

C. Drews

Aktive Audiomagnetotellurik auf Milos (Griechenland) zur Bestimmung der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit und ihrer Korrelation mit geothermischen Anomalien

Im September 1986 und April 1987 wurden vom Institut für Geophysik und Meteorologie der TU Braunschweig auf der Insel Milos an 41 Orten Messungen mit Aktiver Audiomagnetotellurik (AAMT) durchgeführt. Das heißt, es wurden  $f_s$  - und Phasenkurven eines durch horizontale elektrische Dipole künstlich erzeugten Feldes bestimmt.

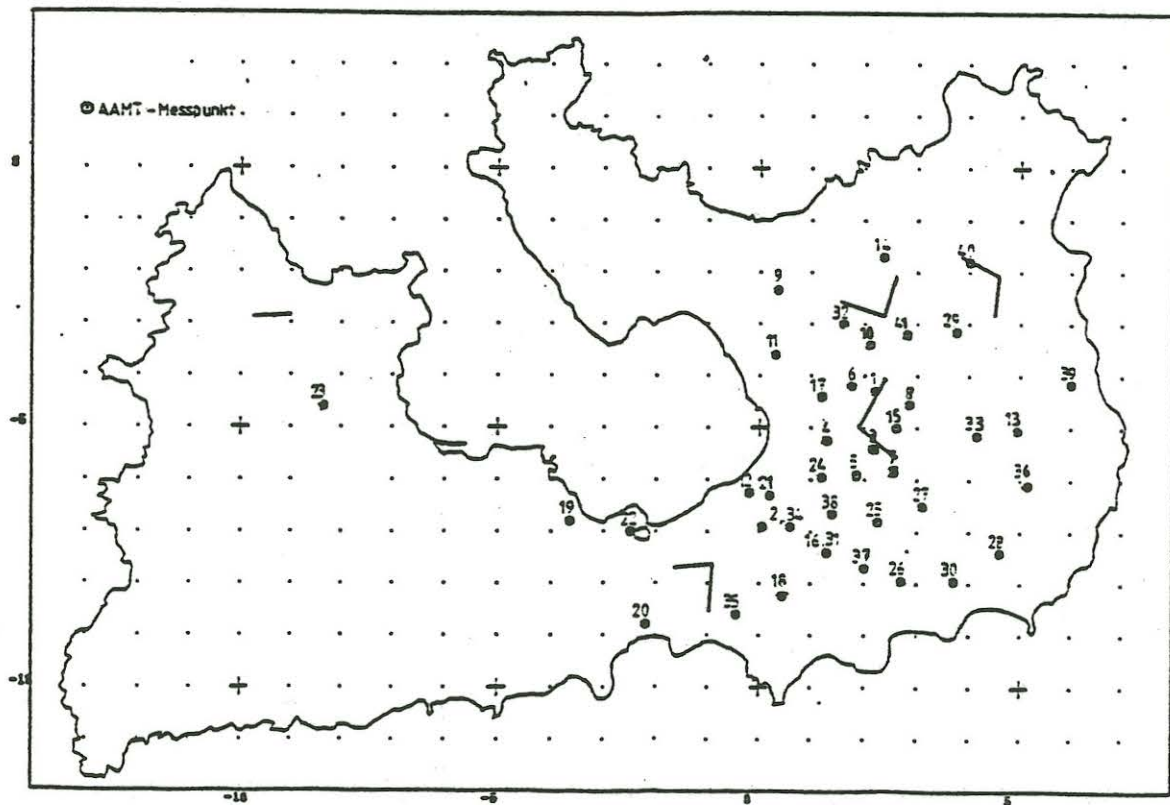


Abb.1: Meßpunkte und Senderlokationen auf Milos

Dabei benutzten wir jeweils, bis auf eine Ausnahme, nach einander zwei zueinander orthogonale Dipole, so daß insgesamt  $(4 \cdot 41 - 2) = 162$  Sätze von  $\rho_s$ - und Phasenkurven im Frequenzbereich von 2500 - 0,1 Hz aufgenommen wurden. Von diesen 162 Kurvenpaaren waren 83 von auswertbarer Datenqualität, wobei an jedem Ort mindestens eine auswertbare Komponente erhalten wurde.

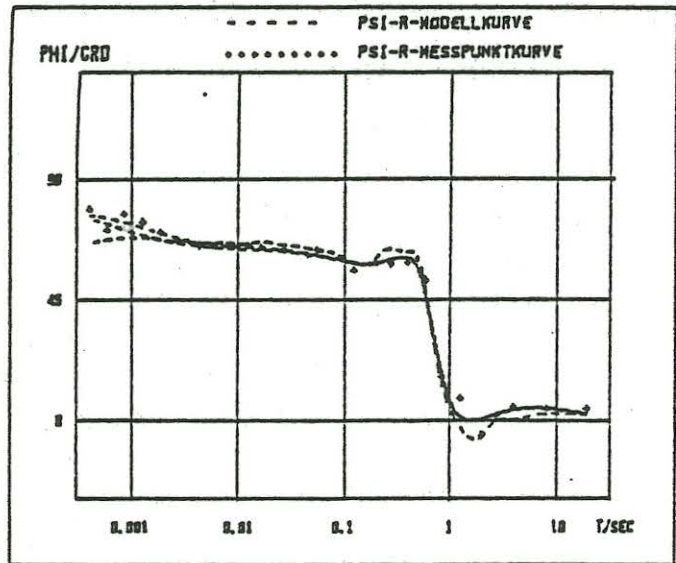
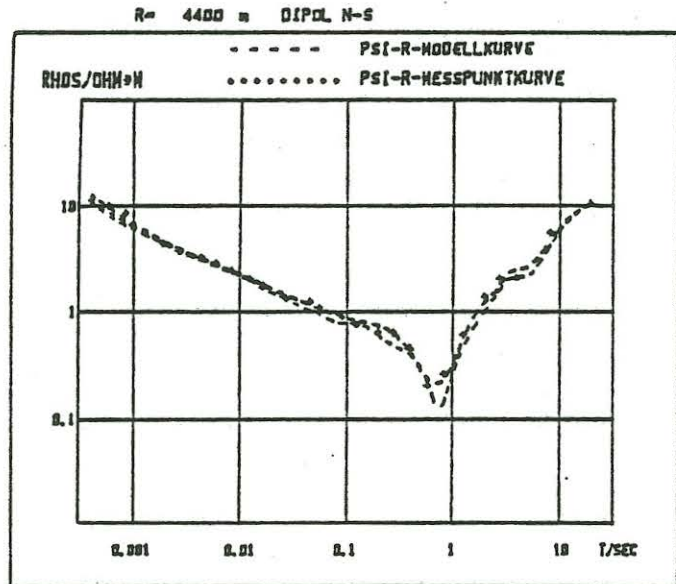
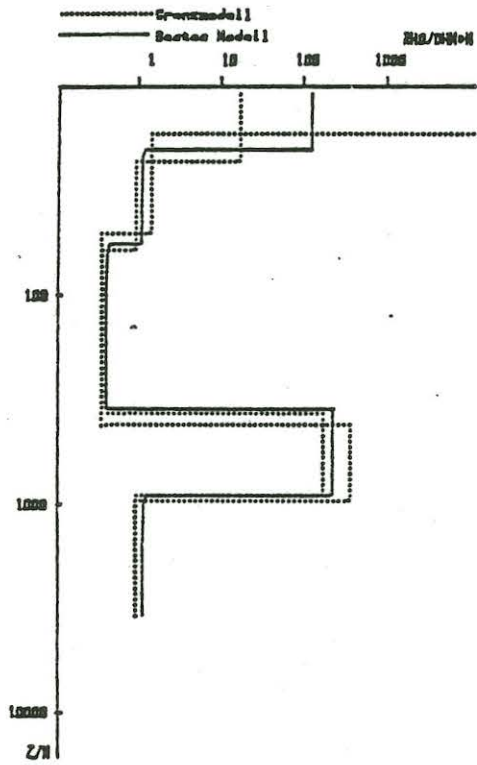
Wie in Abb.1 zu sehen, konzentrierten sich unsere Messungen vor allem auf den Ostteil der Insel und dort verstärkt auf den Südosten. Dies ist auch gerade der Bereich unter dem sich nach den bisherigen Untersuchungen die geothermische Anomalie erstreckt. Zudem kreuzen sich dort zwei ungefähr orthogonale Grabenstrukturen, von denen die eine in etwa durch die Lage der großen Bucht in der Mitte der Insel charakterisiert wird, während sich die andere ungefähr in Nord-Süd-Richtung auf dem Ostteil erstreckt. Auch dieser Graben ist morphologisch vor allem an seiner Ostflanke zu erkennen. Hier gibt es auch bereits einige Bohrungen, die für das Kraftwerk benutzt werden, so daß sich ein Vergleich der Bohrprofile mit unseren Messungen anbietet (Well M1 und M2 an den Meßpunkten 7 und 8). In der Karte sind ausserdem alle 5 Senderstandorte eingezeichnet. Während der ersten Kampagne mußten wir den Senderstandort mehrmals wechseln, da es Schwierigkeiten mit der benötigten Funkverbindung zum Empfänger gab, oder da das erreichte Strommoment nicht ausreichte, um an etwas entfernteren Standorten noch ein ausreichendes Nutzsignal zu erhalten. Für den gemeinsamen Punkt im Westteil haben wir einen einzelnen Dipol aufgebaut, der nur an diesem Punkt verwendet wurde. Für die 18 Meßpunkte der zweiten Fahrt (24-41) dagegen reichte ein Senderstandort aus.

### Auswertung

Die Standardauswertung der Daten wird an unserem Institut mit einem eindimensionalen Inversionsverfahren, bei dem die Matrixinversion mit dem Marquardtverfahren stabilisiert ist, durchgeführt. Am Beispiel der Plots zu dem Punkt Nr.4 Psaras möchte ich kurz die Ergebnisse einer solchen Inversion erläutern. In dem ersten Plot (Abb.2a) sind die gemessenen  $\rho_s$  - und Phasenkurve einer Komponente, die berechneten Kurven zu dem ermittelten besten eindimensionalen Modell, sowie dies Modell graphisch und numerisch dargestellt. Ausserdem sind in der Regel zwei Grenzmodelle in der selben Art dargestellt. Diese Grenzmodelle entstehen durch gezielte Variation einer schlecht aufgelösten Parameterkombination, so daß die aus den veränderten Modellen berechneten Kurven eine vorgegebene mittlere quadratische Abweichung von den Meßwerten nicht überschreiten. An dem Beispiel sieht man, daß in diesem Fall im wesentlichen der Widerstand der ersten Schicht variiert wurde. Wieso gerade dieser Parameter verändert wurde, kann man an dem zweiten Plot der zu diesem Meßpunkt gehört (Abb.2b) ablesen. Dort sind die 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 dem Beispiel ist dies eine Kombination aus  $\rho_3$  und  $D_3$ , und da diese unterschiedliches Vorzeichen haben, bedeutet dies, daß der Quotient  $D_3/\rho_3$ , also der Leitwert der 3.Schicht am besten aufgelöst ist. Nun ist dies ja auch tatsächlich eine Größe, nämlich der Leitwert einer gut leitenden Schicht, die mit elektromagnetischen Methoden gut bestimmt werden kann. An den Dateneigenvektoren sieht man, welche Frequenzen zum Erkennen der Parameter beigetragen haben. Am zweitbesten ist hier die Mächtigkeit des Hangenden aufgelöst, also die Tiefe zum guten Leiter, auch eine bekannte magnetotellurische Größe. Bemerkenswert ist,

# 4 PSARAS

## PSI-R-KOMPONENTE



	Berechn. Modell :	1.13E+02	1.03E+00	3.92E-01	2.12E+02	1.08E+00
RHO/DHM	Grenzmodell :	8.25E+04	1.44E+00	4.12E-01	4.00E+02	1.18E+00
	Grenzmodell :	1.54E+01	3.25E-01	2.88E-01	1.73E+02	1.02E+00
	<hr/>					
D/H	Berechn. Modell :	2.01E+01	3.71E+01	2.94E+02	5.58E+02	
	Grenzmodell :	1.59E+01	3.28E+01	3.37E+02	5.50E+02	
	Grenzmodell :	2.17E+01	3.85E+01	2.82E+02	5.80E+02	

Abb. 2a

4 NS PSI-R

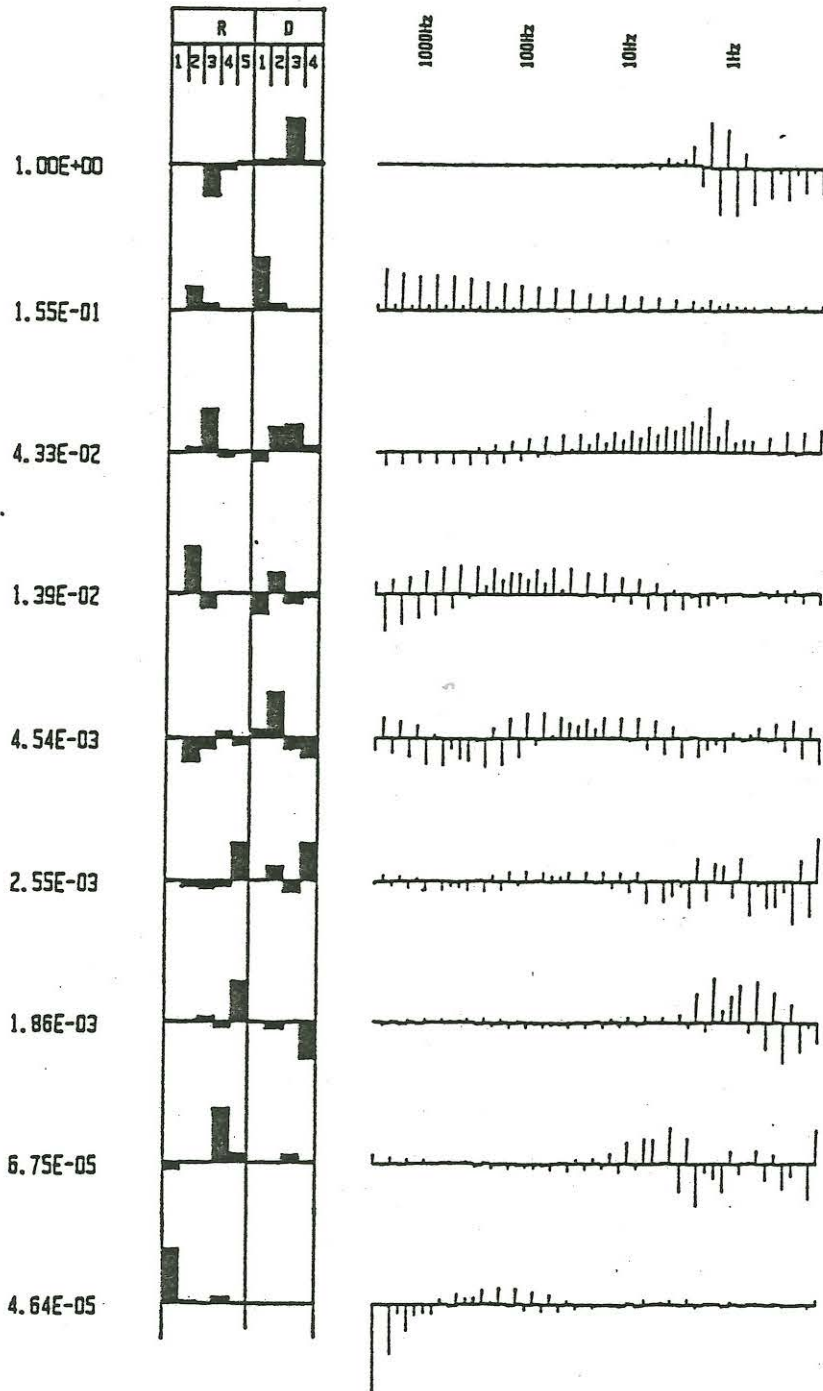


Abb. 2b

daß die Information darüber in einem großen Teil der Daten steckt, nämlich von 2500 bis  $\sim 10$  Hz.

Das Schlusslicht bildet  $\rho_4$ , weshalb auch gerade dieser Parameter zur Berechnung der Grenzmodelle herangezogen wurde. Hier sind es nur die drei höchsten Frequenzen, die eine Information liefern.

Dieser Darstellung der Eigenvektoren können zwar keine quantitativen Fehlerbalken entnommen werden, sie liefert aber einen anschaulichen Hinweis auf die Verlässlichkeit der Modelle.

### Ergebnisse

Während der Bearbeitung der Meßkurven hat sich ein bestimmter Modelltyp als immer wieder mit den Daten konsistent herausgestellt. Dieses eindimensionale Modell ist ein 4 - 5 -Schichtfall, wie er in Abbildung 3 skizziert ist.

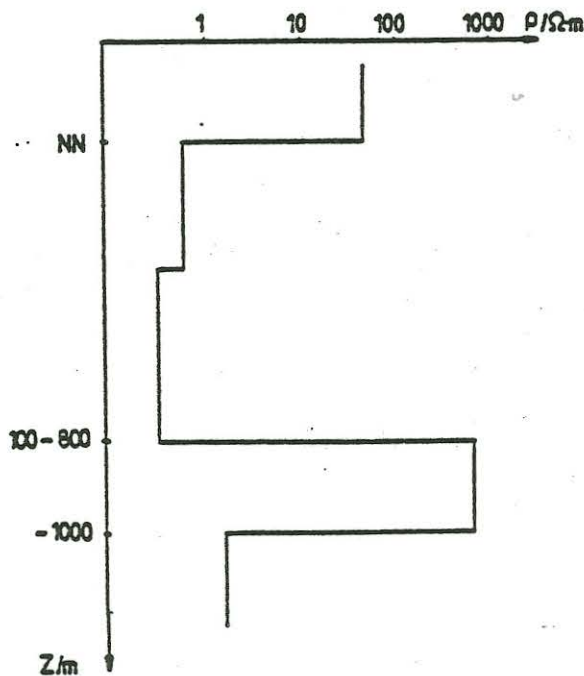


Abb.3: Skizze des häufigsten Modells

So ein Widerstandstiefenmodell konnte an 32 der 41 Meßpunkte die Sondierungskurven erklären. Ich möchte es jetzt Schicht für Schicht durchgehen und an Beispielen die Charakteristika der einzelnen Schichten erläutern. Im Hangenden sieht man eine nicht sehr gut leitfähige Schicht, meistens um  $100 \Omega \cdot m$ , die sich dadurch auszeichnet, daß sie in sehr guter Übereinstimmung mit den von der Karte abgelesenen Meereshöhen stets bei Meeresspiegelniveau endet. Als Beispiel hierfür sei der Meßpunkt Nr.31 (Abb.4a) angeführt. Die Mächtigkeit der ersten Schicht beträgt nach unserer Messung 44-45 m und tatsächlich standen wir mit unserer Meßapparatur, wie später aus der Karte ersichtlich ca.100 m von der 50 m - Höhenlinie bergab entfernt. An den Eigenvektoren (Abb.4b) sieht man, daß dieser Parameter zu dem zweitgrößten Eigenwert gehört, also bestätigt sich auch hier seine gute Auflösbarkeit, während der Widerstand dieser Schicht zum zweitkleinsten Eigenwert gehört, also nicht genau bestimmt werden kann.

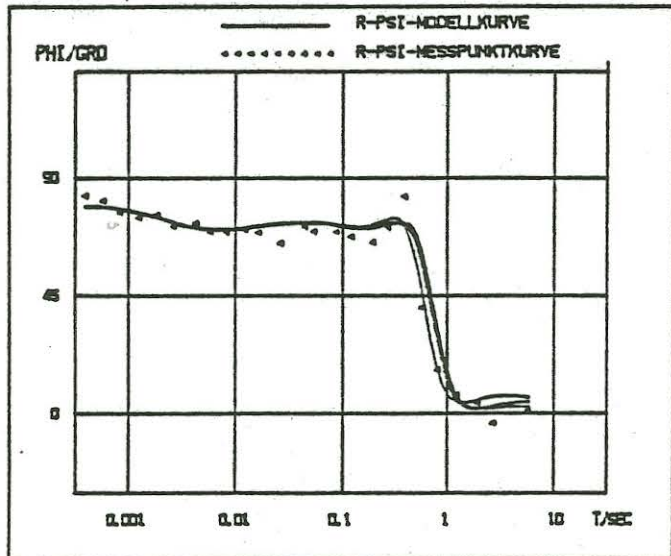
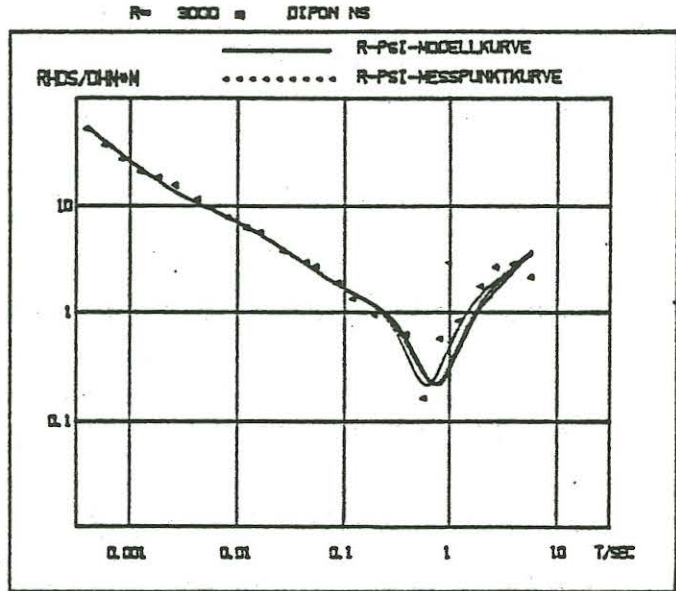
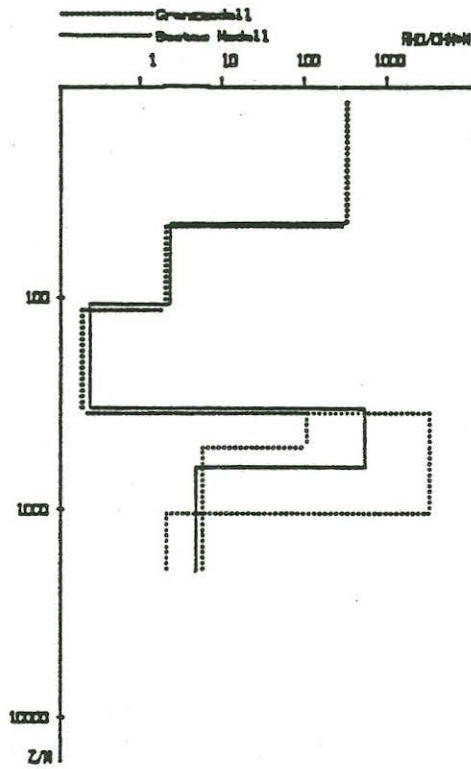
Der nächste interessante Punkt in dem Modell ist die Oberkante der schlecht leitenden Zwischenschicht. zu deren Diskussion bleibe ich vorerst bei Meßpunkt Nr.31, nehme aber noch ein anderes Kurvenpaar, nämlich das der PSI-R-Komponente des EW-Dipols hinzu (Abb.5a,b). Obwohl von der 3.Schicht nur der Leitwert  $D_3 \setminus \rho_3$  gut aufgelöst ist (jeweils der größte Eigenwert), stimmt deren Unterkante bei beiden Komponenten überein. Überhaupt ist die gute Übereinstimmung dieser beiden Kurven ein Zeichen dafür, daß in diesem Fall eine eindimensionale Interpretation gerechtfertigt ist.

Ein weiteres Beispiel hierfür ist der Meßpunkt Nr.32 (Abb.6a,b,7a,b). Dieser Punkt ist etwas höher gelegen, so daß der Bereich über NN hier durch zwei Schichten repräsentiert wird. Die Oberkante des schlechten Leiters ist aber auch wieder bei beiden Dipolen in der selben Tiefe und verhältnismäßig gut bestimmt.

Ein drittes Beispiel schließlich, der Meßpunkt Nr.33 (Abb.8a,b), für den das oben gesagte auch gilt, soll zur Diskussion der vierten Schicht herangezogen werden. An

# 31 SCHLANGENPFUHL

## R-PSI-KOMPONENTE



	Bastard Modell :	2.88E+02	2.08E+00	2.27E-01	4.78E+02	4.28E+00
R-PSI/DHN*M	Grenzwertmodell :	2.97E+02	2.08E+00	2.21E-01	3.01E+03	2.02E+00
	Grenzwertmodell :	2.82E+02	2.08E+00	2.32E-01	1.19E+02	7.47E+00
D/N	Bastard Modell :	4.47E+01	8.42E-01	2.24E+02	2.97E+02	
	Grenzwertmodell :	4.48E+01	8.44E-01	2.24E+02	8.86E+02	
	Grenzwertmodell :	4.47E+01	8.42E-01	2.23E+02	1.58E+02	

Abb. 4a



31 NS-RPSI

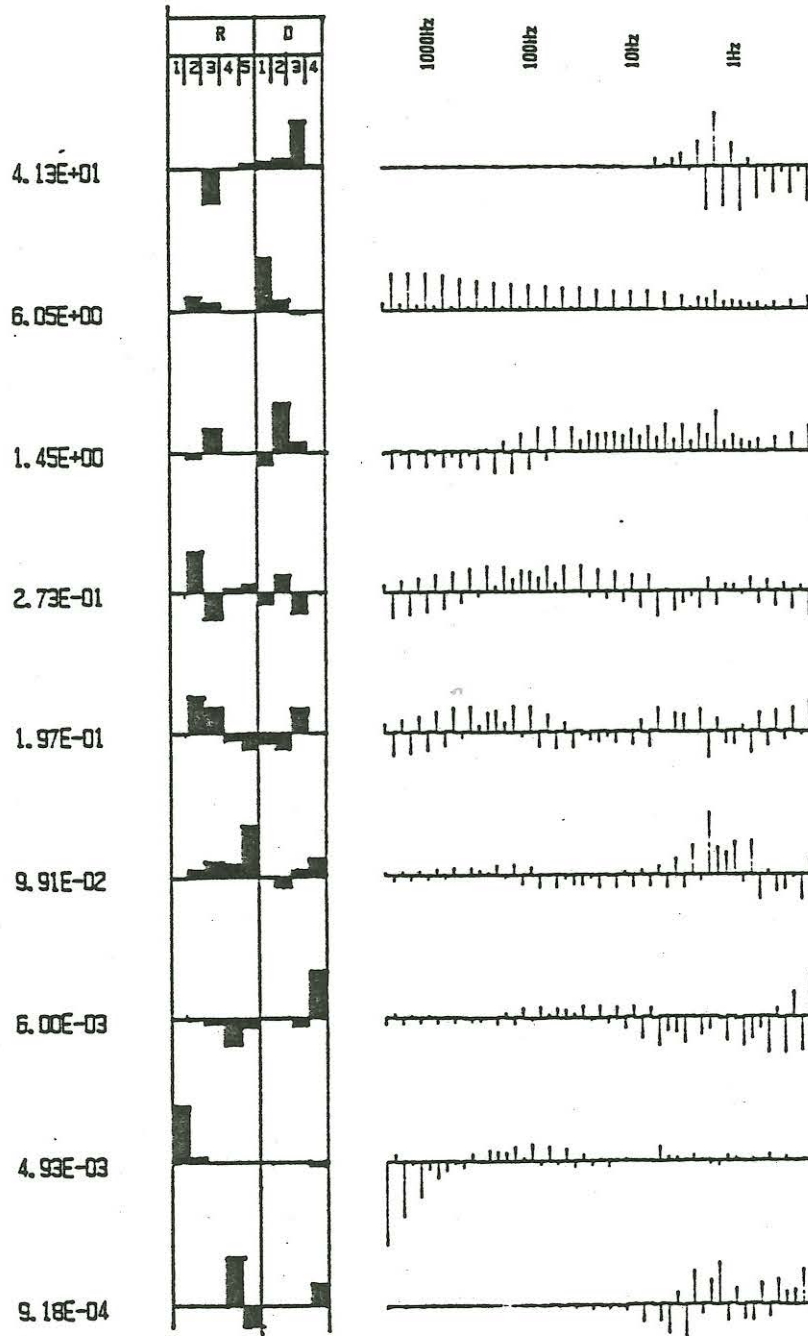
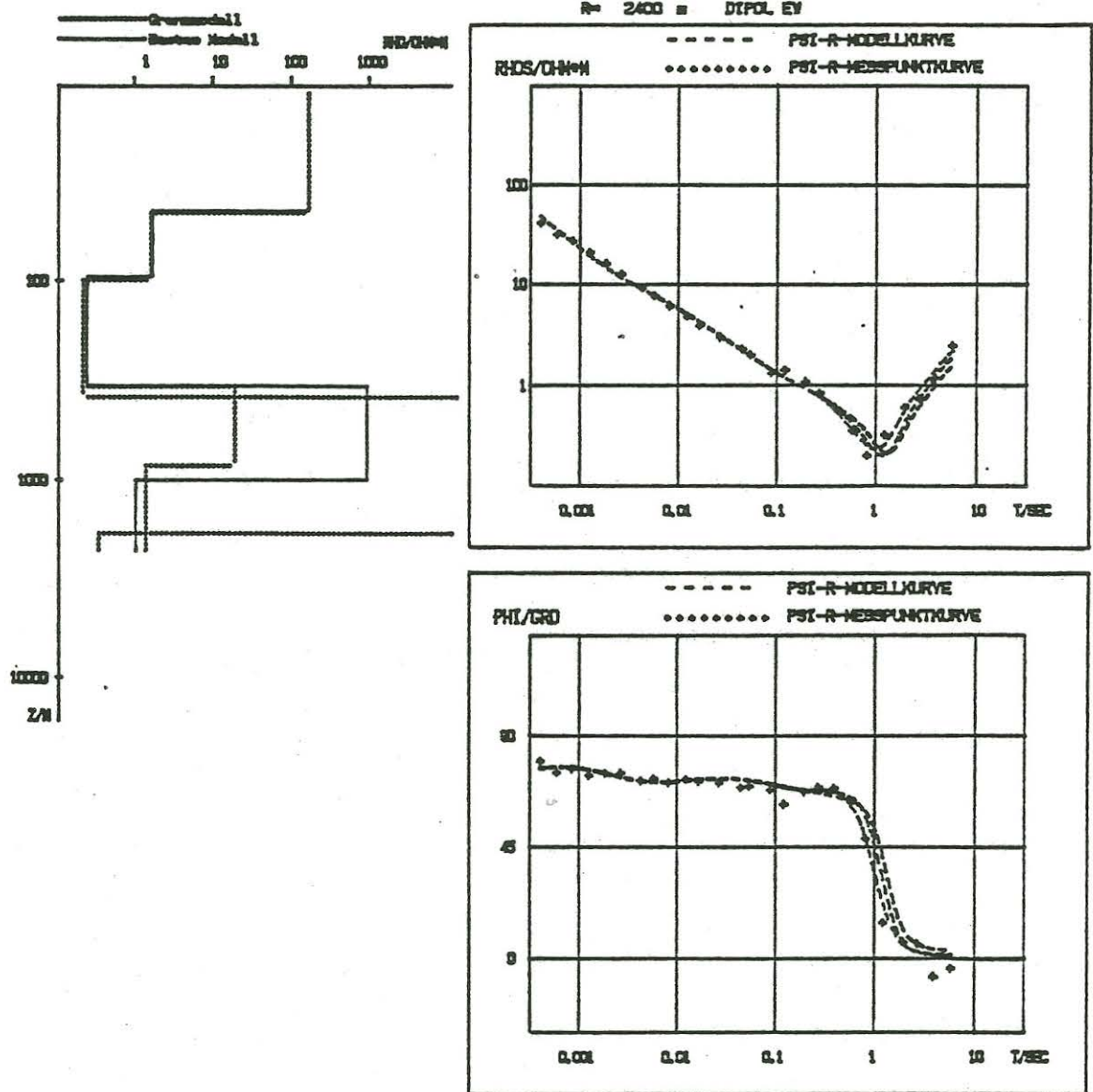


Abb. 4b

# 31 SCHLANGENPFUHL

## PSI-R-KOMPONENTE



	Bestes Modell :	1.47E+02	1.55E+00	2.22E-01	8.88E-02	8.51E-01
RHO/CH*H	Gewinnmodell :	1.47E+02	1.55E+00	2.27E-01	8.58E-02	8.48E-01
	Gewinnmodell :	1.48E+02	1.56E+00	2.80E-01	1.88E-01	1.45E+00
D/H	Bestes Modell :	4.88E+01	5.17E+01	2.40E+02	8.87E+02	
	Gewinnmodell :	4.88E+01	5.19E+01	2.88E+02	1.48E+03	
	Gewinnmodell :	4.88E+01	5.17E+01	2.80E+02	4.78E+02	

Abb. 5a

31 EW-PSI-R

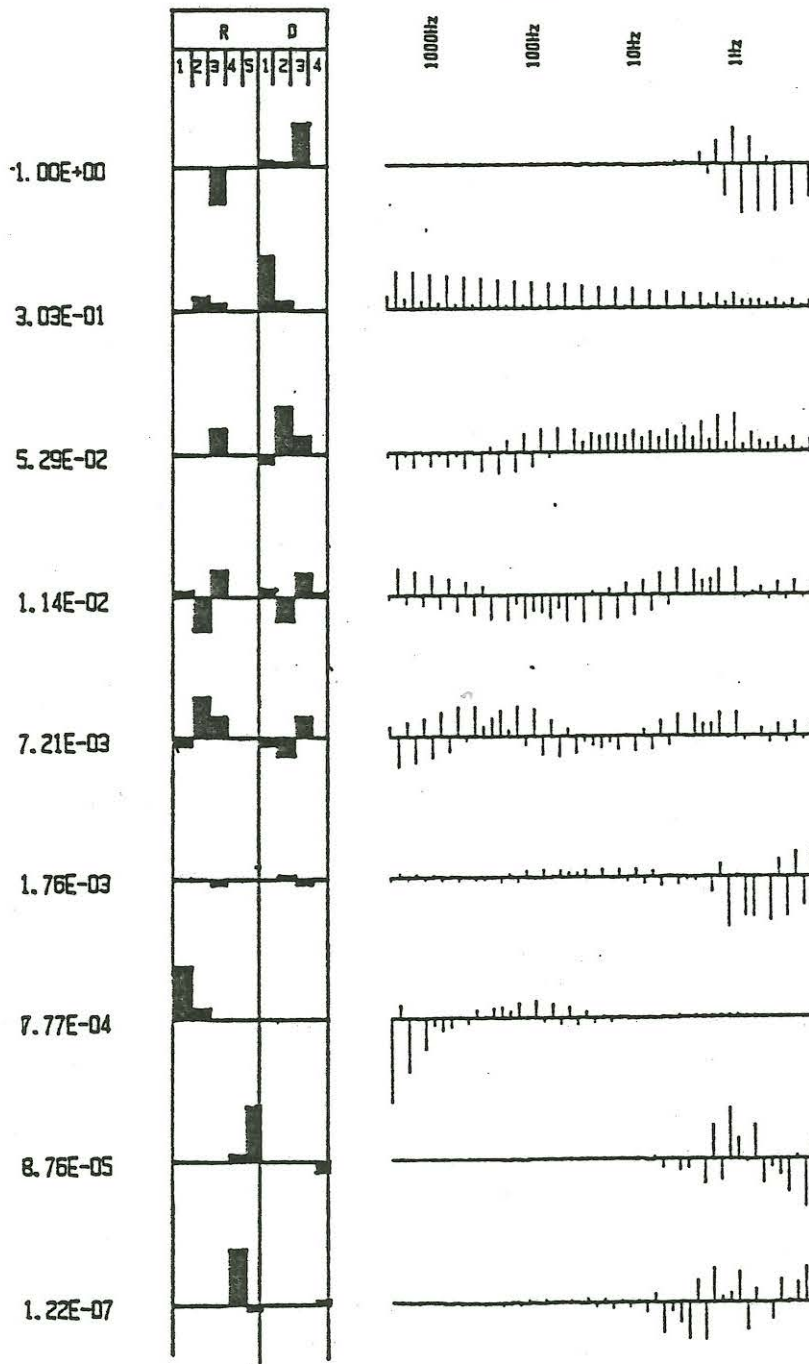
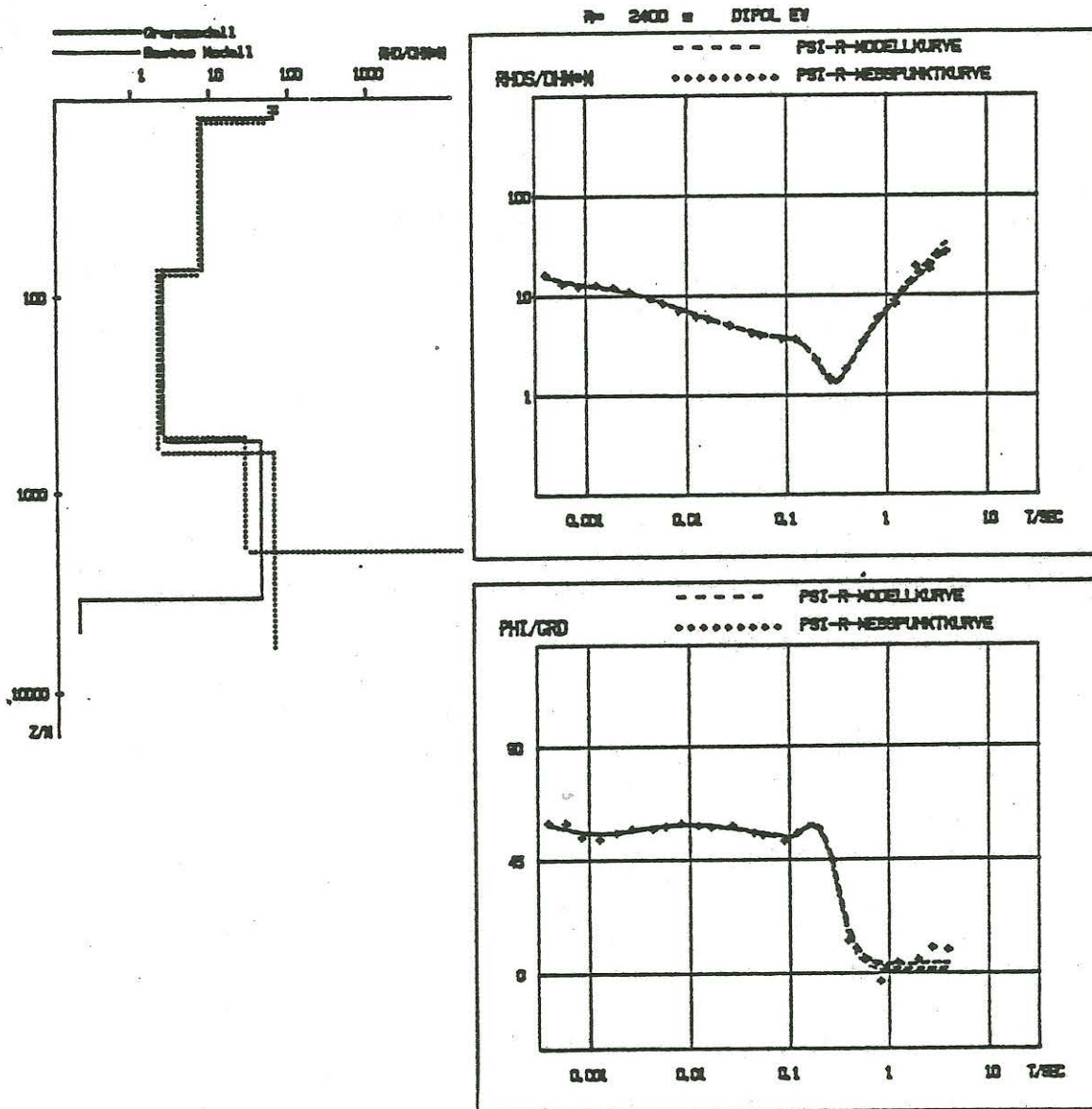


Abb.5b

# 32 AMEISENHAUFEN

## PSI-R-KOMPONENTE



	Bares Modell :	5.65E-01	7.25E+00	2.25E+00	2.64E+01	1.80E-01
RHO/Ohm-M	Grossmodell :	5.25E-01	7.21E+00	2.25E+00	2.55E+01	2.44E+10
	Grossmodell :	6.54E-01	7.95E+00	2.91E+00	3.66E+01	1.47E-10
D/M	Bares Modell :	1.27E+01	6.05E+01	4.74E+02	2.95E+03	
	Grossmodell :	1.91E+01	6.15E+01	4.94E+02	1.45E+03	
	Grossmodell :	1.22E+01	6.02E+01	5.16E+02	3.66E+03	

Abb. 6a

32EW-PSIR

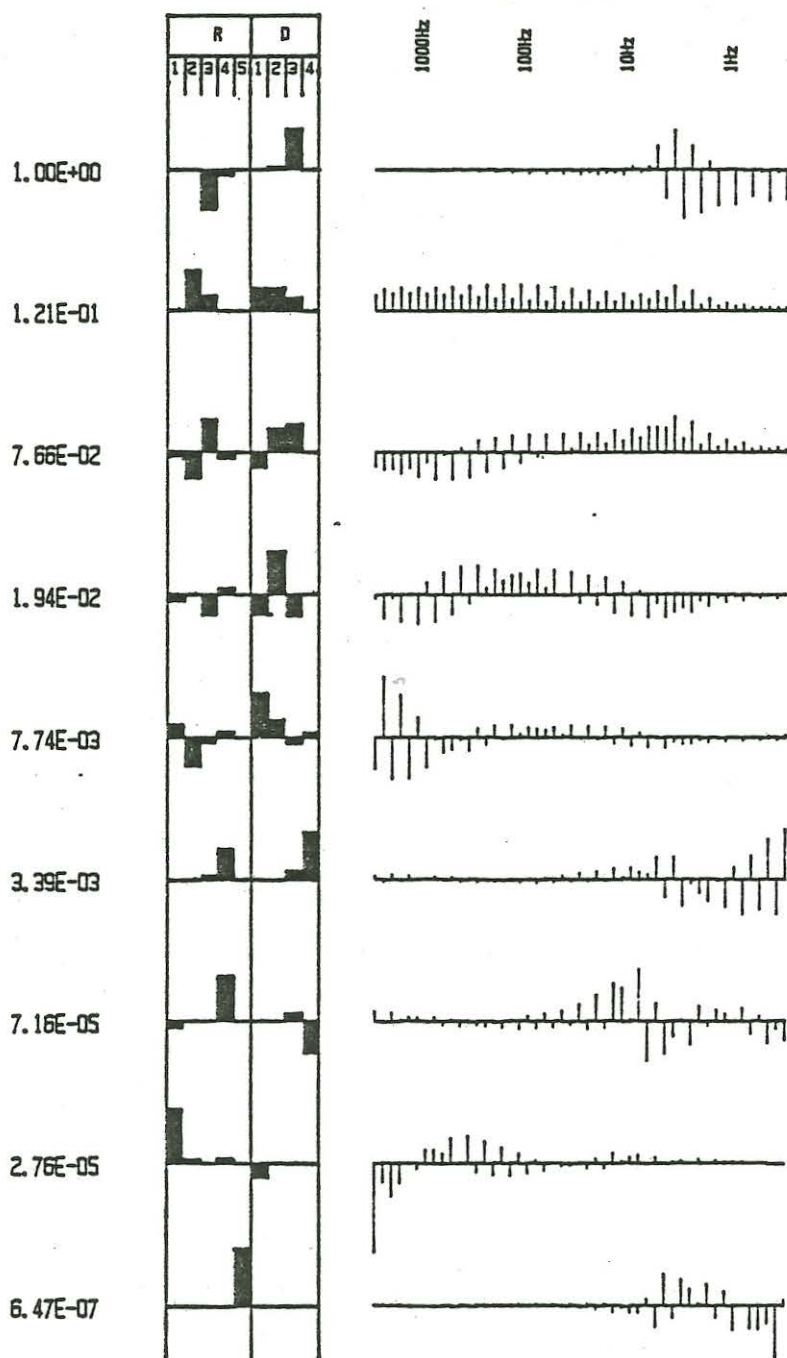
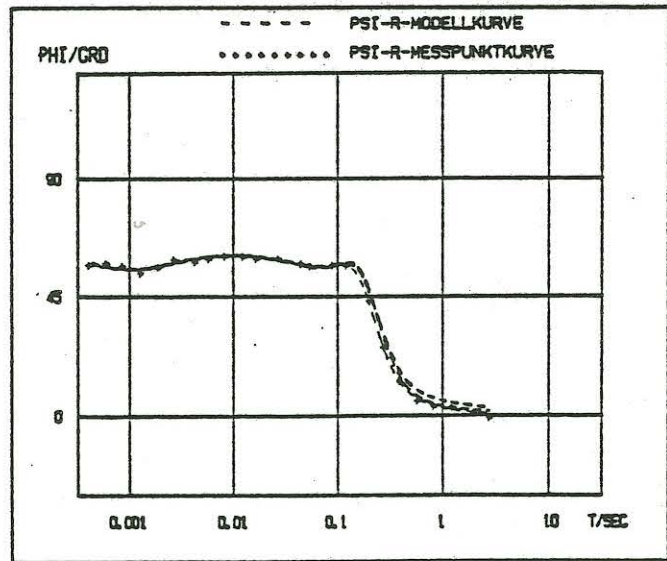
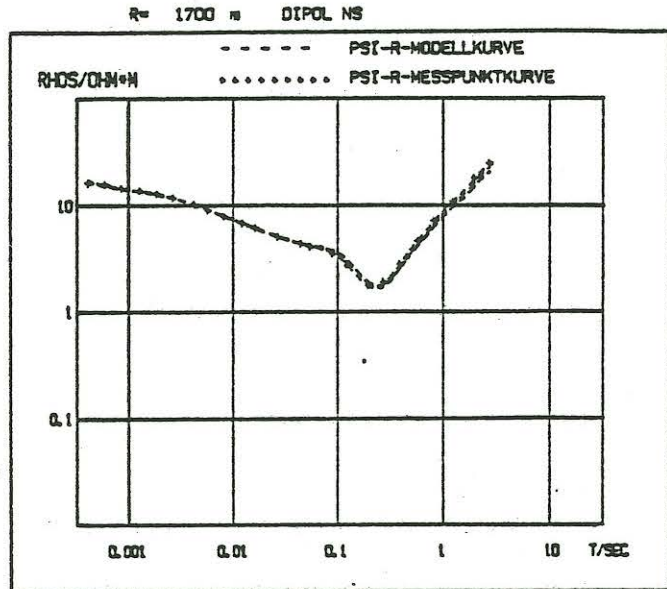
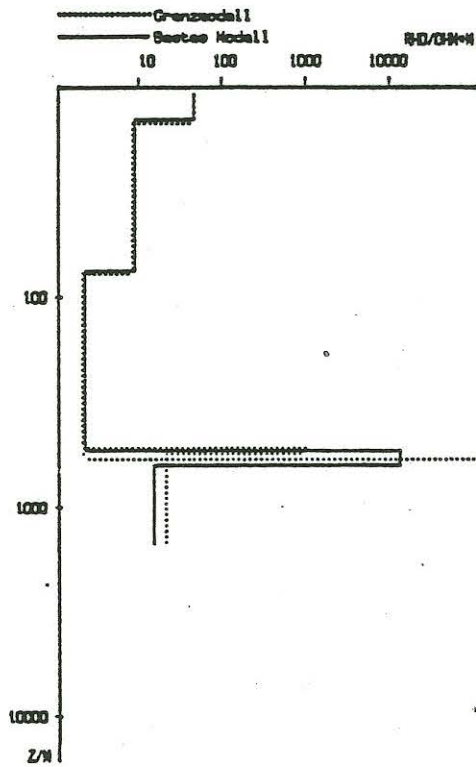


Abb.6b

# 32 AMEISENHAFEN

## PSI-R-KOMPONENTE



	Bestes Modell :	4.18E+01	8.19E+00	2.08E+00	1.18E+04	1.37E+01
RHO/Ohm*M	Grenzmodell :	4.28E+01	8.22E+00	2.09E+00	8.44E+08	8.47E+00
	Grenzmodell :	4.14E+01	8.17E+00	2.07E+00	8.25E+02	1.88E+01
D/M	Bestes Modell :	1.43E+01	8.11E+01	4.81E+02	9.29E+01	
	Grenzmodell :	1.41E+01	8.10E+01	5.07E+02	2.75E+09	
	Grenzmodell :	1.49E+01	8.12E+01	4.49E+02	2.21E+01	

Abb.7a

32 NS - PSIR

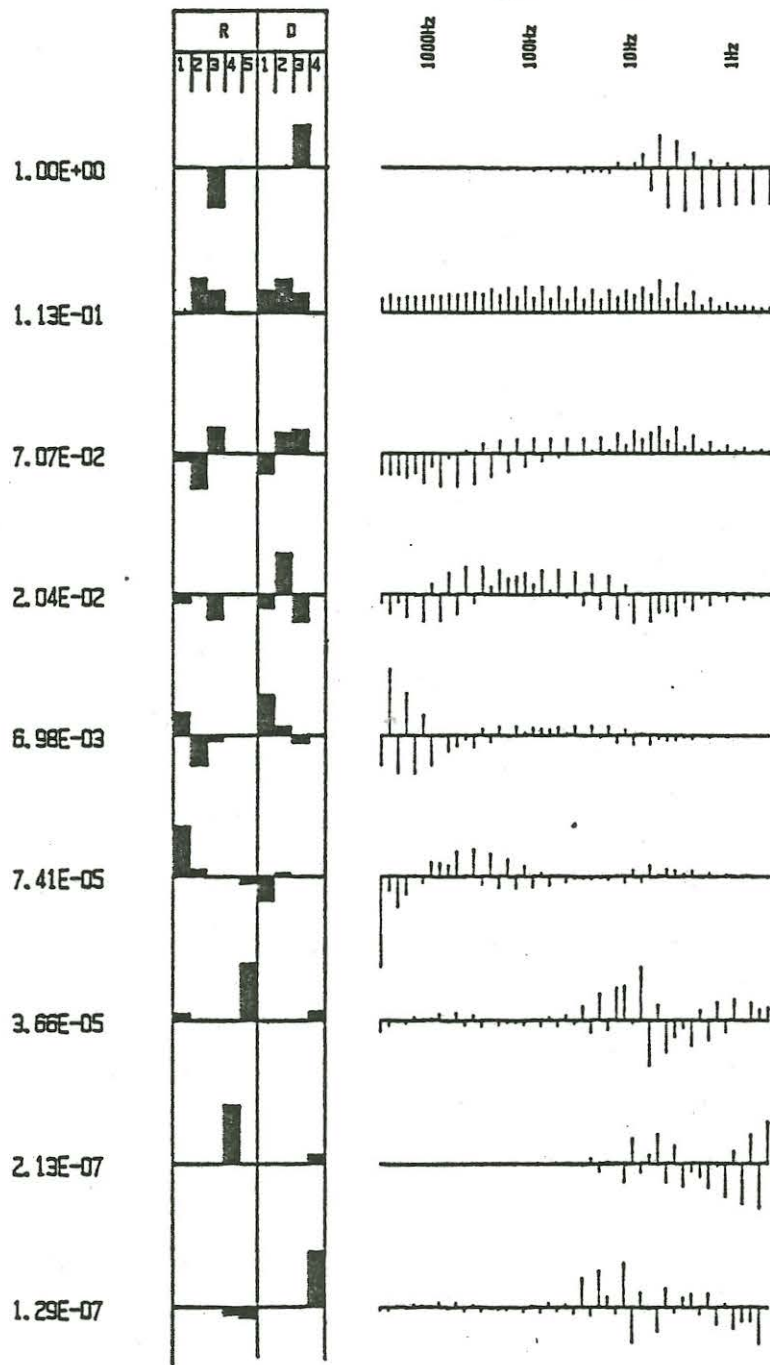
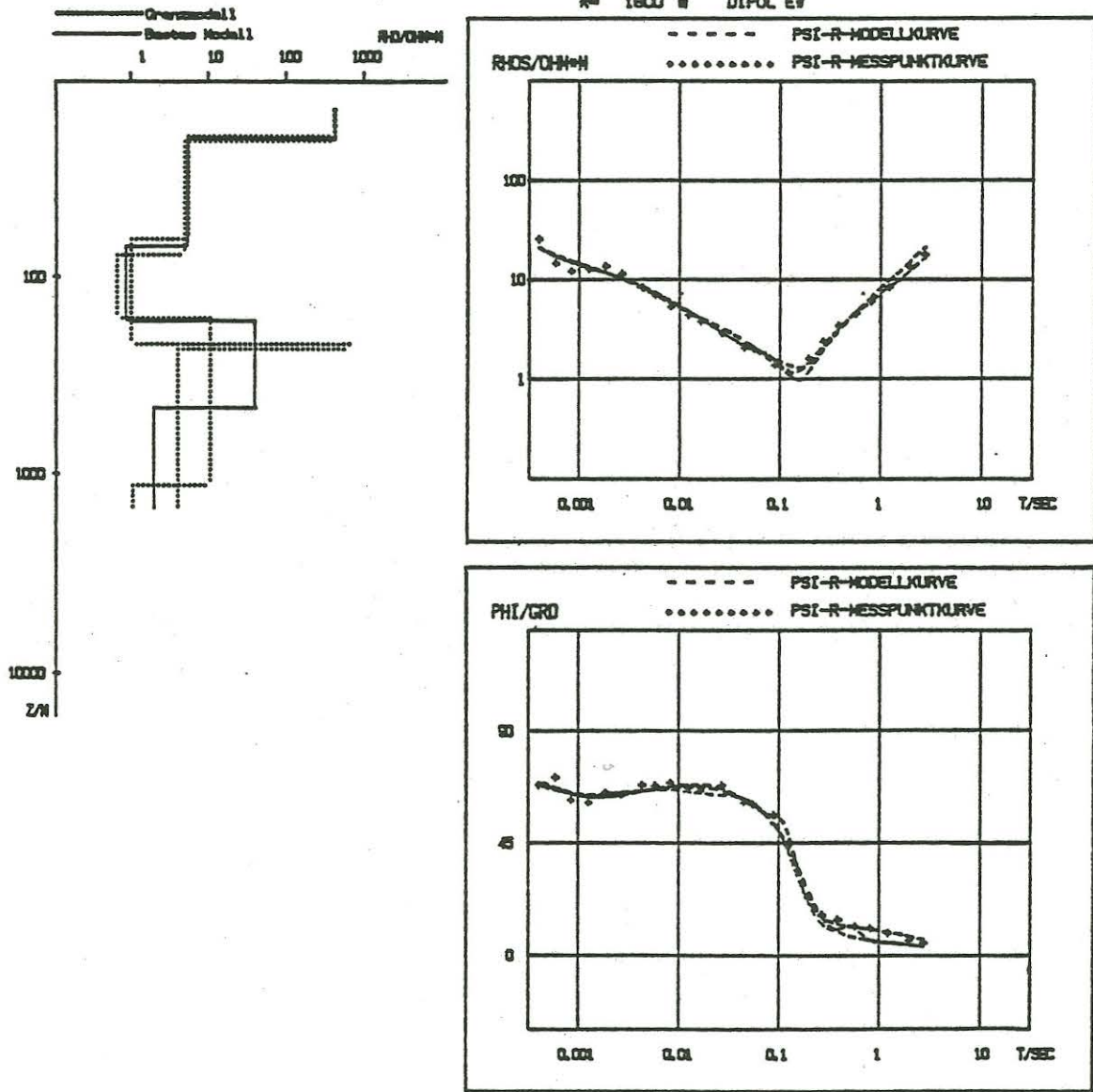


Abb.7b

# 33 STEINBRUCH

## PSI-R-KOMPONENTE



	Bastos Modell :	3.72E+02	4.90E+00	7.90E-01	3.52E+01	1.81E+00
RHO/CHH	Grenzwertmodell :	3.82E+02	5.24E+00	1.08E+00	6.73E+02	4.90E+00
	Grenzwertmodell :	3.77E+02	4.70E+00	8.89E-01	1.02E+01	1.15E+00
D/N	Bastos Modell :	1.65E+01	5.08E+01	9.70E+01	2.84E+02	
	Grenzwertmodell :	1.87E+01	4.48E+01	1.51E+02	1.88E+01	
	Grenzwertmodell :	1.98E+01	5.37E+01	8.15E+01	9.88E+02	

Abb. 8a



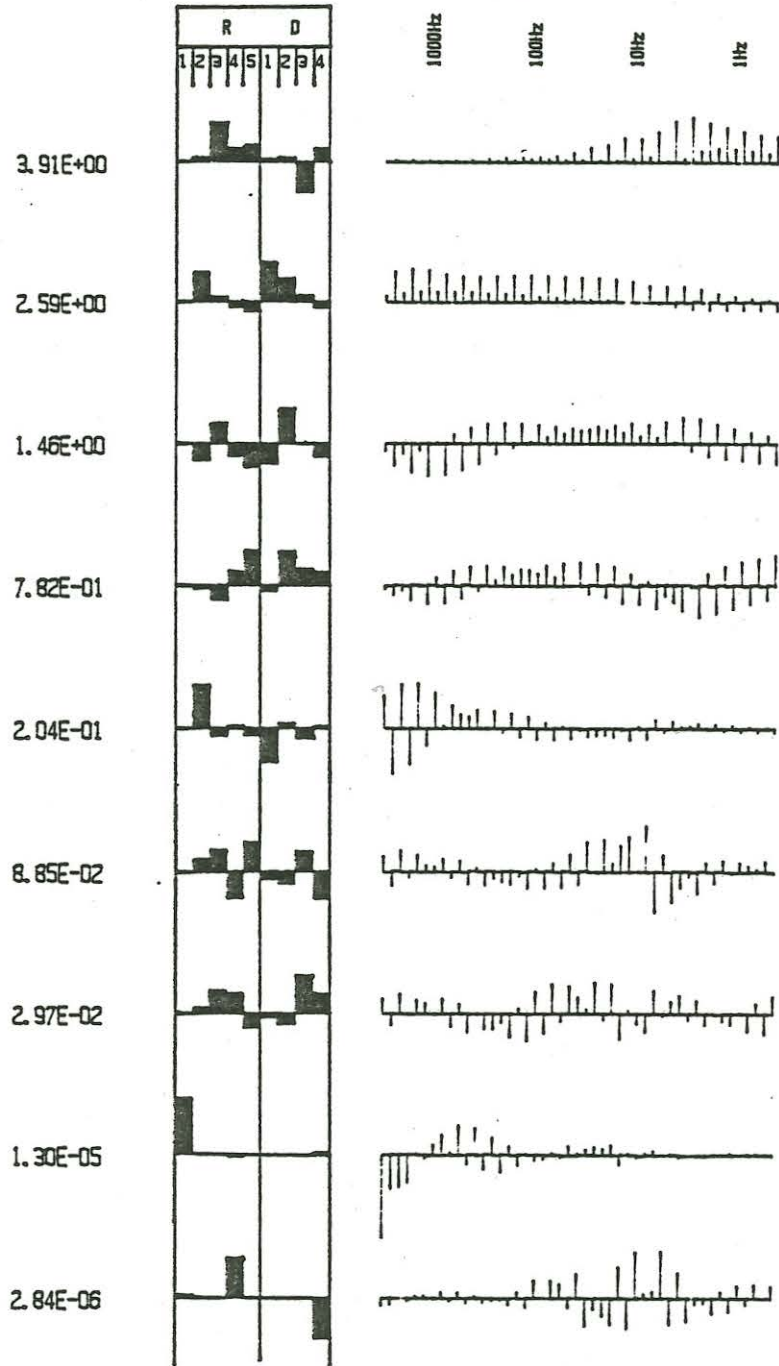


Abb. 8b

der Eigenwertdarstellung sieht man, daß die Parameter dieser Schicht erst bei dem allerkleinsten Eigenwert auftreten und ausserdem wieder in der Kombination  $D/\rho$ . Wie auch an den dazu berechneten Grenzmodellen zu erkennen, lassen sich keine Aussagen über Mächtigkeit oder Widerstand dieser Schicht machen. Hier wird aber deutlich, daß der Widerstand darunter noch einmal abnehmen muß, da sonst die Phase im Bereich des Nahfeldanstieges der  $\rho_s$ -Kurve null werden müßte.

Eine markante Schichtgrenze in diesem Modell ist die Oberkante der schlecht leitenden Schicht, wie oben bereits ausgeführt. Da diese Grenze an vielen Meßpunkten deutlich aus den Daten hervorgeht, haben wir sie in einem 3D-Plot für den Ostteil der Insel dargestellt (Abb.9). Hier wurde das gleiche Koordinatensystem wie in Abb.1 verwendet. Man kann durch Vergleich der Achsenbeschriftungen den Ausschnitt bestimmen. Die schraffierten Flächen stehen für Meeresoberfläche ausserhalb der Küstenlinie.

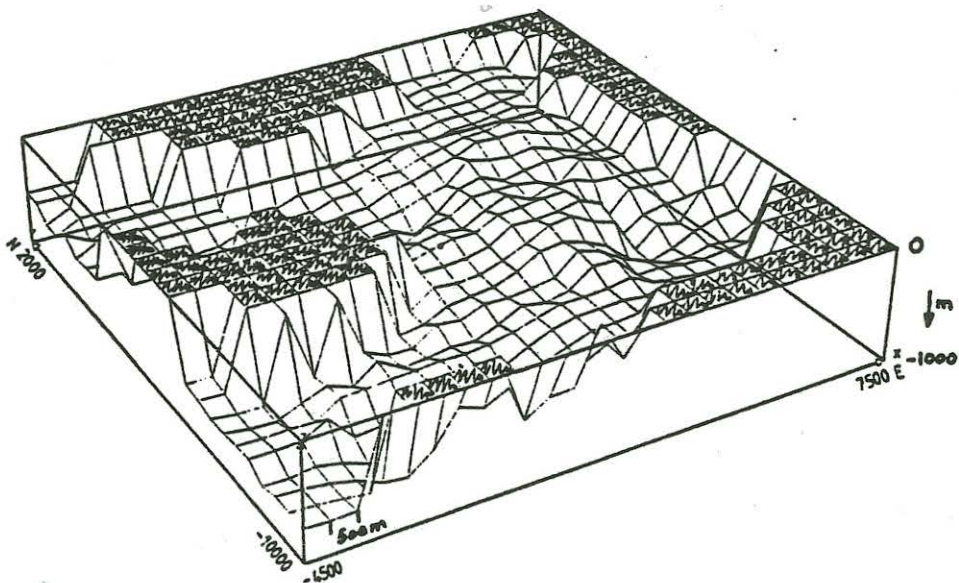


Abb.9: Oberfläche der schlecht leitenden Schicht

Man erkennt einen Rücken in Nord-Süd-Richtung entlang des Grabengebietes. Es ist ausserdem zu sehen, daß die Fläche auf dem ganzen Gebiet zu den Küsten hin abtaucht. Dies legt es nahe, diese Fläche als Grenze des eindringenden Salzwassers in die Oberflächengesteine anzusehen. Eine weitere Interpretationshilfe liefert der Vergleich von Meßpunkten, die dicht an den geothermischen Bohrungen lagen, mit den Bohrprofilen. So geschehen für den Meßpunkt Nr.8, der in unmittelbarer Nähe der Bohrung M2 lag. In Abb.10 sind die Auswertungen zu jeweils einer Komponente beider Anregungsrichtungen mit einigen Grenzmodellen im selben Maßstab neben dem Bohrprofil dargestellt.

Danach bieten sich die folgenden Interpretationen an: Die gute Leitfähigkeit direkt unter der Meeresoberfläche rührt von eingedrungenem Salzwasser in die lockeren vulkanischen Ablagerungen und in den grünen Lahar her. Darunter beginnt das metamorphe Grundgebirge, das dichter ist und deshalb nicht so sehr von Salzwasser durchtränkt. Dies entspricht dann der schlecht leitenden Schicht. Und ab ungefähr 1000m Tiefe schließlich macht sich der Einfluß des geothermischen Reservoirs durch eine erneute Abnahme des Widerstandes bemerkbar.

Ich füge auch noch eine Meßkurve zu diesem Meßpunkt Nr.8 an, um die geringe Abweichung der berechneten Kurven von den den Meßwerten auch bei diesem Punkt zu demonstrieren.

8  
WELL M2  
PSI-R - KOMPONENTE

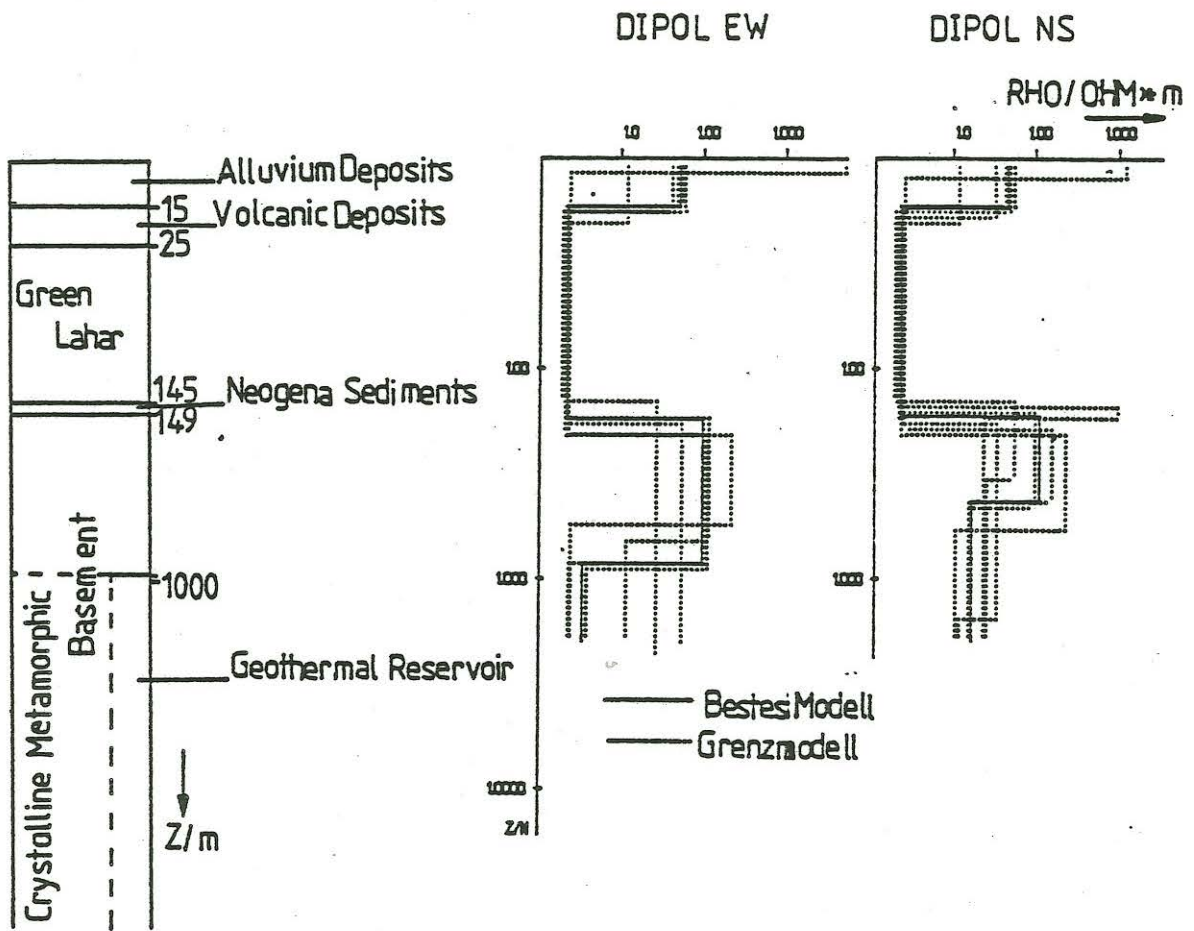
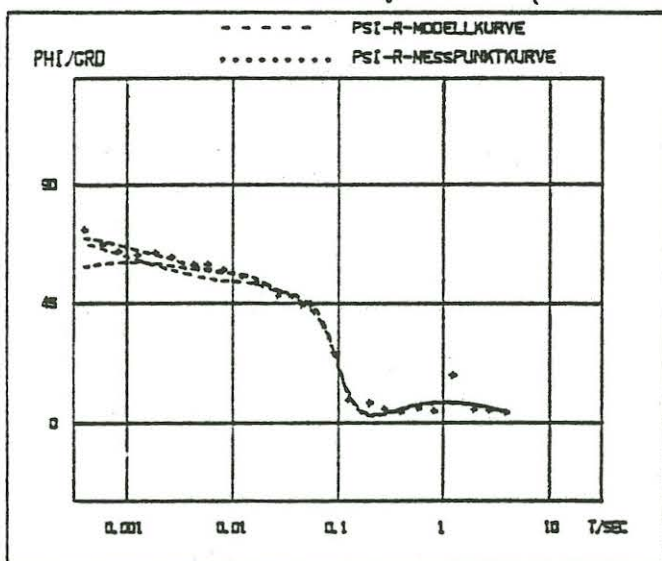
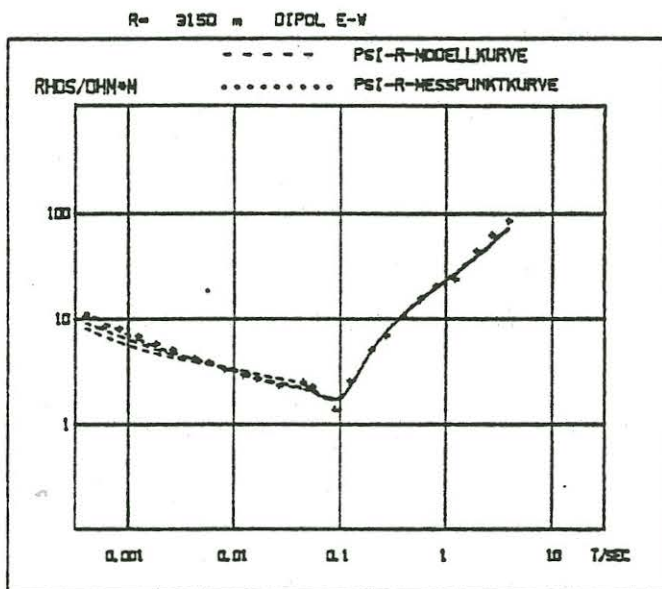
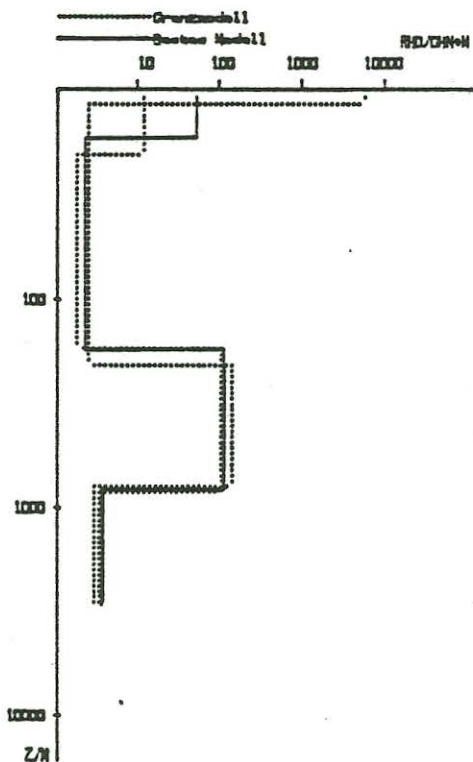


Abb. 10: Vergleich der Stratigraphie von Bohrung M2 mit den Widerstandstiefenmodellen des Meßpunktes Nr.8

8  
WELL M2

PSI-R-KOMPONENTE



	Barton Modell	4.78E+01	2.11E+00	1.02E+02	3.32E+00
RHO/DHM	Grenzmodell	5.04E+03	2.47E+00	1.23E+02	3.06E+00
	Grenzmodell	1.09E+01	2.01E+00	9.83E+01	3.41E+00
	Grenzmodell	1.89E+01	1.56E+02	8.48E+02	
D/M	Grenzmodell	1.07E+01	1.94E+02	5.66E+02	
	Grenzmodell	1.95E+01	1.48E+02	8.77E+02	

Abb. 11a

8 EW-PSIR

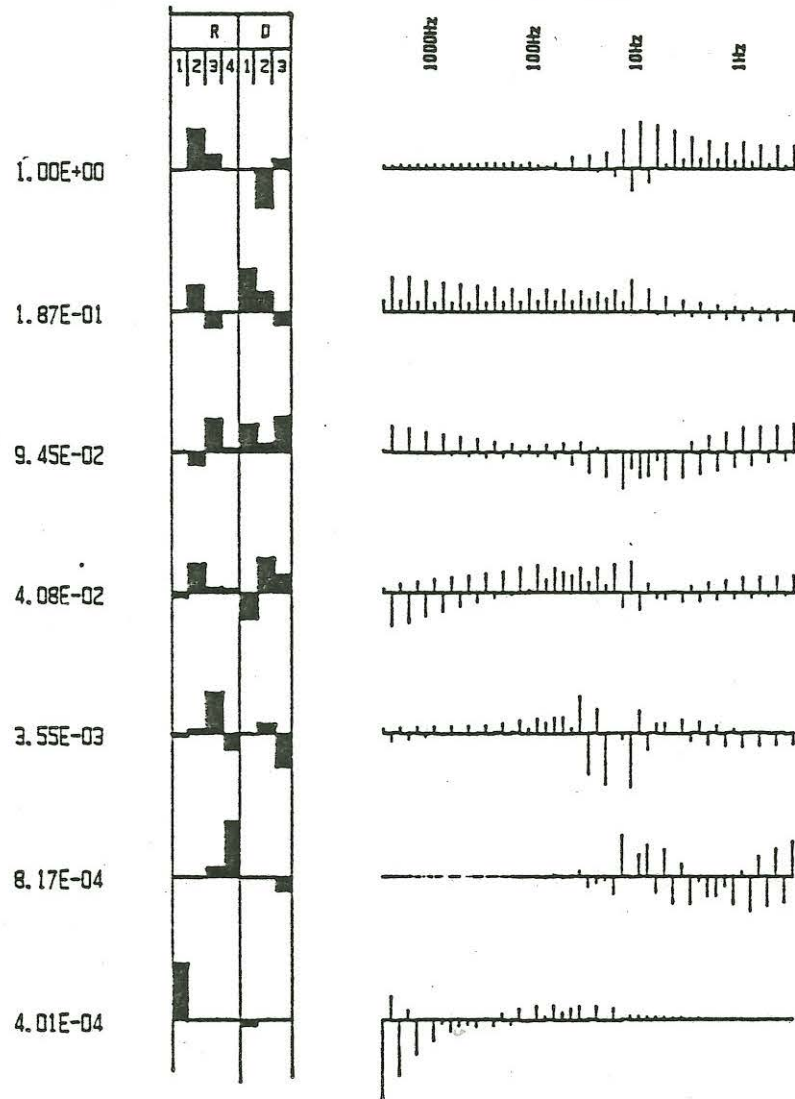


Abb.11b