

Jürgen Untiedt, Münster

"Die elektrische Leitfähigkeit in der Erdkruste in den Zielgebieten Oberpfalz und Schwarzwald - Zusammenfassung der Ergebnisse der elektromagnetischen Voruntersuchungen"

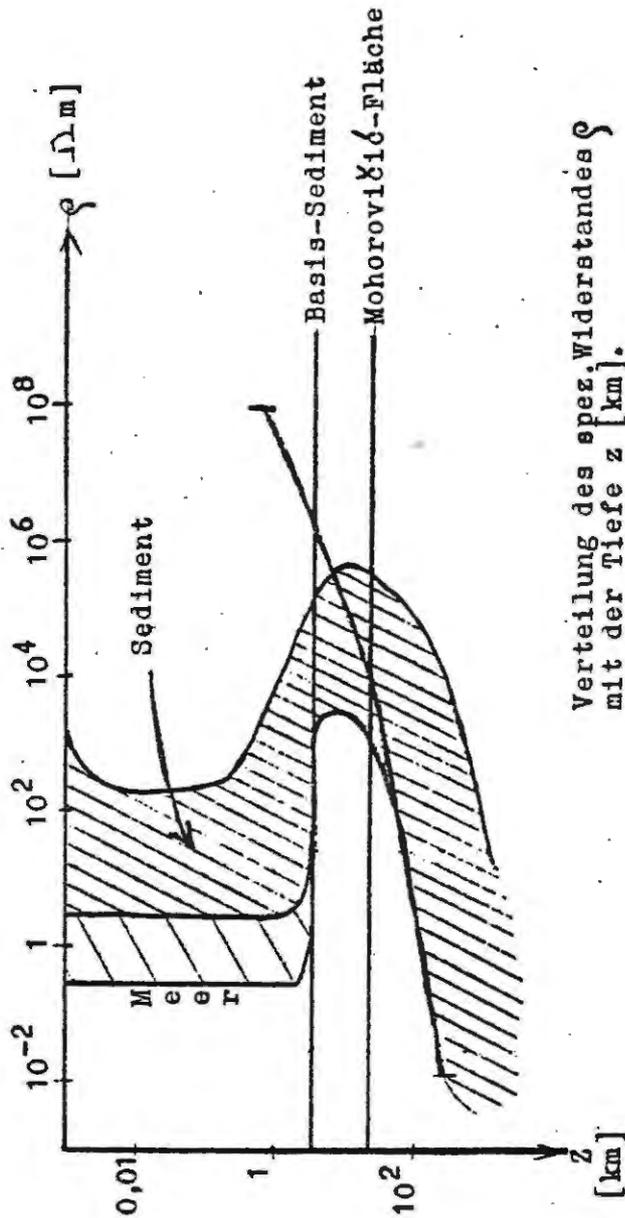
Unter diesem Titel wurde im 2. Kolloquium des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland, das vom 19. bis 21. September 1986 in Seeheim / Odenwald stattfand, auf Bitte des Veranstalters Prof. Emmermann ein Überblicksvortrag gehalten, dessen Abbildungen im folgenden wiedergegeben sind. Abgesehen vom Einleitungsteil beruhen die Darstellungen auf den Ergebnissen, die die verschiedenen Arbeitsgruppen, die in der Oberpfalz und im Schwarzwald gemessen hatten (vgl. Abb. 8), dem Vortragenden zur Verfügung stellten und erläuterten. Allen Beteiligten sei an dieser Stelle noch einmal sehr für ihre Hilfsbereitschaft und Zusammenarbeit während der Vorbereitung des Vortrags gedankt. Entsprechend dem Zweck des Vortrags konnten nur wenige Beispiele von Einzelergebnissen gezeigt werden. Die Auswahl erfolgte vor allem nach methodischen Gesichtspunkten.

Die Abbildungen sprechen im allgemeinen wohl für sich selbst. Soweit vielleicht nötig, haben die Herausgeber dieses Bandes kurze Erläuterungen hinzugefügt. Die einleitenden Abbildungen sollten den Wandel in unserer Vorstellung von der elektrischen Leitfähigkeit in der Erdkruste im Laufe der vergangenen 20 Jahre kurz beleuchten.

Die Darstellung der TDEM (LOTEM) - Ergebnisse für den Schwarzwald ist in folgender Beziehung fehlerhaft (was im Vortrag, jedoch nicht mehr in den Abbildungen korrigiert werden konnte): Die in Abb. 16 angegebenen 100 - 400 Ωm sind wohl als Mehrwerte der mittleren Horizontalleitfähigkeit für die Tiefen oberhalb des guten Leiters zu verstehen, jedoch wahrscheinlich nicht als typische " $\rho_{\text{Kristallin}}$ " - Werte für diesen Tiefenbereich, wie in Abb. 24 angegeben. Wahrscheinlich sind vielmehr auch hier - ähnlich wie in der Oberpfalz - ρ -Werte in der Größenordnung 1000 - 2000 Ωm vorherrschend (vgl. auch AAMT und AMT). Hierfür sprechen Messungen mit relativ kleinem Sender-

Empfänger-Abstand, d.h. geringerer Eindringtiefe (x-Symbole in Abb. 14). Die in Abb. 16 angegebenen 100 - 400 Ωm entsprechen den ρ_1 - Werten in Abb. 15, d.h. Messungen mit relativ großem Sender-Empfänger-Abstand, bei denen die oberen km nicht weiter aufgelöst werden konnten.

In Vortrag und späterer Diskussion wurde auch darauf hingewiesen, daß aus verschiedenen sachlichen Gründen (u.a. verschieden komplizierter Untergrund) die angegebenen Resultate für größere Tiefe für den Schwarzwald gesicherter sind als für die Oberpfalz.



Verteilung des spez. Widerstandes ρ mit der Tiefe z [km].

dick eingezeichnet: Kleinster, möglicher spez. Widerstand der nicht-elektrolytischen Leitung.

Fig. 1: Bis in die 80er Jahre hielt sich die Vorstellung, daß die Krustengesteine einen hohen spezifischen Widerstand haben. Hier eine bereits von ANGENHEISTER (1962) in einem der ersten Protokollbände angegebene Tiefenverteilung des elektrischen spezifischen Widerstandes für Kruste und Mantel, die lange Zeit für repräsentativ gehalten wurde.

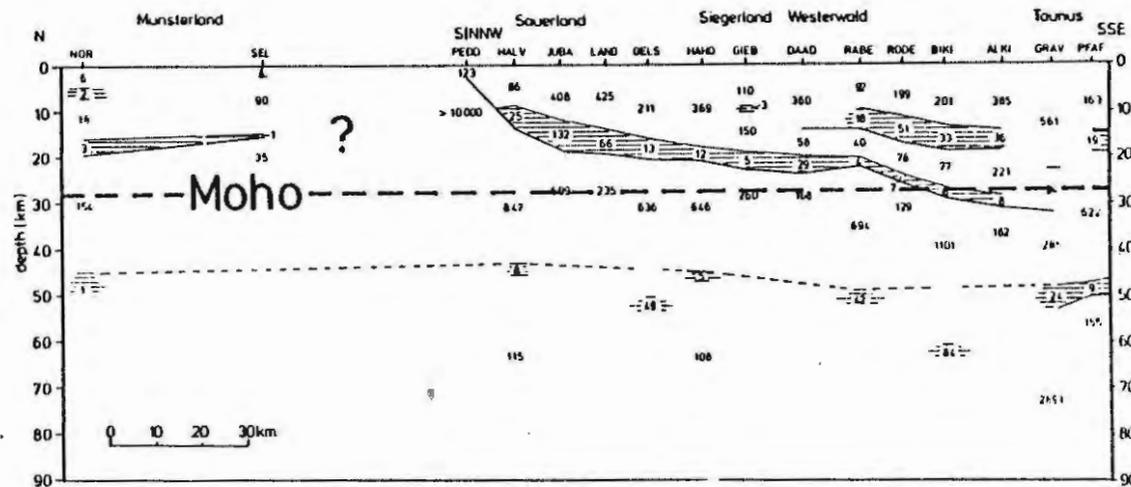
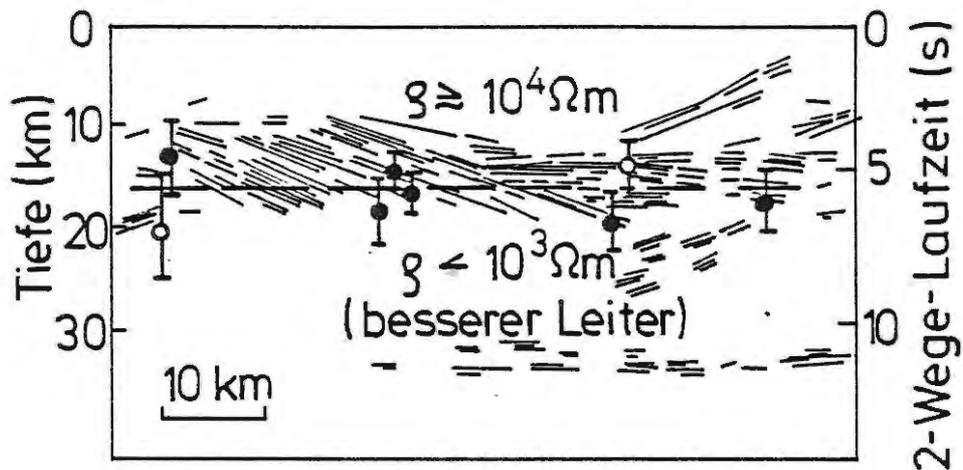
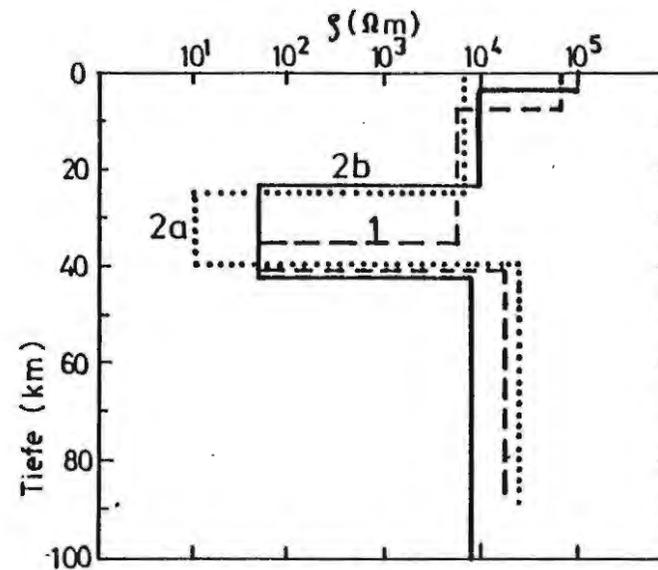
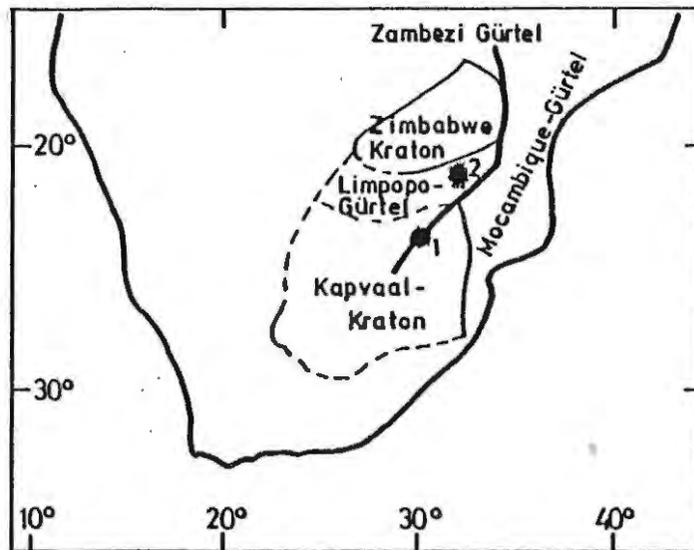


Fig. 2: Diese von JÖDICKE et al. (1983) entdeckten elektrisch gut leitende Schichten unter dem Rheinischen Schiefergebirge (100 - 500 S) zeigen exemplarisch, daß die kontinentale Kruste auch in der elektrischen Leitfähigkeit interessante Strukturen besitzt.



○ Magnetotellurik, ● Induktionsverfahren
mit künstlicher Quelle (Stromschleife)

Fig. 3: Ergebnisse von COCORP und elektromagnetischen Untersuchungen in den südlichen Appalachen (Georgia, Piedmont). ○ Magnetotellurik, ● Induktionsverfahren mit künstlicher Quelle (Stromschleife), THOMPSON et al. 1983. Auch dieses Ergebnis der Korrelation von Zonen hoher seismischer Reflektivität und hoher elektrischer Leitfähigkeit ist exemplarisch für andere Gebiete der kontinentalen Kruste.



1	Van Zijl (1977)	} Maximale Elektrodenauslage	450 km
2a	" " "		1200 km
2b	Blohm et al. (1977)		

Fig. 4: Bereits VAN ZIJL (1, 2a, 1977) und BLOHM et al. (2b, 1977) haben Zonen hoher elektrischer Leitfähigkeit in der kontinentalen Kruste, hier in Südafrika mithilfe der geoelektrischen Tiefensondierung, entdeckt.

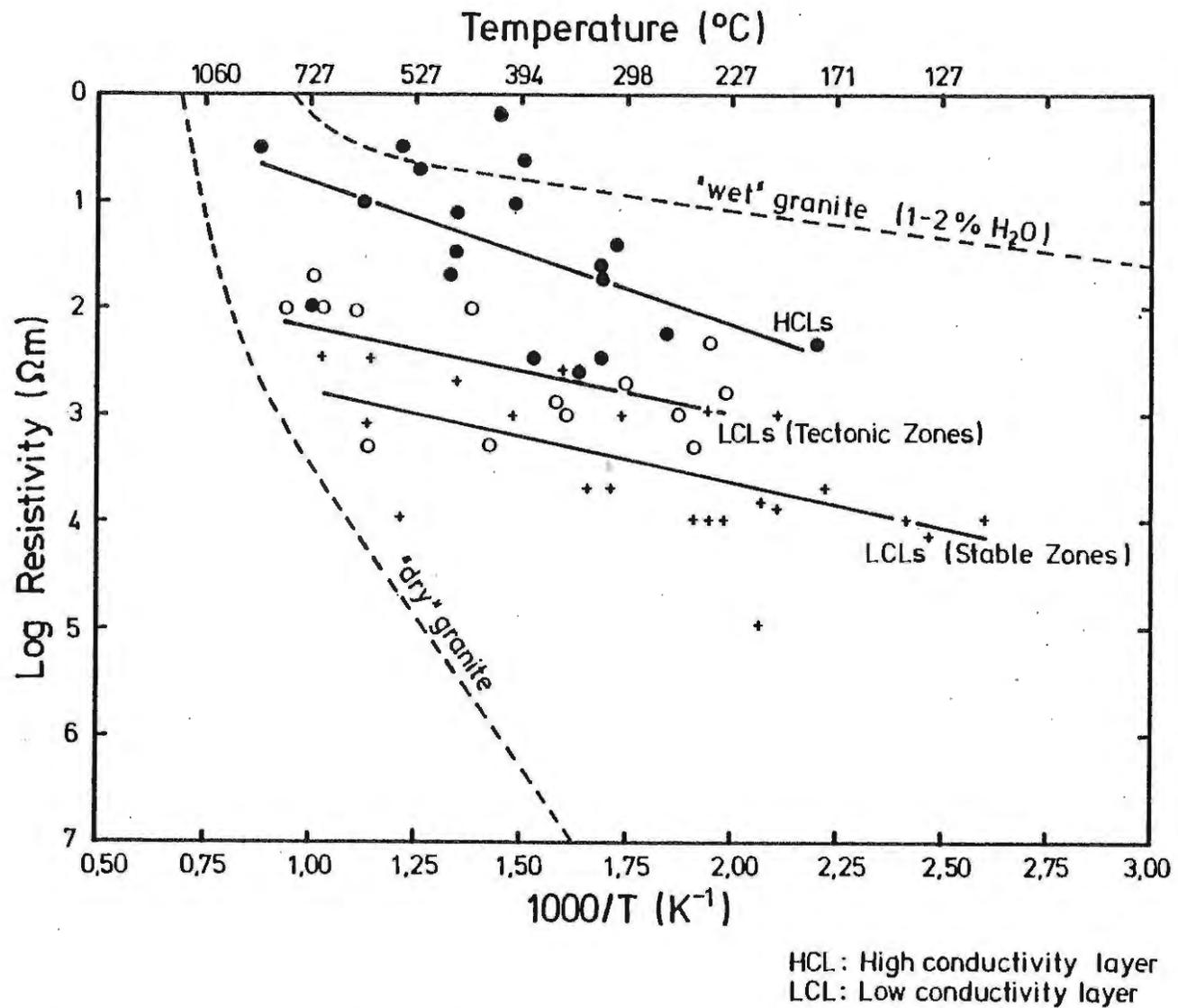
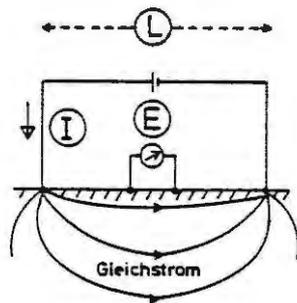


Fig. 5: SHANKLAND & ANDER (1983) haben mit dieser Untersuchung darauf hingewiesen, daß Fluide (salinare Flüssigkeiten) die Ursache der hohen elektrischen Leitfähigkeit in der kontinentalen Kruste sein könnten.

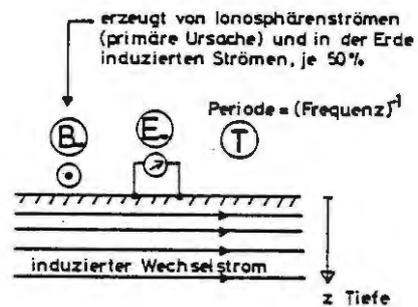
Goelektrische Tiefensondierung

Magnetotellurik



$$\rho_s = \pi \frac{L^2}{4} \frac{E}{I}$$

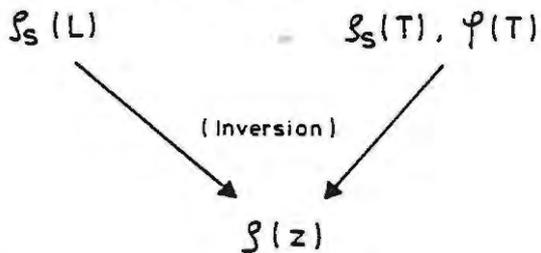
ρ_s "scheinbarer spez. Widerstand"



$$\rho_s = \frac{\mu_0 T}{2\pi} \left| \frac{E_w}{B_w} \right|^2$$

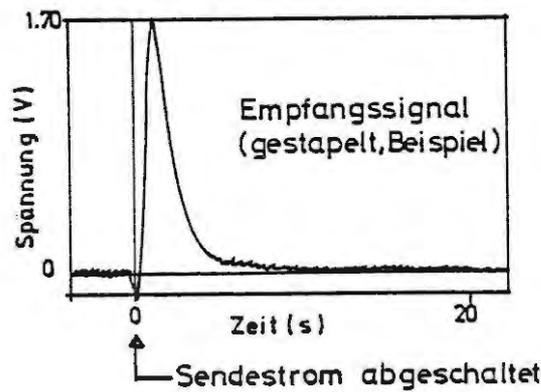
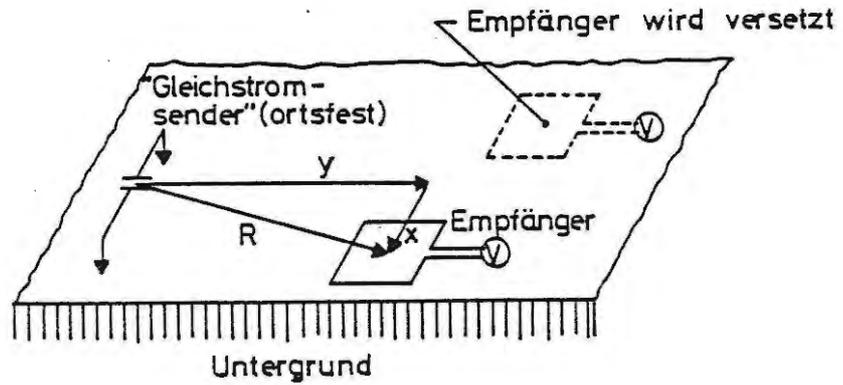
φ = Phase (E_w/B_w)

Sondierungskurven:



Spez. Widerstand = (Leitfähigkeit)⁻¹ als Funktion der Tiefe

Fig. 6: Erläuterung der verwendeten goelektrischen Methoden.



Transient-elektromagnetische Tiefensondierung (Time domain electromagnetics = TDEM)

Fig. 7: Erläuterung der verwendeten Transientenmethode. Insbesondere wurde die LOTEM-Methode verwendet, Long Offset Transient Electromagnetic = Großer Abstand zwischen Sender und Empfänger.

KTB - Voruntersuchungen der elektrischen Leitfähigkeit

Meßgruppen	Oberpfalz	Schwarzwald
Aachen, Tech. Hochschule (Wohlenberg)	GTS	GTS
Berlin, Freie Universität (Haak)	GTS,AMT,MMT,MT,ETS	
" , Techn. Univ. (Brasse, Leonhardt)	AMT	
Braunschweig, Techn. Univ. (Drews, Maurer)	AAMT	AAMT
" , GEOMETRA (Bahr)	MMT,MT	
Göttingen, Univ. (Tezkan, Schmucker)		MT, ETS
Köln, Universität (Strack)	TDEM	TDEM
München, Universität (BerktoId)	AMT,MMT	AMT, MMT, MT, ETS
Neuchâtel, Observatoire Cantonal (Fischer)	AMT	AMT

Methoden*

GTS	Geoelektrische Tiefensondierung	TDEM	Transient-elektromagn. Tiefensondierung
AMT	Audio-Magnetotellurik	MMT	Mittelfrequente Magnetotellurik
AAMT	Aktive Audio-Magnetotellurik	MT	Magnetotellurik (nieder-frequent)
		ETS	Erdmagnetische Tiefensondierung

*grob nach wachsender Eindringtiefe geordnet

Fig. 8: Aufstellung der beteiligten Gruppen und der verwendeten Methoden in den beiden Untersuchungsgebieten. Die in Klammern stehenden Namen sind stellvertretend für eine große Anzahl von Mitarbeitern genannt worden:

Aachen, RWTH: G. Voigt, C. Wendel, J. Wohlenberg; Berlin, FU: Th. Blümecke, V. Haak, M. Martinez, U. Seidel, V. Rath, P. Rüdinger; Berlin, TU: H. Brasse, F. Leonhardt; Braunschweig, TU: Ch. Drews, H.-M. Maurer; Braunschweig, GEOMETRA: K. Bahr, U. Czarkowski, U. Jensen; Göttingen, U: B. Tezkan, U. Schmucker; Köln, U: H.N.Eilenz, T. Hanstein, C.H.Kalle, K.-M.Strack; München, U: A. BerktoId, H. Dittus, U. Teufel; Neuchatel, Observatoire Cantonal: Gaston Fischer, P.-A. Schnegg.

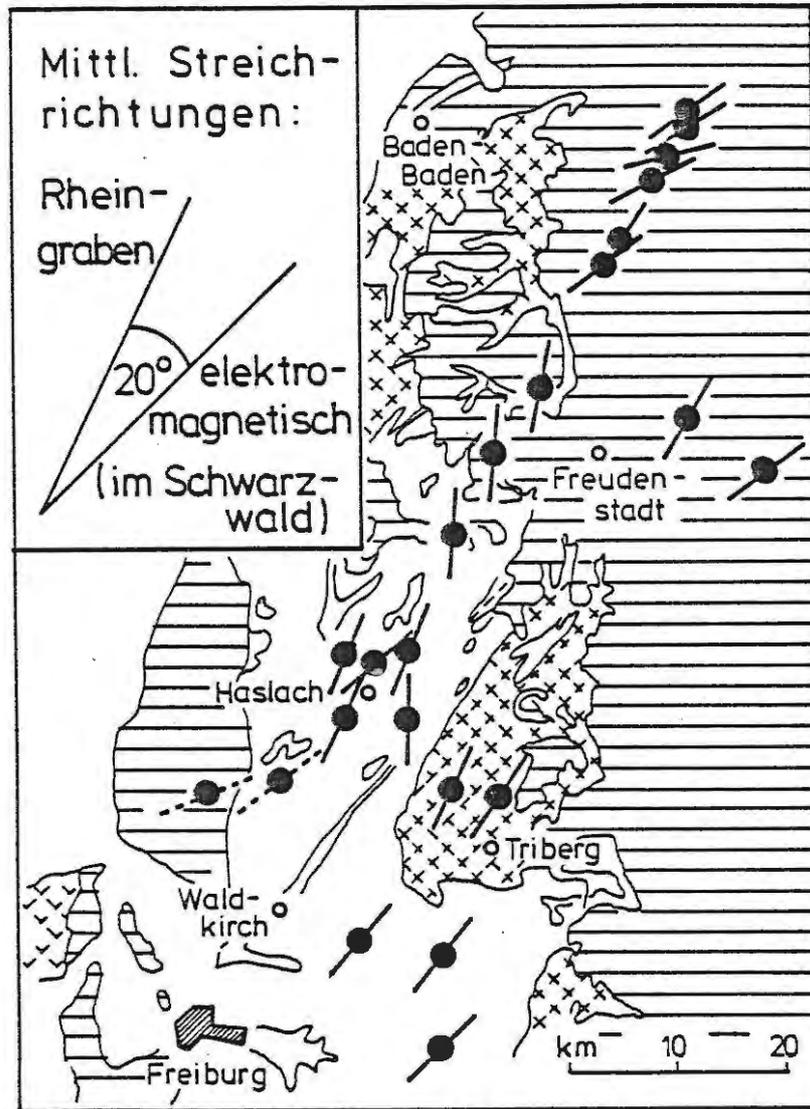


Fig. 9: MT-Stationen Schwarzwald (Göttingen, München) mit lokalen magnetotellurischen Streichrichtungen (Hauptimpedanzen). TEZKAN, 1986; TEUFEL et al., 1986).

$\varphi > 45^\circ$:
Anzeichen eines
guten Leiters
in der Tiefe,
 $\Sigma \approx 600 \text{ S}$

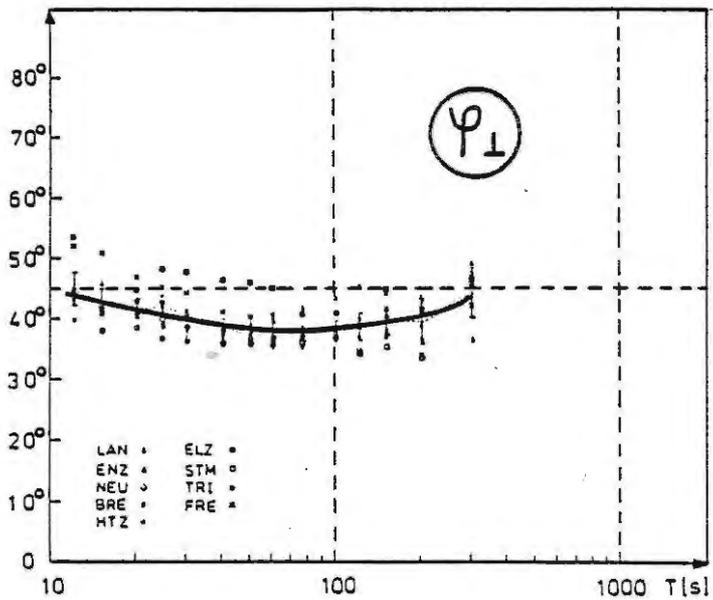
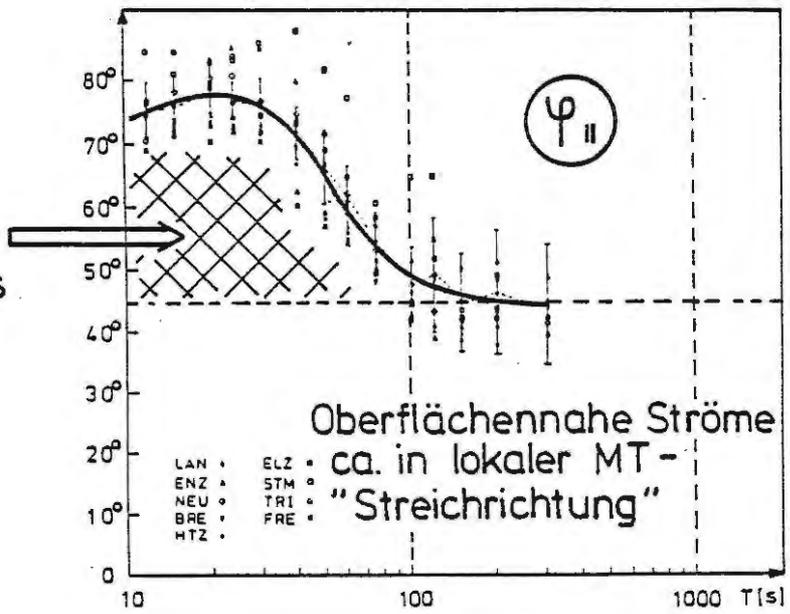
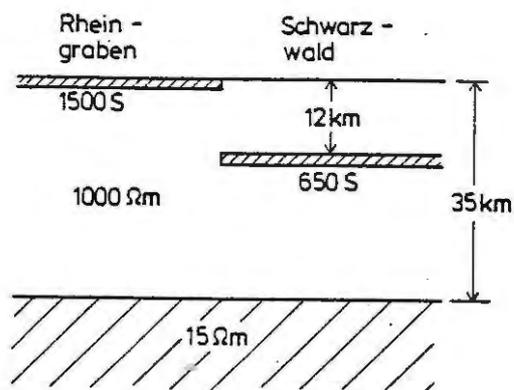


Fig. 10: MT-Phasenkurven für alle Göttinger Schwarzwaldstationen jeweils im lokal an der MT-Streichrichtung orientierten Koordinatensystem (TEZKAN, 1986).



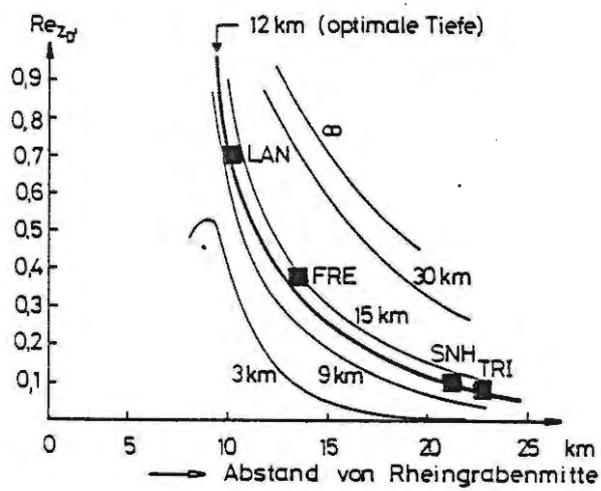
Optimales 2-D-Modell der elektrischen Leitfähigkeit unter dem Schwarzwald nach Tezkan und Schmucker.

Das Modell erklärt φ_+ , φ_- und z_T ($T = 10^1 - 10^3 \text{ s}$).

Unerklärt: - Große Werte von $\rho_{\pm} / \rho_{\parallel}$ im Schwarzwald (Anisotropie)
- Abweichungen der lokalen MT-"Streichrichtungen" von der Rheingrabenrichtung

(nach Diss. Tezkan)

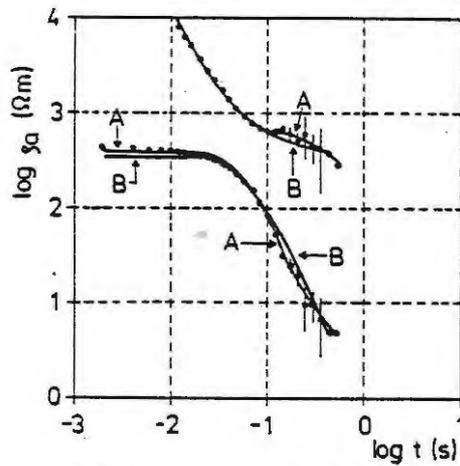
Fig. 11: Modell der elektrischen Leitfähigkeit für Rheingraben und Schwarzwald (nach TEZKAN 1986).



Normierte Vertikalkomponente erdmagnetischer Variationen im Schwarzwald ($T=20s$) und Modellkurven für verschiedene Tiefen zum guten Leiter; ansonsten optimales 2D-Modell (nach Diss. Tezkan)

Fig. 12

TDEM (LOTEM) Schwarzwald
 Meßdaten mit Modellanpassung
 Meßstation 43



Modell A
 (bestangepaßt)

Modell B
 (Halbraum ohne guten Leiter)

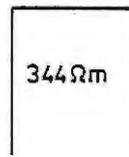
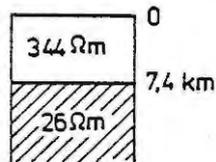
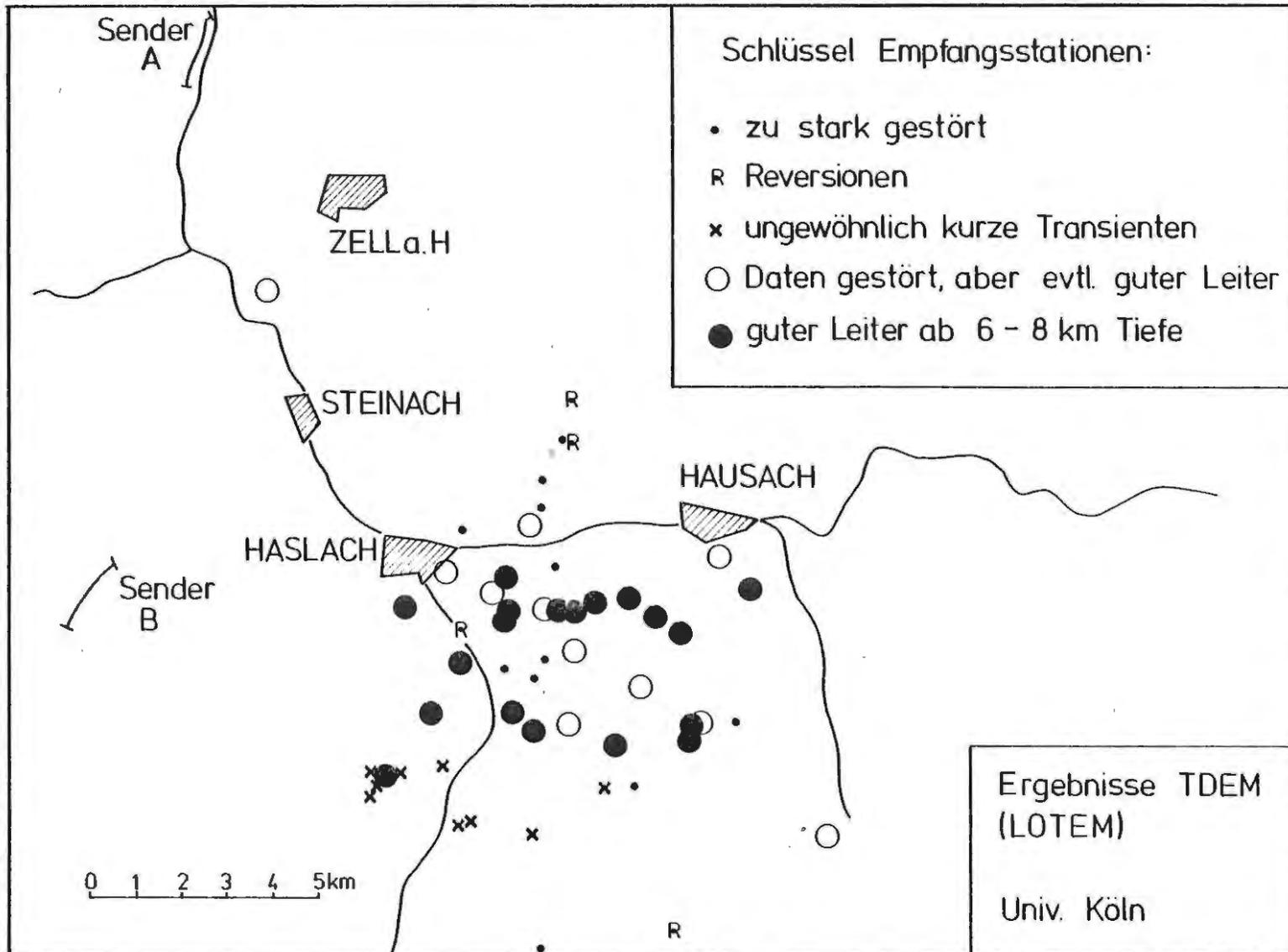
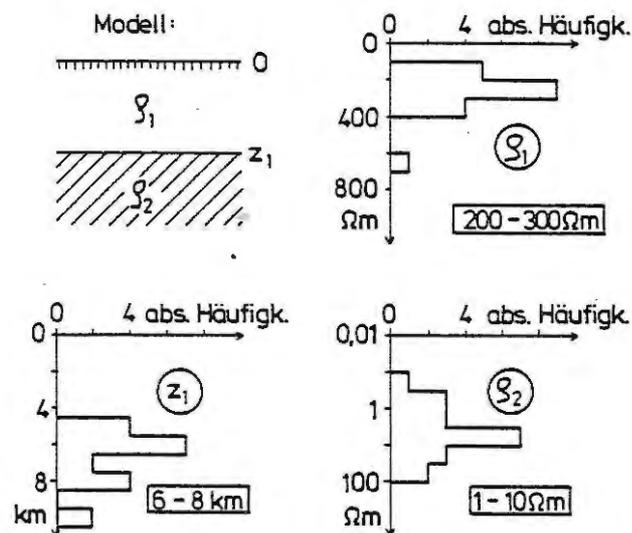


Fig. 13: Meßergebnis der LOTEM-Gruppe (1986), dargestellt als Early-(=unten) und Late-(=oben)-Time Kurven für eine Schwarzwaldstation und Demonstration für den Unterschied zwischen einem Modell mit einem gutem Leiter in 7.4km Tiefe und einem Modell mit homogener Leitfähigkeit.

Fig. 14



Zielgebiet Schwarzwald
TDEM - Interpretationsergebnisse für die
Messpunkte vom Typ "●"



Minimale Mächtigkeit des guten
Leiters einige 100m,
⇒ Leitwert $\Sigma \approx 100 S$

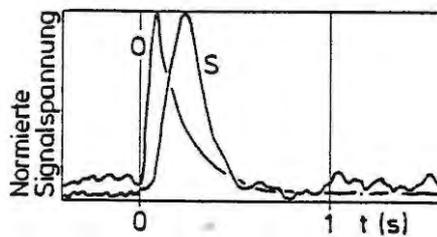
Fig. 15: Statistische Betrachtung für den jeweils wahrscheinlichsten Wert der drei Parameter des 2-Schichtenmodells, das mit dem LOTEM-Verfahren bestimmt wurde.

Zielgebiet Schwarzwald
 -Elektrische Leitfähigkeit -

Tiefe	GTS	AAMT	AMT	TDEM	MT, ETS
km	400 - 9000 Ωm (Zonen \approx 400 Ωm)				
0.5		200 bis 500 Ωm	ca. 200 bis		
1.0		größer als 1000 Ωm	2000 Ωm dabei wahr- scheinlich mit Tiefe wachsend	100 bis 400 Ωm	
4					(1000 Ωm)
8				1 - 10 Ωm ($\Sigma \approx$ 50S)	
12					500 - 700 S
Anisotropie		Bis 30 % ca. variszisch orientiert	Bei $10^{-1} - 10^{-2}$ s gering, mit Periode dann zunehmend		Bei $10^1 - 10^2$ s ca. Faktor 10, ca. variszisch orientiert
Besonderheiten			Daten stark gestört, für 10^{-1} bis 10^{-1} s unbrauchbar		Daten im ganzen Schwarzwald einheitlich

Fig. 16: Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse für das Zielgebiet Schwarzwald

Typische TDEM (LOTEM)- Signale



S Schwarzwald, Station SA 27, $r = 14,4$ km

O Oberpfalz, Station OA 12, $r = 15,2$ km

Fig. 17: Demonstration für den charakteristischen Unterschied zwischen den Transienten in der Oberpfalz und im Schwarzwald: In der Oberpfalz sind die Transienten signifikant kürzer als im Schwarzwald. Dieser Unterschied weist auf den hohen Widerstand der Gesteine der Oberpfalz in den obereren 10 km hin im Vergleich zu den Gesteinen des Schwarzwalds im gleichen Tiefenbereich.

TDEM (LOTEM) Oberpfalz, Station 15
 Meßdaten und Modellanpassung

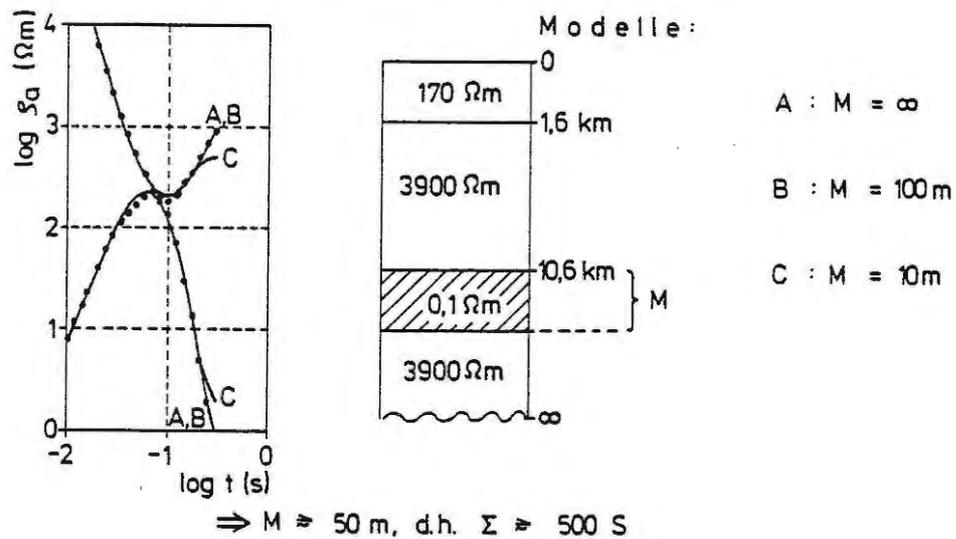


Fig. 18: Early (unten) und Late (oben)-Time Meßkurven für eine Station in der Oberpfalz. Im Gegensatz zu den LO-TEM-Kurven vom Schwarzwald (siehe Fig.13) sind diese Kurven noch mit der Impulsantwort des Meßsystems gefaltet. Die Dekonvolution konnte hier aufgrund numerischer Schwierigkeiten, bedingt durch die extrem kurzen Transienten, nicht durchgeführt werden. Für den Vergleich von Meß- und Modell-Kurven wurden auch die gerechneten Modellkurven mit der (bekannt)en Impulsantwort des Meßsystems gefaltet. Es wird mit drei Modellvarianten demonstriert, welchen Spielraum die Meßdaten der extrem gutleitenden Schicht in etwa 10 km Tiefe lassen.

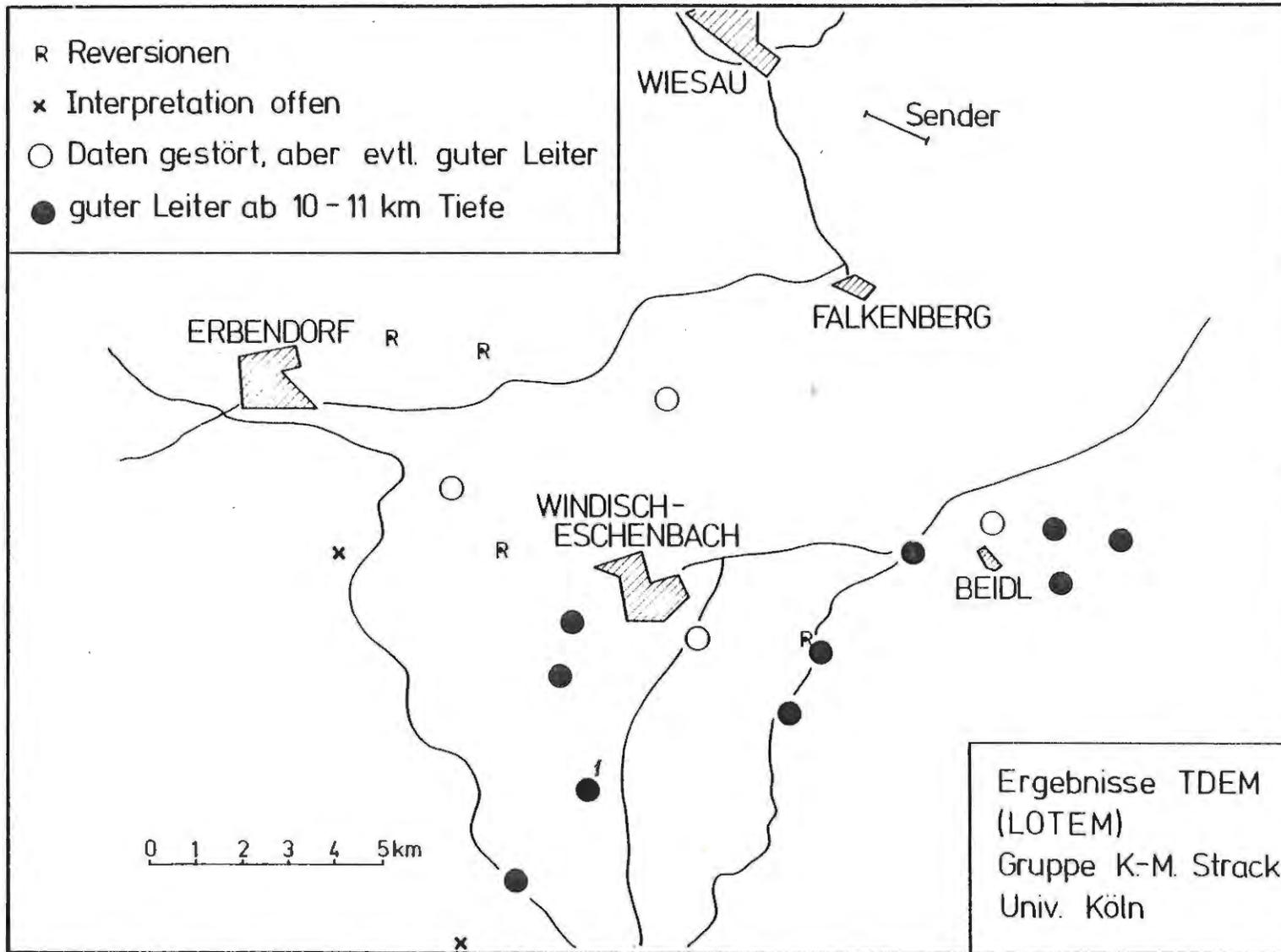
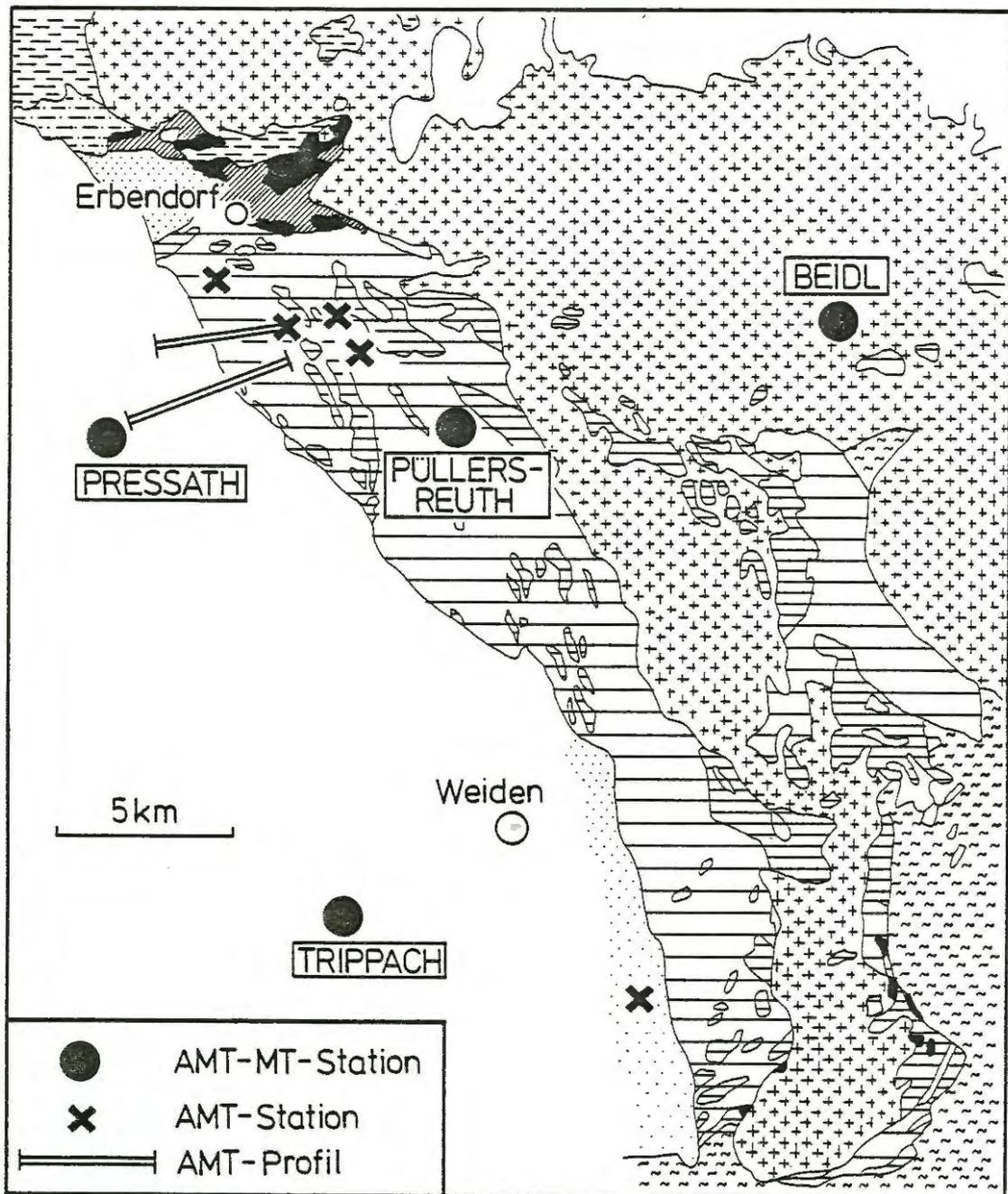
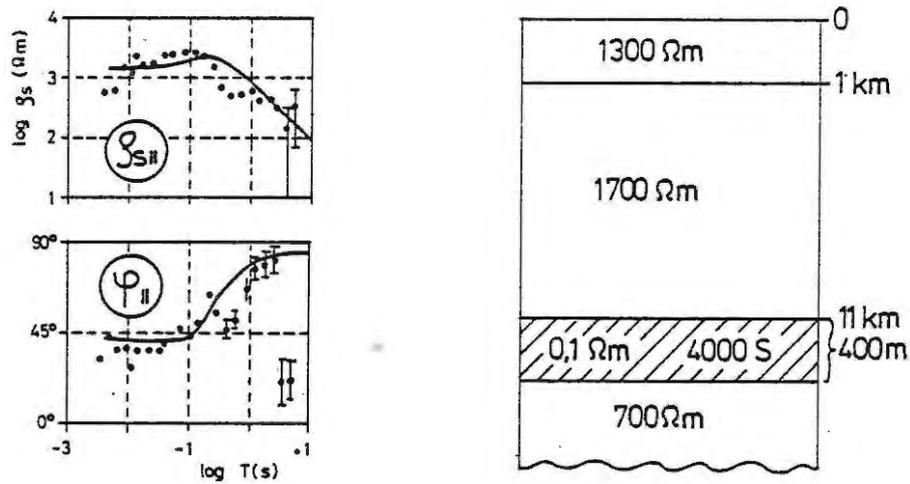


Fig. 19



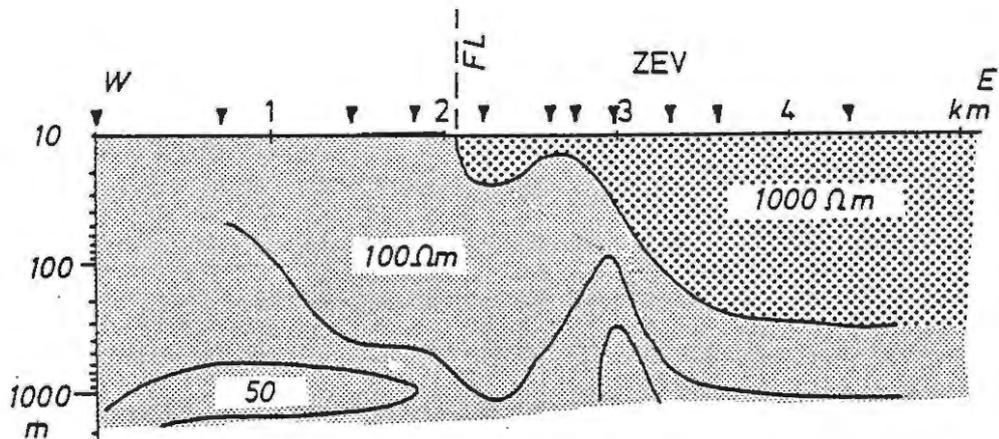
Magnetotellurik - Meßstationen im Zielgebiet Oberpfalz

Fig. 20: Da das engere Zielgebiet erst Ende Mai 86 bestimmt wurde, konnten nur wenige Stationen der weiträumig im Moldanubikum und Saxothuringikum angelegten MT-Messungen für die Erstellung eines Leitfähigkeitsmodelles im Zielgebiet benutzt werden. Der Bohrpunkt wird wenige km NW von Püllersreuth liegen.



Station BEIDL

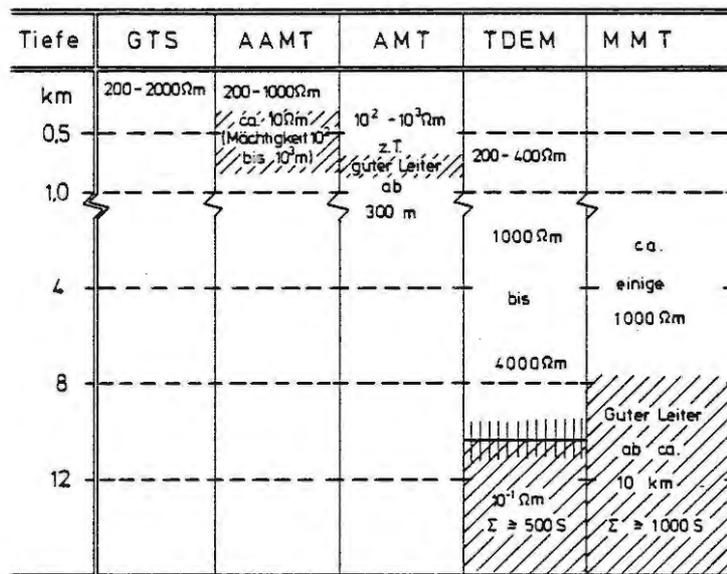
Fig. 21: Demonstration für die Verträglichkeit der MT-Daten, registriert von GEOMETRA (1986), mit dem LOTEM-Modell: Mit einer Inversionsmethode, entwickelt von M. MARTINEZ (1986), wurde als a-priori Information ein extrem guter Leiter vorgegeben: Spez. Widerstand 0.05 bis 0.15 Ohm-m, Tiefe der Oberkante zwischen 9.5 und 10.5 km. Alle anderen Parameter waren frei. Trotz der streuenden Daten ist eine Übereinstimmung von MT-Daten und LOTEM Modell zu erkennen.



Ergebnisse eines AMT-Profiles, das die Fränkische Linie 3,5 km südlich von Erbdorf kreuzt. Spezifische Pseudowiderstände ρ^* als Funktion der Pseudotiefe z^*

Fig. 22: Dieses noch sehr rezente Ergebnis, inzwischen nach Osten verlängert, zeigt deutlich die Existenz von gutleitendem Material unter den hochohmigen Gneisen der Zone von Erbdorf-Vohenstrauß (ZEV). Es ist unklar, welches Material diesen geringen spezifischen elektrischen Widerstand hat. Es wird vermutet, daß dieses Ergebnis nur auf den nördlichen Teil der ZEV zutrifft, in dem allerdings der Bohrpunkt liegen wird. Die Tiefenerstreckung dieses gutleitenden Materials ist gegenwärtig noch unbekannt. (LEONHARDT und BRASSE, 1986).

Zielgebiet Oberpfalz
-Elektrische Leitfähigkeit-



MT/ETS: Die Meßergebnisse für Perioden ≥ 10s sind von 2D- und 3D-Anomalien der elektrischen Leitfähigkeit stark beeinflusst, so daß eine Interpretation schwierig ist.

Fig. 23

Hauptergebnisse der KTB - Voruntersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit

Oberpfalz	Schwarzwald
<ul style="list-style-type: none">• $\rho_{\text{Kristallin}} \approx 1000 - 4000 \Omega\text{m}$ (ab 1-2 km Tiefe)• Guter Leiter ab 10 - 11 km $10^{-1} \Omega\text{m}$, $\geq 1000 \text{ S}$ (TDEM, MMT)• Oberflächennaher guter Leiter ab ca. 300 m, $10^2 - 10^3 \text{ m}$ mächtig ca. $10 \Omega\text{m}$ beschränkt auf nördliche ZEV	<ul style="list-style-type: none">• $\rho_{\text{Kristallin}} \approx 100 - 400 \Omega\text{m}$• TDEM: Guter Leiter ab 6-8 km $1 - 10 \Omega\text{m}$, $\geq 50 \text{ S}$• MT/ETS: Guter Leiter ab ca. 12 km 600 - 700 S unter ges. Schwarzwald• Anisotropie der AMT-MT-Ergebnisse ca. variszisch streichend gering bis zu Eindringtiefen $\sim 1 \text{ km}$ maximal (≈ 10) für Perioden 10-100 s

Fig. 24

- Angenheister, G.: Prot. Erdmagnet. Tiefensondierung, Kassel, 1962
- Blohm, E.-K., Worzyk, P., & Scriba, H.: Geoelectrical Deep Sounding in Southern Africa using the Cabora Bassa power line. J. Geophys., 43, 665-679, 1977
- Jödicke, H., J. Untiedt, W. Olgemann, L. Schulte, V. Wagenitz: Electrical conductivity structure of the Crust and Upper Mantle beneath the Rhenish Shield.- In Plateau Uplift, ed. by K. Fuchs et al., 288-302, 1983
- Leonhardt, F. und H. Brasse: Vorläufige Meßergebnisse, pers. Mitt., 1986
- LOTEM-Gruppe: Posterprogramm, 2.KTB-Kolloquium Seeheim, 1986
- Martinez, M: Eindimensionale Inversionsverfahren mit gezielter Zufallssuche (Monte Carlo). FU Berlin, pers. Mitt. 1986.
- Shankland, T.J, Ander, M.E. (1983): Electrical conductivity, temperatures and fluids in the lower crust. J. Geophys. Res., 88, 9475-9484
- Strack, K.-M.: Das Transient-Elektromagnetische Tiefensondierungsverfahren, angewandt auf die Kohlenwasserstoff- und Geothermie-Exploration.-Mitt. Inst. Geophysik und Meteorologie Univ. Köln, Heft 42, 1985.
- Teufel, U., H.-J. Dittus, A. Berktold: Koll. EM-Tiefenforschung, Lerbach, 1986
- Tezkan, B., Dissertation, Univ. Göttingen, 1986
- Thompson, B.G., Nekut, A. & Kuckes A.F.: Deep crustal electro magnetic sounding in the Georgian Piedmont. J. Geophys. Res., 1983
- Van Zijl, J.S.V.: Electrical studies in the deep crust in various tectonic provinces in southern Africa. In A.G.U. Monogr., 20, Heacock, J.G., ed., 470 - 500, 1977