

LOTEM-Messungen an der KTB-Lokation

LOTEM-Arbeitsgruppe:

P. Wolfgram

P. Bürger

H. Eilenz

T. Hanstein

A. Kötz

H. Petry

A. Stephan

K.-M. Strack



LOTEM-MESSUNGEN AN DER KTB-LOKATION LOTEM-ARBEITSGRUPPE, KÖLN

1. ZUSAMMENFASSUNG

Im April 1986, sowie im April 1987 wurden je eine LOTEM-Messkampagne in der Oberpfalz im Gebiet um Windisch-Eschenbach durchgeführt. Durch die erste Messkampagne sollte festgestellt werden, ob der in 10 km Tiefe vermutete elektrische Leiter mit der LOTEM-Methode aufgelöst werden kann. Das Vorhandensein dieses guten Leiters konnte qualitativ bestätigt werden, es war jedoch aufgrund der komplexen geologischen Verhältnisse nicht möglich, die Daten im Sinne eines Strukturmodells zu interpretieren. Während der zweiten Messkampagne wurden daraufhin zusätzlich elektrische Felder gemessen, es wurden ausführliche walk-away-tests durchgeführt, und es wurde auf einem Kreis um einen zentralen, gekreuzten Dipolsender gemessen. Das Ziel dieser zweiten Messung war, einen Datensatz zu erhalten, an dem Auswerteverfahren für komplexe Strukturen getestet werden können.

Die Daten aus beiden Messkampagnen wurden der Standard-Datenverarbeitung unterzogen, jedoch wurden nur bei den Daten von 1986 Interpretationsversuche unternommen. Die Daten von 1987 sollen im Zuge unserer Entwicklungen auf dem Gebiete der Interpretationsverfahren weiter untersucht werden.

2. DIE LOTEM-METHODE

Die Long Offset Transient ElektroMagnetik (LOTEM)-Methode ist eine Untergruppe der Transientenelektromagnetik, bei der der Abstand zwischen Sender und Empfänger vergleichbar oder größer als die Sondierungstiefe ist.

Abbildung 1 zeigt die Messkonfiguration. Jedes Umschalten des elektrischen Stromes im geerdeten Sender induziert ein System von elektrischen Strömen im Untergrund, welches sich nach unten und zu den Seiten ausbreitet (Abbildung 2). An einer Reihe von Empfänger-Stationen werden dann die elektrischen und magnetischen Felder gemessen, deren Form Informationen über die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund enthält.

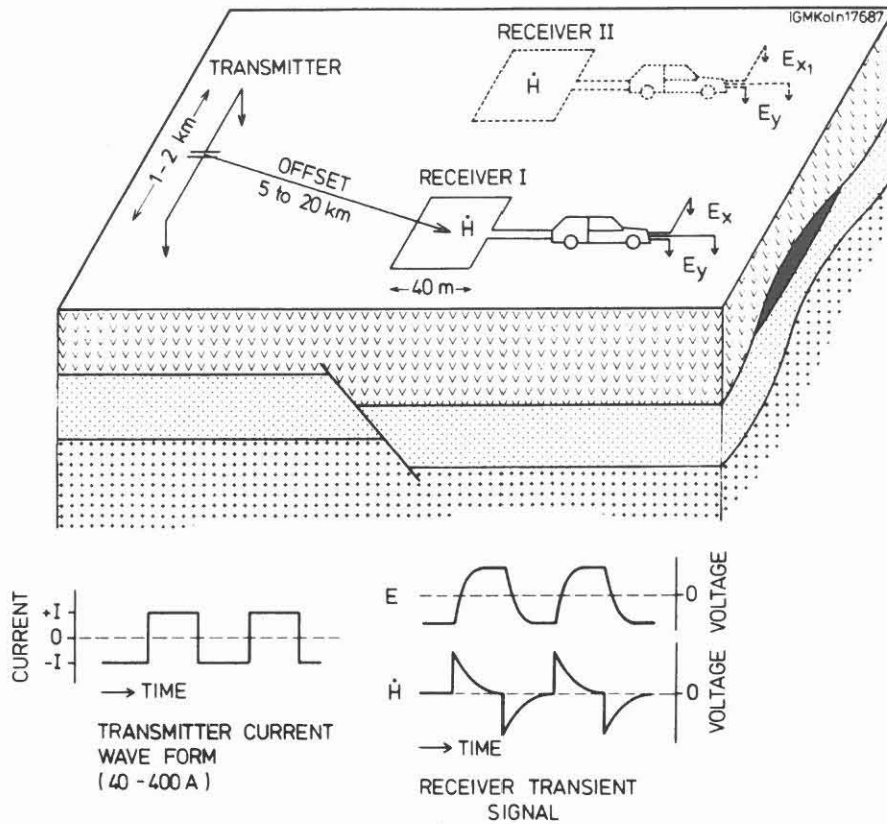


Abb. 1: Typische Feldkonfigurationen einer LOTEM-Messung. Der Sender bleibt fest, während der Empfänger von einer Station zur nächsten wandert. Die Entfernungen zwischen Sender und Empfänger sind typischerweise zwischen 5 und 20 km. Im unteren Teil der Abbildung sind die Signale am Sender und an den Empfängern zu sehen. Der abklingende Teil der Transienten enthält die Information über die elektrische Widerstandsstruktur. Deswegen werden diese Transienten während der Datenverarbeitung sehr genau auf ihr Signal-zu-Rausch Verhältnis hin untersucht.

Die digitalen Rohdaten werden mit speziell dafür entwickelten rekursiven Filtern gefiltert, dann selektiv gestapelt und schließlich nach optionaler weiterer Filterung in scheinbare spezifische Widerstände transformiert. Die Interpretation der so verarbeiteten Daten erfolgt durch ein iteratives Verfahren, bei dem aus einem vorgegebenen Erdmodell berechnete synthetische scheinbare Widerstandskurven mit den aus den Daten gewonnenen Kurven verglichen werden, und dann das zugrunde liegende Erdmodell so lange verändert wird, bis gemessene und berechnete Kurven übereinstimmen.

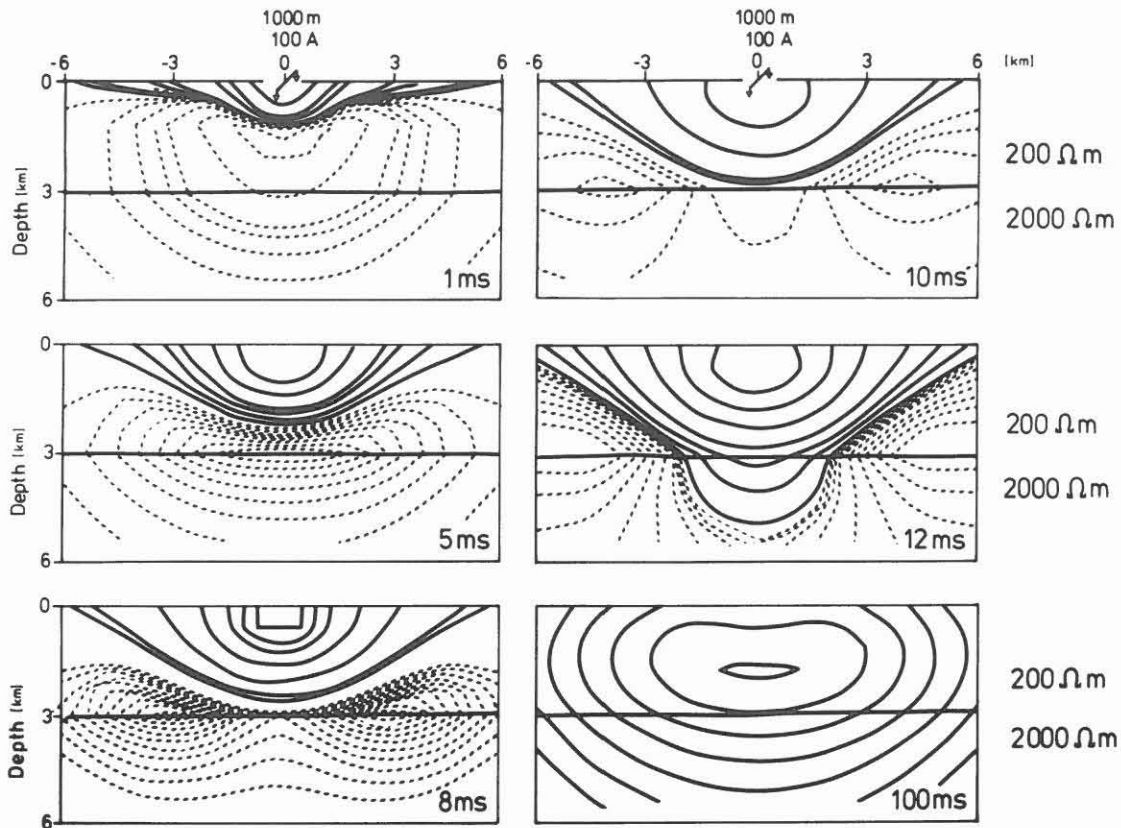


Abb. 2: System von "Rauchringen" in einer zweigeschichteten Erde mit Widerständen von $200 \Omega\text{m}$ und $2000 \Omega\text{m}$, welches sich nach dem Ausschalten des Stromes am Sender entwickelt. dargestellt sind Linien gleichen elektrischen Feldes. Die elektrischen Ströme fließen demnach bei den durchgezogenen Linien aus der Zeichenebene heraus und bei den gestrichelten Linien in die Zeichenebene hinein. Es ist bemerkenswert, wie sich bei fortschreitender Zeit die Rauchringe an der Grenzfläche entlang nach außen ausbreiten.

3. MESSKAMPAGNE UND ERGEBNISSE VON 1986

Im April 1986 wurden LOTEM-Messungen im Gebiet der Bohrlokation durchgeführt, um zu sehen, ob der in 10 km Tiefe vermutete gute Leiter mit der LOTEM-Methode aufgelöst werden kann. Vor der Messung durchgeführte Vorwärtsrechnungen zeigten, daß ein guter Leiter in 10 km Tiefe nicht aufgelöst werden kann, falls eine mäßig leitende Schicht in geringerer Tiefe existiert. Ein weiteres Risiko bestand darin, daß die LOTEM Feldapparatur speziell für die Kohlenwasserstoffexploration entwickelt wurde, wo geringere

spezifische Widerstände und längere Signale üblich sind. Es gab keine Erfahrungen mit LOTEM in kristallinen Gesteinen.

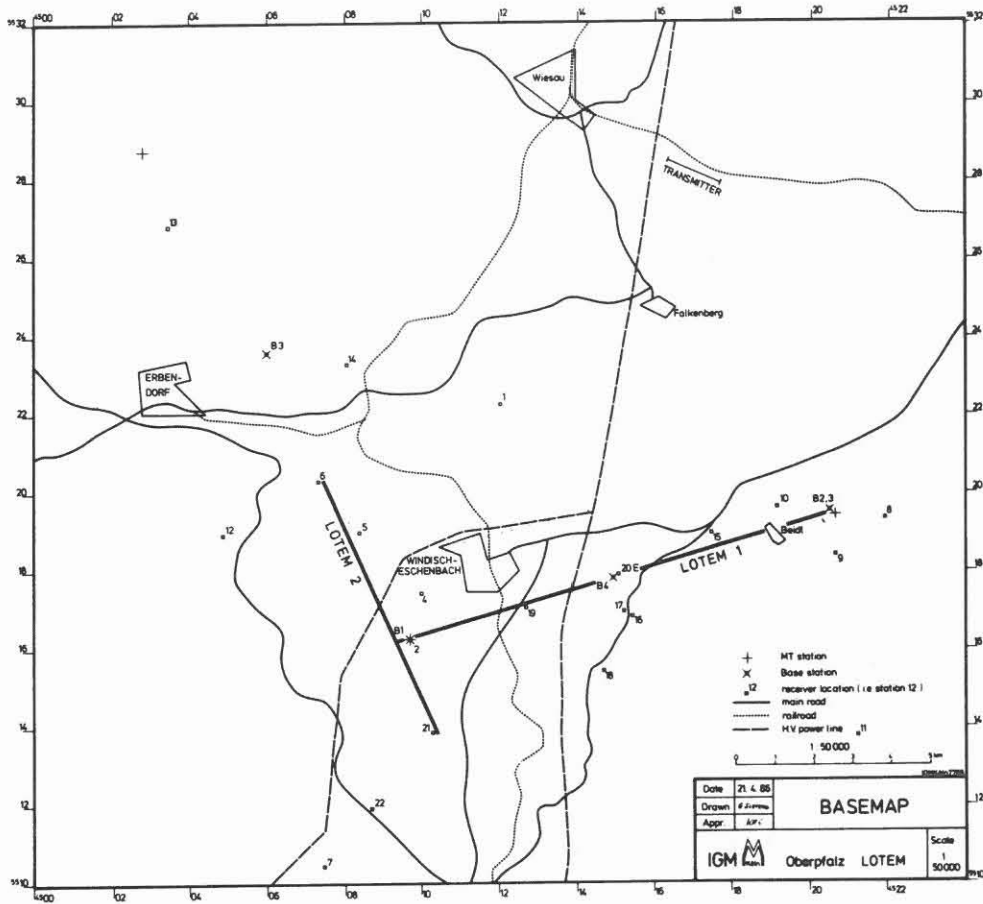


Abb. 3: Lokationskarte der Messkampagne von 1986.

Die Karte in Abbildung 3 zeigt die Lokationen des Senders sowie der 22 Empfängerstationen, die während drei Tagen gemessen wurden. Die Vorzeichenumkehr des Signals an einigen Stationen konnte nicht interpretiert werden, sie rührt aber vermutlich von geologischen Störungszonen bisher unbekanntes Charakters her. Die restlichen Stationen hatten gute bis sehr gute Datenqualität, wie in Abbildung 4 zu sehen ist.

OBERPFALZ STATION 12

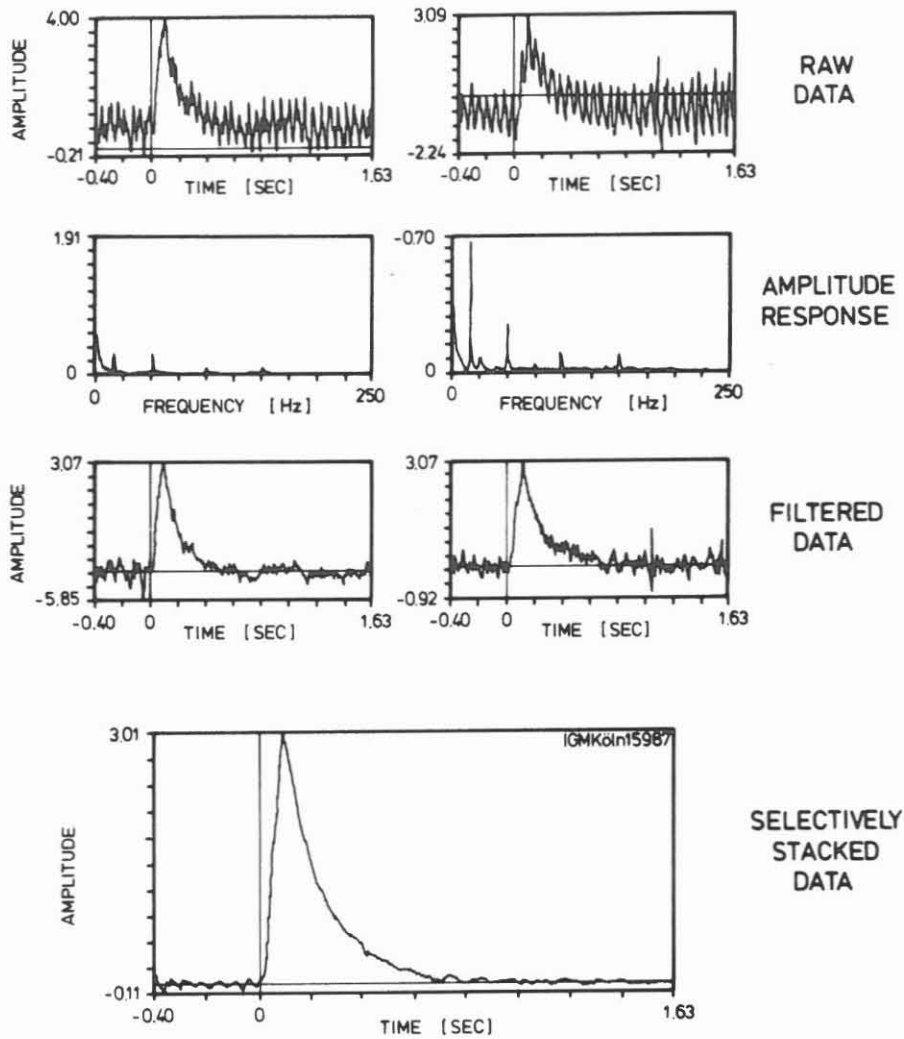


Abb. 4: Beispiele für Rohdaten und verarbeitete Transienten von der Messkampagne 1986.

Die beiden oberen Kurven zeigen typische Rohtransienten für das Oberpfalzgebiet. Die beiden Transienten wurden im Abstand von 16 Sekunden registriert. In den beiden Diagrammen darunter sind die entsprechenden Amplitudenspektren gezeigt, welche zur Identifikation der harmonischen Störungsfrequenzen standardmäßig berechnet werden. Die so identifizierten harmonischen Störungsfrequenzen werden dann im Zeitbereich mit amplitudentreuen digitalen rekursiven Filtern (Hanstein et al., 1986) herausgefiltert – das Ergebnis ist in den nächsten beiden Kurven zu sehen. Bei dieser

Messung wurden im allgemeinen 50 bis 100 dieser gefilterten Transienten selektiv gestapelt, um den im unteren Teil der Abbildung gezeigten Transienten zu erhalten. Dieser gestapelte Transient wird dann weiter mit einem zeitvariablen digitalen Hanning-Filter verarbeitet und schließlich für die Eingabe in die Inversionsprogramme auf logarithmische Koordinaten in Zeit und Amplitude transformiert.

Die Resultate der eindimensionalen Inversionen waren sehr instabil und stark abhängig vom gewählten Startmodell. Die von der Inversion berechneten Schichtmodelle variierten stark zwischen benachbarten Stationen, und es war notwendig, a priori Information einzubeziehen, um ein konsistentes Erdmodell für benachbarte Stationen zu erhalten. Diese Information bestand in der Forderung, daß Modelle zwischen zwei etwa einen Kilometer voneinander entfernten Empfängerstationen im Long Offset Bereich nicht stark variieren durften. Mit dieser Bedingung konnte nach mehreren tausend Inversionsläufen ein Modell konsistent über das gesamte Profil an die Daten angepasst werden.

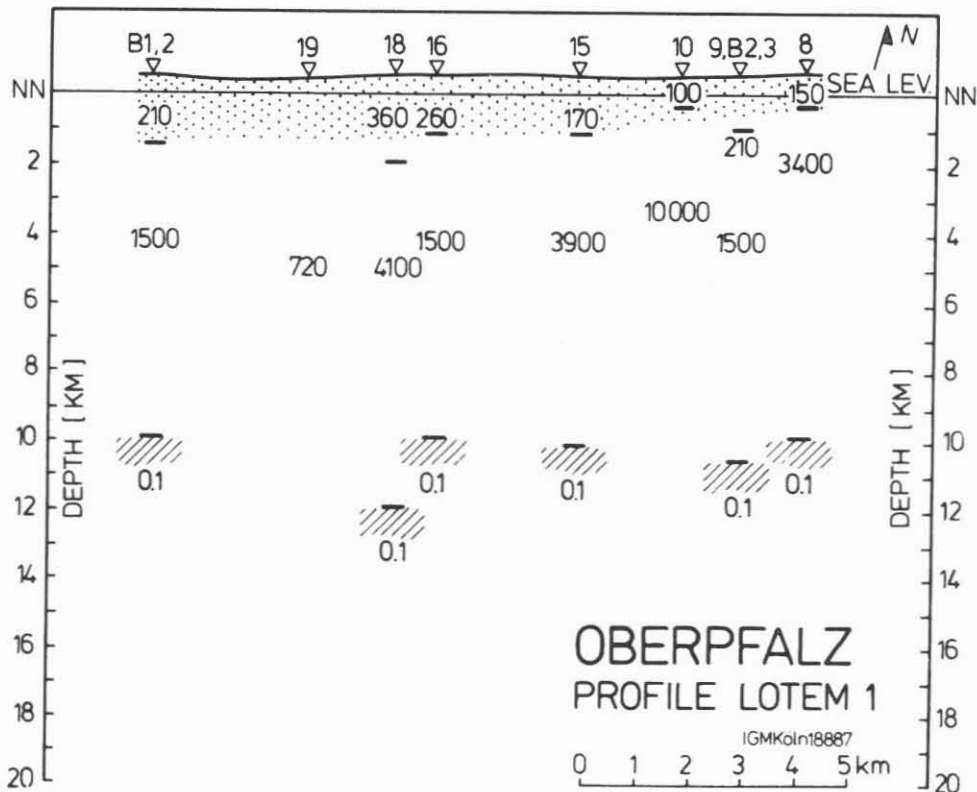


Abb. 5: Nach eindimensionalen Inversionen interpretiertes Profil der Messungen von 1986. Die Zahlen geben spezifische elektrische Widerstände in Ωm an.

Das so interpretierte Modell in Abbildung 5 zeigt einen guten Leiter in 10 bis 11 km Tiefe, obwohl die individuellen Inversionsergebnisse immer noch sehr instabil sind und die Gültigkeit der Interpretation weiterer Bestätigung bedarf. Dies kann durch Vergleich verschiedener Inversionsergebnisse mit synthetischen Kurven geschehen, wie in den Abbildungen 6 und 7 gezeigt wird.

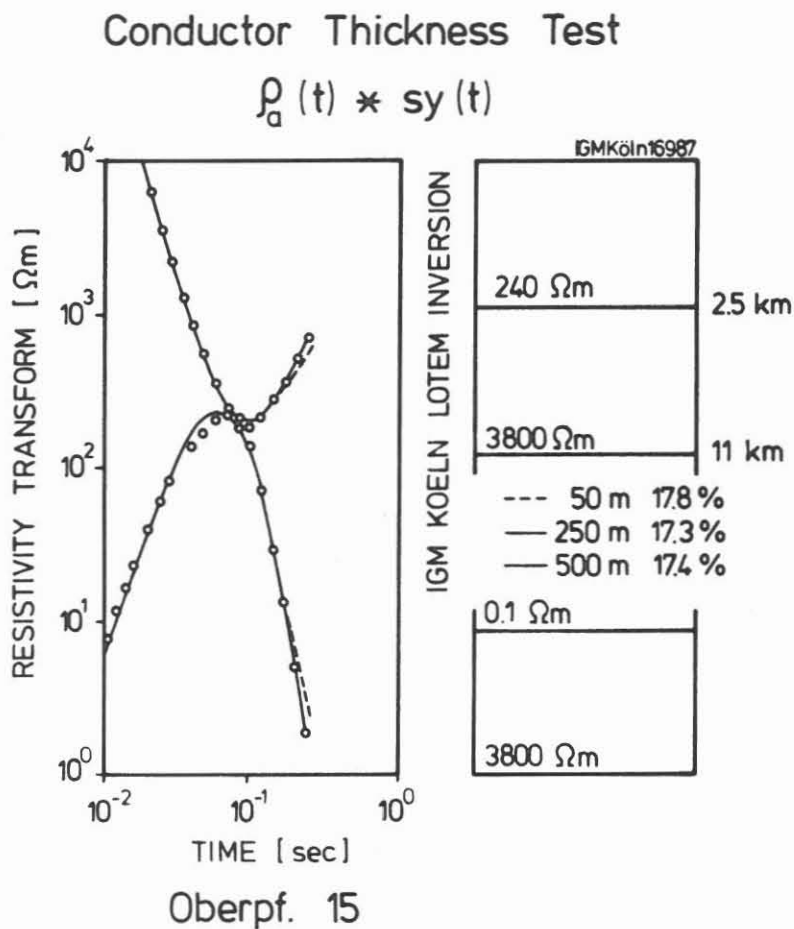


Abb. 6: Test auf minimale Dicke der letzten Schicht für die Station 15. Die oberen und unteren Kurven sind die "early" und "late time" Widerstands-Transformierten für die rechts angegebenen Modelle. Die Kreise stellen die gemessenen Felddaten dar.

Last Layer Resistivity Test

$$\rho_a(t) * sy(t)$$

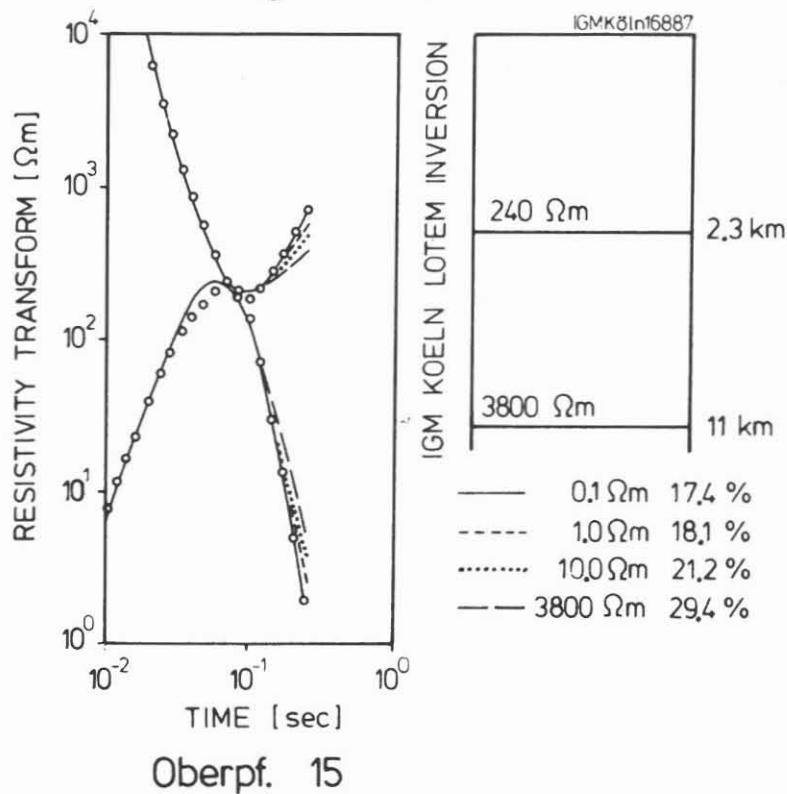


Abb. 7: Test auf spezifischen Widerstand der letzten Schicht für Station 15. Die oberen und unteren Kurven sind die "early" und "late time" Widerstands-Transformierten für die rechts angegebenen Modelle. Die Kreise stellen die gemessenen Felddaten dar.

In diesen Abbildungen sind die Daten als spezifische Widerstands-Transformierten dargestellt, welche noch die Systemfunktion der Analogelektronik und der Sender-Stromfunktion enthalten. Um diese mit den synthetischen Daten vergleichbar zu machen, werden die synthetischen Daten mit der Systemfunktion gefaltet (durchgezogene Linien). Diese Methode des Vergleichens ist genauer als der Vergleich von entfaltenen Felddaten mit ungefalteter synthetischer Kurve, da während der Entfaltung der Felddaten numerische Stabilitätsprobleme auftreten (Stoyer, 1984). In der Oberpfalz waren die Transienten sogar extrem kurz, so daß die Entfaltung (Dekonvolution) nicht möglich war ohne künstliche Oberflächenschichten aus den numerischen Instabilitäten zu generieren. Abbildung 6 zeigt einen Test auf Minimaldicke des 0.1 Ωm Leiters. Dieser Test wird durch Variation der Dicke des Leiters über einem schlecht leitenden Halbraum von 50 über 250 bis

500m erreicht. Es wird deutlich, daß die synthetischen Kurven für einen 250 bzw. 500 m dicken Leiter nicht sichtbar variieren, während ein nur 50 m dicker Leiter eine leicht unterschiedliche synthetische Kurve erzeugt. Unter der Annahme, daß es keine Äquivalentmodelle gibt, würde dies bedeuten, daß der Leiter mindestens 250 m dick ist, daß er aber dicker sein könnte.

In Abbildung 7 wird die Auflösung des spezifischen Widerstandes dieser Schicht untersucht, indem dieser von $0.1 \Omega\text{m}$ zu höheren Werten variiert wird. Die gestrichelten Linien zeigen die Abweichungen von den Felddaten mit größer werdenden Widerstandswerten. Wieder unter der Annahme, daß es keine Äquivalentmodelle gibt, würde dies auf einen spezifischen Widerstand von $0.1 \Omega\text{m}$ schliessen lassen. Ein unabhängiger Hinweis auf den spezifischen Widerstand von $0.1 \Omega\text{m}$ rührt daher, daß die magnetotellurischen Daten unter Zuhilfenahme der LOTEM-Interpretation besser angepasst werden können. Die Modellkurve der Magnetotellurik erzeugt nur für die sehr verrauschten Daten der E-Polarisation eine gute Anpassung (Haak, 1986).

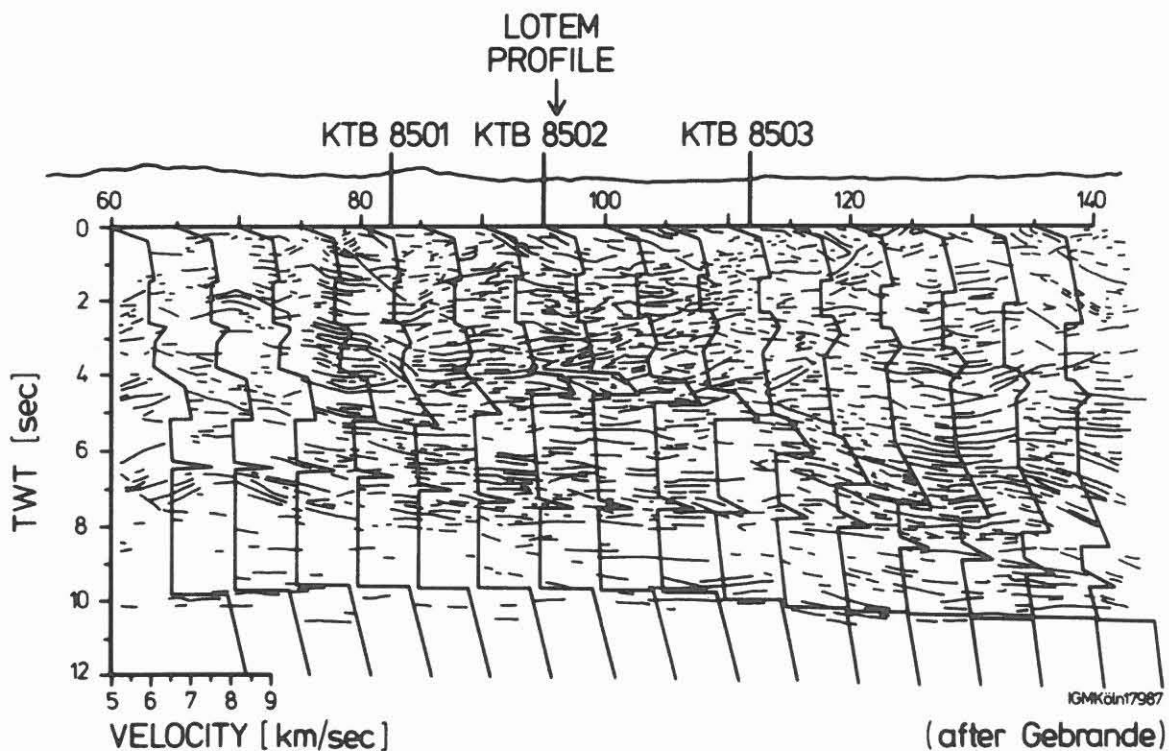


Abb. 8: Strichzeichnung und seismische Geschwindigkeitsmodelle für die Oberpfalz (nach: Dekorp Research Group, 1987).

Abbildung 8 zeigt zum Vergleich eine Strichzeichnung des reflexionsseismischen Profils Dekorp 4 und darüber gezeichnet die Geschwindigkeitsmodelle der Reflexionsseismik (Dekorp Research Group, 1987). Bei einer Zweiweg-Laufzeit von etwa 4 Sekunden, was einer Tiefe von 11 bis 12 km entspricht, zeigen die interpretierten seismischen Geschwindigkeitsmodelle eine sehr deutliche Hochgeschwindigkeitsanomalie. Eine mögliche Korrelation der seismischen Hochgeschwindigkeitszone mit dem guten elektrischen Leiter kann nur durch weitere detailliertere Feldmessungen gezeigt werden oder durch das Bohrloch selbst.

4. DIE MESSUNGEN VON 1987

Primäres Ziel der Messung in der Oberpfalz war die elektromagnetische Tiefensondierung im Zielgebiet der KTB-Bohrung. Dazu sollte dieses Gebiet von zwei Sendern aus flächendeckend vermessen werden. Im Feld war die Datenverarbeitung lediglich bis zur Vorbereitung einer Inversionsrechnung vorgesehen, damit sich die beteiligten Personen voll auf die zügige Durchführung des umfangreichen Meßprogramms konzentrieren konnten. Neben der Vermessung des Bohrgebietes selbst wurden nämlich noch walk-away-tests von zwei Sendern ausgeführt, um den Einfluß des Sender-Empfänger Abstandes bei Mehrdimensionalität berücksichtigen zu können. Außerdem konnten für zwei Sender, die rechtwinklig zueinander angeordnet waren und eine gemeinsame Elektrode besaßen, jeweils 29 Magnetfelder auf einem Kreis mit einem Halbmesser von etwa 10 km aufgezeichnet werden. Hiervon erhoffen wir exakte Informationen über Streich- und Fallrichtungen im Untergrund. An fast allen anderen Stationen wurden neben der Vertikalkomponente des Magnetfeldes auch die beiden horizontalen Komponenten des elektrischen Feldes gemessen. Aus bisherigen Untersuchungen wissen wir, daß Magnetfeldinterpretationen alleine eine Überbetonung der guten Leiter ergeben.

Die Erweiterung der Messungen vom unmittelbaren Bohrplatz nach außen wurde hauptsächlich durchgeführt, um eventuelle spätere Widerstandsveränderungen, die durch die Bohrung bedingt sind, zu dokumentieren. Durch die flächenmäßig sehr dichte Vermessung am Bohrplatz erhoffen wir uns aus den Einzelmessungen auch eine Referenzstation zusammenstapeln zu können.

Abbildung 9 zeigt die Lokationen von Sender und Empfangsstationen im Messgebiet um Windisch-Eschenbach. Es wurden wesentlich mehr Daten als

bei der Messung von 1986 aufgezeichnet, auch die Datenqualität war aufgrund neuer Instrumente und Datenverarbeitungsverfahren verbessert worden. Die Daten wurden im Feld und im Institut in Köln soweit aufbereitet, daß sie direkt als Datenbasis für die geplante Entwicklung von Interpretationsverfahren für komplizierte geologische Strukturen benutzt werden können.

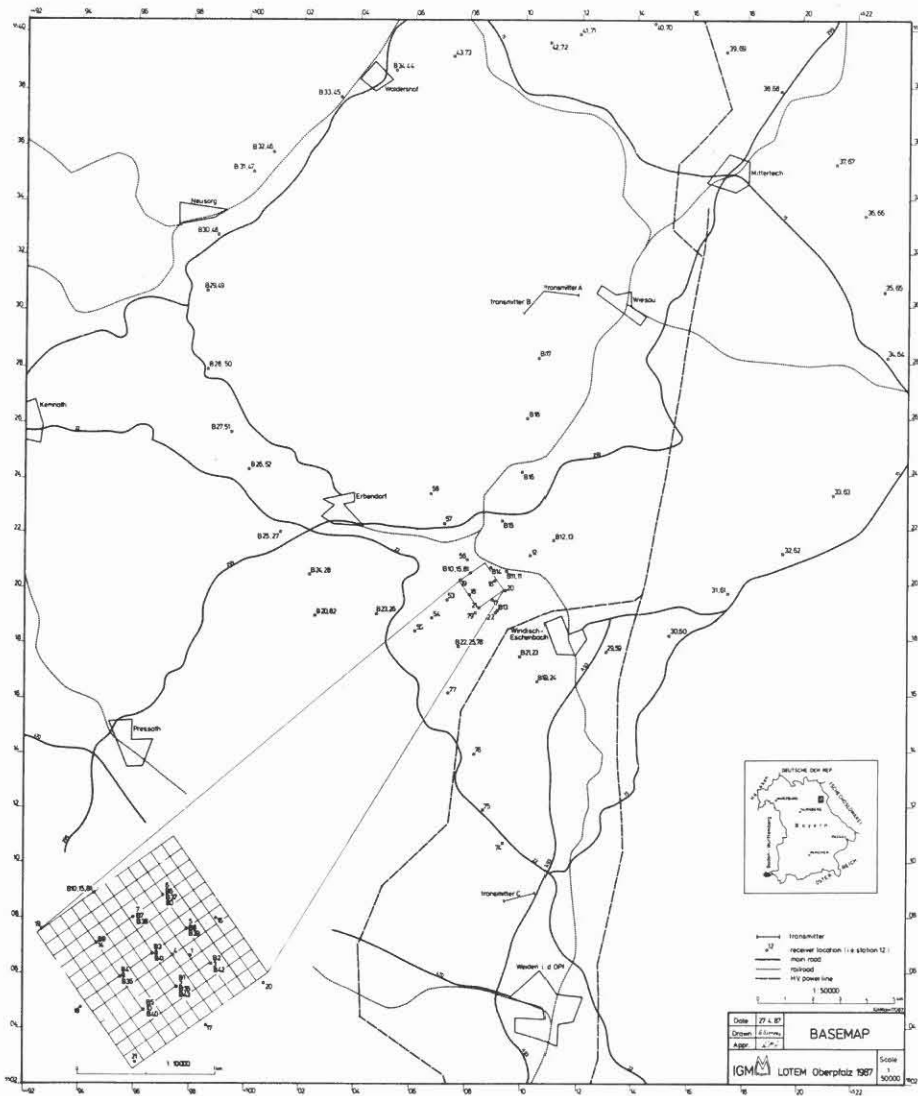


Abb. 9: Lokationskarte der Messkampagne von 1987.

5. BEWERTUNG DER BISHERIGEN ERGEBNISSE UND ZUKÜNFTIGE ARBEITEN

Die Daten der Messkampagne von 1987 sind einerseits von sehr guter Qualität, andererseits erkennt man aus der Inversionsstatistik der einzigen bisher ausgewerteten Station eine hohe Korrelation der erhaltenen Modellparameter untereinander: Es werden nur die spezifischen Widerstände aufgelöst während die Schichtdicken unbestimmt bleiben. Auch ein schlechter Leiter aus der Dreischicht-Inversion ist nicht zwingend durch die Daten innerhalb ihrer Streubreiten begründet. Das bedeutet, daß eine Zusammenfassung von vielen Stationen zu einer einzigen regionalen "Referenzstation" die Auflösbarkeit verbessern dürfte.

Die Gründe für den scheinbaren Widerspruch zwischen hoher Datenqualität und Nicht-Eindeutigkeit der elektrischen Widerstandsmodelle müssen vorläufig der Spekulation überlassen bleiben, jedoch bietet der vorliegende Datensatz eine solide Basis für die folgenden vielversprechenden Forschungsarbeiten:

- 1) Entwicklung neuer Formen der Darstellung wie Pseudosektionen oder direkte Tiefendarstellung nach einfacher Transformation.
- 2) Zusammenfassung von vielen Stationen um ein angenähertes regionales Leitfähigkeitsmodell mit entkoppelten Modellparametern zu erhalten
- 3) Interpretation der beiden Komponenten der elektrischen Felder um schlechtleitende Schichten besser auflösen zu können, sowie zur Ermittlung von Vorzugsrichtungen.
- 4) Auswertung der Messungen, die auf einem Kreis um den Sender herum durchgeführt wurden, und mögliche Transformation auf eine geologische Streichrichtung.
- 5) Gemeinsame Inversion von elektrischen und magnetischen Feldern anstelle der Kurven des scheinbaren Widerstandes.
- 6) Experimente mit der Tensorleitfähigkeit (E_x/H_z , E_y/H_z): theoretische Entwicklung und Tests an den vorliegenden Daten. Erfassung von 3D-Effekten.
- 7) Berücksichtigung der System-Übertragungsfunktion in Kristallingebieten.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen, die nicht ständig mit uns zusammenarbeiten, bedanken. Darüber hinaus gebührt unser besonderer Dank den Mitarbeitern im Institut für Geophysik und Meteorologie an der Universität Köln, die uns innerhalb kürzester Zeit mit Ersatzteilen versorgten und somit einen zügigen Fortschritt der Messung ermöglichten. Einen Dank auch an die Bevölkerung von Fuchsmühl, die unsere Messungen mit Wohlwollen verfolgte. In diesem Zusammenhang soll Herr W. Tretter aus Fuchsmühl nicht ohne Erwähnung bleiben, der, obwohl Außenstehender, uns bei der Organisation vor Ort mit Rat und Tat zur Seite stand, wann immer Not am Mann war. Ganz wesentlich für die Durchführung der Messkampagne war die Unterstützung von seiten Herrn Dr. Marondes von der DFG, der uns zwei VW-Busse zur Verfügung stellte. Auch hierfür ein herzliches Danke. Ohne die Unterstützung aller Genannten und versehentlich Ungenannten wäre diese schwere Messkampagne mit Sicherheit nicht so schnell und reibungslos durchgezogen worden.

LITERATURLISTE

- DEKORP Research Group, 1987, *Results of Dekorp 4 / KTB-Oberpfalz deep seismic reflection investigations*, J. Geophys., (in press).
- Haak, V., 1986, *Ein Modell der elektrischen Leitfähigkeit für die Lokation Oberpfalz: 2nd symp. poster summary*, Continental Deep Drilling Project of the German Federal Republic, 25.
- Hanstein, T., Eilenz, H.N., and Strack, K.-M., 1986, *Einige Aspekte der Aufbereitung von LOTEM Daten*, in Haak, V., and Homilius, J., Eds., *Elektromagnetische Tiefenforschung*, NlfB, 319-328.
- Stoyer, C.H., 1984, *Long offset transient electromagnetic (LOTEM) sounding method*, Integrated GeoSciences Inc., technical paper TP-1.