

Über die Modellierung der Induktionspfeile: Anisotropie- oder 3D-Modelle

B. Tezkan, N. Veese, M. Müller (Universität zu Köln)

1 Einleitung

Bei magnetotellurischen Stationen auf kristallinem Untergrund sind oft ausgeprägte tellurische Vorzugsrichtungen, und damit unterschiedliche Nebendiagonalelemente des Impedanzensors in optimal gedrehten Koordinaten, beobachtet worden. Hinzu kommt, daß die magnetischen Übertragungsfunktionen oft keinen Zusammenhang mit den elektrischen Übertragungsfunktionen zeigen. Die Induktionspfeile deuten auf eine Leitfähigkeitsstruktur hin, die unabhängig von der magnetotellurischen Streichrichtung zu sein scheint. Somit ist es nicht möglich, mit konventionellen 2D-Leitfähigkeitsmodellen das beobachtete Magnetfeld und das elektrische Feld mit einem Modell gleichzeitig zu erklären.

Auch in neueren Arbeiten (Wannamaker, 1996, Jones, 1996) ist nicht versucht worden, die beobachteten Induktionspfeile mitzumodellieren. In einigen Arbeiten (Tezkan, 1988, Hofer, 1990) wurde nur die größere Komponente der Übertragungsfunktionen für die Vertikalkomponente des Magnetfeldes berücksichtigt, die kleinere Komponente wurde bei der Modellierung ignoriert. Durch die Entwicklungen der Modellierungssoftware in den letzten Jahren ('Dünne-Schicht-Algorithmus' mit der Berücksichtigung einer anisotropen Schicht von Schmucker (1994), 3D-Modellierungsprogramm von Mackie und Madden (Mackie et al., 1993) und 3D-Programm mit Anisotropie von Weidelt (1996) können theoretische Induktionspfeile berechnet und mit den beobachteten verglichen werden (Ritter, 1995).

Im folgenden werden zunächst an einer Station im Schwarzwald die oben genannten Schwierigkeiten für eine gemeinsame Interpretation magnetischer und elektrischer Übertragungsfunktionen demonstriert. Ziel ist es, ein Modell zu finden, das die im Schwarzwald beobachteten Induktionspfeile zusammen mit den elektrischen Übertragungsfunktionen gleichzeitig erklärt. Dazu werden verschiedene Modellansätze vorgestellt.

2 Die Übertragungsfunktionen der Stationen im Schwarzwald

Die in diesem Bericht vorgestellten Daten von den Stationen im Schwarzwald (Tezkan, 1988) sind nicht neu. Sie zeigen aber typische Eigenschaften von MT-Messungen auf Kristallin, sodaß die hier diskutierten Modellansätze zur Interpretation eine allgemeine Gültigkeit haben könnten.

In Abb. 1 sind die Induktionspfeile nach Schmucker für eine ausgewählte Periode von 100 s an 8 Stationen im Schwarzwald dargestellt. Die Induktionspfeile ($\underline{u} = z_H \hat{x} + z_H \hat{y}$, mit den Einheitsvektoren \hat{x} und \hat{y} in Nord- und Ostrichtung) zeigen von den gutleitenden Rheingrabsedimenten weg. Aufgrund der Streichrichtung des Rheingrabs kann man annehmen, daß die beobachtete

z_D Komponente viel größer sein sollte als z_H . Dies ist für alle beobachteten Perioden (10 s – 600 s) auch der Fall, allerdings sind für diese Perioden auch kleinere Z-Komponenten gemessen worden, die mit der H-Komponente korreliert sind. Es müßte also eine regionale, OW-streichende, gutleitende Anomalie in einer unbekanntenen Tiefe unterhalb des Schwarzwaldkristallins existieren. Da die beobachteten z_H -Werte (Abb. 1) negativ sind, kann man annehmen, daß die Leitfähigkeit dieser Anomalie von Norden nach Süden abnehmen müßte. Mit Modellrechnungen (Kap. 3) soll dieses Verhalten untersucht werden, da bei der 2D-Modellierung der Schwarzwald Daten bis jetzt nur die z_D -Komponente berücksichtigt wurde.

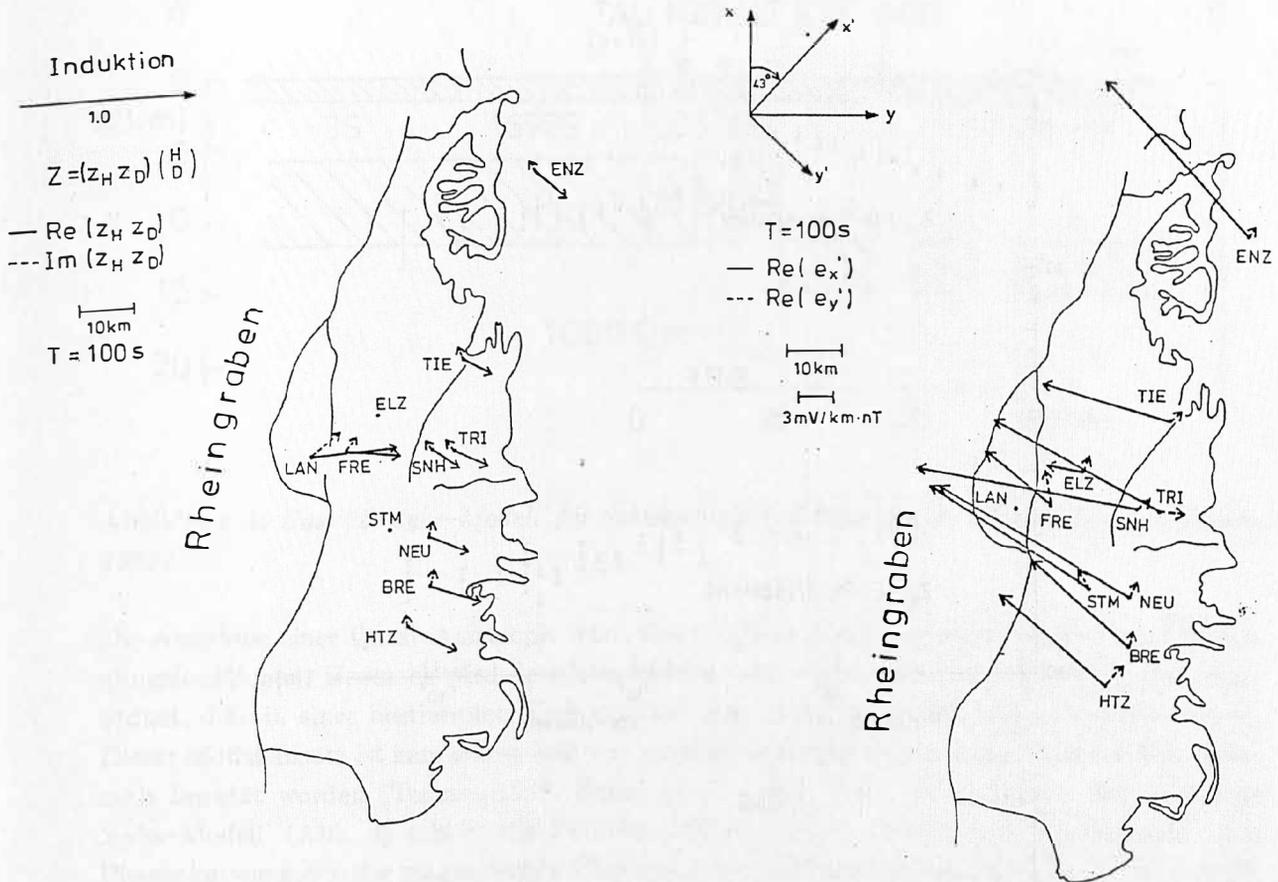


Abbildung 1: Induktionspfeile der Stationen im Schwarzwald für eine Periode von 100 s.

Abbildung 2: Tellurische Vektoren für die Schwarzwaldstationen für eine Periode von 100 s.

Abb. 2 zeigt die tellurischen Übertragungsfunktionen für eine Periode von 100 s im optimal gedrehten Koordinatensystem in Form von tellurischen Vektoren, wobei die regionale Zweidimensionalität des Schwarzwaldkristallins sehr gut zu erkennen ist. Die regional induzierten tellurischen Ströme fließen in nordwestlicher Richtung und ihre Amplituden sind zehnmal größer als die Ströme senkrecht dazu. Es existiert eine große aber gleichbleibende Anisotropie. Die Schwierigkeit der Interpretation dieser Beobachtungen ist in Abb. 3 deutlicher zu erkennen. Auf dieser Abbildung sind die beobachteten scheinbaren Widerstände und Phasen in optimal gedrehten Koordinaten für die Schwarzwaldstation BRE dargestellt. Die um Zehnerpotenzen auseinander liegenden scheinbaren Widerstandskurven sind typisch für Kristallinstationen. Der

Abfall der scheinbaren Widerstandskurve der E-Polarisation zwischen 10 s und 100 s wird als guter Leiter unter einem schlechtleitenden Kristallin interpretiert. Typisch für Kristallinstationen sind auch die Phasen. Die gemessenen Phasen der E-Polarisation sind deutlich größer als 45° , während die Phasen der B-Polarisation kleiner als 45° sind. Die von 70° auf 45° abfallenden Phasen der E-Polarisation sind ein eindeutiges Indiz für eine gutleitende Schicht innerhalb des Schwarzwaldkristallins.

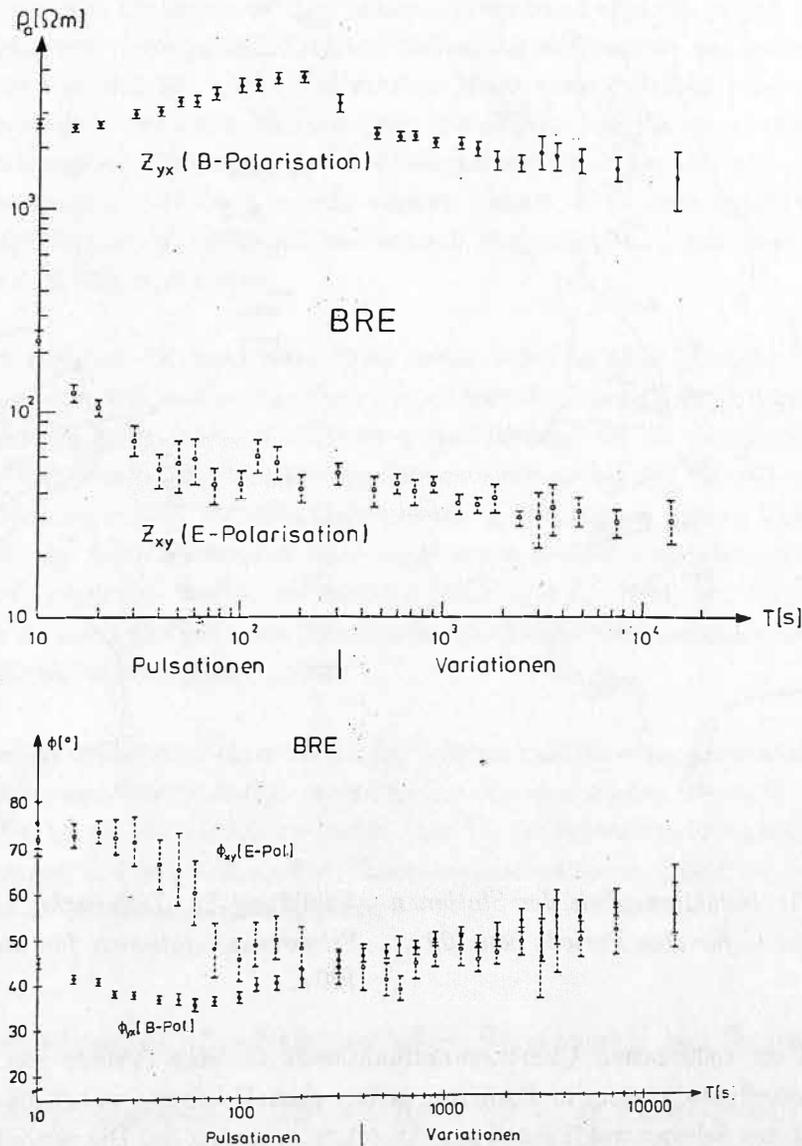


Abbildung 3: Scheinbare Widerstands- und Phasenkurven für die Schwarzwaldstation BRE.

3 Die Modellansätze zur Interpretation der Übertragungsfunktionen

A Das 'dyke-Modell'

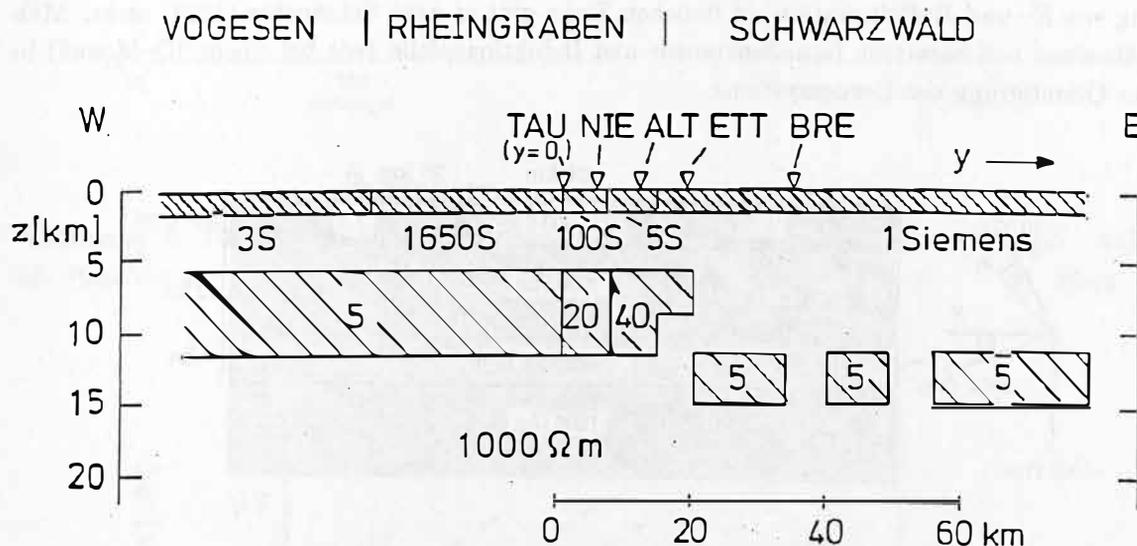


Abbildung 4: Das '2D-dyke-Modell' für Schwarzwald und Rheingraben (Schmucker und Tezkan, 1988).

Die Annahme einer Quasi-Anisotropie wäre eine mögliche Erklärung der beobachteten Übertragungsfunktionen. Demnach wird dem Krustenleiter eine richtungsabhängige Leitfähigkeit zugeordnet, d.h. in einer bestimmten Tiefe existiert eine Reihe von guten und schlechten Leitern. Dieser Modellansatz ist zum ersten Mal von Schmucker (1986) vorgeschlagen und seitdem mehrmals benutzt worden (Tezkan, 1988, Kellet et al. 1992, Eisel, 1992, 1995). Das sogenannte 'dyke-Modell' (Abb. 4) erklärt die Periodenabhängigkeit der scheinbaren Widerstands-, der Phasenkurven sowie die magnetischen Übertragungsfunktionen (Schmucker und Tezkan, 1988). Mit diesem Modell gelang es zum ersten Mal, die Periodenabhängigkeit der scheinbaren Widerstände der B-Polarisation im Schwarzwald mit Leitfähigkeitsmodellen zu erklären.

B 'Dünne-Schicht-Algorithmus' mit Anisotropie

Sowohl die konventionellen 2D-Leitfähigkeitsmodelle als auch die '2D-dyke-Modelle' unterliegen einer Beschränkung: Die Streichrichtung der 2D-Struktur (hier der Grabenverlauf) stimmt mit der Richtung extremaler Leitfähigkeit der Tiefenstruktur im Schwarzwald nicht überein. Der Verlauf des Grabens ist ca. 20° NNO, das optimale Koordinatensystem für das tellurische Feld im Schwarzwald ist 45° NO. Die Auswirkung dieser Schiefwinkeligkeit auf die induzierten tellurischen Felder war nicht bekannt.

Um diesen Effekt zu studieren, also um den Winkel zwischen dem Grabenverlauf und den dykes zu behandeln, wurden mit dem 'Dünne-Schicht-Algorithmus' von Schmucker (1994) Modelle

gerechnet. Das Endmodell (Abb. 5) besteht aus einer inhomogenen dünnen Schicht an der Erdoberfläche über einem geschichteten horizontalen Halbraum. Für die Grabensedimente wurde ein 20 km breiter Streifen mit 1000 S gewählt. Der Leitwert außerhalb des Grabens beträgt 3 S. Die Tiefenstruktur besteht aus horizontalen Schichten, wobei der Krustenleiter eine horizontal-anisotrope Leitfähigkeit erhält. Die Hauptachsen des Widerstandstensors sind gegenüber dem Modell-Koordinatensystem um einen Winkel von 30° (siehe Abb. 5) gedreht. Eine Unterscheidung von E- und B-Polarisation im üblichen Sinne gibt es nach Schmucker (1994) nicht. Man erhält einen voll besetzten Impedanztensor und Induktionspfeile (wie bei einem 3D-Modell) in jeder Orientierung des Bezugssystems.

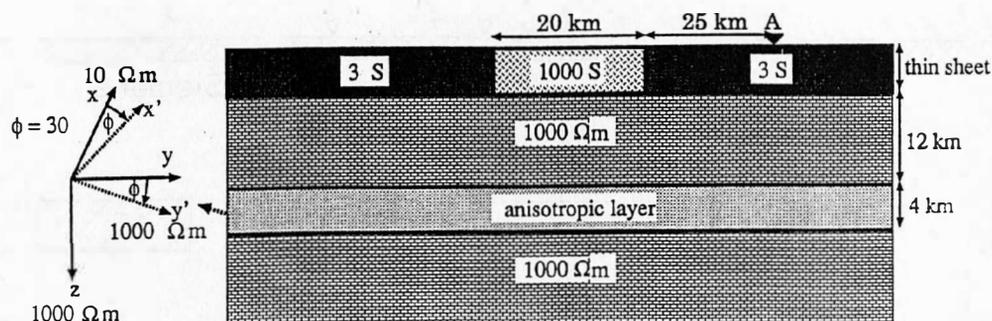


Abbildung 5: 'Dünne Schicht' Modell für Schwarzwald und Rheingraben. Der Krustenleiter in 12 km ist anisotrop.

Abb. 6 zeigt die berechneten scheinbaren Widerstände und Phasen für die Station A (Abb. 5), die 25 km vom Grabenrand entfernt liegt. Damit sollten die Beobachtungen an der Station BRE (Abb. 1 und Abb. 2) simuliert werden. Man erreicht aufspaltende scheinbare Widerstandskurven für die E- und B-Polarisation als Funktion der Periode. Auch die berechneten Phasenkurven zeigen eine Aufspaltung. Mit diesem Modellansatz kann man das tellurische Feld im Schwarzwald problemlos modellieren. Die Felddaten (Abb. 3) zeigen ähnliche Periodenabhängigkeiten wie die berechneten.

Abb. 7 zeigt einen Vergleich zwischen den beobachteten und berechneten Induktionspfeilen für die Station BRE (Abb. 1). Die berechneten Induktionspfeile weisen für alle Perioden in nordwestliche Richtung und stimmen überhaupt nicht mit den Beobachtungen überein. Mit diesem Modellansatz lassen sich die tellurischen und magnetischen Übertragungsfunktionen offenbar nicht gleichzeitig erklären.

C Die 3D-Modellrechnungen

Ziel der 3D-Modellrechnungen ist es, ein Leitfähigkeitsmodell zu finden, das die beobachteten Induktionspfeile, die scheinbaren Widerstände und die Phasen gleichzeitig erklärt, was mit den Modellansätzen A und B nur teilweise möglich ist.

Zahlreiche Vorwärtsmodellierungen wurden mit dem Programm von Mackie und Madden (1994)

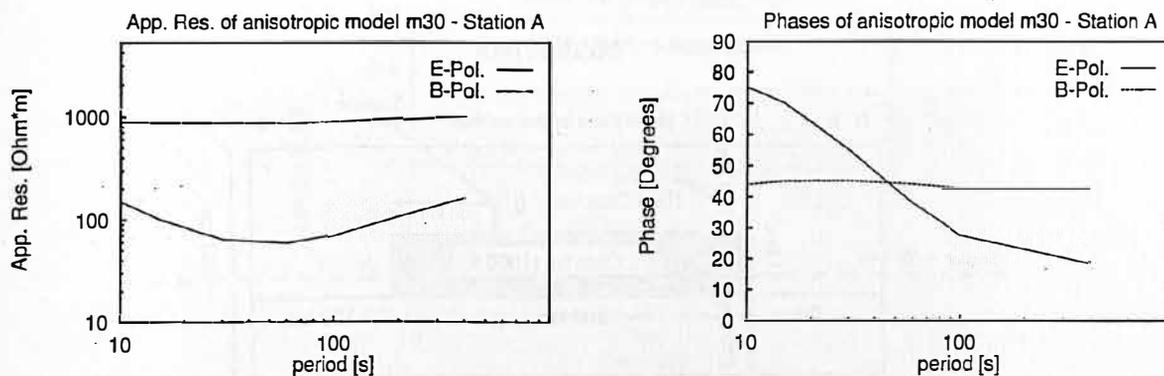


Abbildung 6: Die theoretischen Kurven des scheinbaren Widerstandes und der Phase (Abb. 5) als Funktion der Periode für eine 25 km vom Grabenrand entfernte Station.

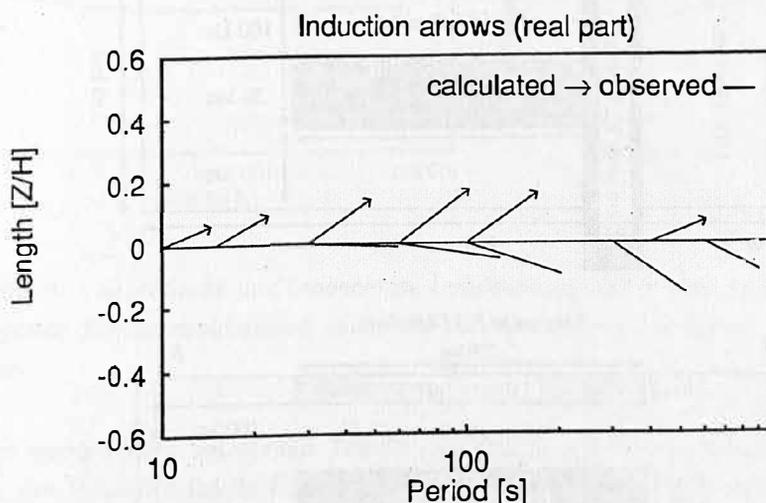


Abbildung 7: Theoretische (Abb. 5) und beobachtete Induktionspfeile für eine 25 km vom Grabenrand entfernte Station.

durchgeführt. Es wurde zuerst Wert darauf gelegt, den Realteil der gemessenen Induktionspfeile an den Schwarzwaldstationen zu modellieren.

Die gutleitenden Rheingrabensedimente an der Erdoberfläche im Osten reichen alleine nicht aus, um die beobachtete SW-Richtung der Induktionspfeile mit 3D-Modellen zu reproduzieren. Aus den 3D-Modellierungen der Induktionspfeile von Messungen im Norden Chiles (Müller, 1995) war abzuleiten, daß eine Zone erhöhter Leitfähigkeit in einer zunächst unbekanntem Tiefe im Norden des Meßgebietes existieren muß, um negative z_H -Modell-Übertragungsfunktionen für alle Stationen im Schwarzwald zu erhalten. Die Fortsetzung des Krustenleiters nach Süden unterhalb den Sedimenten ist auch notwendig, denn dadurch erreicht man stärker aufspaltende Phasen- und scheinbare Widerstandskurven, die den Beobachtungen entsprechen. Der gute Leiter im Norden ist hypothetisch und muß mit weiteren Messungen bestätigt werden.

In Abb. 8 ist die vorläufige Modellgeometrie vorgestellt, die die Daten am besten erklärt. Im oberen Teil der Abbildung sieht man in der Aufsicht die Rheingrabensedimente und das um-

Model .g43

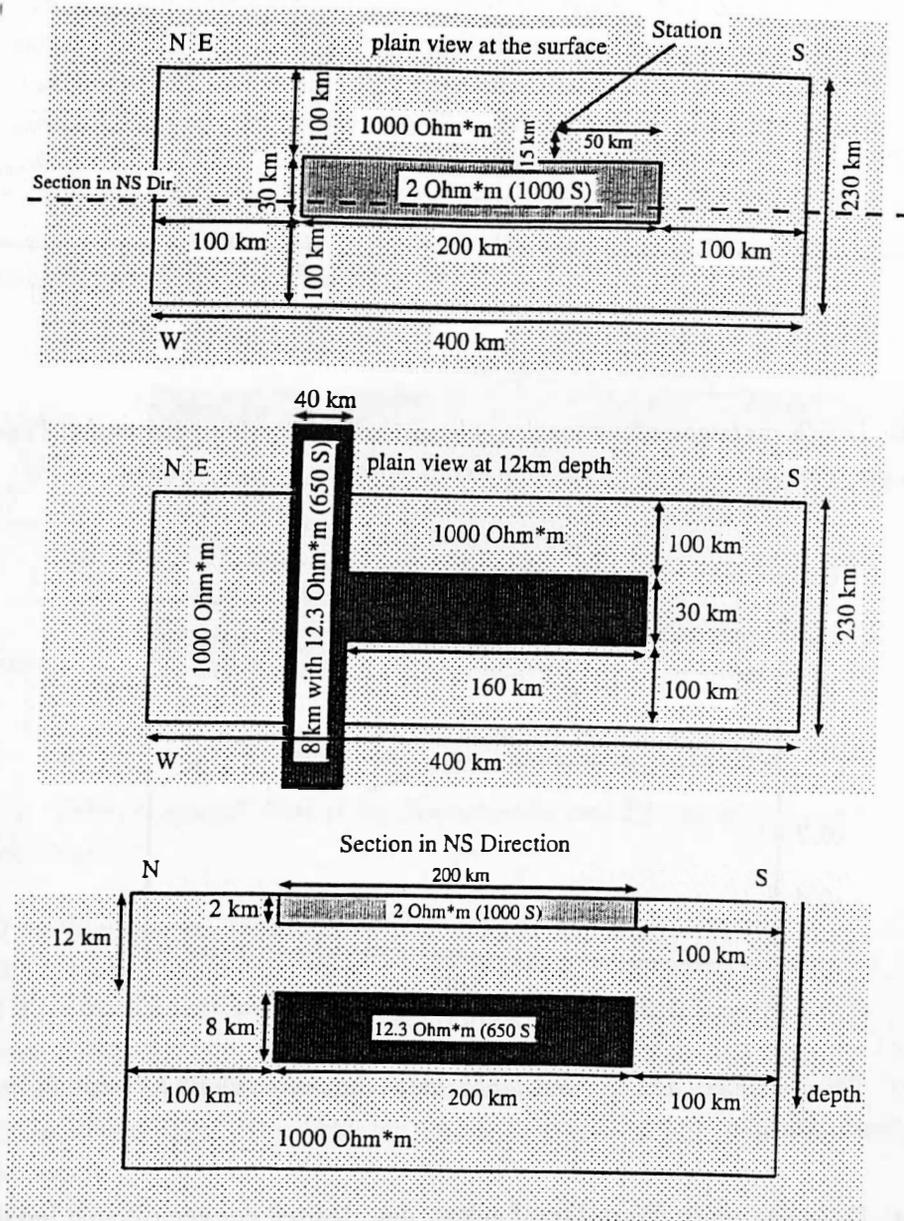


Abbildung 8: Das vorläufige 3D-Modell für Schwarzwald und Rheingraben.

liegende Kristallin von Schwarzwald und Vogesen. Die Modelldaten und die Beobachtungen werden für eine Station vorgestellt, die 15 km vom Grabenrand entfernt liegt. In der Mitte der Abbildung ist ein Horizontalschnitt in 12 km Tiefe dargestellt. Hier erkennt man den guten, T-förmigen Leiter, der die negativen z_H -Übertragungsfunktionen produziert. Bis jetzt wurden keine weiteren alternativen 3D-Modelle gefunden, um die beobachtete südöstliche Richtung der Induktionspfeile im Schwarzwald zu reproduzieren.

Abb. 9 zeigt die Realteile der Induktionspfeile, sowie die scheinbaren Widerstands- und Phasenkurven für die Nebendiagonalelemente des Impedanztensors, die aus dem Modell in Abb. 8

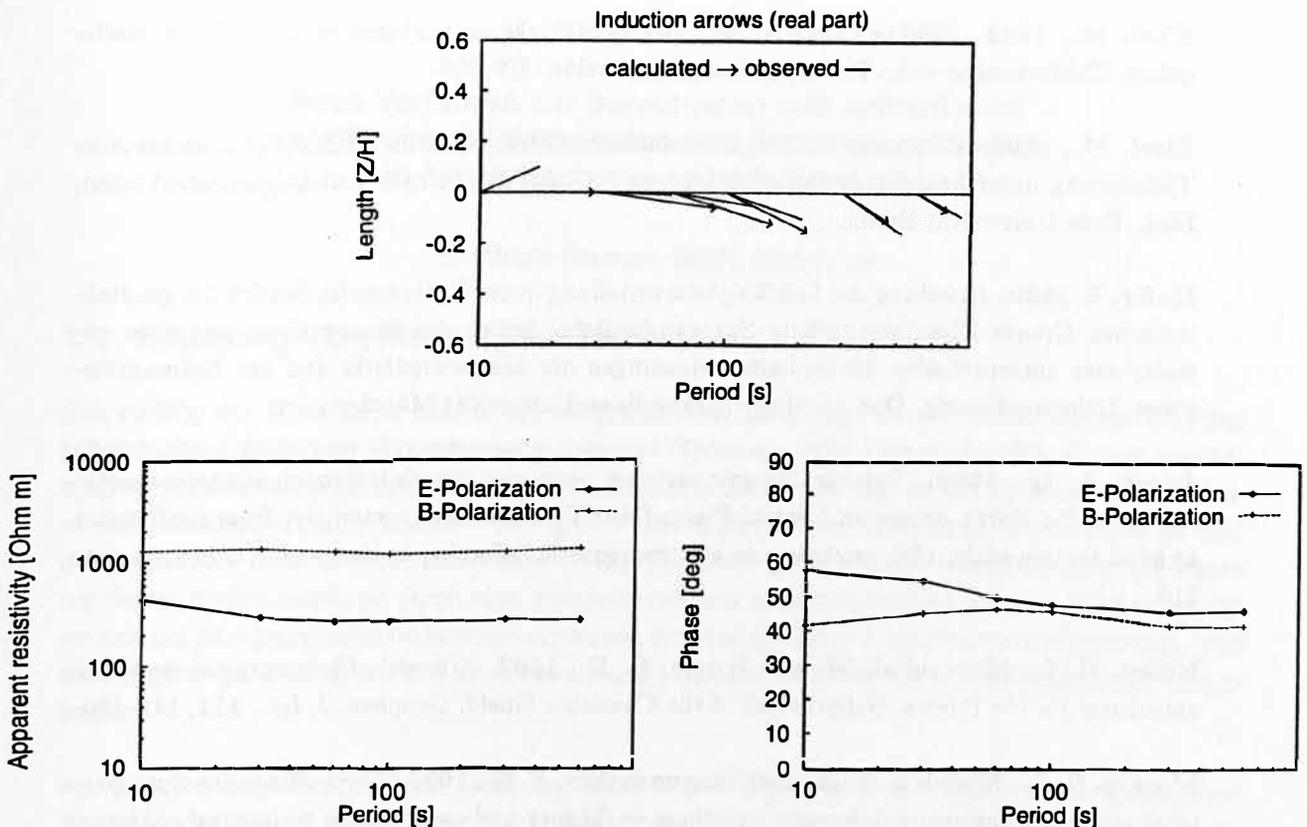


Abbildung 9: Theoretische und beobachtete Induktionspfeile für eine 15 km vom Grabenrand entfernt liegende Schwarzwaldstation sowie die theoretischen scheinbaren Widerstands- und Phasenkurven.

berechnet worden sind. Im oberen Teil der Abbildung werden die gemessenen und berechneten Realteile der Induktionspfeile für eine 15 km vom Grabenrand entfernt liegende Schwarzwaldstation verglichen. Die Anpassung ist sowohl für die Amplitude als auch für die Richtung im Periodenbereich von 10 s bis 600 s ganz gut. Auch die Periodenabhängigkeit der theoretischen Phasen und scheinbaren Widerstände stimmt mit den beobachteten (Abb. 3) sehr gut überein. Somit ist ein erstes vorläufiges Modell gefunden worden, das den Großteil der Beobachtungen erklären kann.

4 Zusammenfassung

- Die Periodenabhängigkeit der scheinbaren Widerstands- und Phasenkurven sowie die Anomalie des magnetischen Vertikalfeldes im Schwarzwald konnten mit '2D-dyke-Modellen' erklärt werden.
Da die magnetischen und elektrischen Übertragungsfunktionen unterschiedliche Koordinatensysteme haben und nicht zusammenpassen, haben die berechneten 2D-Modelle eine eingeschränkte Aussagekraft.
- Dieses Problem wurde mit der Benutzung des 'Dünne-Schicht-Algorithmus' berücksichtigt, wobei eine anisotrope Schicht in 12 km Tiefe unter dem Schwarzwaldkristallin angenommen wurde. Mit diesem Modelltyp kann das beobachtete magnetische und das elektrische Feld getrennt erklärt werden.
- Die ersten 3D-Modellstudien zeigen die Möglichkeiten für eine gemeinsame Interpretation aller beobachteten Übertragungsfunktionen.

5 Literatur

- Eisel, M., 1992. Effekte lateraler anisotroper Leitfähigkeitsstrukturen in der MT, 14. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Borkheide, 279–298.
- Eisel, M., 1995. Interpretation magnetotellurischer Messungen im Umfeld der kontinentalen Tiefbohrung unter besonderer Berücksichtigung lateraler anisotroper Leitfähigkeitsstrukturen, Diss., Freie Universität Berlin.
- Hofer, S. 1990. Ableitung der Leitfähigkeitsverteilung in der Erdkruste im Bereich der großtektonischen Grenze Rhenoharzynikum–Saxothuringikum östlich des Rheingrabens aus einer gemeinsamen Interpretation flächenhafter Messungen der Magnetotellurik und der Erdmagnetischen Tiefensondierung, Diss., Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Jones, A. G., 1996. Paleoproterozoic tectonic processes revealed through electromagnetic studies of the North American Central Plains (NACP) conductivity anomaly: from continental to hand sample scale, 13th workshop on electromagnetic induction in the earth, Onuma, Japan, 119.
- Kellet, R. L., Mareschal, M. and Kurtz, R. D., 1992. A model of lower crustal electrical anisotropy for the Pontiac Subprovince of the Canadian Shield, *Geophys. J. Int.*, 111, 141–150.
- Mackie, R. L., Madden, T. R. and Wannamaker, P. E., 1993. Three-dimensional magnetotelluric modelling using difference equations — Theory and comparisons to integral equation solutions, *Geophysics*, 58, No. 2, 215–226.
- Müller, M., 1995. Mehrdimensionale Modellierung von magnetotellurischen und erdmagnetischen Meßdaten aus den Anden Nordchiles unter besonderer Berücksichtigung des Küsteneffektes und gut leitender Schichten, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln.
- Schmucker, U., 1986. A regional quasi-anisotropy in West Germany, 8th workshop on electromagnetic induction in the earth and moon, Neuchatel, 1–3.
- Schmucker, U., 1994. 2D-Modellierungen zur Induktion in inhomogenen dünnen Deckschichten über anisotropen geschichteten Halbräumen, 15. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Höchst, 3–26.
- Schmucker, U. und Tezkan, B., 1988. Die elektrische Leitfähigkeit der unteren Kruste im südlichen Schwarzwald und Rheingraben, Arbeitsbericht zum DFG-Vorhaben Schm 101/14–2 im Schwerpunkt 'Untere Kruste', Institut für Geophysik, Göttingen.
- Ritter, O., 1995. An audiomagnetotelluric investigation of the Southern Upland Fault: novel instrumentation, field procedures and 3D modeling, Ph. D Thesis, University Edinburgh.
- Tezkan, B., 1988. Electromagnetic sounding experiments in the Schwarzwald central gneiss massif, *J. Geophys.*, 62, 109–118.
- Wannamaker, P. E., Johnston, J. M. and Booker, J. R., 1996. Hydrocarbon source and reservoir prospects beneath the sevier overthrust belt, Utah and Nevada, U.S.A.: greater possibilities based on MT profiling, 13th workshop on electromagnetic induction in the earth, Onuma, Japan, 119.
- Weidelt, P., 1996. Electromagnetic induction in the three dimensional anisotropic earth, 13th workshop on electromagnetic induction in the earth, Onuma, Japan, 90.