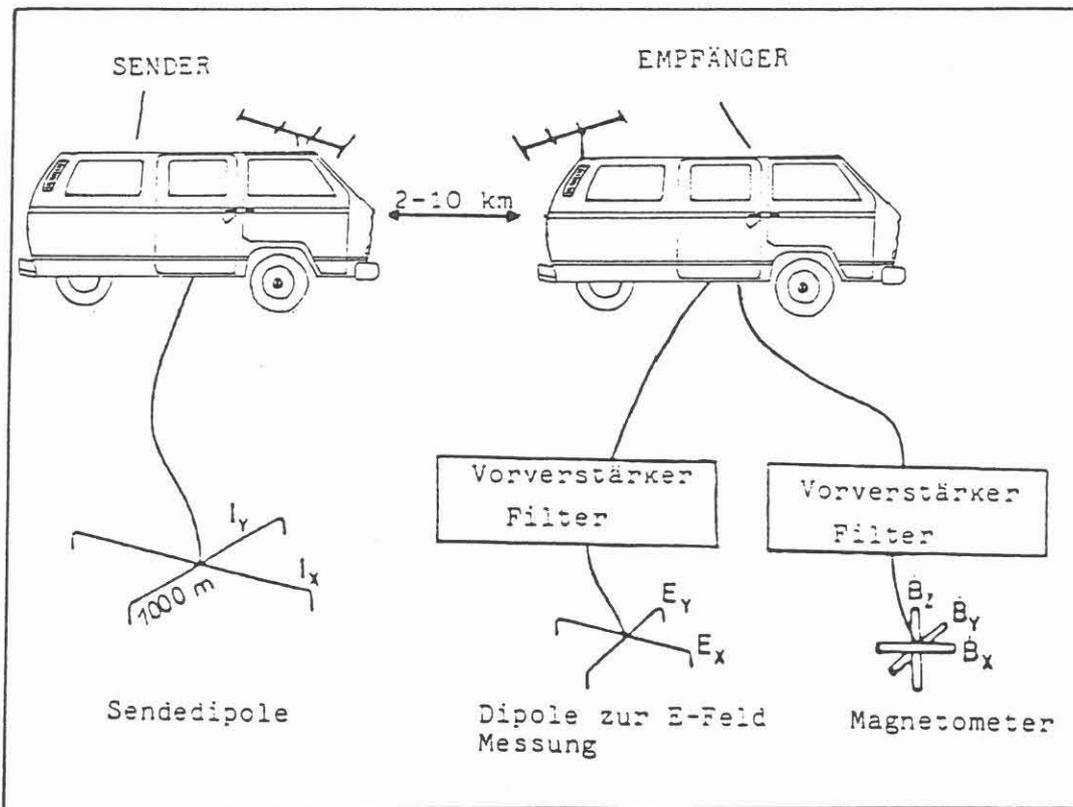


Abb.2: Prinzipskizze des Meßaufbaus

Auswertung

Im ersten Schritt der Bearbeitung werden die im Feld in Nord-Süd und Ost-West-Richtung aufgenommenen Feldkomponenten in ein Zylinderkoordinatensystem transformiert, in dessen Ursprung der Sendedipol liegt (Abb.3). Die so erzeugten ρ_s - und Phasenkurven sind für uns am besten zu beurteilen, da sie im Gegensatz zu solchen Darstellungen, bei denen eine Transformation in das Hauptachsensystem des Impedanztensors vorgenommen wurde, unabhängig von Einflüssen durch die Geometrie des Meßaufbaus sind.

Anhand unserer Erfahrung können wir bereits vor der Computerauswertung ein mehr oder weniger gut passendes eindimensionales Modell "erraten". Denn ausser aus dem Fernfeldteil, in dem die ρ_s -Kurve schon ungefähr den Verlauf des tatsächlichen Widerstandes im Untergrund widerspiegelt, sind auch aus der Lage und dem Beginn des Nahfeldanstieges Rückschlüsse auf den Untergrund zu ziehen.

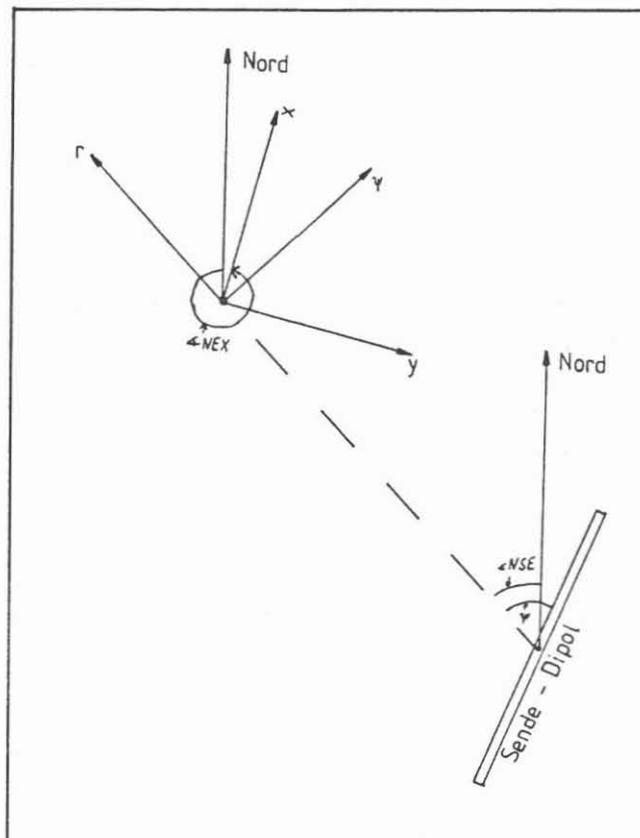
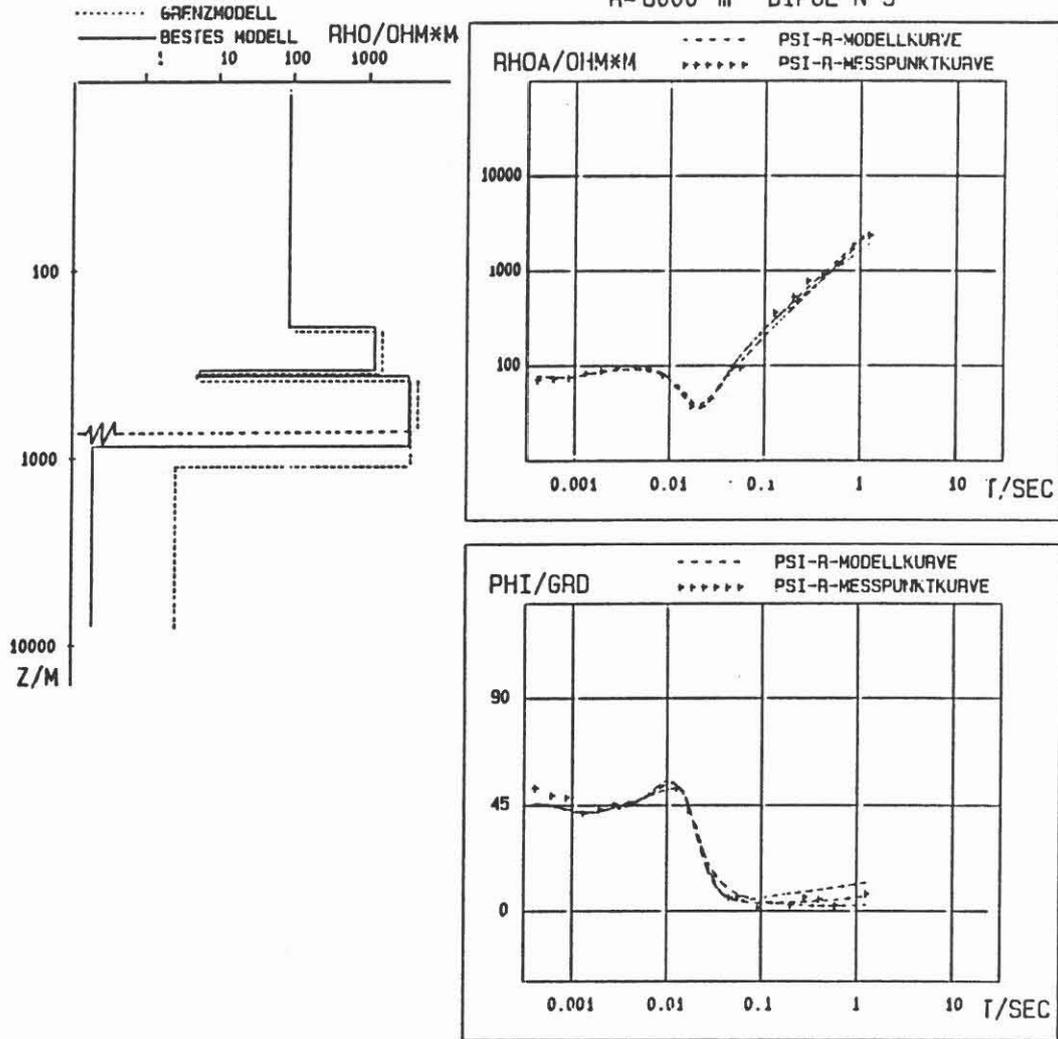


Abb.3: Definition der Koordinatensysteme

S1
TREBSAU

PSI-R-KOMPONENTE

R=8000 m DIPOL N-S



	BESTES MODELL :	8.01E+01	1.08E+03	5.10E+00	3.12E+03	1.85E-01
RHO/OHM*M	GRENZMODELL :	8.01E+01	9.98E+02	4.96E+00	2.87E+03	2.33E+00
	GRENZMODELL :	8.02E+01	1.17E+03	5.24E+00	3.39E+03	1.47E-02
	BESTES MODELL :	2.03E+02	1.44E+02	2.63E+01	5.11E+02	
D/M	GRENZMODELL :	1.98E+02	1.46E+02	2.77E+01	7.57E+02	
	GRENZMODELL :	2.08E+02	1.41E+02	2.49E+01	3.45E+02	

Abb.4a:S1 Trebsau NS PsiR, Meßwerte und Modelle

Trebsau NS-PSIR
S1

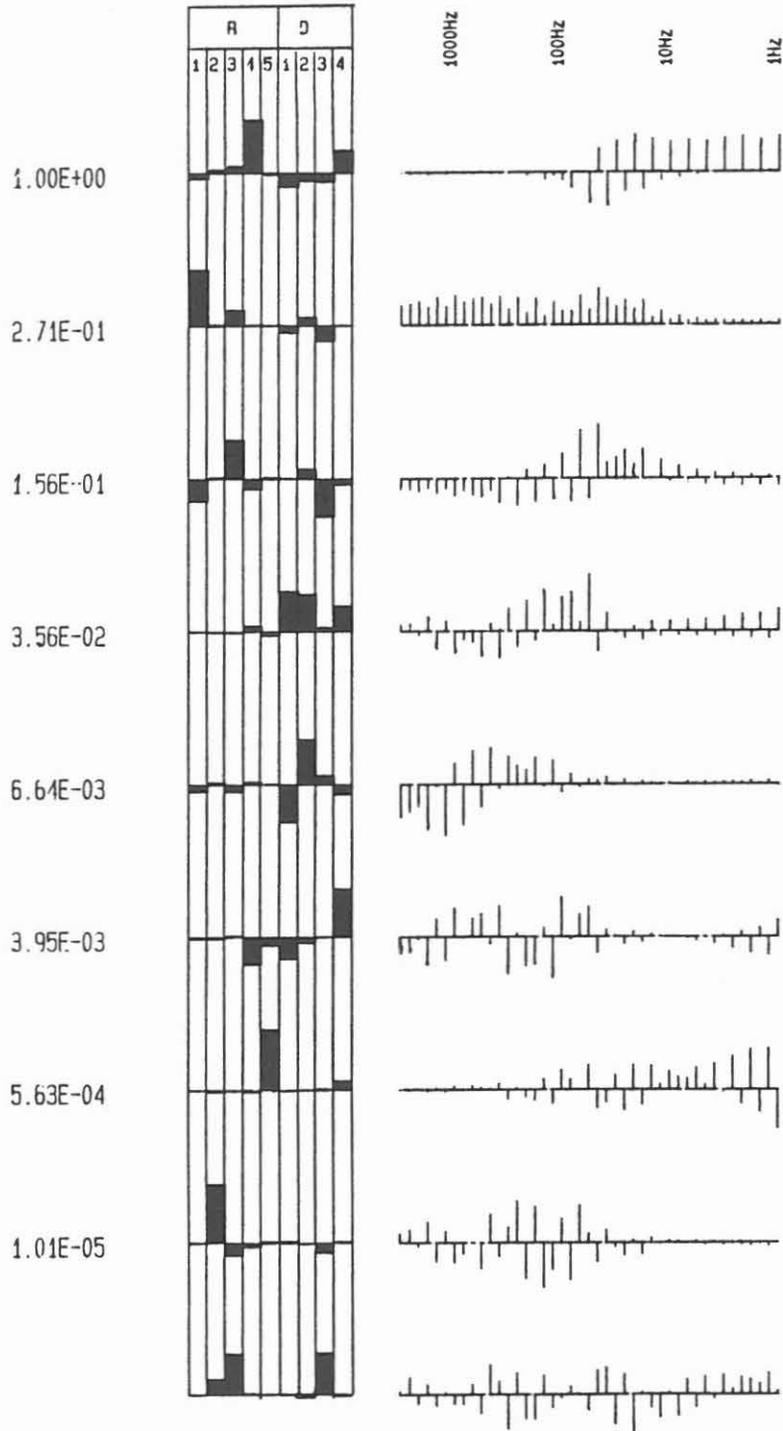


Abb.4b:S1 Trebsau NS Psi R, Eigenvektoren

So spalten die im Nahfeld des Dipols mit 45° ansteigenden Äste der zwei zu einer Anregungsrichtung gehörenden Polarisationen (E_T/H_V und E_V/H_T) in einer Halbraumkurve mit dem Faktor 4 auf. Liegt aber in der Tiefe, die zum Übergangsbereich zwischen Fern- und Nahfeld gehört ein Widerstandskontrast vor, so verändert sich diese Aufspaltung. Bei hochohmigerem Liegendem wird der Aufspaltungsfaktor geringer, und bei besser leitendem Untergrund wird er größer.

Die genaue eindimensionale Auswertung geschieht dann mit einem Inversionsprogramm, das zur Stabilisierung den Marquardt-Algorithmus benutzt. Die Ergebnisse einer solchen Inversion lassen sich am besten an einem Beispiel erläutern. Dies soll für den Punkt S1 Trebsau (Abb.4a,b) geschehen. In dem Plot sind die Meßwerte für β_s und Phase in der üblichen logarithmischen Darstellung über der Periode eingetragen. Dazu kommen die rechnerisch ermittelten Kurven für das beste eindimensionale Modell, sowie eine graphische und numerische Darstellung dieses Modells. Die Anzahl der Schichten wird durch das Startmodell vorgegeben. Als weiteres Ergebnis findet man in dem Plot noch ein oder mehrere Grenzmodelle in der selben Weise dargestellt. Diese Grenzmodelle entstehen durch Variation schlecht aufgelöster Modellparameter oder Parameterkombinationen. Dies geschieht solange, bis eine vorgegebene mittlere quadratische Abweichung von den Meßwerten, abhängig von der erzielten Anpassung des besten Modells, erreicht ist. An dem Beispiel sieht man, daß hier z.B. die Variation des Liegendwiderstandes interessant ist, da sich herausstellt, daß er erheblich verändert werden kann, ohne daß die Kurven deutlich von den Meßwerten abweichen.

Für welche Parameterkombinationen es sinnvoll ist, Grenzmodelle zu berechnen, um die wirklich in der Messung enthaltene Information zu finden, läßt sich an dem zweiten Plot zu einem Meßpunkt (hier Abb.4b) ablesen.

Dort sind die normierten Eigenwerte der Inversionsmatrix angegeben und die zugehörigen Parameter- und Dateneigenvektoren graphisch dargestellt. Die Eigenwerte sind der Größe nach geordnet, das heißt, der Parametereigenvektor in der obersten Zeile gibt die am besten aufgelöste Parameterkombination an. In diesem Beispiel ist dies der Widerstand der vierten Schicht, wobei allerdings auch die Mächtigkeit dieser Schicht dazu gehört. Bei der Berechnung von Grenzmodellen zu diesem Eigenwert würde also das Produkt von Dicke und Leitfähigkeit dieser Schicht variiert. Da dieser Eigenwert aber so groß ist, sind keine großen Variationen zu erwarten. Am zweitbesten ist hier der Widerstand der ersten Schicht aufgelöst, und man sieht auch an dem Dateneigenvektor, daß die Information hierüber in einem großen Teil der Daten, nämlich von 2500 - ca.10 Hz steckt. Soll heißen, der Hangendwiderstand beeinflußt die Meßwerte in diesem Fall bis in den Übergangsbereich zum Nahfeld, in der ρ_s - Kurve an dem "Unterschwinger" zu erkennen. Die Mächtigkeit dieser Schicht kommt allerdings erst bei dem viertgrößtem Eigenwert vor und auch nur in Kombination mit D_2 und D_4 .

Dieser Darstellung können zwar nicht direkt quantitative Fehlerbalken entnommen werden, sie liefert aber einen anschaulichen Hinweis auf die Zuverlässigkeit der Modelle.

Ergebnisse

Die Meßpunkte lassen sich anhand der ermittelten Leitfähigkeitsmodelle in drei Gruppen einteilen.

1.) Modelle mit durchgehend mehr oder weniger hohen Widerständen ($> 400 \Omega \cdot m$). Hierzu gehören der Meßpunkt N7 auf dem Steinwaldgranit, die Punkte S4 und S5 auf dem Leuchtenberger Granit und der Punkt S8 auf dem Moldanubikum Senso Stricto, also dem im Osten des Bohrgebiets anstehendem kristallinem Grundgebirge.

Bei allen diesen Punkten ist davon auszugehen, daß wir mit dem Empfänger auf kristallinem Gestein standen, und daß dieses mindestens bis an die Grenzen der Aussagtiefe der AAMT hinabreicht. Denn diese Widerstände sind typisch für bergfeuchte kristalline Gesteine, wie man in einschlägigen Tabellen nachlesen kann (z.Bsp. Deppermann et al., 1961).

Als Beispiel für diese Gruppe will ich den Punkt N7 etwas näher betrachten (Abb.5a,b). Hier konnten einmal die zwei Polarisierungen einer Anrichtungsrichtung mit einem gemeinsamen Modell ausgewertet werden, was darauf hindeutet, daß der Untergrund tatsächlich so eindimensional ist, wie wir es für die Interpretation voraussetzen. In der Eigenwertanalyse (Abb.5b) gibt es deshalb zu jedem Eigenwert zwei Dateneigenvektoren, einen zu der RPSI-Komponente und einen zu der PSIR-Komponente.

Bei den Eigenwerten ist ein deutlicher Sprung um nahezu drei Größenordnungen vom dritten auf den vierten Eigenwert zu sehen, das heißt, hier ist die Grenze in der Auflösbarkeit zu ziehen. Der vierte Eigenwert gehört zu dem Produkt $\rho_1 * D_1$; für diese gut leitende Zwischenschicht steckt also keine eindeutige Aussage über dieses Produkt in den Meßwerten. Das ist auch an den Grenzmodellen zu erkennen.

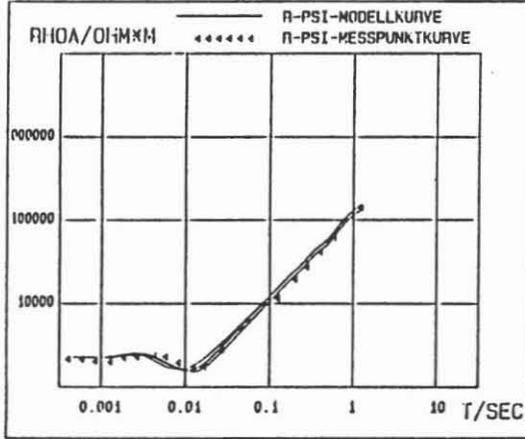
Ihre integrierte Leitfähigkeit D_1 / ρ_1 bleibt aber bei der Variation mit ungefähr 1.6 S erhalten. Dieser Quotient ist ja auch in dem Parametereigenvektor zum größten Eigenwert enthalten. Ausserdem kann keine genaue Aussage über den Liegendwiderstand ρ_1 gemacht werden, der durch den kleinsten Eigenwert repräsentiert wird. Er muß aber eindeutig hochohmig sein, da die beiden Nahfeldäste fast überhaupt nicht aufspalten.

2.) Die Meßpunkte N2, N3, N4 und N5 auf dem nördlichen Teil der ZEV, oder an deren Rand gelegen: Ihnen gemeinsam ist eine Abnahme des Widerstandes in einigen hundert Metern Tiefe, von 200 - 600 $\Omega * m$ auf Werte um 10 $\Omega * m$.

N7
WALDHAUS

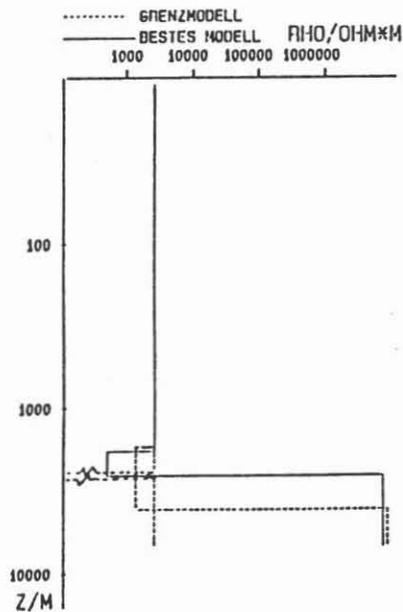
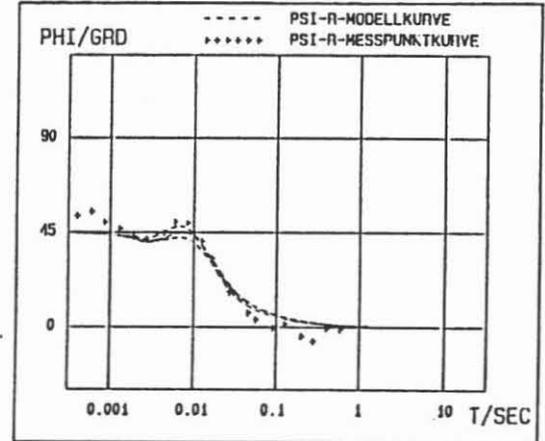
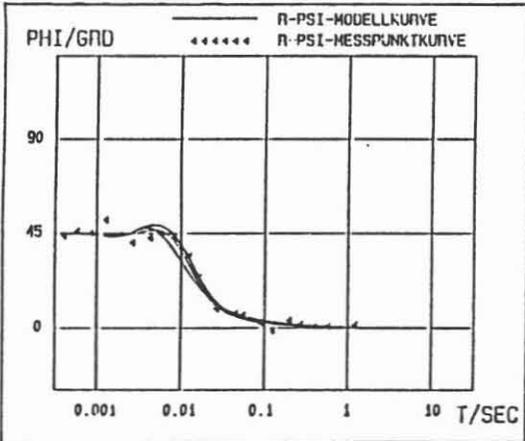
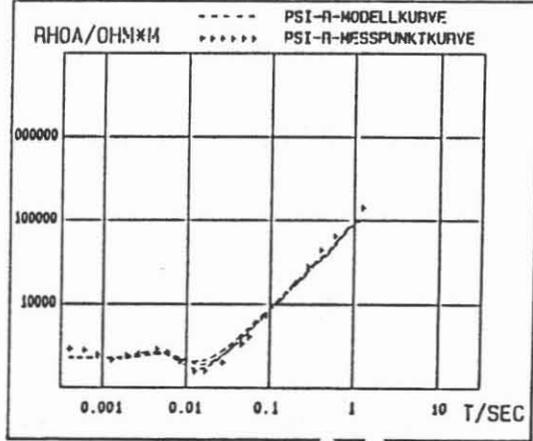
R-PSI-KOMPONENTE

R=7200 m DIPOL NS,



PSI-R-KOMPONENTE

R=7200 m DIPOL NS,



	BESTES MODELL :	2.34E+03	4.55E+02	6.56E+06
RHO/OHM*M	GRENZMODELL :	2.35E+03	1.25E+03	7.28E+06
	GRENZMODELL :	2.31E+03	1.04E+01	4.70E+06
	BESTES MODELL :	1.07E+03	7.70E+02	
D/M	GRENZMODELL :	1.74E+03	2.17E+03	
	GRENZMODELL :	2.33E+03	2.91E+01	

Abb.5a: N7 Waldhaus Dipol NS, Meßwerte und Modelle

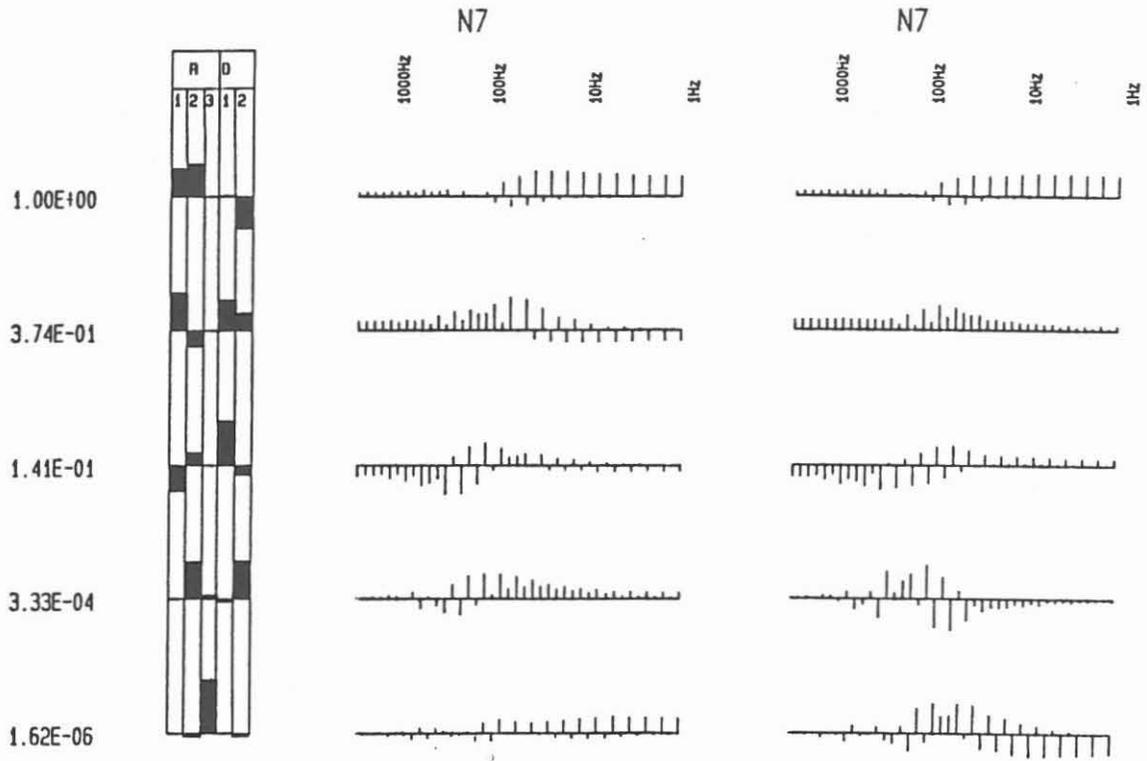


Abb.5b:N7 Waldhaus Dipol NS, Eigenvektoren

Das erste Beispiel soll hier der Punkt N5 sein (Abb.6a,b). Das Dreischichtmodell zeigt eine mit zunehmender Tiefe immer besser werdende Leitfähigkeit. Bildet man anhand der Grenzmodelle ein Gebiet zulässiger Modelle, so ist auch eine kontinuierliche Abnahme des Widerstandes mit der Tiefe denkbar. Zu dem zweitgrößten Eigenwert gehörend, ist der Liegendwiderstand sehr gut bestimmt. Seine Variation ergab zulässige Werte zwischen 2.5 und $11 \Omega \cdot m$. Auch hier liefert noch eine zweite Kurve, nämlich die R Ψ i - Kurve des anderen Dipols (Abb.7a,b), ein annähernd gleiches Modell. Zwar wird hier bei der Inversion eine schlecht leitende Zwischenschicht eingeführt, doch ist der Leitwert dieser Schicht ξ_3 / D_3 nicht aufgelöst. Der Versuch, durch die Vorgabe einer vierten Schicht bei der Inversion wiederum der Ψ iR - Komponente des Ost - West - Dipols, die Unterkante des guten Leiters zu ermitteln, ist leider fehlgeschlagen. Denn wie an der Eigenwertdarstellung dieses Programmlaufs (Abb.8b) abzulesen, ist das Modell damit deutlich überparametrisiert. Der Eigenwert zu dem Widerstand dieser zusätzlichen Schicht ist um ganze fünf Größenordnungen kleiner als der Nächstgrößte. Dies wird dann auch wieder an den Grenzmodellen überdeutlich. Wenn man also eine Aussage darüber machen möchte, so höchstens die, daß ein Wiederanstieg des Widerstandes frühestens in etwa 3000 - 4000 m Tiefe zu erwarten ist. Ein ganz ähnliches Bild bietet der Meßpunkt N4 (Abb.9a,b). Allerdings werden hier die Verhältnisse schon ab etwa 1600 m Tiefe unklar.

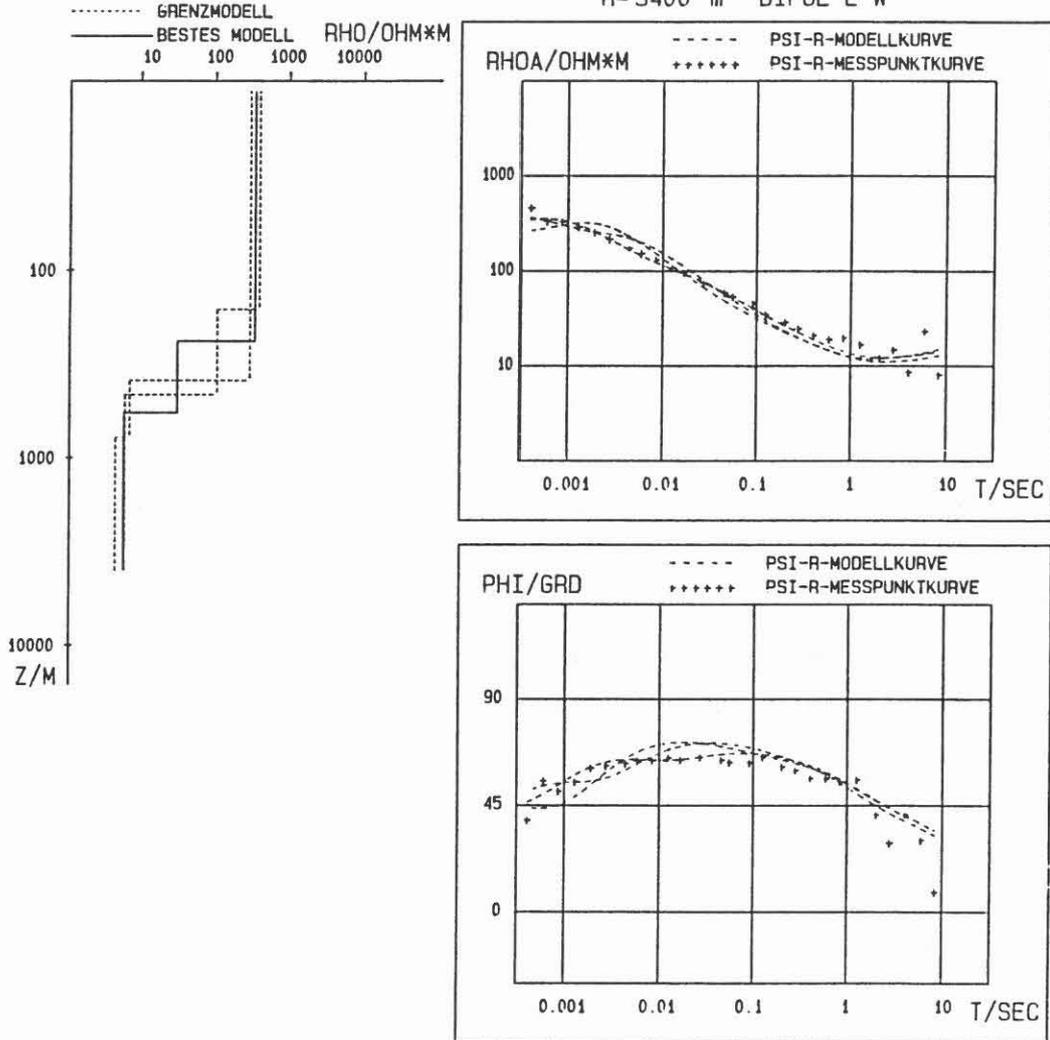
3.) Übrig bleiben noch die Punkte S3 und S6 im Süden der ZEV, der Punkt S7 auf der Grenze der ZEV zum Moldanubikum, die Punkte S1 und N6 westlich der Fränkischen Linie und N1 auf dem Saxothuringikum.

Hier überall waren die Verhältnisse komplizierter als in den vorher beschriebenen Fällen. Es waren überwiegend 4- und 5-Schicht - Fälle mit einer oder mehreren gutleitenden Zwischenschichten in hochohmigerem Substrat nötig, um die Meßdaten zu interpretieren.

N5
DER BUEHL

PSI-R-KOMPONENTE

R=5400 m DIPOL E-W



	BESTES MODELL :	3.07E+02	2.79E+01	5.40E+00
RHO/OHM*M	GRENZMODELL :	3.55E+02	1.00E+02	5.84E+00
	GRENZMODELL :	2.66E+02	7.73E+00	4.99E+00
	BESTES MODELL :	2.45E+02	3.44E+02	
D/M	GRENZMODELL :	1.63E+02	2.94E+02	
	GRENZMODELL :	3.68E+02	4.03E+02	

Abb.6a: N5 Der Buehl EW PsiR, Meßwerte und 3-Schichtmodelle

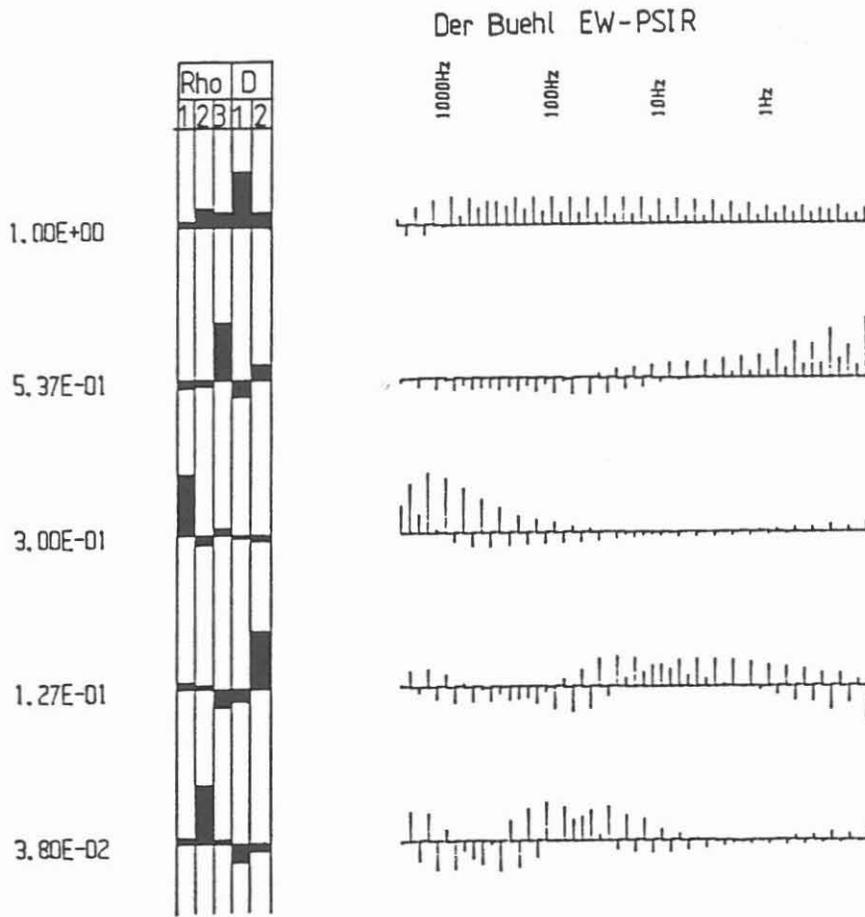
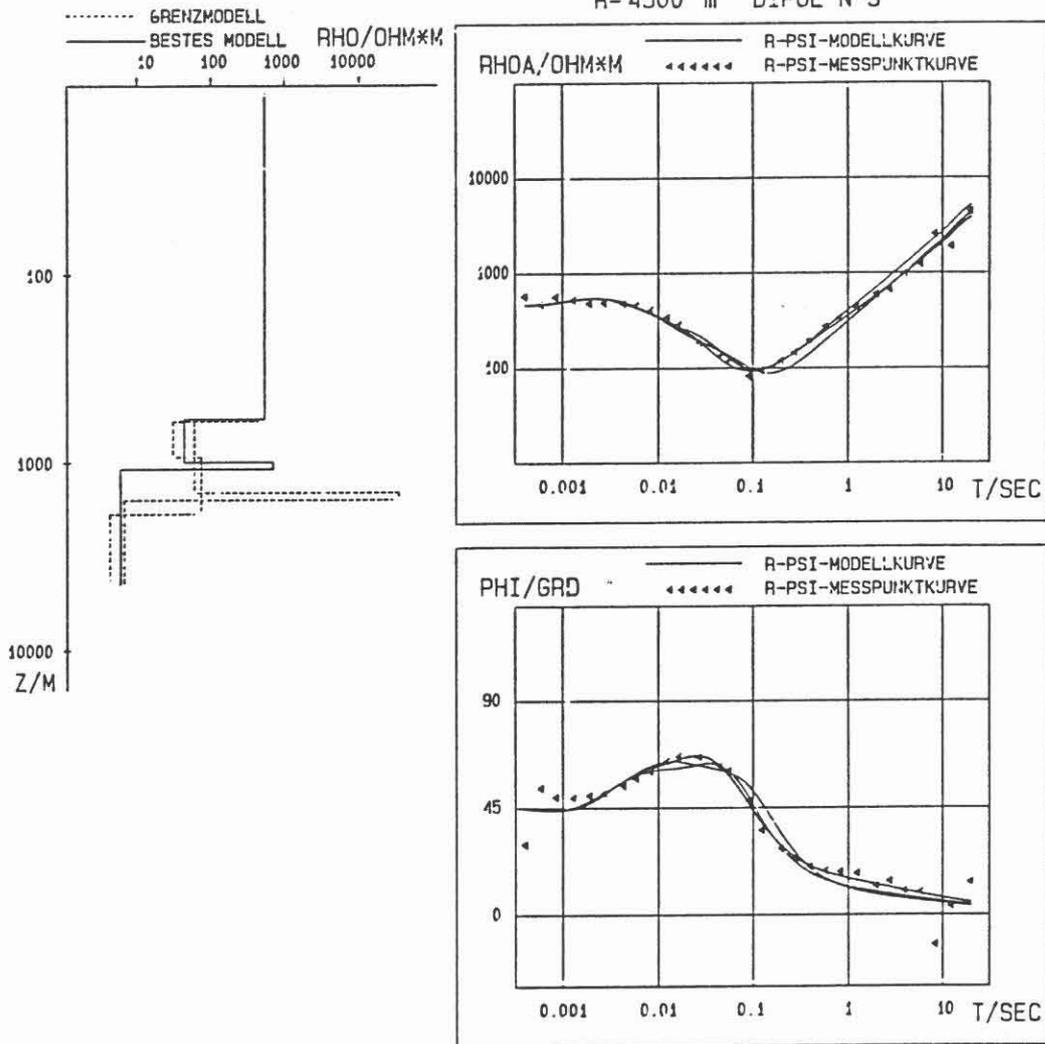


Abb.6b: N5 Der Buehl EW PsiR, Eigenvektoren zum 3-Schichtfall

N5 DER BUEHL

R-PSI-KOMPONENTE

R= 4500 m DIPOL N-S



	BESTES MODELL :	4.78E+02	3.92E+01	6.26E+02	5.39E+00
RHO/OHM*M	GRENZMODELL :	4.76E+02	3.24E+01	7.09E+01	4.94E+00
	GRENZMODELL :	4.81E+02	5.53E+01	3.01E+04	6.30E+00
	BESTES MODELL :	5.98E+02	4.17E+02	9.18E+01	
D/M	GRENZMODELL :	6.16E+02	2.83E+02	9.26E+02	
	GRENZMODELL :	5.68E+02	8.31E+02	1.51E+00	

Abb.7a: N5 Der Buehl NS RPsi, Meßwerte und Modelle

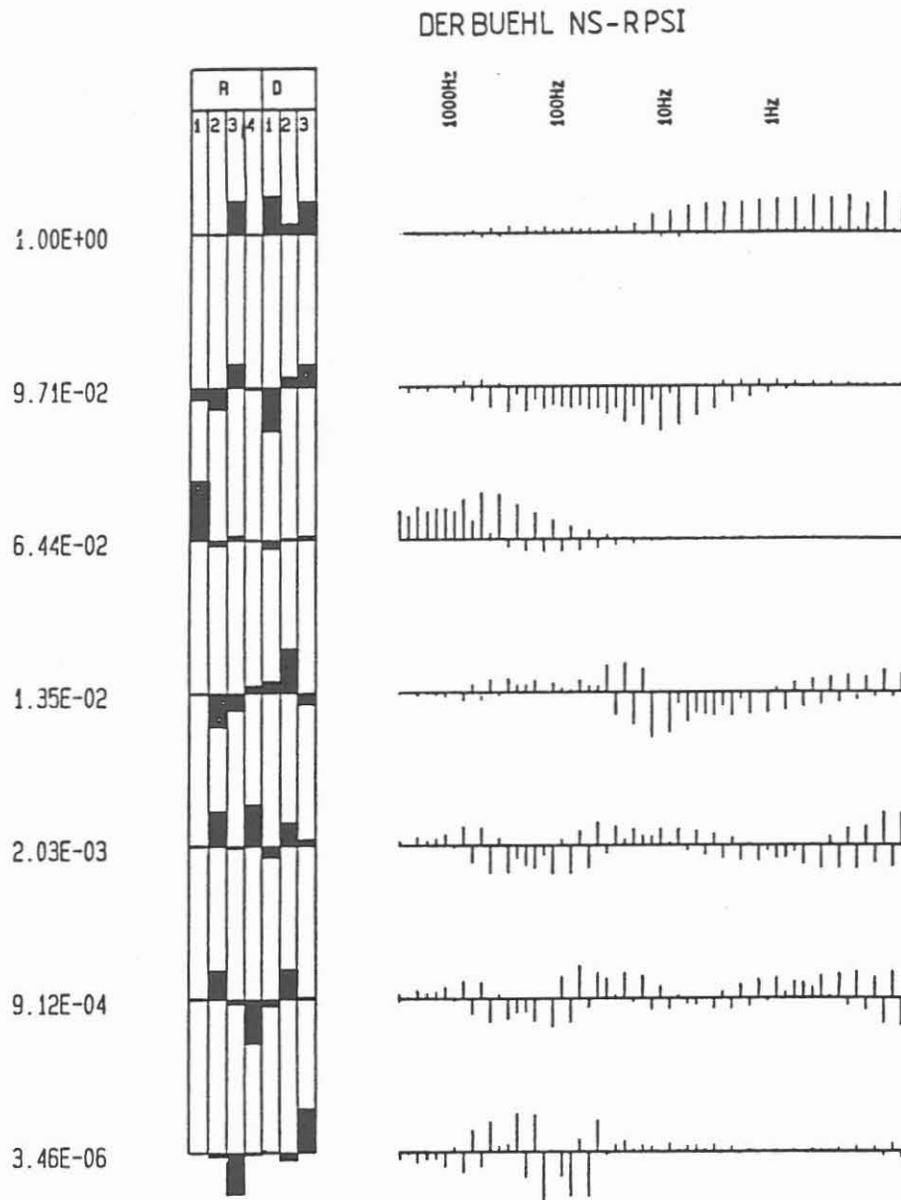
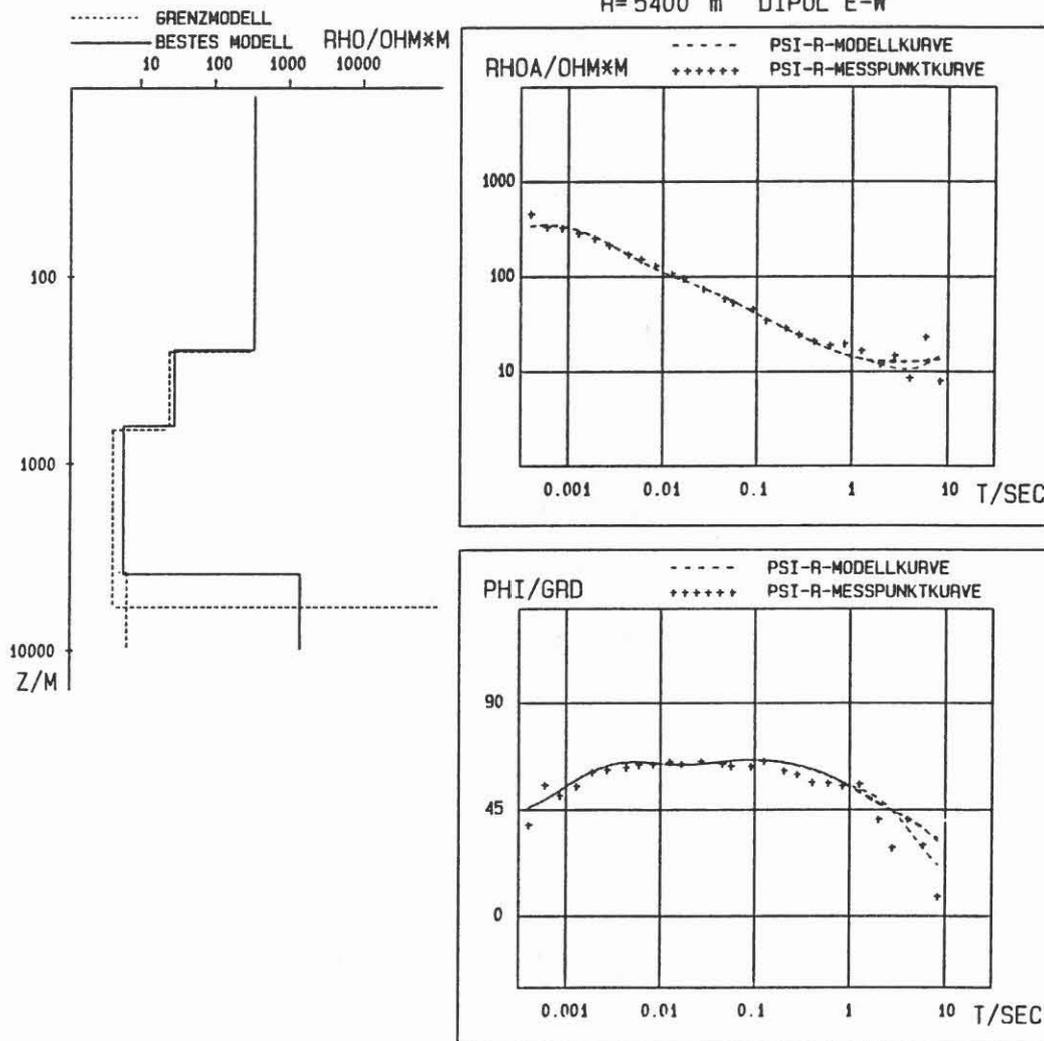


Abb.7b: N5 Der Buehl NS RPsi, Eigenvektoren

N5
DER BUEHL

PSI-R-KOMPONENTE

R=5400 m DIPOL E-W



	BESTES MODELL :	3.05E+02	2.58E+01	5.36E+00	1.28E+03
RHO/OHM*M	GRENZMODELL :	3.06E+02	2.61E+01	5.52E+00	8.69E+32
	GRENZMODELL :	3.05E+02	2.58E+01	5.35E+00	7.39E+00
	BESTES MODELL :	2.51E+02	3.90E+02	3.33E+03	
D/M	GRENZMODELL :	2.50E+02	3.83E+02	5.13E+03	
	GRENZMODELL :	2.51E+02	3.91E+02	3.22E+03	

Abb.8a: N5 Der Buehl EW PsiR, Meßwerte und 4-Schichtmodelle

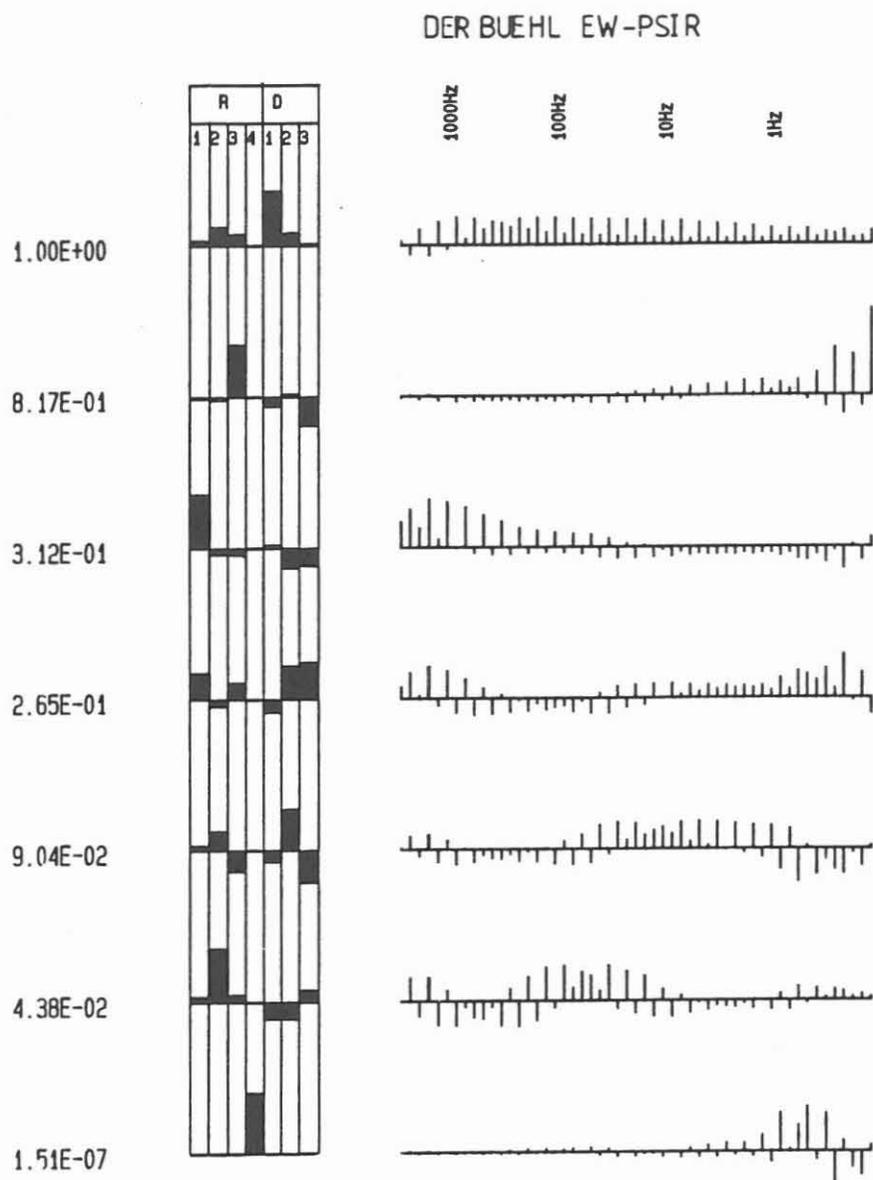
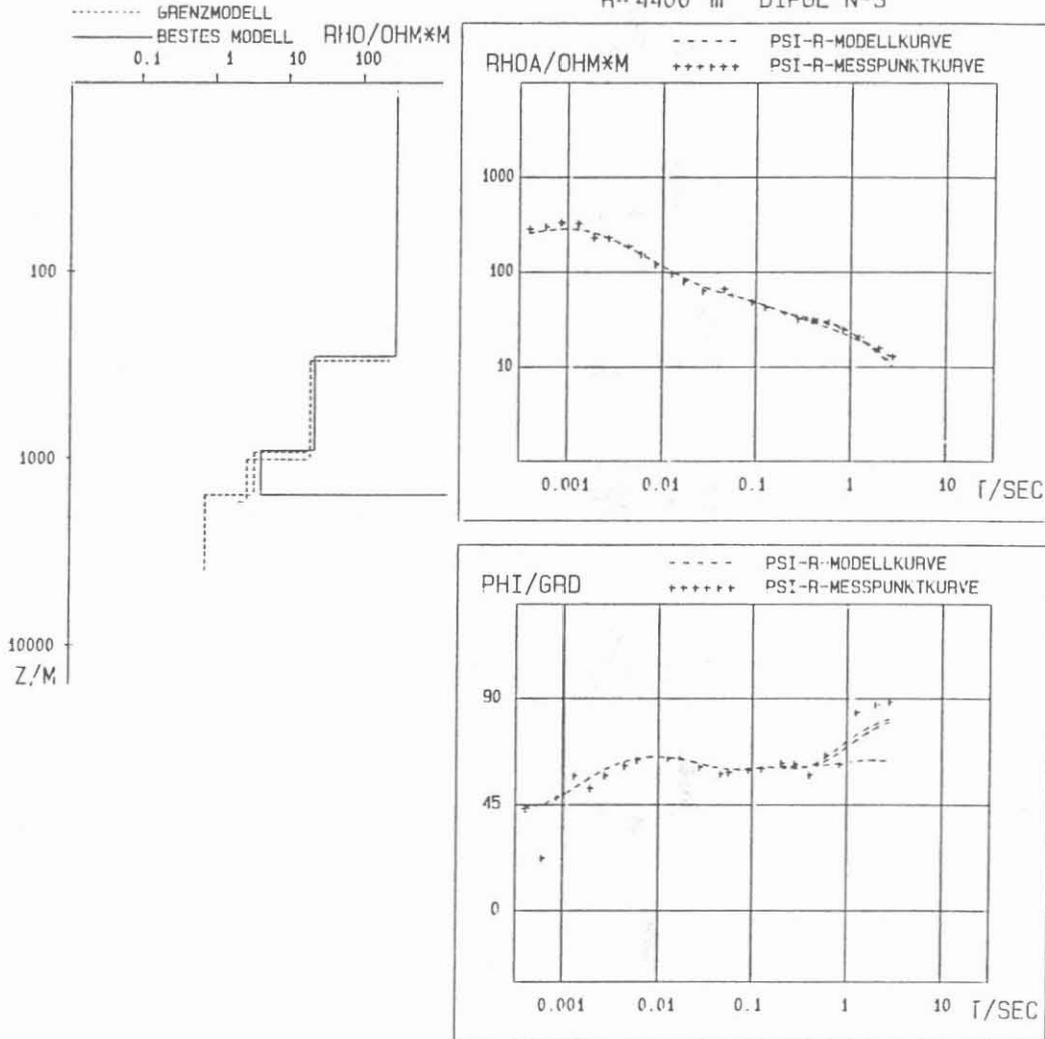


Abb.8b: N5 Der Buehl EW PsiR, Eigenvektoren zum 4-Schichtmodell

N4
STEINBACH

PSI-R-KOMPONENTE

R= 4400 m DIPOL N-S



	BESTES MODELL :	2.48E+02	2.04E+01	3.86E+00	4.82E-05
RHO/OHM*M	GRENZMODELL :	2.48E+02	2.05E+01	3.99E+00	8.86E-01
	GRENZMODELL :	2.47E+02	2.01E+01	3.19E+00	5.07E-29
	BESTES MODELL :	2.90E+02	6.40E+02	6.76E+02	
D/M	GRENZMODELL :	2.90E+02	6.35E+02	6.71E+02	
	GRENZMODELL :	2.91E+02	6.69E+02	7.02E+02	

Abb.9a: N4 Steinbach NS PsiR, Meßwerte und Modelle

STEINBACH NS-PSIR

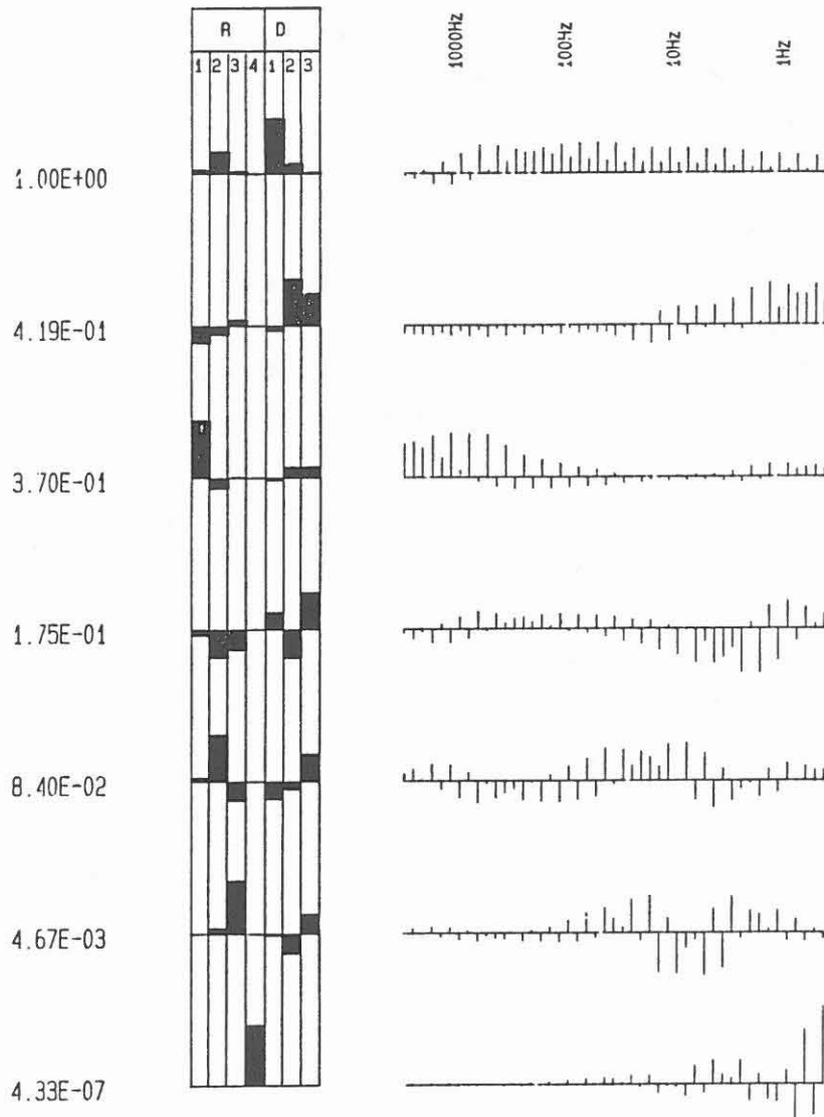


Abb.9b: N4 Steinbach NS PsiR, Eigenvektoren

Ein Beispiel zu dieser Gruppe, den Meßpunkt S1 habe ich schon im Abschnitt Auswertung ausführlich diskutiert. Bei diesem, wie auch bei dem Punkt N1 stellt die unmittelbare Nähe zur Fränkischen Linie die Möglichkeit einer eindimensionalen Interpretation sehr in Frage. Eventuell könnte man aber die dort gefundene gutleitende Zwischenschicht in etwa 350 m Tiefe als Schnitt der Verwerfung mit dem bei der Sondierung erfassten lateralen Bereich interpretieren.

Da diese Punkte nicht in unmittelbarer Nähe der Bohrung liegen, soll das Gesagte für diese Gruppe genügen.

Die Ergebnisse für die nördlichen Punkte sind in Abbildung 10 noch einmal in einem Profilschnitt zusammengefasst. Es zeigt nahezu in dem ganzen Bereich die unter 2.) beschriebene Leitfähigkeitsanomalie. Wie in der Vorbohrung inzwischen festgestellt, handelt es sich dabei wohl um mehr oder weniger umfangreiche Graphiteinlagerungen, die ja auch ganz zwanglos solche guten Leitfähigkeiten erklären.

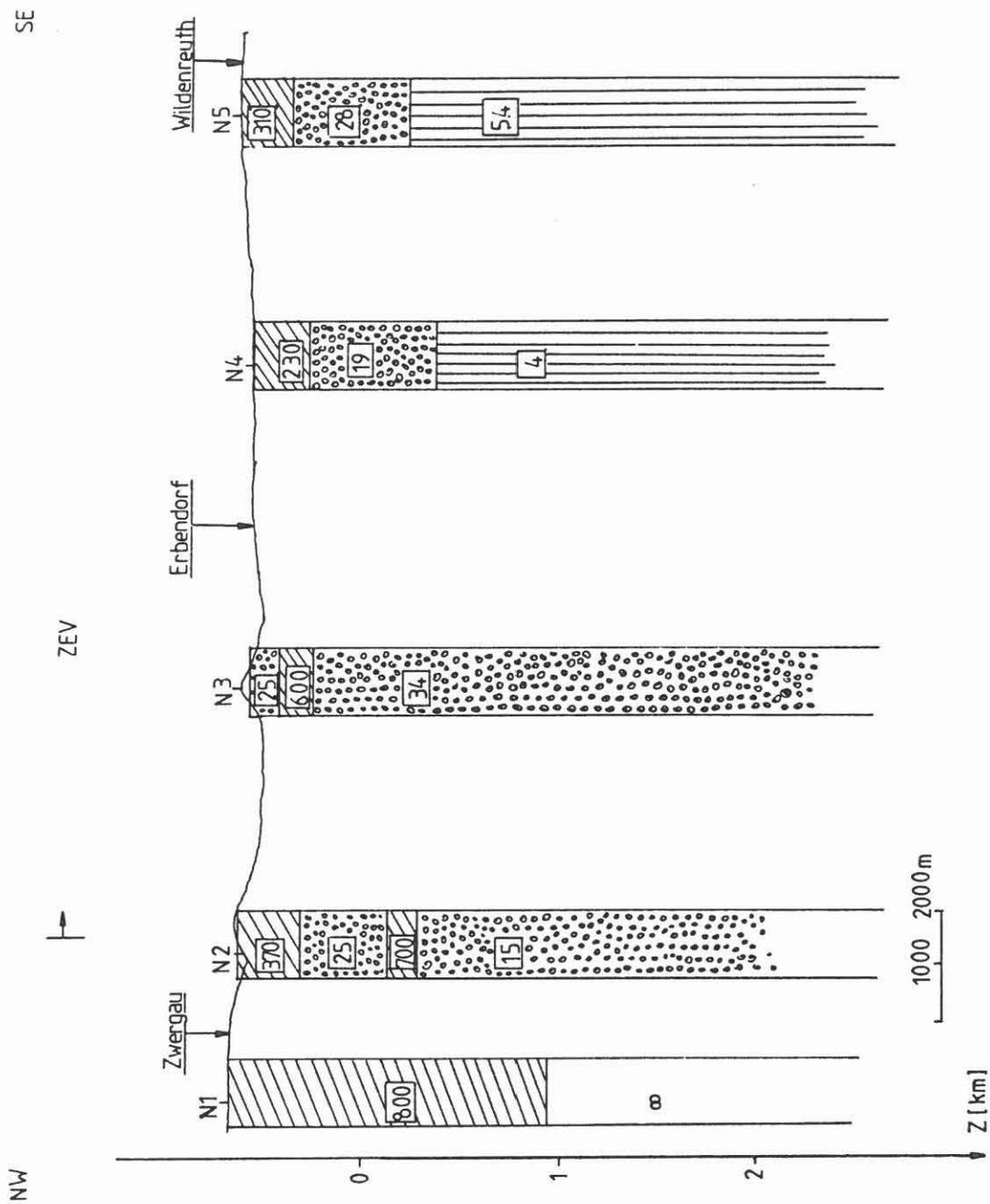


Abb.10: Profil der nördlichen ZEV (Widerstände in $\Omega \cdot m$)

Bibliographie

Deppermann et al.: Die geoelektrischen Verfahren der angewandten Geophysik, Lehrbuch der angewandten Geologie, Band 1, (Hrsg. Bentz), S.718-804, Stuttgart, gart, 1961

Drews, C.: Ermittlung der Tiefenverteilung der elektrischen Leitfähigkeit in der Oberpfalz mit Hilfe der Aktiven Audiomagnetotellurik, Diplomarbeit, Inst. f. Geophysik und Meteorologie, TU Braunschweig, 1986

Marquardt, D.W.: An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, J.Soc.Indust.Appl. Math., 11(2), S.431-441, 1963

Maurer, H.-M.: Ermittlung der Tiefenverteilung der elektrischen Leitfähigkeit im mittleren Kinzigtal mit Hilfe der Aktiven Audiomagnetotellurik, Diplomarbeit, Inst. f. Geophysik und Meteorologie, TU Braunschweig, 1986

Weidelt, P.: Bericht über Inversion transient-elektromagnetischer Messungen über geschichtetem Untergrund, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1984