

Effekte anisotroper Leitfähigkeit in LOTEM-Daten

Schönfelder, T., Hördt, A. (Köln), Maurer, H.-M. (Uppsala, S)

1 Einleitung

Im Rahmen der Vorerkundung für die kontinentale Tiefbohrung KTB wurden in der Oberpfalz verschiedene Meßmethoden angewendet. Eines der aktiven elektromagnetischen Verfahren war "long-offset transient electromagnetics" (LOTEM). Bei diesem Verfahren wird in einen horizontalen elektrischen Dipol von ca. 1 km Länge ein Rechteckstrom eingespeist. In 5 bis 40 km Entfernung werden dann die elektrischen und magnetischen Komponenten des Feldes gemessen.

Die Wahl der Empfängerpositionen bei der oben erwähnten LOTEM-Messung war auf zwei Aspekte ausgelegt. Erstens ein Meßgebiet in dem direkten Umfeld der Tiefbohrung, um die lokalen Effekte im Bereich der Bohrung zu untersuchen, zweitens eine Kreismessung mit 12 km Radius um eine Senderposition 10 km nördlich der Bohrlokation. Die Interpretationen der Daten, die im selben Gebiet mit Hilfe der passiven Magnetotellurik aufgezeichnet worden waren, ließen Effekte anisotroper elektrischer Leitfähigkeit erkennen (Gundelach, 1992, Eisel, 1992, Tauber, 1992).

Hier wird der Versuch unternommen, die großräumigen Effekte in den LOTEM-Daten anisotrop zu interpretieren und die Ergebnisse der MT zu verifizieren.

2 Einleitende Berechnungen

Diese Rechnungen benutzen ein Programm, welches ursprünglich für die Controlled-source-audiomagnetotellurics (CSAMT) entwickelt wurde (Maurer, 1994). Dabei wird ein beliebig orientierter Widerstandstensor für einen Halbraum vorgegeben und die Antwort im Frequenzbereich ermittelt. Zur Anwendung auf die transiente Elektromagnetik überführt eine nachfolgende Transformation die Ergebnisse dann aus dem Frequenz- in den Zeitbereich (Abb. 1).

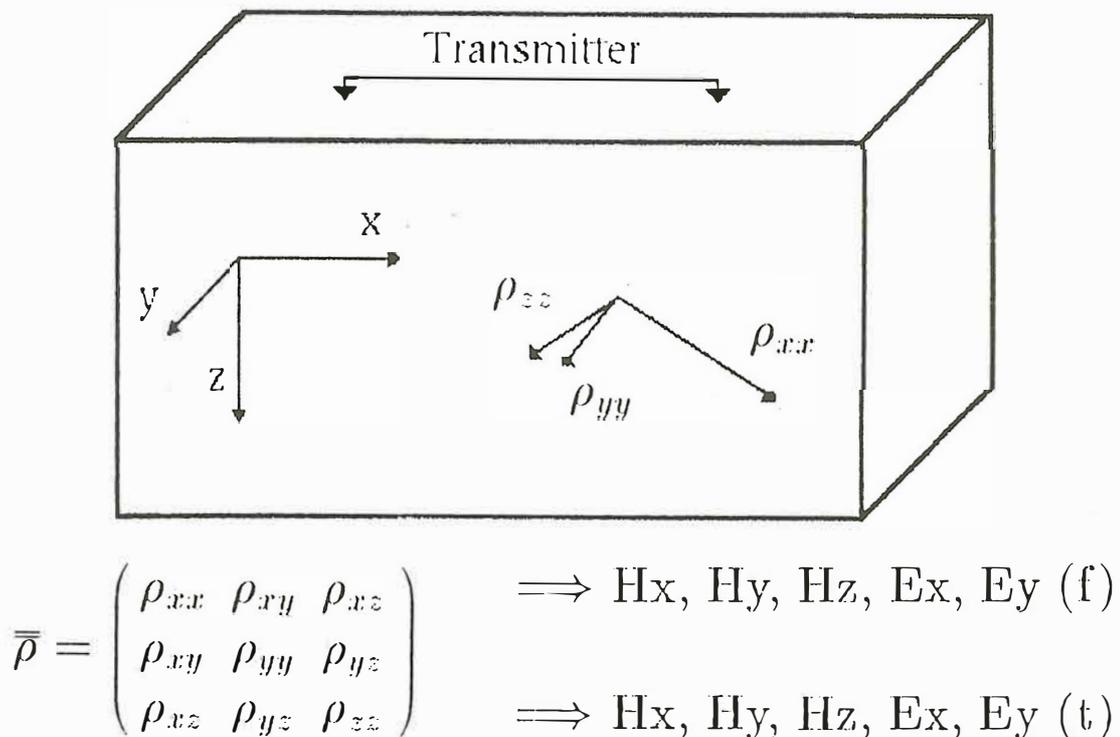


Abbildung 1 : Parameterkonvention der Vorwärtsrechnung

Die Ergebnisse liegen dann in Form von scheinbaren Widerstandskurven vor. Abb. 2 zeigt diese für einen typischen Zweischichtfall. Obwohl für LOTEM eine ALL-TIME scheinbare Widerstandskurve entwickelt worden ist (Karlik, 1994; Karlik & Strack, 1990), ist diese auf einem geschichteten Halbraum basierende Lösung für dreidimensionale und anisotrope Strukturen problematisch. Deshalb werden hier die Daten als Früh- und Spätzeinnäherung dargestellt. Die Early-Time Kurve ist proportional zur gemessenen Spannung und nähert sich zu frühen Zeiten dem Widerstand der oberen Schichten, die Late-Time Kurve zu späten Zeiten dem Widerstand der tiefen Schichten (Abb. 2)

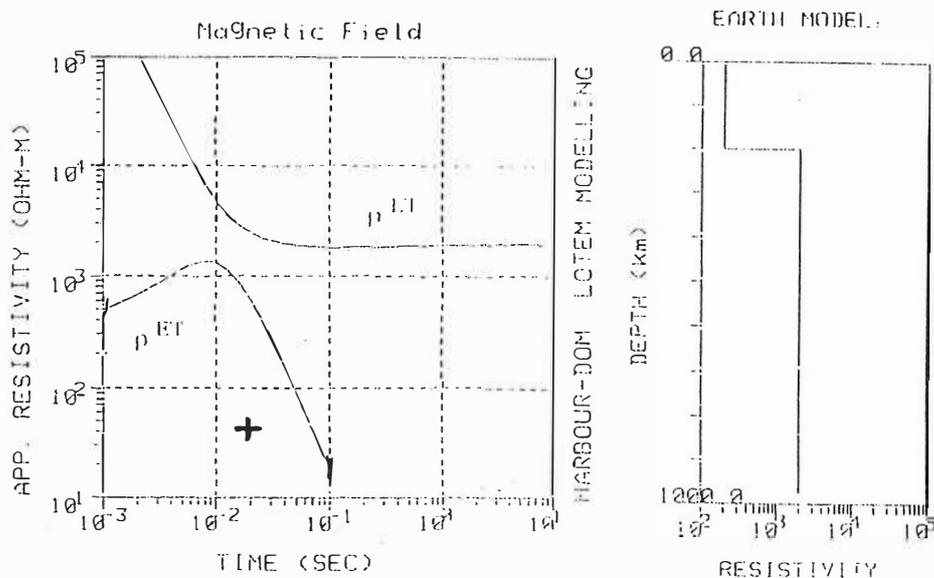
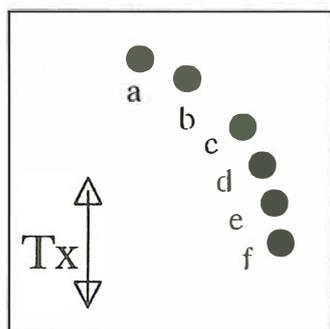


Abbildung 2 : Scheinbare Widerstandskurven von LOTEM

Zunächst sollen hier einfache anisotrope Fälle untersucht werden, um die dabei auftretenden Effekte zu studieren. Als Beispiel wird ein geringer Widerstand (100 Ohm) in Senderrichtung (x -Richtung) angenommen. Der Widerstand in den beiden Richtungen senkrecht dazu wird mit 1000 Ohm deutlich größer gewählt (Abb. 3). Der Tensor könnte durch lineare Leiter erzeugt werden. Es werden die Ergebnisse an 6 Stationen in Abstand von 12 km betrachtet, um einen Eindruck über die räumliche Verteilung zu geben. Dargestellt ist die H_z -Komponente für 10° , 30° , 50° , 70° , 80° und 90° zur Senderachse. Die Widerstandskurve bei 30° (Abb. 3 b) entspricht dem Bild einer homogenen Halbraumkurve mit einem Widerstand, der etwas unter den Maximalwerten des Tensors liegt.. Die Stationen zeigen mit zunehmender Annäherung an die y - Achse ein Abgleiten der Frühzeitwerte (Abb 3 c+d), das im Bereich der y - Achse in mehreren Vorzeichenwechseln (Reversals) endet (Abb 3 e+f). Da die scheinbaren Widerstandskurven doppeltlogarithmisch dargestellt werden, muß das Vorzeichen in den Daten vernachlässigt werden. Um diese Information aber nicht völlig zu verlieren, wird das Vorzeichen nachher wieder in die Widerstandskurven (+ und -) eingetragen. Bei diesen Reversals handelt es sich nicht um - wie früher vermutet - numerische Ungenauigkeiten, sondern um einen Effekt der Anisotropie (Maurer, 1994).

Ein weiteres Merkmal dieser Kurven ist, daß der Widerstand des Tensors in y - Richtung an den Positionen nahe der x - Achse entnommen werden kann. So zeigt die senderachsennahe Station (Abb. 3a) den Widerstandswert des Tensors in y - Richtung (1000 Ohm-m).

Nach diesem einfachen Fall soll nun untersucht werden, wie sich ein Fallen der maximalen Leitfähigkeit auswirkt. Hierzu wird derselbe Tensor an 3 Stationen (10° , 50° und 80°) betrachtet, aber das Einfallen der Hauptwiderstandsrichtung wird durch Drehungen um 5° , 10° und 20° um die y -Achse zu Station a) verändert (Abb 4). Dadurch werden die Nebendiagonalelemente des Widerstandstensors besetzt.



$$\underline{\underline{\rho}} = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix}$$

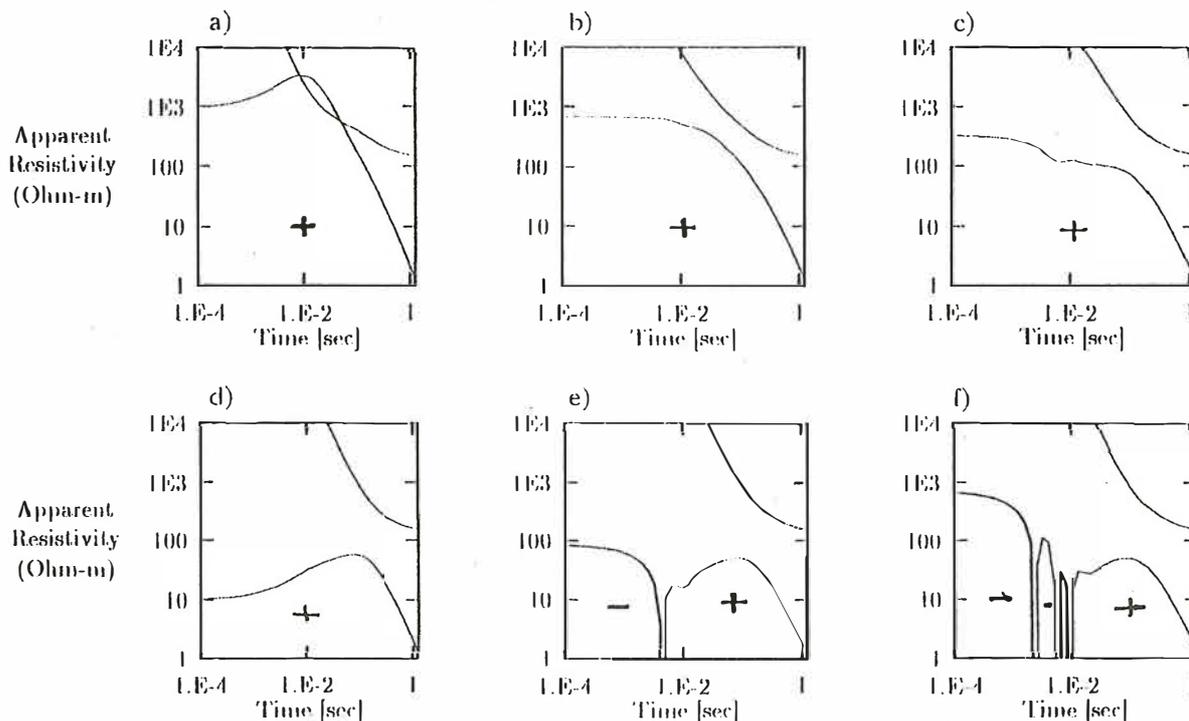


Abbildung 3 : Azimuthale Verteilung der horizontalen Anisotropie

Im Vergleich zu den oben gezeigten Ergebnissen treten nun die Reversals gehäuft auf. Weiterhin sind die Vorzeichenwechsel in der Spätzeitkurve zu erkennen. Die Vermutung, daß diese Spätzeitreversals numerische Probleme der Zeittransformation sind, läßt sich durch eine Betrachtung mit besserem Stationsraster und ausgedehntem Zeitbereich der Transformation widerlegen. Dies führt zu einer Erklärung als Auswirkung des anisotropen Untergrundes. Eine Auffälligkeit soll hier noch erwähnt werden. Ein Vergleich der Widerstandskurven für 5° Fallen mit den Kurven für 0° Fallen zeigt eine starke Abweichung (3a,c,e und 4a,c,e). Die Ursache für diesen Effekt ist noch nicht geklärt; ein Vergleich mit anderen Programmen soll hier für Klärung sorgen.

3 Messungen in der Oberpfalz

Damit wurde gezeigt, daß eine anisotrope Leitfähigkeitsverteilung deutliche Auswirkungen in den Widerstandskurven zeigt. Die Meßergebnisse aus der Oberpfalz sollen nun auf die oben erwähnten Effekte hin untersucht werden. Abb. 5 zeigt eine Karte der Oberpfalz mit den Meßstationen, an denen 1987 mit LOTEM die Hz -Komponente gemessen wurde. Eine Besonderheit dieser Messung ist die gleichzeitige Verwendung von zwei zueinander beinahe orthogonalen Sendern (Kreuz und Dreieck). Der Radius des Stationskreises beträgt ca. 12 km. Diese Stationen sind für die Simulation eines homogenen

anisotropen Halbraumes interessant, das enge Meßkreuz um die KTB östlich von Erbdorf ist zu sehr von lokalen Störungen geprägt, als daß es einen wichtigen Hinweis auf die regionalen Effekte geben würde.

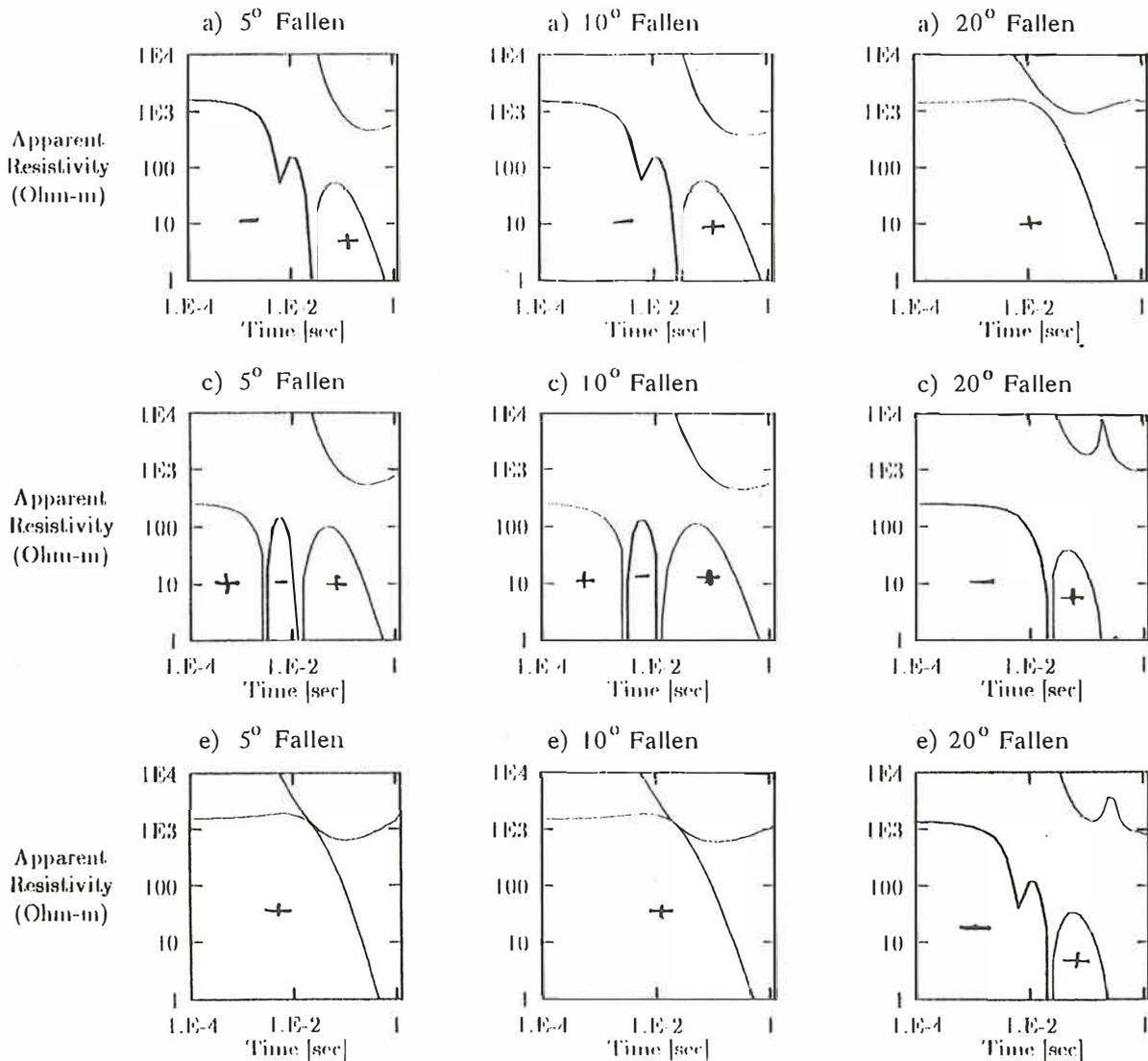
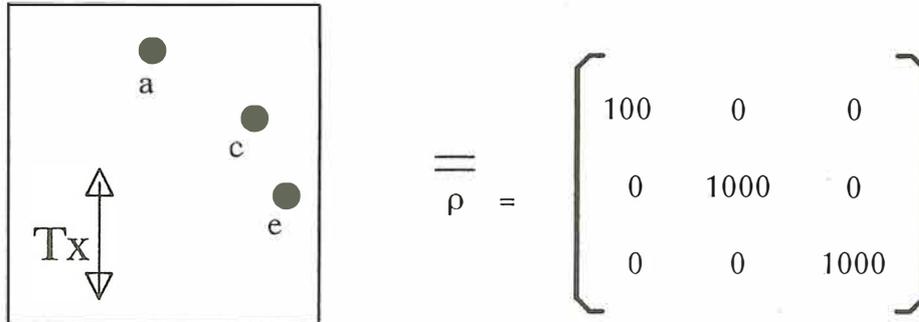


Abbildung 4 : Auswirkungen einer einfallenden Leitfähigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Empfängerposition

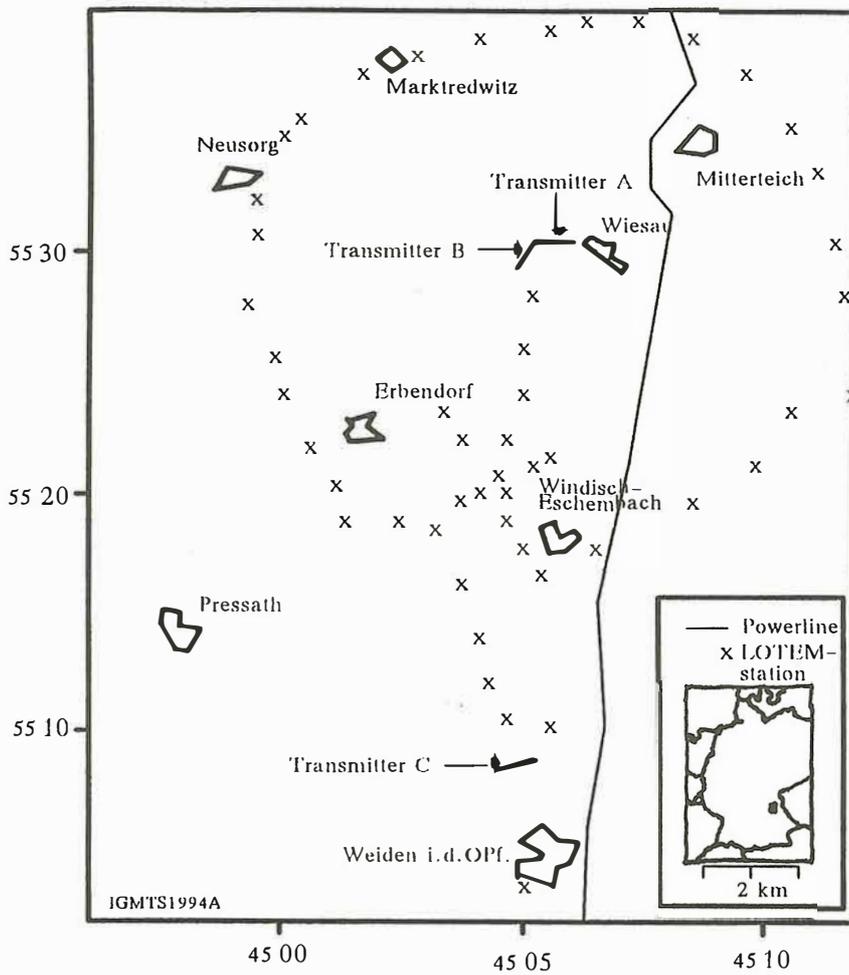


Abbildung 5 : Lage der LOTEM-Stationen in der Oberpfalz

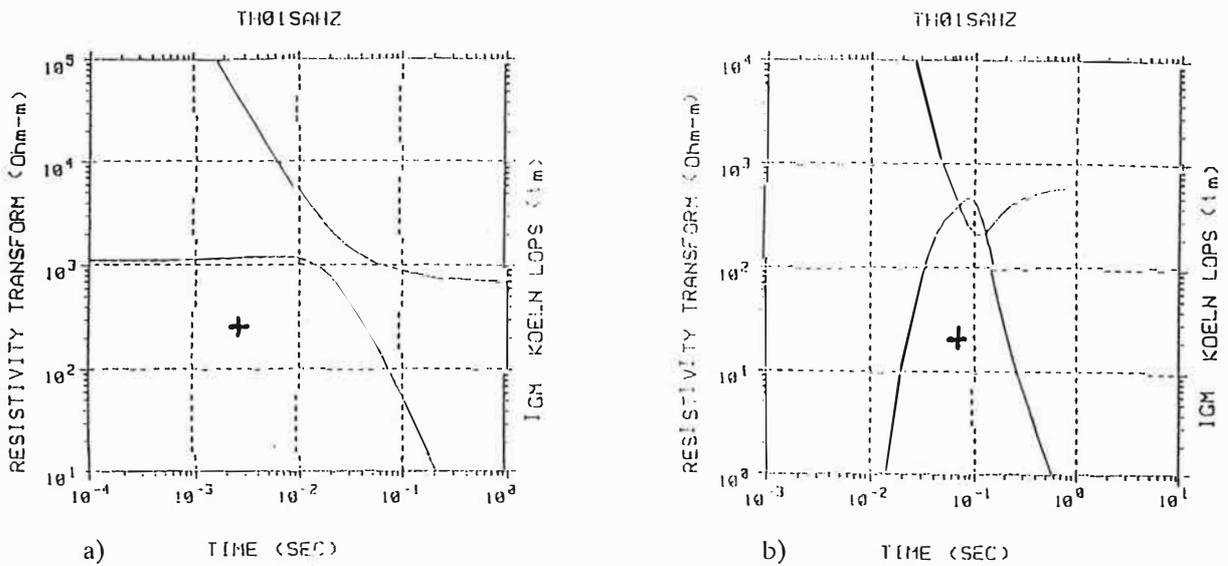


Abbildung 6 : Auswirkung der Konvolution auf LOTEM-Daten

Die Meßdaten aus der Oberpfalz liegen allerdings nur mit der Systemantwortfunktion gefaltet vor. Diese Systemantwortfunktion beschreibt die Verfälschung der Meßwerte durch die Eigenschaften des Aufzeichnungssystems. Da die Dekonvolution, also die Beseitigung dieser Verfälschung, instabil und nicht eindeutig ist, werden die Vorwärtsdaten mit der Systemantwort gefaltet und dann mit den Meßdaten verglichen. Abb. 6 zeigt zur Verdeutlichung einen Datensatz vor (6a) und nach (6b) der Faltung. Wie oben erwähnt, legen die Interpretationsergebnisse der Magnetotellurik für die Oberpfalz nahe, die Oberpfalzdaten durch eine anisotrope Leitfähigkeitsverteilung zu interpretieren. Abb.7 zeigt 3 Stationen von Sender A von 0 bis 45 Grad. Die Widerstandskurve der Station bei 0 Grad (Abb. 7a) hat ein Signal, obwohl dieses auf Grund der Winkelabhängigkeit der Senderposition nicht vorhanden sein dürfte.

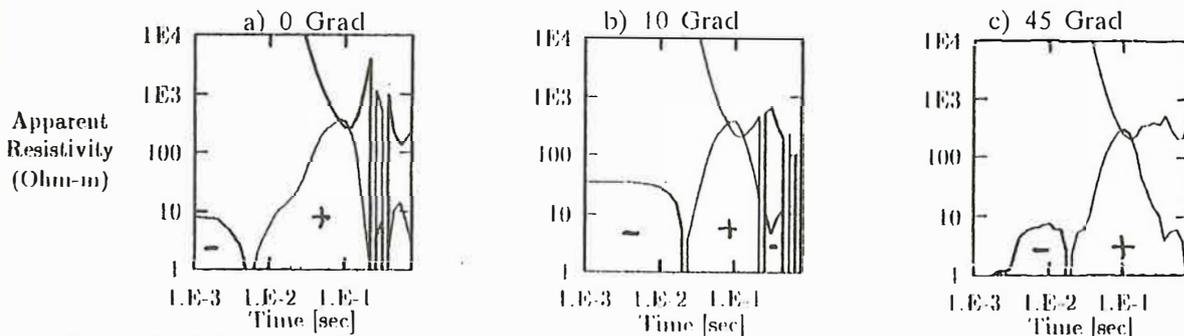


Abbildung 7 : Scheinbare Widerstandskurven von 3 Stationen des Senders A in der Oberpfalz

Als Interpretationsmöglichkeit käme eine fehlerhaft durchgeführte Messung oder auch eine lokale Störung des Untergrundes in Betracht. Ein Vergleich der Stationen 0 bis 45 Grad zeigt, daß die Effekte von 0 Grad sich bis 45 Grad fortsetzen (Abb. 7a-c). So bleiben das Widerstandsmaximum und die Position des Vorzeichenwechsels der Frühzeitkurve erhalten. Ein weiteres Merkmal sind die Vorzeichenwechsel zu späten Zeiten, die – wie wir gesehen haben – ein Effekt abtauchender Anisotropie sein können. Ein anderer Grund für anisotrope Interpretation ist aber auch das Ergebnis der Magnetotellurik von Gundelach (1992). Danach ist in der Oberpfalz das Fallen der besten Leitfähigkeit mit 45 Grad anzunehmen. Der Versuch, die LOTEM-Daten mit einem anisotropen homogenen Halbraum bestmöglich anzupassen, ergibt für 45 Grad Fallen mit 54 Grad Streichen nach NE eine gute Anpassung. Abb. 8 zeigt 3 durchschnittliche Stationen (obere Reihe 8a-c) und dazu die gefaltete Modellantwort (untere Reihe 8d-f). Die beste Anpassung wurde durch Vergleich der Amplituden und Betrachtung der Spätzeitreversals ermittelt. Diese Reversals in den Meßdaten könnten natürlich auch durch Pipelineeffekte (Hanstein, 1994) verursacht werden, aber die Verteilung über fast alle Meßstationen steht dem jedoch entgegen. Diese Anpassung durch einen anisotropen homogenen Halbraum kann keine lokalen Effekte erklären, gibt aber grundlegende Erkenntnisse für spätere dreidimensionale Interpretationen.

4 Schlußfolgerungen

- Die Hz -Komponente von LOTEM zeigt Effekte bei anisotroper Leitfähigkeitsverteilung.
- Die Verteilung der Reversals ergibt die Abgrenzung zu Pipelineeffekten
- Die Ausrichtung des LOTEM-Senders ist für die Erkennung von Anisotropie wichtig, wenn nicht ein kompletter Kreis gemessen wird.
- Die LOTEM-Meßdaten der Oberpfalz können durch eine anisotrope Leitfähigkeitsverteilung (45° Fallen, 54° NE Streichen) erklärt werden.

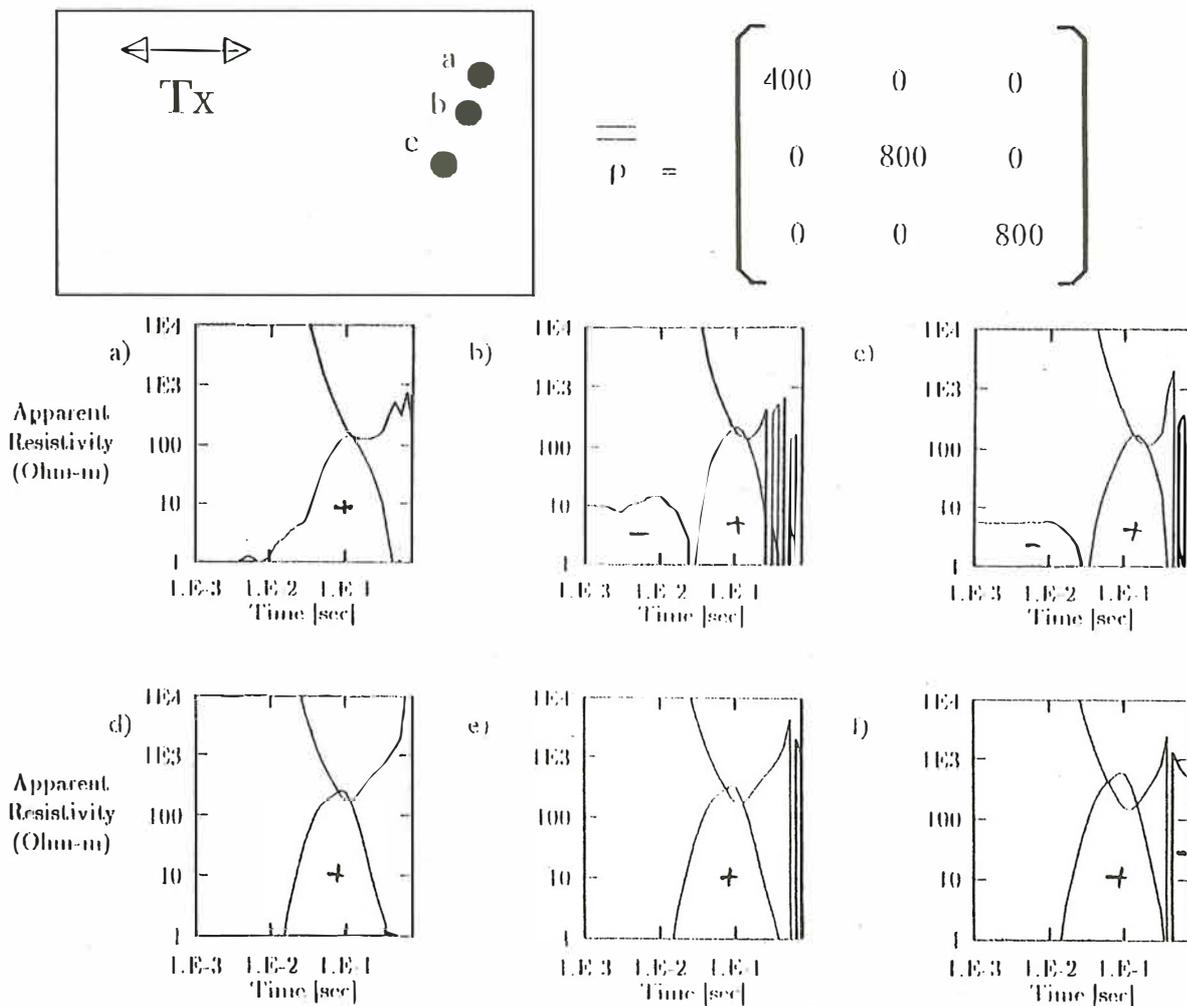


Abbildung 8 : Vergleich von Meßdaten der Oberpfalz mit dem Ergebnis der Modellierung

5 Literatur

- Eisel, M., 1992. Effekte lateraler anisotroper Leitfähigkeitsstrukturen in der MT, in Protokoll über das 14. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", pp. 279-288, ed. Haak, V. & Rodemann, H., Borkheide 14. Kolloquium EMTF
- Gundelach, V., 1992. Magnetotellurik in der Oberpfalz, in Protokoll über das 14. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", pp. 343-348, ed. Haak, V. & Rodemann, H., Borkheide
- Hanstein, T., Hördt, A. (Köln), 1994. Effekte von Gasleitungen auf LOTEM-Sondierungen, in diesem Protokollband
- Karlik, G., 1994. "Imaging" für elektrische Felder der LOTEM-Methode, in diesem Protokollband
- Karlik, G. & Strack, K.-M., 1990. 'ALL-TIME' scheinbare Widerstandskurven für LOTEM, in Protokoll über das 13. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", pp. 135-144, ed. Haak, V. & Homilius J., Hornburg
- Maurer, H.-M., 1994. Elektromagnetische Induktion in anisotropen Leitern, Dissertation TU Braunschweig
- Tauber, S., 1993. Die Leitfähigkeitsverteilung in den nördlichen Varisziden untersucht mit den Methoden der Magnetotellurik und der geomagnetischen Tiefensondierung auf einem Profil vom Oberpfälzer Wald ins Vogtland, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Geoinformatik der FU Berlin