

H. M. Maurer

AAMT-Messungen im mittleren Schwarzwald

Im Oktober 84 und Juni 85 haben wir im mittleren Kinzigtal, dem geplanten KTB-Zielgebiet Schwarzwald, Messungen mit Aktiver Audiomagnetotellurik an 12 Punkten durchgeführt. Den prinzipiellen Aufbau der Meßanlage zeigt Abb. 1. Als Sender dienen zwei etwa orthogonale horizontale elektrische Dipole. Eingespeist wird ein Sinussignal, jeweils 6 Frequenzen pro Dekade. Am Empfänger werden die Horizontalkomponenten des elektrischen Feldes und alle drei Komponenten des Magnetfeldes mit einer Korrelationstechnik gemessen. Die Datenqualität ist gut, die größten Störungen traten im Kinzigtal auf (Eisenbahnlinie, Industrie). Die Lage der Meßpunkte zeigt Abb. 2.

Die Meßkurven wurden mit einem 1-D-Inversionsprogramm nach dem Marquardt-Verfahren ausgewertet. Die Parameterstabilität wurde quantitativ durch die Berechnung von Grenzmodellen abgeschätzt.

Grenzmodelle

$y_{i,m}$  sei der  $i$ -te Meßwert (hier Impedanz für die  $i$ -te Frequenz). Eine Meßreihe wird zum Meßdatenvektor  $y_m$  zusammengefaßt. Die Parameter des Leitfähigkeitsmodells bilden den Parametervektor  $p$  (L-Schicht-Modell  $\rightarrow$  2L-1 Parameter). Eine Vorwärtsrechnung berechnet theoretische Daten aus den Parametern, das Ergebnis ist der theoretische Datenvektor  $y_t(p)$ . Die Vorwärtsrechnung ist nichtlinear, deshalb wird in eine Taylorreihe entwickelt und nach dem linearen Glied abgebrochen. Ziel der Inversion ist es, ausgehend von einem vorgegebenen Startmodell ein verbessertes Modell zu finden:

$$p_{\text{verbessert}} = p_{\text{start}} + \Delta p \quad ; \quad \Delta y = y_m - y_t(p_{\text{start}})$$

Dann ist der Verbesserungsvektor

$$\Delta p(\mu) = (\underline{\underline{A}}^T \underline{\underline{A}} + \mu \underline{\underline{I}}) \underline{\underline{A}}^T \Delta y$$

mit dem Marquardt-Parameter  $\mu > 0$ .  $\underline{\underline{A}}$  ist die Matrix der partiellen Ableitungen der Daten nach den Parametern. Wird eine Eigenwertzerlegung von  $\underline{\underline{A}}^T \underline{\underline{A}}$  durchgeführt, erlauben die Eigenwerte und Eigenvektoren eine qualitative Abschätzung der Parameterstabilität. Jeder Komponente eines Eigenvektors ist ein Parameter zugeordnet. Gehört der Eigenvektor zu einem großen Eigenwert, so sind die Parameter, die seinen großen Komponenten zugeordnet

sind, gut aufgelöst; gehört der EV zu einem kleinen Eigenwert, sind sie schlecht aufgelöst.

Abb. 3 zeigt rechts oben synthetische, verrauschte Daten eines Zwei-Schicht-Modells und die Modellkurven des Startmodells (SM) und des besten Modells (BM). Links unten sind die Eigenwerte und Eigenvektoren dargestellt. Die Reihenfolge der Auflösbarkeit ist also  $\rho_1, \rho_1, d_1$ .  $\underline{y}_{NP}$  ist der Eigenvektor, der zum kleinsten Eigenwert gehört, der also große Komponenten bei den am schlechtesten aufgelösten Parametern hat. Das beste Modell  $\underline{p}_{opt}$  wird verändert:

$$\underline{p}_{Grenz} = \underline{p}_{opt} + k \underline{y}_{NP}$$

Der empirische Faktor  $k$  wird solange vergrößert, bis eine vorgegebene Verschlechterung der Anpassung überschritten wird. Das so erhaltene  $\underline{p}_{Grenz}$  ist eine quantitative Abschätzung des Bereichs, in dem die zu  $\underline{y}_{NP}$  gehörige Parameterkombination variieren kann.

#### Ergebnisse

Die Meßkurven lassen sich alle durch 2-Schicht- oder 3-Schicht-Modelle erklären. Die Typen der Modelle sind:

- 2-Schicht: mittlerer Deckschichtwiderstand -  
hoher Liegendwiderstand
- 3-Schicht: mittlerer Deckschichtwiderstand -  
besser leitende Zwischenschicht -  
hoher Liegendwiderstand

Die Deckschichtwiderstände sind für kristalline Gesteine erstaunlich niedrig. Es ergeben sich 200 - 500  $\Omega$ m bis in ca. 800m Tiefe. Die Abbildungen 4,5,6,7,8 zeigen Meßpunktkurven und Modellkurven für das beste Modell und für Grenzmodelle.

#### Äquivalente Modelle

Bei der Auswertung stellte sich heraus, daß das Inversionsprogramm bei den südöstlichen Punkten als bestes Modell für die eine Polarisation ein Dreischichtmodell mit einer sehr dünnen gutleitenden Zwischenschicht lieferte, für die andere Polarisation ein Modell mit einer dicken, nicht so gutleitenden Zwischenschicht (Abb.9).

Modellrechnungen mit synthetischen Daten dieser beiden Modelle zeigen, daß sie praktisch nicht unterscheidbar sind (Abb. 10). Es handelt sich aber um zwei getrennte Anpassungsminima, nicht um die Grenzfälle eines mittleren Modells.

#### Streichrichtung

Da die Messungen der passiven MT in größerer Tiefe eine starke Anisotropie der Leitfähigkeit ergaben, habe ich für die 5-7 Fernfeldfrequenzen der Meßkurven Streichwinkel ausgerechnet. Diese Winkel sind nur auf  $90^\circ$  bestimmt, d.h. man kann nicht entscheiden, ob die größere Leitfähigkeit in der angegebenen Richtung oder senkrecht dazu vorliegt. Die Winkel der Streichrichtung zeigt Abb. 11. Es besteht eine gute Übereinstimmung der Punkte untereinander und mit der Hauptstörungsrichtung SW-NE in diesem Gebiet. Die Richtungsabhängigkeit der Leitfähigkeit zeigt sich also schon in den oberflächennahen Schichten bis ca. 800m Tiefe.

Eine Zusammenfassung der Meßpunkte zu drei Profilen zeigen die Abbildungen 12, 13 und 14. Die Elztalllinie im Südosten scheint sich durch erhöhte Klüftigkeit bemerkbar zu machen, ebenso ein Gebiet nördlich von Haslach. Die niedrigeren Widerstände im Norden treten auch bei den DCR-Messungen auf. Sie könnten eventuell auch durch den erhöhten Graphitgehalt der dort anstehenden Gneise interpretiert werden.

#### Zusammenfassung

Im mittleren Kinzigtal, dem geplanten Zielgebiet der KTB-Lokation Schwarzwald, sind an 12 Punkten je 4 Meßkurven aufgenommen worden. In den weniger gestörten Seitentälern ist die Datenqualität sehr gut, und auch die Messungen im Kinzigtal selbst liefern trotz der großen technischen Störungen ausreichende Ergebnisse, sofern der Abstand zwischen anregendem Dipol und Empfangsstation nicht zu groß ist.

Messungen am gleichen Empfangsstandort bei verschiedenen Standorten des Dipols zeigen z.T. gute Übereinstimmung. Die Meßkurven lassen sich durch 1-dimensionale Modelle mit 2 oder 3 Schichten erklären. Mit Hilfe von Grenzmodellen wurde versucht, die Stabilität der Parameter dieser Modelle abzuschätzen. Die Messungen ergaben erstaunlich niedrige spezifische Widerstände für das kristalline Grundgebirge. Vermutlich beruhen diese niedrigen Widerstände auf einer erhöhten Klüftigkeit und damit verbunden einem größeren Wassergehalt der Gneise. Eine Streichrichtung SW-NE ist auch für Tiefen kleiner 800 m feststellbar. Eventuell stimmt eine Schicht mit erniedrigtem Widerstand mit einer Struktur in den reflexionsseismischen Profilen des DE-KORP-Programms überein. Für eine weitergehende Auswertung wäre es notwendig, 2-dimensionale Leitfähigkeitsverteilungen theoretisch behandeln zu können. In Bezug auf die kontinentale Tief-

bohrung scheint im engeren Zielgebiet direkt bei Haslach bis in eine Tiefe von 4 km, abgesehen von einer kontinuierlichen Widerstandszunahme, keine Veränderung der Gesteine aufzutreten, die sich in der elektrischen Leitfähigkeit bemerkbar macht.

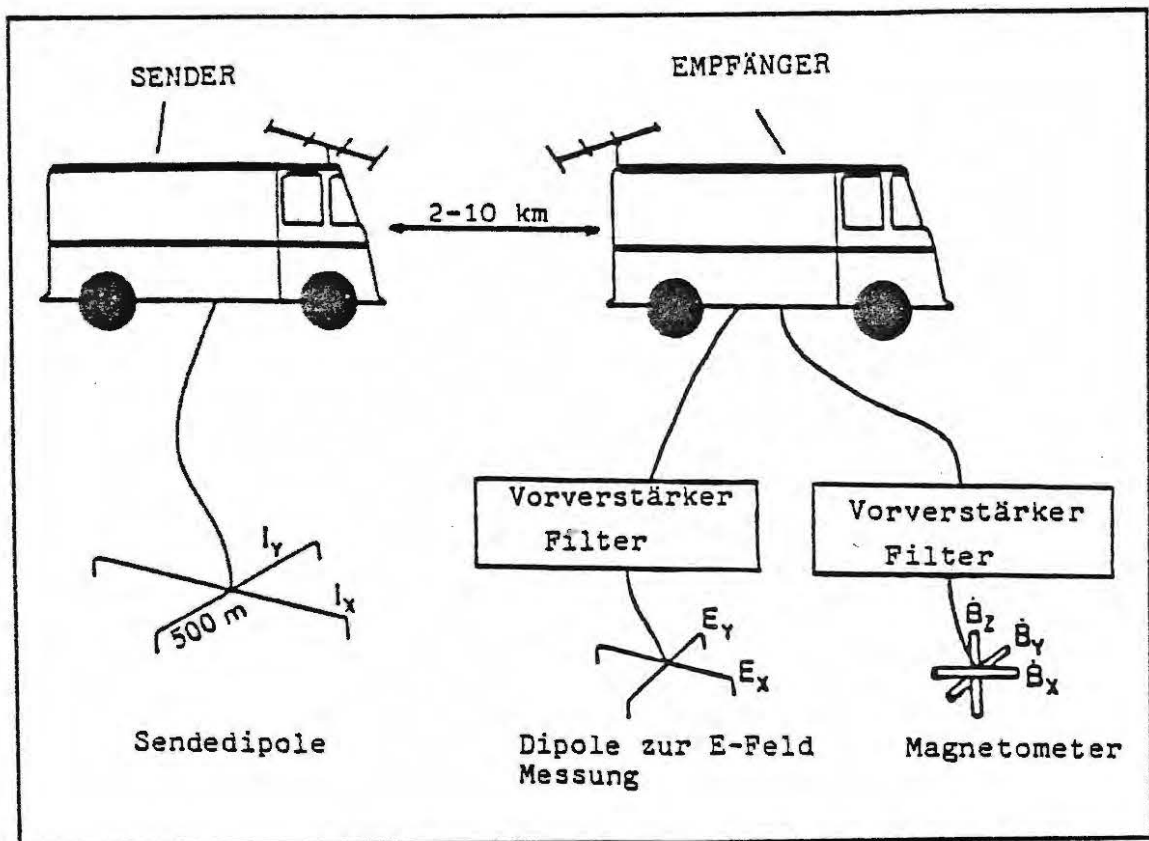
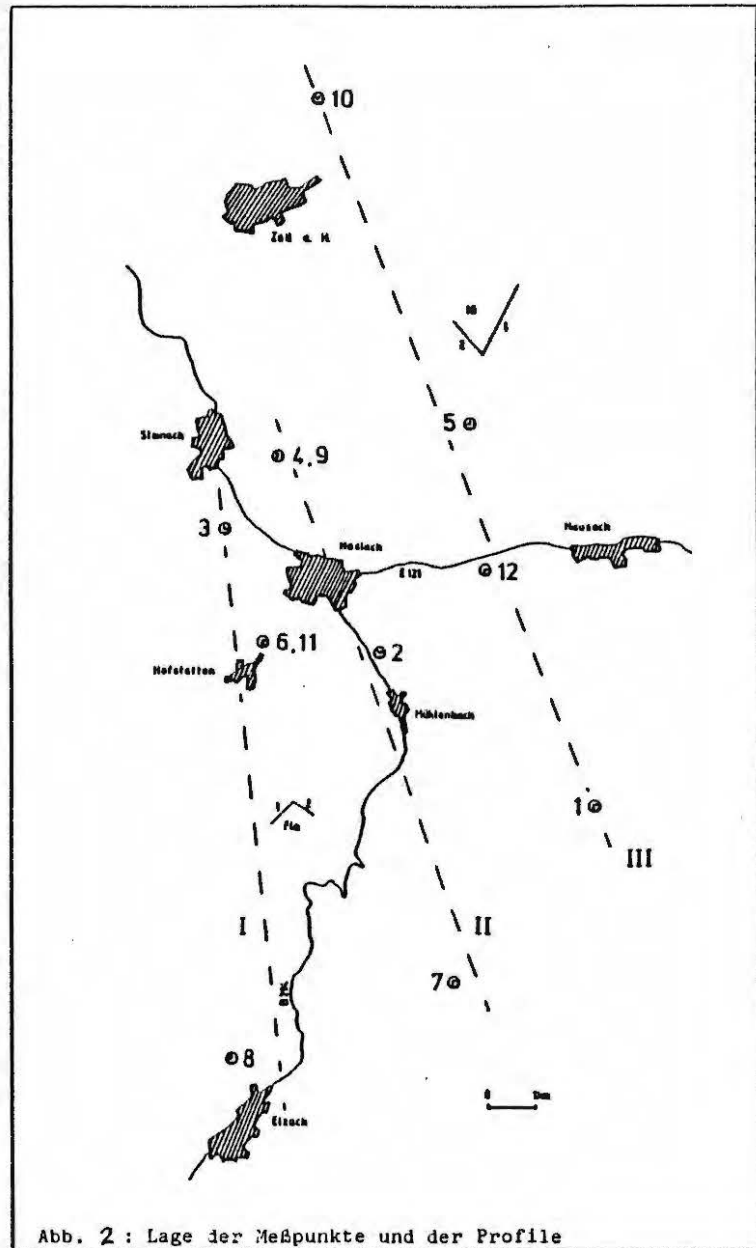


Abb. 1 : Skizze der Meßanlage



### Synt. Modell 2

#### PSI-R-KOMPONENTE

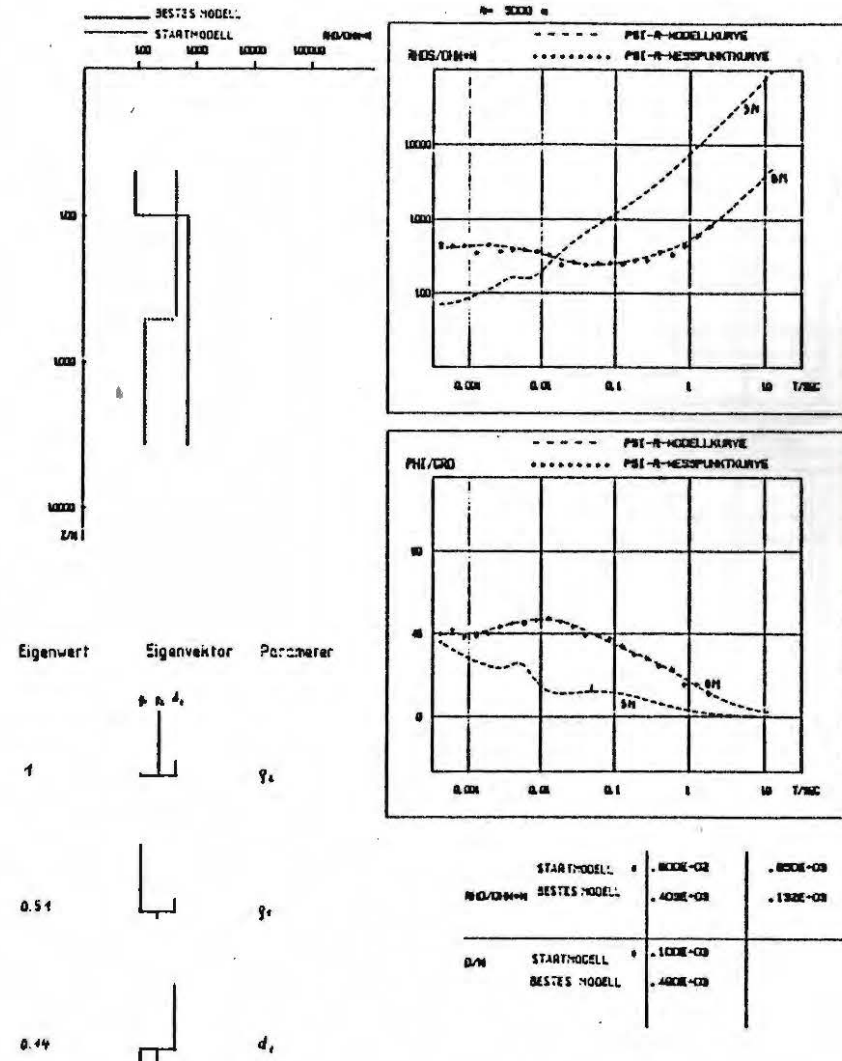
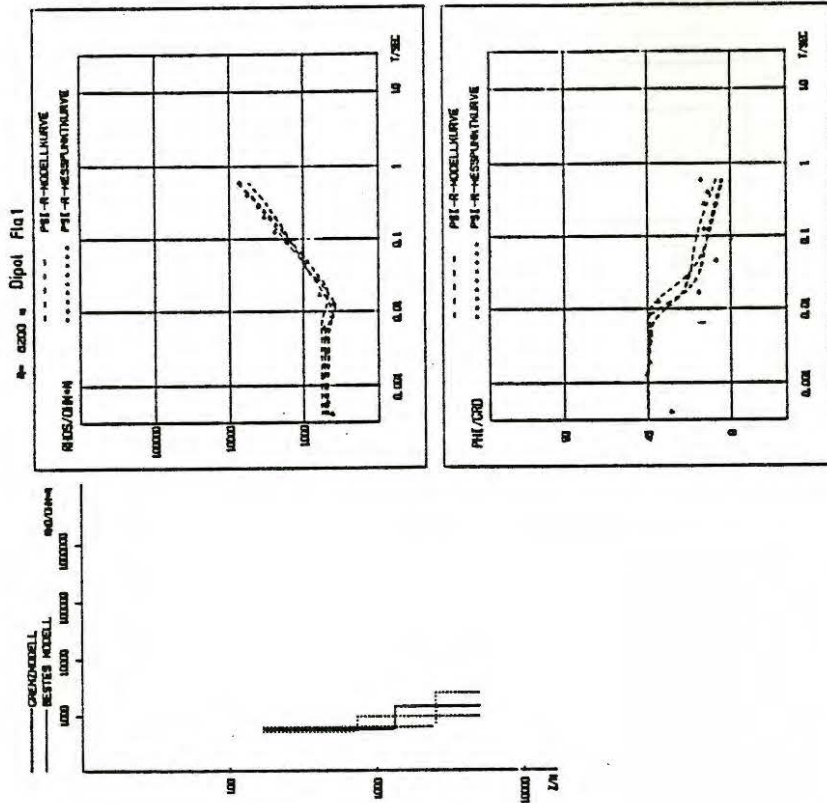


Abb. 3

3 SARACH

PSI-R-KOMPONENTE

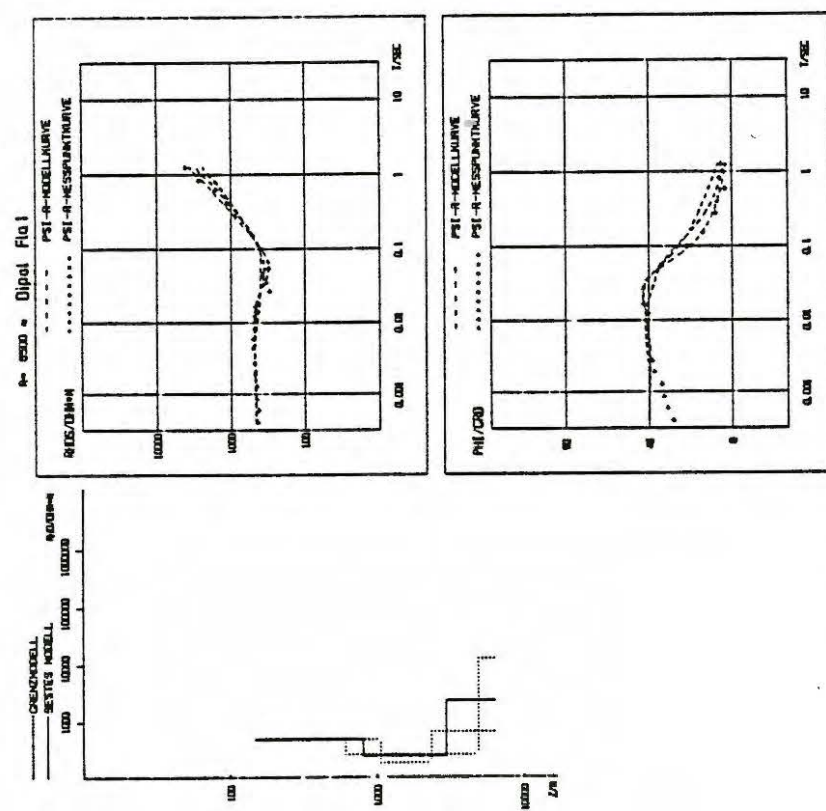


BESTES MODELL	.512E-03	.110E-04
CRENZMODELL	.562E-03	.108E-04
CRENZMODELL	.470E-03	.840E-03
D/W		
BESTES MODELL	.112E-04	
CRENZMODELL	.240E-04	
CRENZMODELL	.720E-03	

Abb.: 5

1 BUCHJOCKENHOF

PSI-R-KOMPONENTE

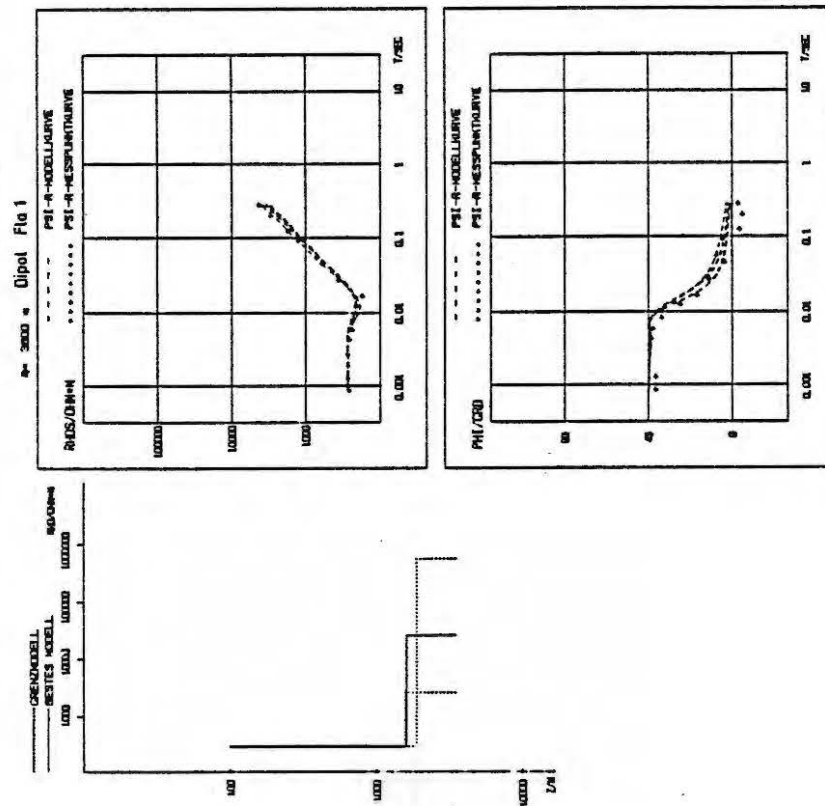


BESTES MODELL	.454E-03	.212E-04
CRENZMODELL	.457E-03	.118E-03
CRENZMODELL	.451E-03	.590E-03
D/W		
BESTES MODELL	.810E-03	.218E-04
CRENZMODELL	.800E-03	.404E-04
CRENZMODELL	.102E-04	.130E-04

Abb.: 4

6  
LAEUFERHOF

PSI-R-KOMPONENTE

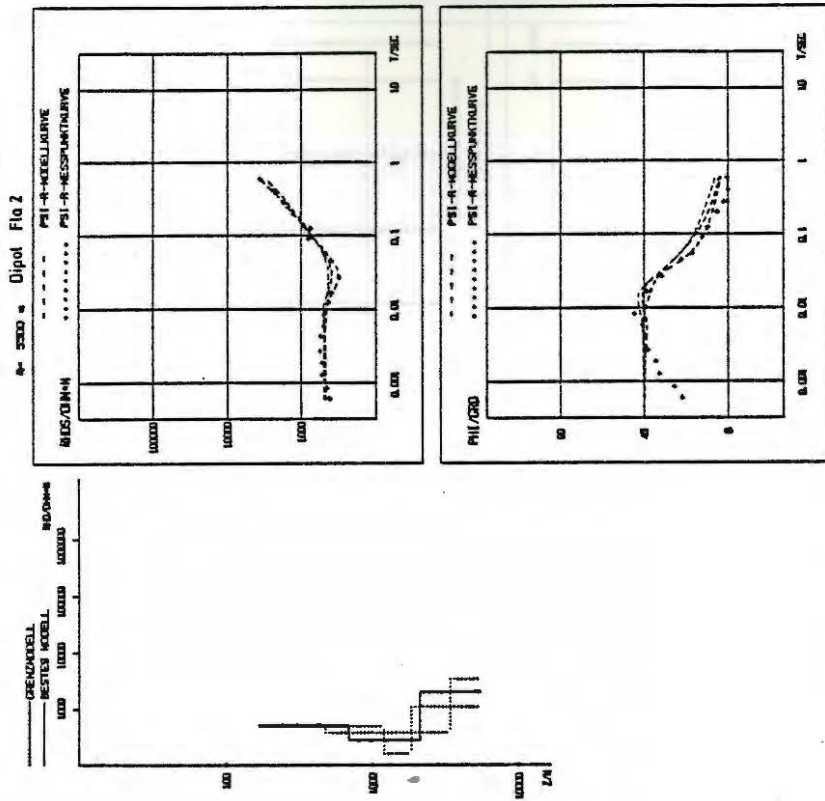


BESTES MODELL	.209E-03	.231E-02
RUS/DIN-H GRENZMODELL	.209E-03	.478E-03
GRENZMODELL	.209E-03	.227E-04
BESTES MODELL	.181E-04	
GRENZMODELL	.170E-04	
GRENZMODELL	.139E-04	
D/W		

Abb.: 6

8  
BURGERS

PSI-R-KOMPONENTE

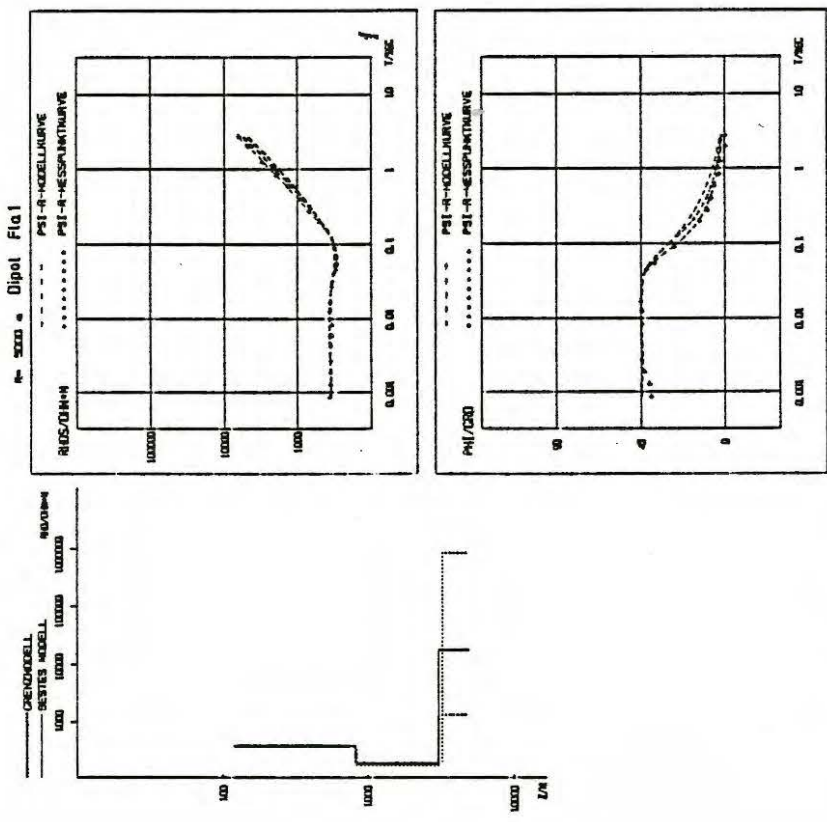


BESTES MODELL	.478E-03	.205E-03	.118E-04
RUS/DIN-H GRENZMODELL	.468E-03	.874E-03	.809E-04
GRENZMODELL	.406E-03	.107E-03	.602E-03
BESTES MODELL	.002E-03	.143E-04	
GRENZMODELL	.468E-03	.285E-04	
GRENZMODELL	.118E-04	.590E-03	
D/W			

Abb.: 7

7  
BREHMBACH

PSI-R-KOMPONENTE

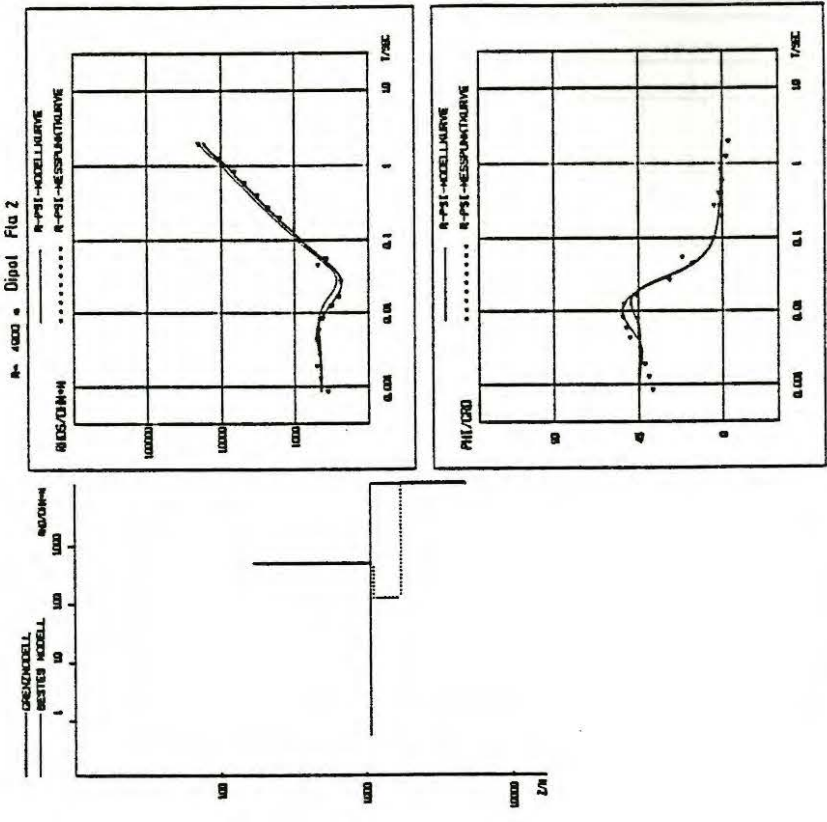


BESTES MODELL :	3.40E-03	.172E-03	.154E-03
R(DS/DH+H) GRENZMODELL :	3.40E-03	.172E-03	.740E-03
GRENZMODELL :	3.40E-03	.174E-03	.110E-04
BESTES MODELL :	.827E-03	.222E-04	
GRENZMODELL :	.800E-03	.247E-04	
GRENZMODELL :	.654E-03	.214E-04	

Abb.: 8

7  
BREHMBACH

R-PSI-KOMPONENTE



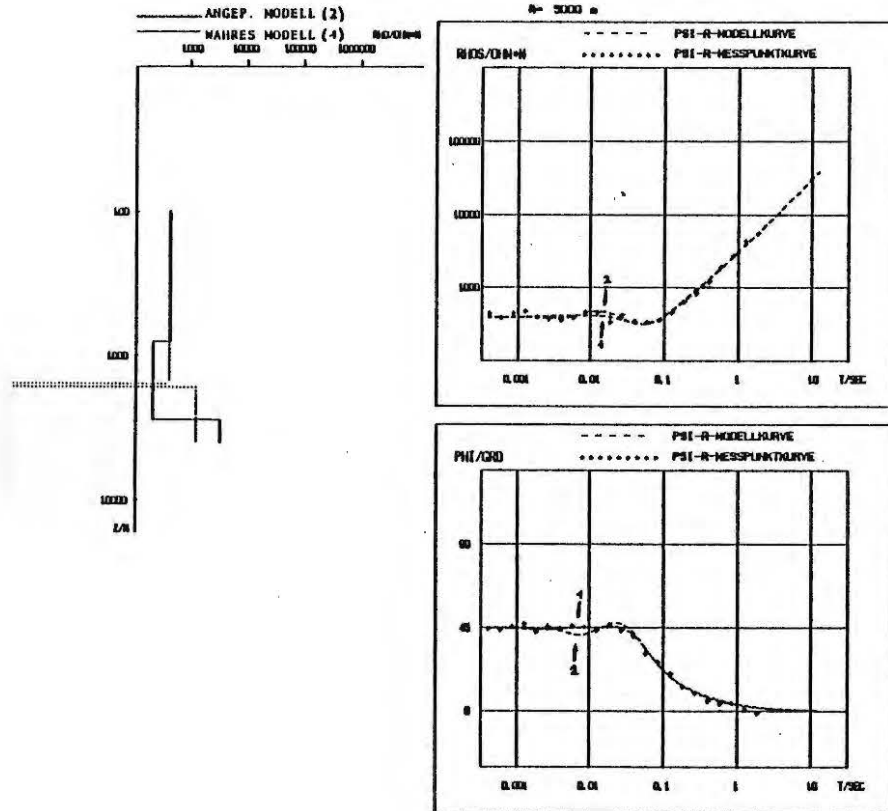
BESTES MODELL :	.487E-03	.437E-03	.104E-03
R(DS/DH+H) GRENZMODELL :	.487E-03	.437E-03	.105E-03
GRENZMODELL :	.108E-04		
BESTES MODELL :	.108E-04	.270E-01	
GRENZMODELL :	.108E-04	.010E-03	

Abb.: 9



# Synt. Modell 3

## PSI-R-KOMPONENTE



MAHRES MODELL	.400E+03	.200E+03	.300E-04	(4)
RHO/Delta N-H ANGEF. MODELL	.387E+03	.400E+03	.100E-04	(1)
<hr/>				
MAHRES MODELL	.800E+03	.200E-04		(4)
ANGEF. MODELL	.152E+04	.290E+01		(2)

Abb. 10 Äquivalente Modelle für M3

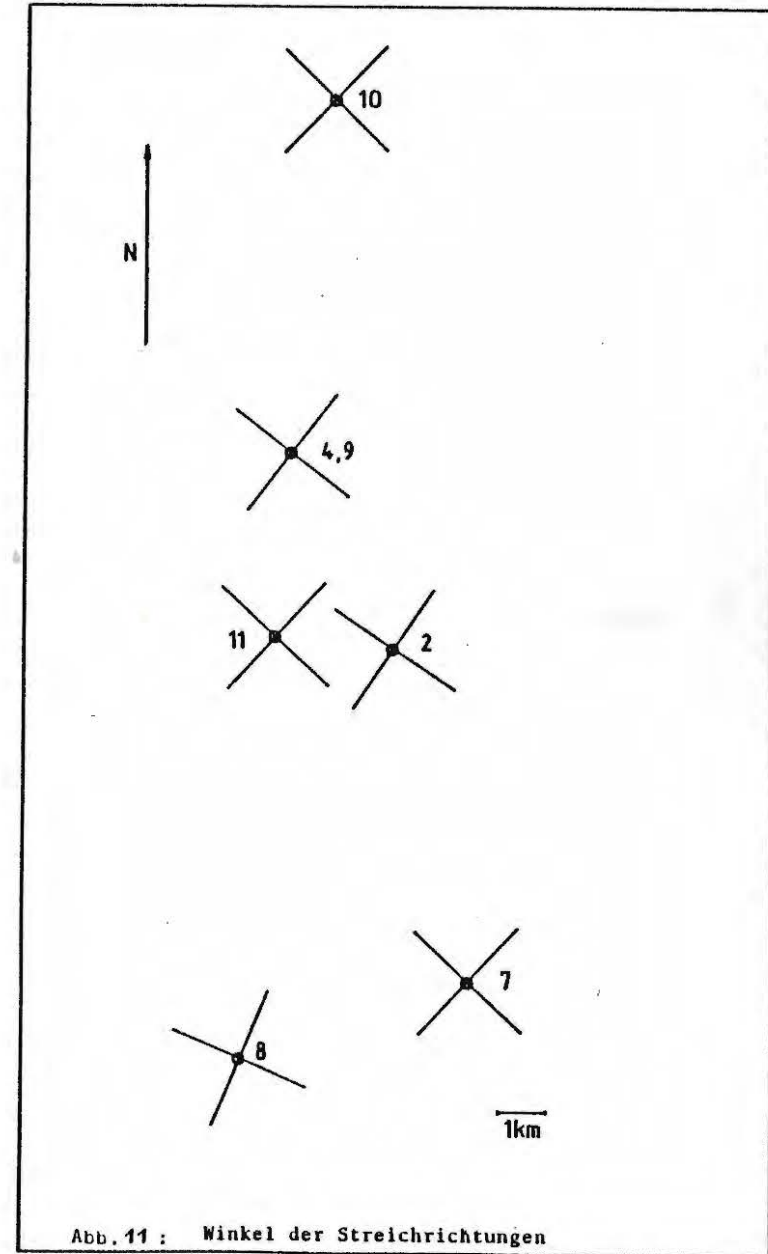


Abb. 11 : Winkel der Streichrichtungen

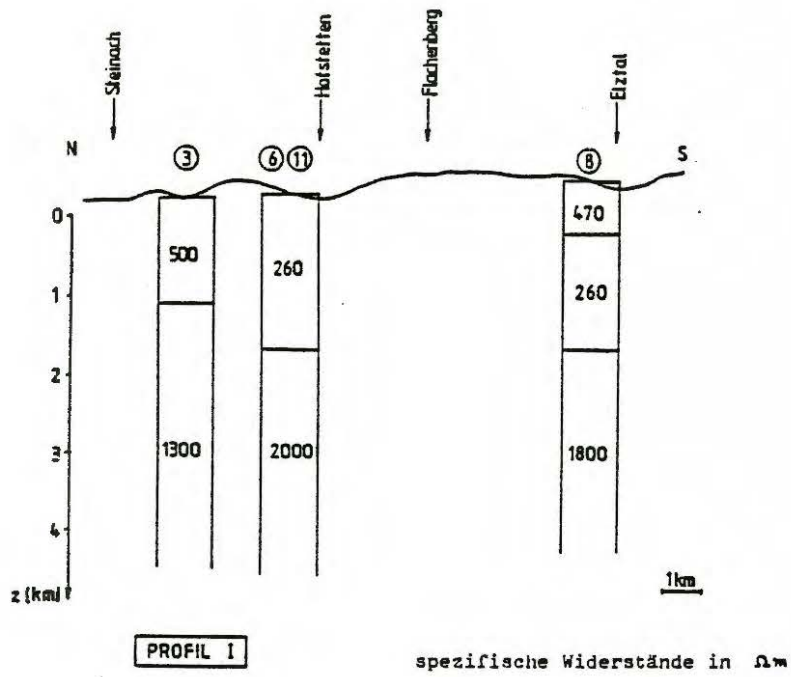


Abb. 12 : Widerstands-Tiefen-Profil I

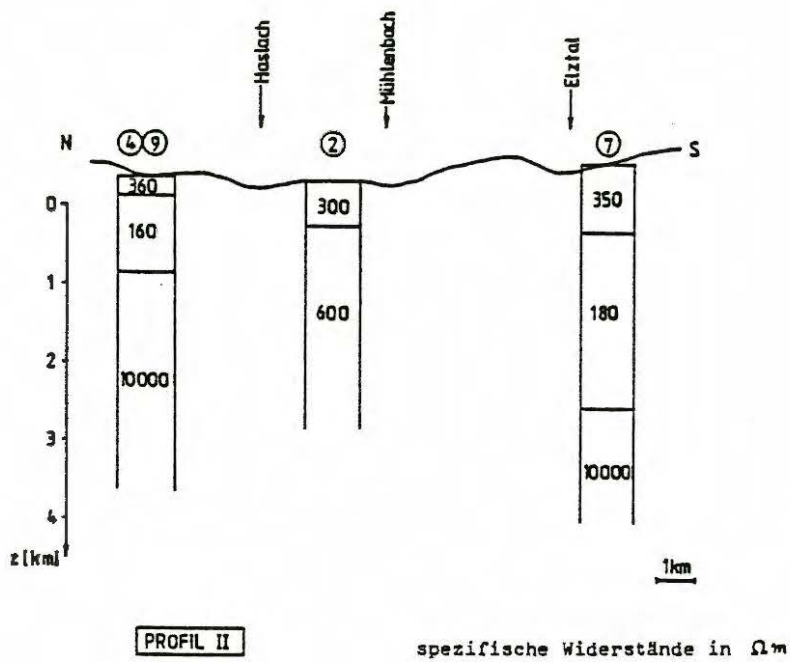


Abb. 13 : Widerstands-Tiefen-Profil II

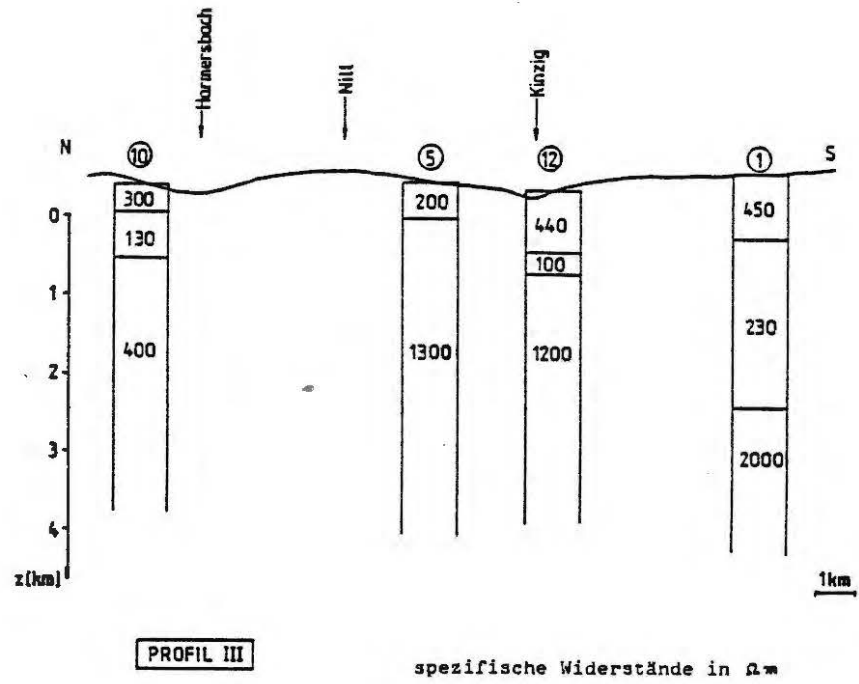


Abb. 14 : Widerstands-Tiefen-Profil III