

Ein anisotropes Leitfähigkeitsmodell der ZEV

Markus Eisel, GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg A45, 14473 Potsdam

Einleitung

Seit der Entscheidung für die nordöstliche Oberpfalz als Lokation für das Kontinentale Tiefbohrprogramm (KTB) wurden in diesem Gebiet magnetotellurische (MT) Messungen durchgeführt. Die Technische Universität Berlin machte AMT-Messungen entlang von Profilen über die Fränkische Linie (FL) (LEONHARDT, 1987, BRASSE ET AL, 1988), die auf eine oberflächennahe, schmale Zone erhöhter Leitfähigkeit an dieser Störungszone deuteten. GEOMETRA (JENSEN ET AL, 1988, 1990) führte MT-, AMT- und CSAMT-Messungen an 30 Stationen im nahen und weiteren KTB-Umfeld durch, aus denen zweidimensionale (2-D) Modelle abgeleitet wurden, die eine hochleitfähige Zone in ca. 10km Tiefe im gesamten Untersuchungsgebiet aufweisen. Auf der Basis von 6 Stationen entlang eines 30km langen Nord-Süd-Profiles entwickelte EISEL (1990) ein 2-D-Modell, das eine leitfähige, Ost-West streichende Struktur in 10km Tiefe aufweist, deren Leitfähigkeit von Norden nach Süden abnimmt. Zur Erklärung der Daten mußte der Leiter weit nach Norden - bis in den Bereich der Mitteldeutschen Kristallinschwelle - ausgedehnt werden. Eindimensionale Inversionsmodelle von transienten elektromagnetischen (TEM) Messungen (LO-TEM-ARBEITSGRUPPE, 1988) zeigen einen guten Leiter in 8 - 10km Tiefe an annähernd allen Stationen in der KTB-Umgebung. Letzendlich verifizierte TAUBER (1993) das leicht modifizierte Modell von EISEL (1990) und erklärte damit die Daten von 30 Stationen eines etwa 100km langen Nord-Süd-Profiles.

All diese Ergebnisse weisen deutlich auf die Existenz des "10-km-Leiters" hin, dessen von Norden nach Süden abnehmende integrierte Leitfähigkeit als Ursache der regional beobachteten Induktionspfeile gilt. Trotzdem scheint diese leitfähige Schicht in 10km Tiefe in Widerspruch zu den Modellen zu stehen, die sich aus der Anpassung der AMT-MT-Impedanzen ableiten.

Die regionale Struktur, abgeleitet aus Induktionspfeilen

Bis auf die Stationen der TU Berlin (LEONHARDT, 1987) wurden an allen Stationen auch die Variationen des vertikalen Magnetfeldes registriert und die Übertragungsfunktionen zwischen diesem und den horizontalen Komponenten des Magnetfeldes bestimmt. Im Gegensatz zu den Impedanzsensoren, die zum Teil mit großen Fehlern behaftet sind, zeigen die Induktionspfeile besonders im langperiodischen Bereich eine beachtenswerte Konsistenz im gesamten Meßgebiet.

Ab einer Periode von etwa 100s zeigen die Realteile der Induktionspfeile streng nach Süden, dies ist bis hin zu Perioden von einigen tausend Sekunden zu beobachten. Als Funktion der Periode betrachtet hat der Betrag des Realteils ein Maximum bei 500 - 600s, damit geht ein Vorzeichenwechsel des Imaginärteils einher. Abb. 1 zeigt eine Karte des Meßgebiets mit den wichtigsten geologischen Einheiten und den Induktionspfeilen bei 500s.

Die Induktionspfeile an den beiden Stationen westlich der FL weisen einen leichten Osttrend auf. Dies ist symptomatisch für das gesamte Gebiet westlich der FL (HOFER, 1990).

Östlich der FL ist dieses strenge Südweisen der Induktionspfeile bis weit nach Norden ins Vogtland zu beobachten. Auf der Datenbasis von 30 Stationen eines Nord-Südprofils leitete TAUBER (1993) ein 2-D-Modell ab, das diese Beobachtungen erklärt. Abb. 2 zeigt das Modell,

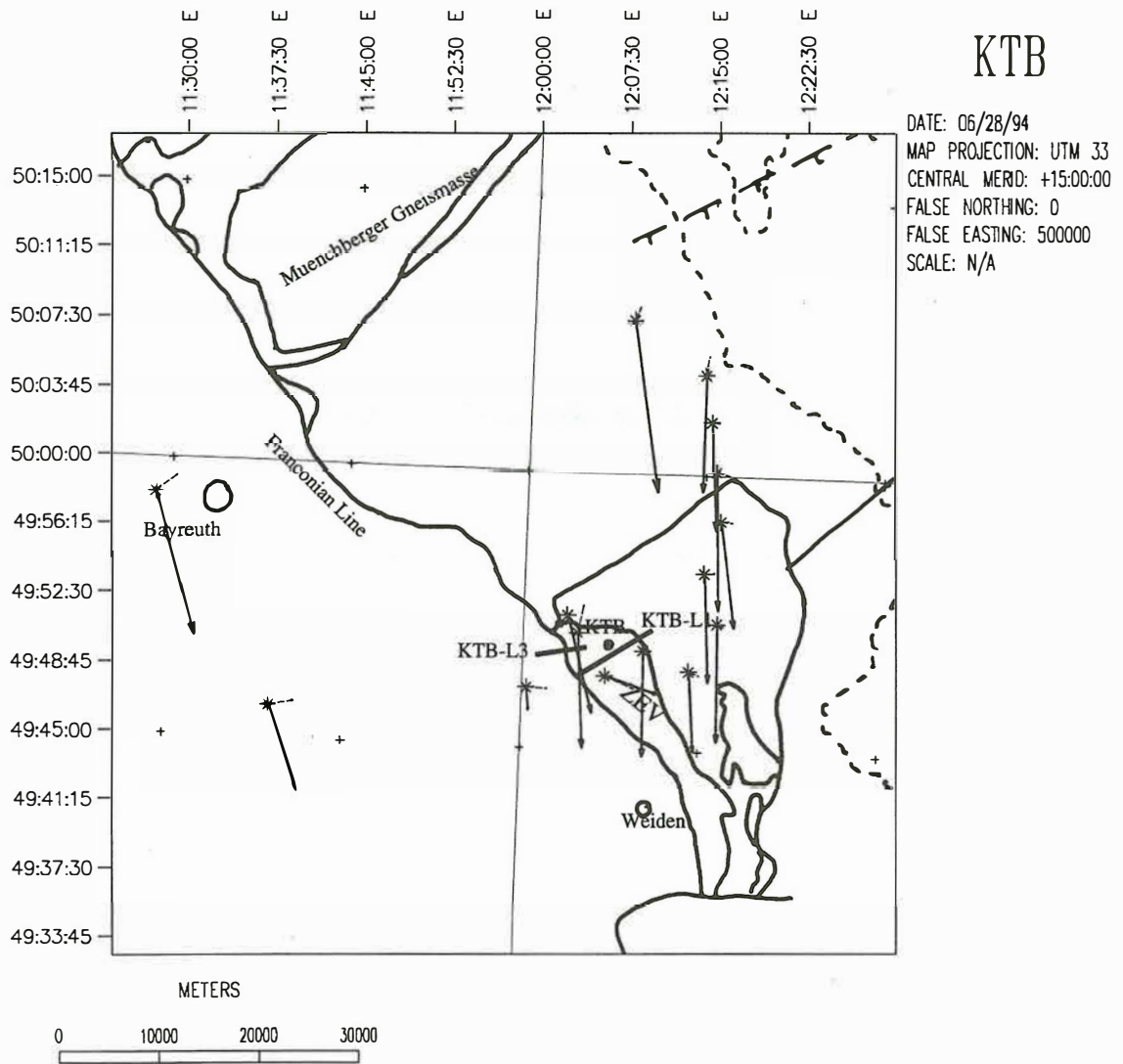


Abbildung 1: Karte des Meßgebiets mit den wichtigsten geologischen Strukturen und den Induktionspfeilen bei $T = 500s$. Im Gegensatz zu den Stationen östlich der FL zeigen die Induktionspfeile an den beiden Stationen westlich der FL eine leichte Abweichung der strengen Südrichtung.

das eine gutleitende Schicht in 11km Tiefe enthält, deren Widerstand von Norden nach Süden abnimmt. Die Existenz dieses "10-km-Leiters" wird durch 1-D-Inversionsmodelle von LOTEM-Daten (LOTTEM-ARBEITSGRUPPE, 1988) und MT-Messungen entlang der Tschechischen Grenze (CERV ET AL, 1993 a, 1993 b) bekräftigt.

Anisotrope Leitfähigkeitsstrukturen in der oberen Kruste

In der näheren Umgebung der KTB ergibt sich aus der Analyse der Impedanztensoren im Bereich von 250Hz bis 10s eine Streichrichtung $N40^{\circ}W$. Die scheinbaren spezifischen Widerstände parallel zur Streichrichtung ($\rho_{\parallel} \approx 10\Omega m$) sind bis zu zwei Dekaden kleiner als jene senkrecht zur Streichrichtung, also in Richtung $N50^{\circ}O$ ($\rho_{\perp} \approx 5000\Omega m$). Abb. 3 zeigt ein Beispiel für solch stark anisotropen Widerstandskurven, mit denen auch die entsprechenden Unterschiede in den Phasenkurven einhergehen.

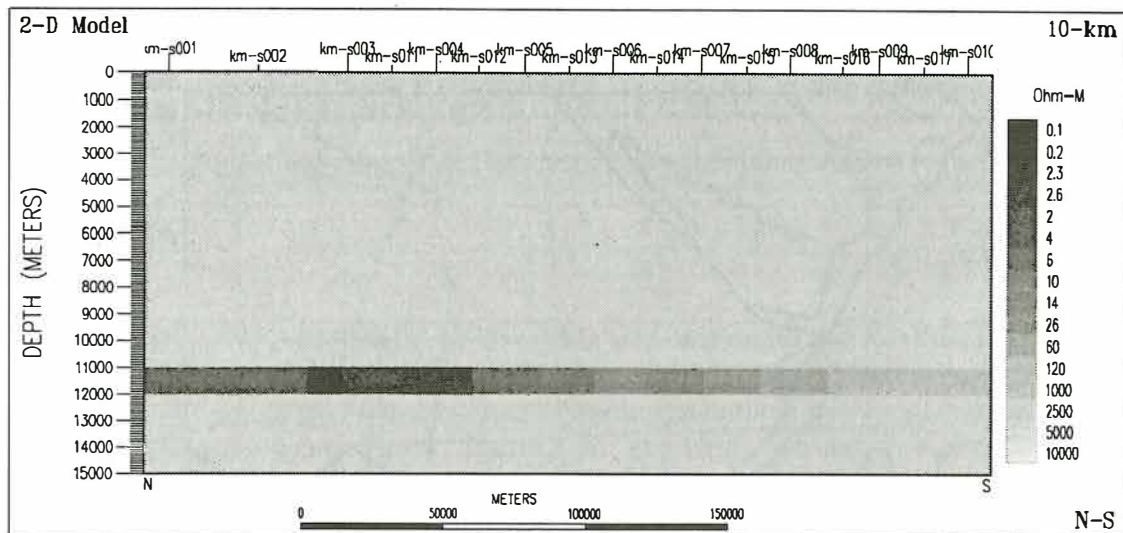


Abbildung 2: Das regionale 2-D-Modell (TAUBER, 1993) aus der Anpassung der Induktionspfeile von 30 Stationen eines Nord-Süd-Profiles. Die integrierte Leitfähigkeit der Schicht in 11km Tiefe nimmt von $\tau = 10000S$ im Norden auf $\tau = 10S$ im Süden ab. Der Halbraumwiderstand beträgt $2500\Omega m$.

Diese, über einen weiten räumlichen Bereich beobachtete, starke Anisotropie läßt sich durch eindimensionale Modelle mit horizontaler Anisotropie modellieren. In der Tabelle sind die Parameter eines solchen Modells wiedergegeben, das für die Station IGEO-s106 abgeleitet wurde.

$\rho_1[\Omega m]$	$\rho_2[\Omega m]$	$\alpha[^\circ]$	$d[km]$
200	200	0	0.2
200	250	-40	0.7
30	5000	-40	15
5000	5000	0	10
1000	1000	0	∞

Die Widerstands- und Phasenkurven des Modells sind in Abb. 3 zu sehen. Die anisotrope Schicht in diesem Modell ist 15km mächtig und besitzt einen Anisotropiekoeffizienten von $A = \sqrt{5000/30} \approx 13$.

Für ein SW-NE-Profil, das südlich der KTB verläuft wurde auf der Basis der 1-D-Anisotropiemodelle ein zweidimensionales Modell entwickelt. Das Profil hat eine Länge von etwa 8km und Daten von 14 Stationen wurden benutzt. Die Übertragungsfunktionen wurden mit einem Finite-Elemente-Code von WANNAMAKER ET AL (1987) berechnet. Abb. 4 zeigt das Modell. Der durch die Schraffur gekennzeichnete Bereich ist anisotrop. Für die Berechnung der Übertragungsfunktionen wurden die beiden Polarisationsrichtungen (E- und B-Polarisation) getrennt berechnet und dem anisotropen Bereich jeweils der entsprechende Widerstand zugewiesen. Die E-Polarisation entspricht der Richtung senkrecht zum Profil/Modell und ihr ist der geringe Widerstand zugeordnet ($125\Omega m$ im oberflächennahen Bereich, $40\Omega m$ im Bereich bis 20km Tiefe). Die B-Polarisation ist mit der Profilrichtung parallel, und dieser Richtung sind die hohen Widerstände zugeordnet ($440\Omega m$, bzw. $4500\Omega m$).

Der anisotrope Block scheint nach Nordosten hin abzutauchen, was mit den Ergebnissen aus Messungen an der Tschechischen Grenze übereinstimmt, wo anisotropes Verhalten der Impedanztensoren erst bei Perioden größer 10s, was mit größeren Eindringtiefen einhergeht, beobachtet wird (CERV ET AL, 1993 b). Mit diesem Modell können die beobachteten AMT/MT-Impedanzen sehr gut erklärt werden. Abb. 5 zeigt die Kurven des scheinbaren Widerstands und der Phase dreier Stationen des Profils zusammen mit den entsprechenden Modellstationen. Die Anpassung aller vier Parameter gelingt gut, die Hauptmerkmale: divergierende ρ_a -Kurven,

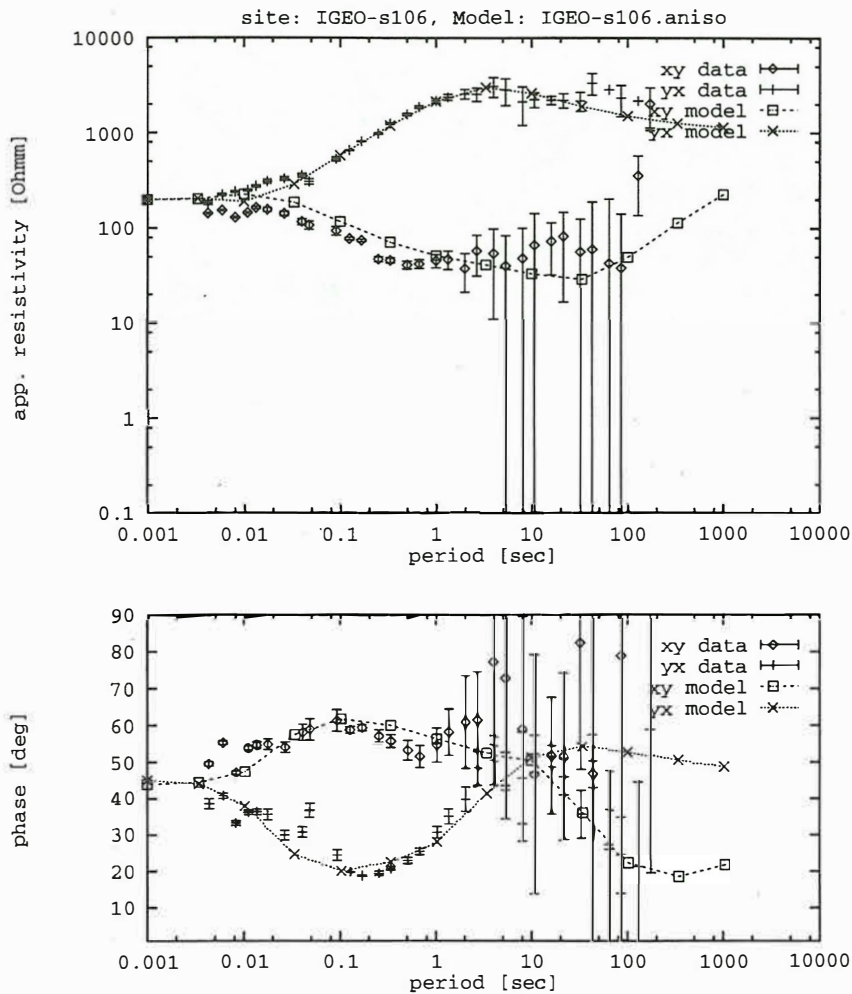


Abbildung 3: Scheinbarer spezifischer Widerstand (oben) und Phase als Funktion der Periode der Station IGEO-s106 zusammen mit den Übertragungsfunktionen des anisotropen 1-D-Modells aus Tab. 1. Sowohl Feld- als auch Modelldaten sind in die Streichrichtung rotiert.

Phasen entsprechen unter bzw. über 45° , werden durch das Modell reproduziert. Trotzdem ist die Erklärung der extrem hohen Anisotropiekoeffizienten ($\rho_{max}/\rho_{min} \approx 100$) durch eine intrinsische Anisotropie nicht realistisch. Die höchsten Anisotropien, die an Gesteinsproben im Labor gemessen wurden liegen um mehr als eine Größenordnung darunter (z. B. RAUEN, 1990).

Vergleichende Modellstudien (EISEL, 1992) von mikroskopischer und makroskopischer Anisotropie – letztere realisiert durch Sequenzen nieder- und hochohmiger Lamellen – zeigten, daß unter bestimmten Voraussetzungen eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Fällen anhand von MT-Impedanzen nicht möglich ist. Dies ist dann der Fall, wenn eine Deckschicht über der Lamellenstruktur vorhanden ist. Abhängig von deren Dicke werden die Unterschiede in den ρ_a -Werten über nieder- und hochohmigen Lamellen bis zum Verschwinden gedämpft. Basierend auf diesen Untersuchungen wurde der mikroskopisch anisotrope Block im Modell von Abb. 4 durch eine Struktur ersetzt, die aus dünnen, leitfähigen, subvertikalen Schichten innerhalb eines hochohmigen Blocks aufgebaut ist. Abb. 6 zeigt dieses Modell. Die Geometrie der

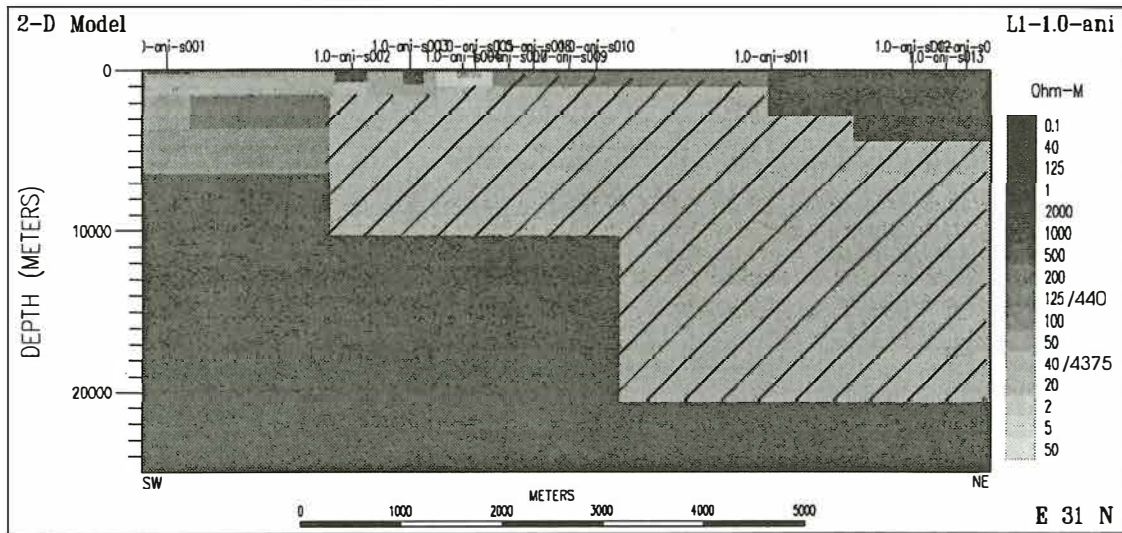


Abbildung 4: Zweidimensionales Modell für das 8km lange SW-NE-Profil südlich der KTB. Die Schraffur kennzeichnet den homogen anisotropen Bereich, dessen Parameter auf den 1-D-Anisotropiemodellen basieren.

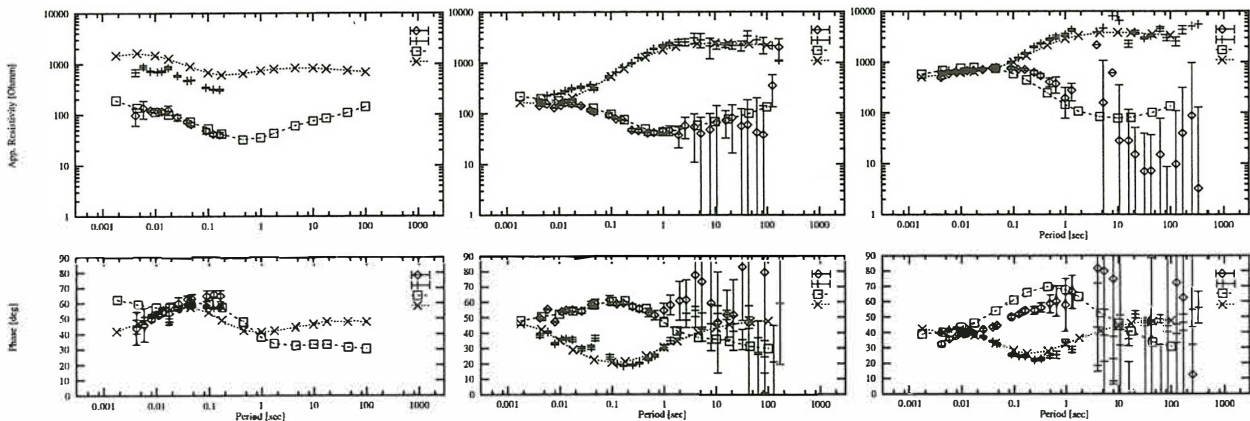


Abbildung 5: Kurven des scheinbaren spezifischen Widerstandes und der Phase für drei Profilstationen und die Kurven der entsprechenden Modellstationen.

leitfähigen Schichten können mit den Kataklysezonen, die in der Bohrung angetroffen wurden, und den Reflektoren der 3-D-Seismik (HIRSCHMANN, 1993) korreliert werden. Die Anpassung der Modellkurven an die Meßdaten entspricht der Anpassung durch das Modell in Fig 4.

Der 10km tiefe Leiter, der als Ursache der Induktionspfeile angesehen wird, existiert allerdings nicht in diesen Modellen. Das Vorhandensein eines solchen Leiters würde auch die Erklärung der Daten unmöglich machen: Modelle, die diesen Leiter enthalten, erklären nicht die hohen scheinbaren Widerstände der B-Polarisation bei langen Perioden.

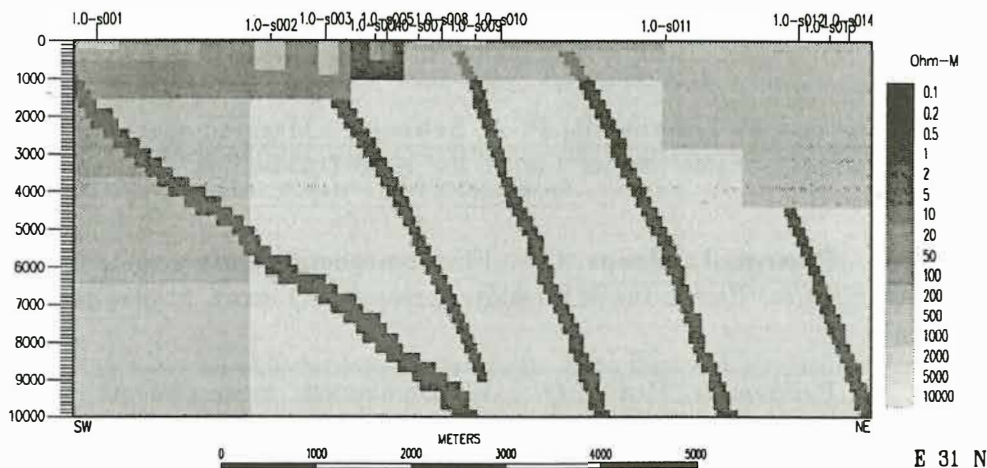


Abbildung 6: Variation des 2-D-Modells aus Abb. 4. Der mikroskopisch anisotrope Block ist durch eine makroskopische Struktur ersetzt. Dargestellt sind die oberen 10km des Modells.

Zusammenfassung

Die Existenz einer regionalen Struktur, deren Streichen Ost-West verläuft und in einer Tiefe von etwa 10km angesiedelt ist, wird durch die sehr konsistenten magnetischen Übertragungsfunktion entlang eines über 150km langen Nord-Süd-Profiles gefordert. Diese Struktur erstreckt sich etwa von Süd-Thüringen bis zum Nordrand des Bayrischen Waldes und weist eine abnehmende Leitfähigkeit von Nord nach Süd auf.

Aus den Impedanztensoren eines Südwest-Nordost verlaufenden Profils wurde ein Modell für die ZEV abgeleitet, dessen Hauptmerkmal ein stark anisotroper Block in der oberen bis mittleren Kruste ist. Nach Nordosten hin scheint dieser Block in größerer Tiefe zu sein. Die extrem hohe Anisotropie läßt dem Modell einer makroskopischen Struktur den Vorzug vor einem solchen mit mikroskopischer Anisotropie geben. Die in der Bohrung angetroffenen Nordwest-Südost streichenden Kataklysezonen, die mit Fluiden, Graphit und anderen leitfähigen Mineralen angereichert sind, müssen als die leitfähigen Dikes innerhalb des sehr hochohmigen Basements angesehen werden. Bedingt durch die Überdeckung in beiden Modellen – mikroskopischem und makroskopischem – ist eine Unterscheidung zwischen diesen aus den magnetotellurischen Impedanzen nicht möglich.

Der Widerspruch, der bei einer Überlagerung von regionalem und lokalem Modell entsteht, ist noch nicht geklärt. Eine mögliche Erklärung wäre die Unterbrechung des "10-km-Leiters" im Bereich der ZEV. Erste Modellierungsversuche mit einer 30km großen Lücke innerhalb der leitfähigen Struktur zeigen, daß der Einfluß dieser Änderung gegenüber dem ursprünglichen Modell in den magnetischen Übertragungsfunktionen nur im Periodenbereich $T < 10s$ eine wesentliche Rolle spielt. Die langen Perioden, die die Basis des regionalen Modells sind, werden durch diese Änderung nicht beeinflußt. Allerdings sind hier noch detailliertere Untersuchungen nötig, um diese Modellvariation zu verifizieren oder zu falsifizieren.

Literatur

- Brasse, H., G. Fischer, F. Leonhardt, P.-A. Schnegg** : Magnetotellurische Untersuchungen an der Fränkischen Linie und im Umfeld der KTB-Lokation, KTB-Report 88-12, 111-128, **1988**
- Cerv, V., Pek, J., Pecova, J., Praus, O.** : Electromagnetic measurements in the vicinity of the KTB drill site. Part I: the MV results across A 2-D array. *Studia geoph. et geod.* 37, **1993 a**
- Cerv, V., Pek, J., Pecova, J., Praus, O.** : Electromagnetic measurements in the vicinity of the KTB drill site. Part II: Magnetotelluric results. *Studia geoph. et geod.* 37, **1993 b**
- Eisel, M.** : Über die Superposition von lokalen und regionalen Leitfähigkeitsanomalien, untersucht anhand magnetotellurischer Messungen entlang eines Nord-Süd-Profiles im Nordosten der Oberpfalz. Diplomarbeit, Inst. f. Meteorologie und Geophysik d. J. W. Goethe-Univ. Frankfurt/M., **1990**
- Eisel, M.** : Effekte lateral anisotroper Leitfähigkeitsstrukturen in der MT. In: Haak, V. und Rodemann, H. (Hrsg.): Protokoll zum 14. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", Borkheide, **1992**.
- Hirschmann, G.** : On the geological interpretation of the 3-D seismic data with special regard to the information from the KTB holes. KTB-Report 92-5, **1992**
- Hofer, S.** : Ableitung der Leitfähigkeitsverteilung in der Erdkruste im Bereich der großtektonischen Grenze Rhenohherzynikum-Saxothuringikum östlich des Rheingrabens, aus einer gemeinsamen Interpretation flächenhafter Messungen der Magnetotellurik und erdmagnetischen Tiefensondierung. Diss. Fak. f. Geowiss.. Univ. München, **1990**
- Jensen, U., Karmann, R., Scharberth, J.** : Elektromagnetische Tiefensondierung 1987. KTB-Report 88-3, **1988**
- Jensen, U., Karmann, R., Martinez, M.** : Elektromagnetische Tiefensondierung im Umfeld der Kontinentalen Tiefbohrung, KTB-Report 90-3, **1990**
- Leonhardt, F.** : Audiomagnetotellurische Untersuchungen in der Oberpfalz. Diplomarbeit, Inst. f. Angew. Geophysik, Petrologie und Lagerstättenkunde der TU Berlin, **1987**
- LOTEM Arbeitsgruppe** : LOTEM-Messungen an der KTB. KTB Report 88-12, **1988**
- Rauen, A., E. Huenges, E. Lippmann, H.C. Soffel** : Elektrische Widerstandsmessungen an KTB-Bohrkernen. In: Haak, V., Homilius, J., (Hrsg.): Protokoll zum 13. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", Hornburg, **1990**
- Wannamaker, P.E., Stodt, J.A., Rijo, L.** : A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modelling. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 88, 277-296, **1987**