

Magnetotellurik und erdmagnetische Tiefensondierung bei Rittsteig, Bayern

Till Kraft¹, Ute Weckmann², Oliver Ritter² und Andreas Junge¹

Einleitung

Im Herbst 1998 sind in einer Zusammenarbeit zwischen dem GFZ Potsdam und der Universität Frankfurt a. Main nahe der Ortschaft Rittsteig (Böhmerwald, Bayern) magnetotellurische Messungen und erdmagnetische Tiefensondierungen mit SPAM Mk III-Datenloggern im Frequenzbereich zwischen maximal 1kHz und 0.001Hz durchgeführt worden. Im Folgenden werden die Ergebnisse von zwölf Stationen vorgestellt. Mit 2D Modellrechnungen soll überprüft werden, inwieweit existierende Eigenpotentialmodelle durch die Magnetotellurik bestätigt und erweitert werden können.

1 Der Messaufbau und das Messgebiet

Das Messgebiet befindet sich unmittelbar nordwestlich der 1994 abgeteuften Forschungsbohrung Rittsteig (FBR, Rechtswert: $45^{\circ}76060$, Hochwert: $54^{\circ}58120$, 705m NN). Eigenpotentialmessungen, die vom Frankfurter Institut für Meteorologie und Geophysik in den Vorjahren durchgeführte worden waren, zeigen nördlich der Bohrung starke Anomalien. Über die mit $\sim -750\text{mV}$ markanteste Anomalie im Nordosten des Bergrückens „Hängend“ (vgl. Abbildung 1) verläuft das NW-SO streichende MT Profil. Für eine Detailvermessung der Anomalie und um Aussagen über ihre Tiefenerstreckung machen zu können, haben die MT-Stationen einem maximalen Abstand von ca. $300\text{-}400\text{m}$.

Das Messgebiet liegt hinsichtlich seiner geologischen Einordnung im südlichsten Abschnitt der Zone von Teplá-Taus (ZTT), die dem Teplá-Barrandium der Böhmisches Masse zugehört. Es befindet sich damit in unmittelbarer Nachbarschaft des Grenzbereichs zum Moldanubikum. Im Raum Rittsteig trennt die Hoher Bogen-Scherzone das Teplá-Barrandium gegen das Moldanubikum ab (BUES *et al.* 1998). Dominierende Gesteine im Messgebiet sind feinkörnige Amphibolite und grobkörnige Gabbro-Amphibolite sowie untergeordnet Biotit-Plagioklas-Gneise, also metamorphe Gesteine, die normalerweise eine geringe Leitfähigkeit besitzen.

In der FBR sind bis hinab zur Endteufe ($\sim 584\text{m}$, bei einer vertikalen Tiefe von $\sim 426\text{m}$) sind drei meter bis zehnermeter mächtige Zonen gefunden worden, in denen Graphit in verbundener Form auf Scherflächen auftritt (ARTMANN 1999). Elektromagnetische und elektrische geophysikalische Messverfahren sind besonders geeignet, gutleitende Scherzonen näher zu untersuchen. Die in diesem Gebiet sich befindenden graphitisierten Scherzonen in (hoch)metamorphen Gesteinen sind vergleichbar denen der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) in der Zone von Erbdorf-Vohenstrauß – einem der ZTT ähnlichen Krustensegment (FRANKE 1990). Dort konnte gezeigt werden, dass Graphitisierungen sehr niedrige spezifische Widerstände (bis zu $0.1\Omega\text{m}$) im Bereich der Scherzonen bedingen (ELEKTRO GROUP 1997). Mittels der Messung des nicht-linearen IP-Effektes wiesen BIGALKE & JUNGE (1999) eine Verbindung zwischen einer der graphitisierten Bereiche der FBR (bei Teufenmeter 310m) und der Eigenpotential-Anomalie (a) nördlich deren Ansatzpunkt nach (vgl. Abbildung 1).

¹Institut für Meteorologie und Geophysik der J.W. Goethe-Universität Frankfurt a. Main

²GeoForschungsZentrum Potsdam

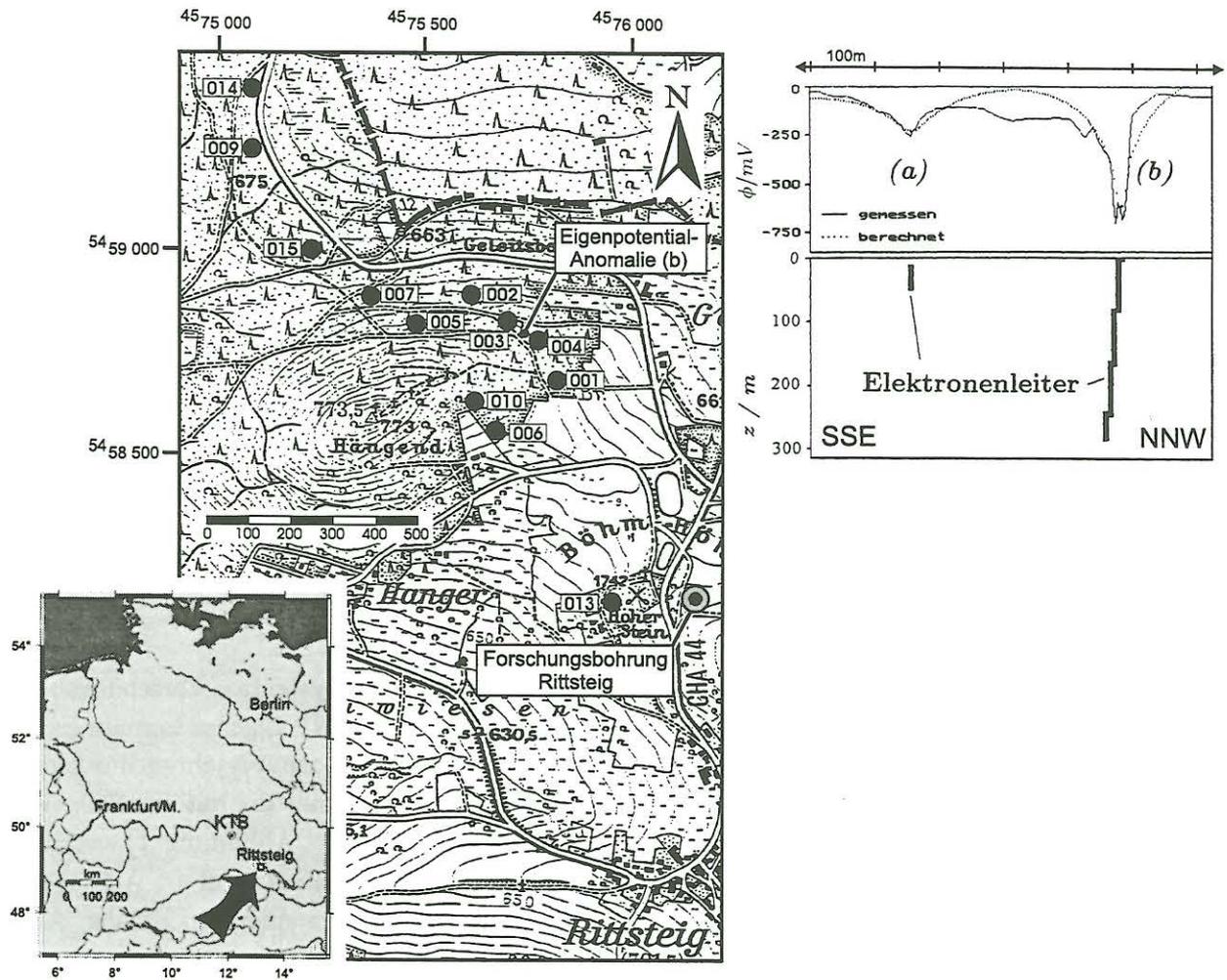


Abbildung 1: Lage des Messgebietes bei Rittsteig (Böhmerwald, Bayern) nahe der Grenze zur Tschechischen Republik (Ausschnitt aus der TK25, Blatt 6744 Rittsteig). Neben der Lage der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) und der Forschungsbohrung Rittsteig ist die Eigenpotential-Anomalie (b) eingezeichnet. Der Verlauf des Eigenpotentials entlang eines SSE-NNW-Profiles sowie dessen Anpassung durch ein Modell sind rechts dargestellt (BIGALKE, pers. Mitteilung).

2 Die Messergebnisse

Aus den registrierten Zeitreihen wurden die magnetotellurische Impedanz sowie die magnetischen Übertragungsfunktionen zwischen der vertikalen und den horizontalen Magnetfeldkomponenten berechnet. Aufgrund starker Störungen wurden die Zeitreihen einer Notch-Filterung der Netzfrequenz und ihrer Multiplen unterzogen. Trotz einer robusten Analyse (nach JUNGE 1993) ergeben sich in einem breiten Frequenzbereich stark streuende Übertragungsfunktionen. Verbesserungen der Übertragungsfunktionen konnten mit einer robusten Remote Reference Analyse für den Frequenzbereich von 100 Hz bis 1 Hz erreicht werden. Für den Frequenzbereich von 1 Hz bis etwa 0.1 Hz ist eine Vorselektion der Effekte für die robuste Analyse anhand Energie- und Kohärenzkriterien im Frequenzbereich vorgenommen worden. Die Übertragungsfunktionen bleiben jedoch besonders zu längeren Perioden hin stark gestört.

Die Induktionspfeile nach WIESE an den einzelnen Stationen zeigen einen deutlichen Richtungswechsel zwischen den Stationen 003 und 004, weshalb sich die Stationen aufgrund der Richtung

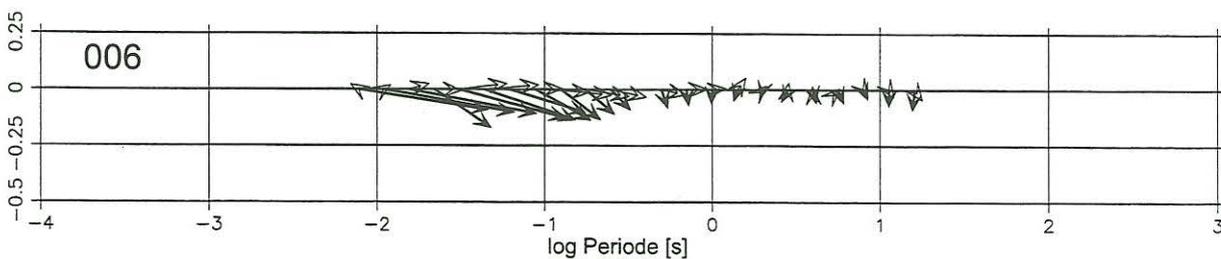
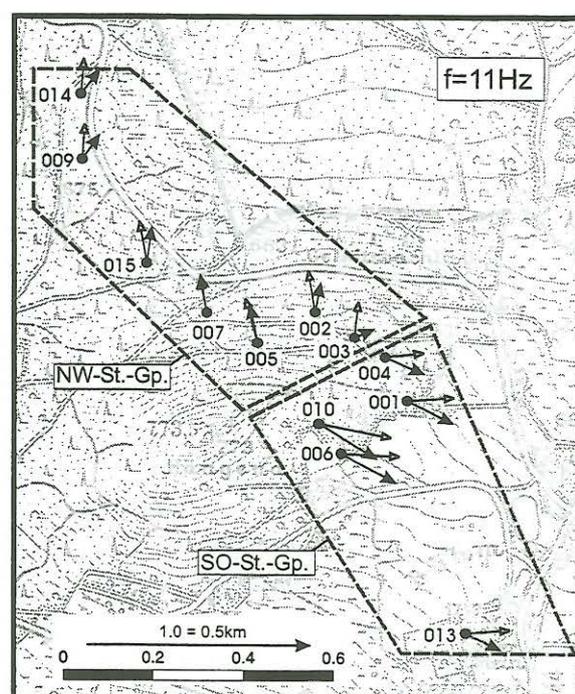
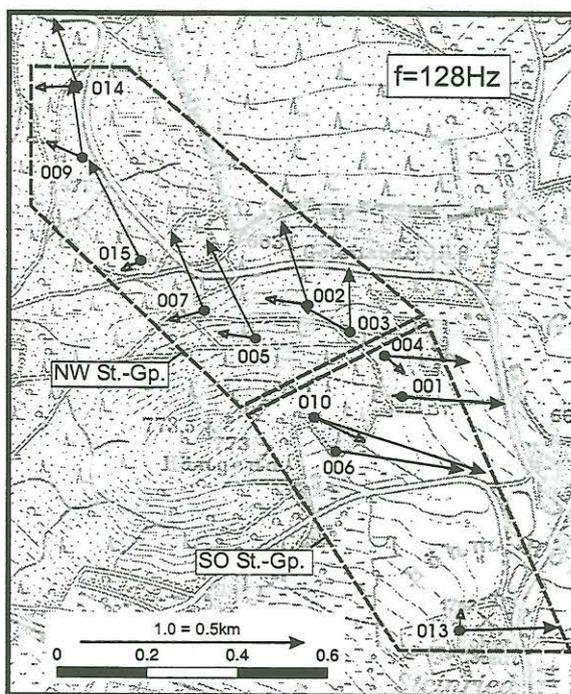
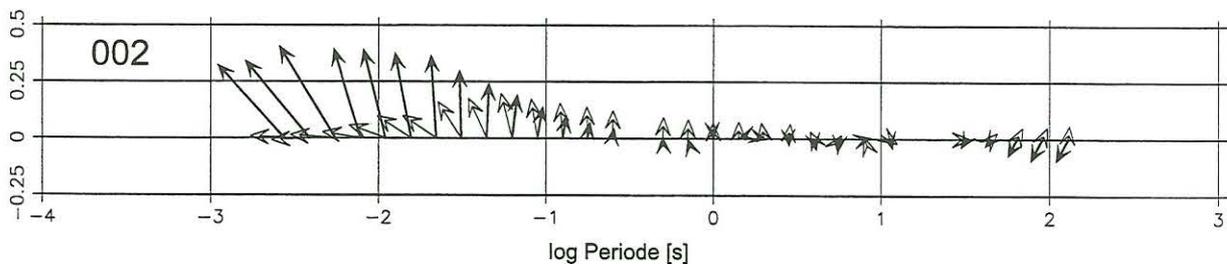


Abbildung 2: Induktionspfeile nach *Wiese* (Realpfeile gefüllt, Imaginärpfeile offen) der nordwestlichen Station 002 und der südöstlichen Station 006. Die Darstellung der Induktionspfeile aller Stationen für zwei Frequenzen zeigt eine starke Richtungsänderung der Realpfeile beim Übergang von NW nach SO.

der Induktionspfeile einer nordwestlichen und eine südöstlichen Gruppe zuordnen lassen. Dazwischen befindet sich ein lateraler Leitfähigkeitskontrast (Abbildung 2). Im gesamten Messgebiet klingen die Real- und Imaginärpfeile ab einer Periode von 1s ab und bleiben auch zu langen Perioden verschwindend klein. Die Realpfeile besitzen im Frequenzbereich zwischen 100-300Hz ihr Maximum von 0.3 bis 0.8. Für die nordwestlichen Stationen zeigen die Realpfeile in diesem Frequenzbereich nach NW, für die südöstlichen Stationen nach OSO. Abbildung 2 zeigt unter anderem die Induktionspfeile an den Stationen 002 im Nordwesten und 006 im Südosten des Messgebietes. Die Imaginärpfeile sind an den meisten Stationen nicht parallel oder antiparallel zu den Realpfeilen. Dies sowie das nicht vollständige Umklappen der Realpfeile zwischen den Stationen 003 und 004 deutet auf eine kompliziertere 3D Leitfähigkeitsstruktur hin.

Die scheinbaren spezifischen Widerstands- und Phasenkurven (siehe Abbildung 5 und 6) zeigen im gesamten Messgebiet vergleichbare Verläufe. Für Perioden größer 0.01s steigen die unrotierten Phasenwerte von 45-60° kontinuierlich an und erreichen Werte von über 75°. Insgesamt streuen die Werte zu langen Perioden stark, jedoch zeigt sich deutlich, dass die Phasen der YX-Polarisation an den Stationen 003 und 004 nahe des Leitfähigkeitskontrastes den Quadranten zu längeren Perioden verlassen. Die ρ_a -Kurven fallen für beide Polarisationen zu längeren Perioden auf Werte kleiner 10 Ωm ab.

Obwohl die Induktionspfeile als auch ρ_a und Phase durch dreidimensionale Leitfähigkeitsstrukturen beeinflusst sind, ist eine zweidimensionale von SW nach NO verlaufende Struktur prinzipiell für den Richtungswechsel in den Induktionspfeilen verantwortlich.

Eine Bestimmung des Streichwinkels der 2D-Struktur anhand der magnetotellurischen Impedanz ist sowohl nach BÄHR als auch nach SWIFT vorgenommen worden. Die Analyse nach BÄHR war aufgrund der starken Störungen über den gesamten Frequenzbereich unsicher, bei der Analyse nach SWIFT fanden sich unterhalb 1s stabile Werte, die je nach Station zwischen etwa -45° und -30° lagen. Dies ist konsistent mit der Richtung der Realpfeile der nordwestlichen Stationen. Aus diesem Grund sind die Daten um -35° gegen Nord gedreht, wodurch die XY-Komponente der B-Polarisation und die YX-Komponente der E-Polarisation entspricht.

3 Interpretation durch ein 2D-Modell und Schlussfolgerungen

Zur Interpretation der Messergebnisse ist mittels einer Vorwärtsmodellierung mit dem Programm PW2DI von WANNAMAKER (1990) das in Abbildung 3 dargestellte Modell entwickelt worden. Dabei erfolgte die Modellfindung zunächst unabhängig von dem in Abbildung 1 dargestellten Eigenpotentialmodell von BIGALKE. Das Modell erstreckt sich entlang eines mit -35° gegen Nord gedrehten Profils. Die Anpassung der Modellantworten an die Komponente der Induktionspfeile in Profilrichtung sowie an die magnetotellurischen Sondierungskurven der E- und B-Polarisation sind in den Abbildungen 4 bis 6 dargestellt.

Das Modell besteht aus zwei wesentlichen Teilen: zum einen der mit der Tiefe kontinuierlich zunehmenden Leitfähigkeit und zum anderen der nach SSO hin einfallenden Zone hoher Leitfähigkeit im obersten Krustenbereich.

Die beiden oberflächennahen Viertelräume dienen zunächst zur Erklärung des insgesamt etwas niedrigeren Niveaus der ρ_a -Kurven der B-Polarisation an den Stationen im Nordwesten (ab Station 005) gegenüber den Stationen im Südosten. Die mit der Tiefe zunehmende Leitfähigkeit ist bedingt durch den generellen Anstieg der Phasen-Kurven und den Abfall der ρ_a -Kurven, der auch nach der Rotation in Streichrichtung noch gegeben ist. Die im Modell gewählte Schichtenfolge zeigt eine kontinuierliche Abnahme des spezifischen Widerstandes von 500 bzw. 1000 Ωm im ober-

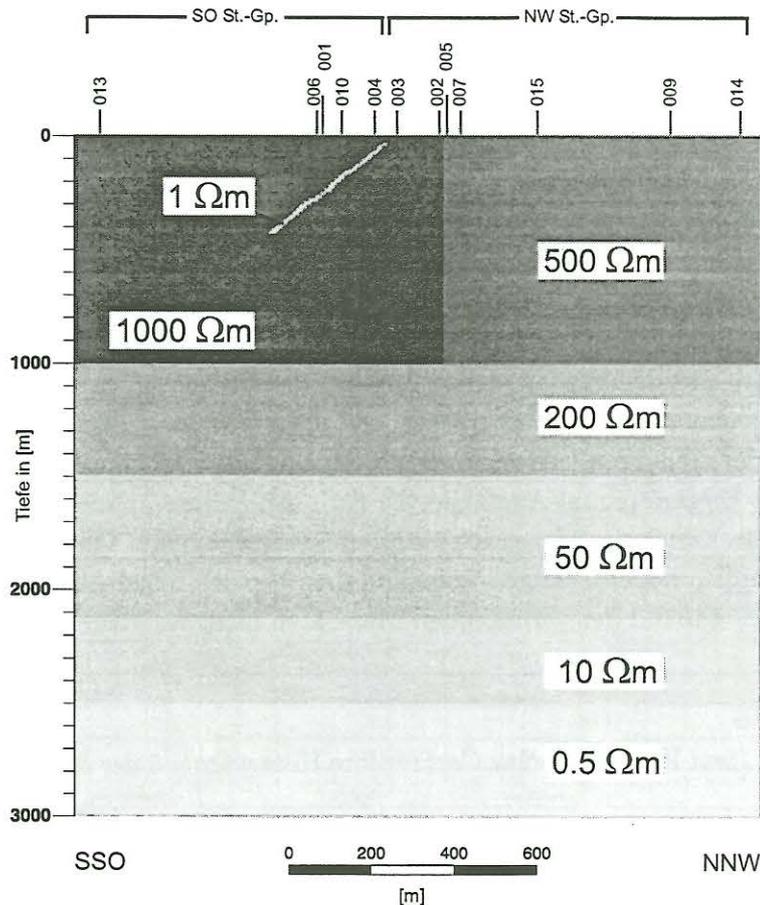


Abbildung 3: Das zur Interpretation der Messdaten abgeleitete 2D-Modell weist eine kontinuierliche Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe auf und zeigt einen nach SSO hin einfallende Zone hoher Leitfähigkeit (Einfallswinkel $\sim 60^\circ$) im obersten Krustenbereich. Deren Oberkante liegt in einer Tiefe von 30m.

sten Krustenbereich bis hinab zu $0.5\Omega m$ in 2.5km Tiefe, bei einer kontinuierliche Zunahme des Leitwertes. Aussagen über tiefere Krustenbereiche können nicht getroffen werden, Hinweise auf einen unterlagernden, schlechteren Leiter können anhand der Messdaten nicht aufgelöst werden. Die hochleitfähige Zone ($\rho < 1\Omega m$) im obersten Krustenbereich erklärt die Frequenzabhängigkeit der magnetischen Übertragungsfunktionen und ist wesentliche Ursache für das Aufspalten der E- und B-Polarisation der Phasen- und ρ_a -Kurven. Ihre Oberkante liegt zwischen den Stationen 003 und 004, zwischen denen die Richtungsänderung der Realpfeile auftritt (vgl. Abbildung 2). Für ein Einfallen der Zone nach SSO hin gegenüber einem vertikalen Verlauf oder gar einem Einfallen nach NNW hin spricht bei gleicher Leitfähigkeit und Oberkanten-Lage eine bessere Anpassung der magnetischen Übertragungsfunktionen und der Phasen-Kurven der nordwestlichen Stationen. Ihr wird bei der Anpassung größeres Gewicht beigemessen als den südöstlichen Stationen, da für sie die Induktionspfeile mit der Streichrichtung der 2D Struktur besser übereinstimmen. Bei den südöstlichen Stationen ist von einem stärkeren 3D Einfluss auszugehen. Die Länge des guten Leiters ist zu 500m gewählt. Aufgrund der gegebenen Datenqualität lassen sich nur Aussagen über eine Mindestlänge machen.

Die hohe Leitfähigkeit ab einer Tiefe von 2.5km ist vergleichbar den Interpretationsergebnissen magnetotellurischer Messungen im Gebiet der Münchberger Gneismasse, die von RITTER *et al.* (1999) im Frequenzbereich von 100Hz bis 0.01Hz durchgeführt wurden. Als eine Erklärung für

die hohe Leitfähigkeit schlagen RITTER *et al.* (1999) weitreichende horizontale Scherzonen im oberen Krustenbereich vor, auf denen Graphit über große Flächen in verbundener Form auftritt. Aufbau, Art der Gesteine und erdgeschichtliche Entwicklung der Münchberger Gneismasse sind vergleichbar denen der ZTT. Bei beiden Gebieten hat ein horizontaler Transport der Gesteinsverbände in Form tektonischer Decken aus nordöstlicher bis südöstlicher Richtung zu ihrer heutigen Lage geführt (FRANKE 1990; WALTER 1995). Aufgrund der gegebenen Parallelen lässt sich der Erklärungsansatz auf das Messgebiet bei Rittsteig übertragen, zumal die FBR graphitisierte Scherzonen aufgezeigt hat.

Wie BIGALKE & JUNGE (1999) nachgewiesen haben, bestehen zwischen Eigenpotential-Anomalien an der Oberfläche und den graphitisierten kataklastischen Scherzonen der FBR elektronisch leitende Verbindungen, was für ein Einfallen der Störungszonen nach SSO spricht. Da die Lage der Oberkante der steil einfallenden, hochleitfähigen Zone im obersten Krustenbereich der mit der Position der Eigenpotential-Anomalie (b) (vgl. Abbildung 1) zusammenfällt, liegt auch für diese Struktur die Annahme einer graphitisierten Scherzone nahe. Ob eine Verbindung zwischen der oberflächennahen hochleitfähigen Zone und dem Bereich hoher Leitfähigkeit ab 2.5km Tiefe besteht, lässt sich anhand der vorliegenden Messdaten nicht feststellen.

Danksagung

Unser Dank gilt Josef Pek und Vačlav Čerf für ihre Hilfe während der Messkampagne in Rittsteig.

Literatur

- ARTMANN, E. *Die geologische Entwicklung der Zentralböhmischen Scherzone zwischen Svatá Kateřina (Tschechische Republik) und Rittsteig (Nordost-Bayern) im Böhmerwald*. Diplomarbeit, Geol.-Paläo. Inst., Universität Frankfurt a. Main. 1999.
- BIGALKE, J. & JUNGE, A. *Using evidence of non-linear induced polarisation for detecting extended ore mineralizations*. Geophys. J. Int., **137**, 516–520. 1999.
- BUES, C., BEHRMANN, J., FRANKE, W., PAULI, C., SEIBERT, J. & ZULAUF, G. *Strukturentwicklung und Kinematik der Metabasite und Metapelite im Grenzbereich Telpá-Barrandium-Moldanubikum im Raum Hoher Bogen-Rittsteig*. Zeitschrift dt. geol. Gesell., **149** (3), 329–343. 1998.
- ELEKTRO GROUP. *KTB and the electrical conductivity of the crust*. J. geophys. Res., **102** (B8), 18289–18305. 1997.
- FRANKE, W. *Tectonostratigraphic units in the W part of the Bohemian Massiv – An introduction*. In: FRANKE, W. (Hrsg.), *Bohemian Massiv – Conference on paleozoic orogens in central Europe, geology and geophysics*, 1–23. Göttingen-Giessen. 1990.
- JUNGE, A. *Induzierte elektrische Felder – neue Beobachtungen in Norddeutschland und im Bramwald*. Habilitationsschrift math.-nat.wiss. Fachbereich Universität Göttingen (unveröffentlicht). 1993.
- RITTER, O., HAAK, V., RATH, V., STEIN, E. & STILLER, M. *Very high electrical conductivity beneath the Münchberg Gneiss area in Southern Germany: implications for horizontal transport along shear planes*. Geophys. J. Int., **139**, 161–170. 1999.
- WALTER, R. *Geologie von Mitteleuropa*. E.Schwartzbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 6 Auflage. 1995.
- WANNAMAKER, P. *Finite element program for magnetotelluric forward modeling and parameterized inversion of two-dimensional earth resistivity structure*. User Documentation. ESL-89043-TR, Univ. of Utah Research Institute. 1990.

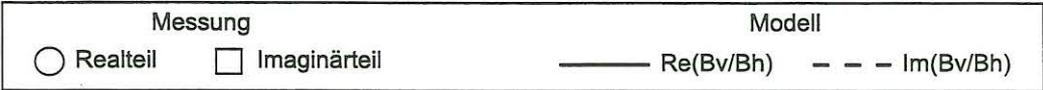
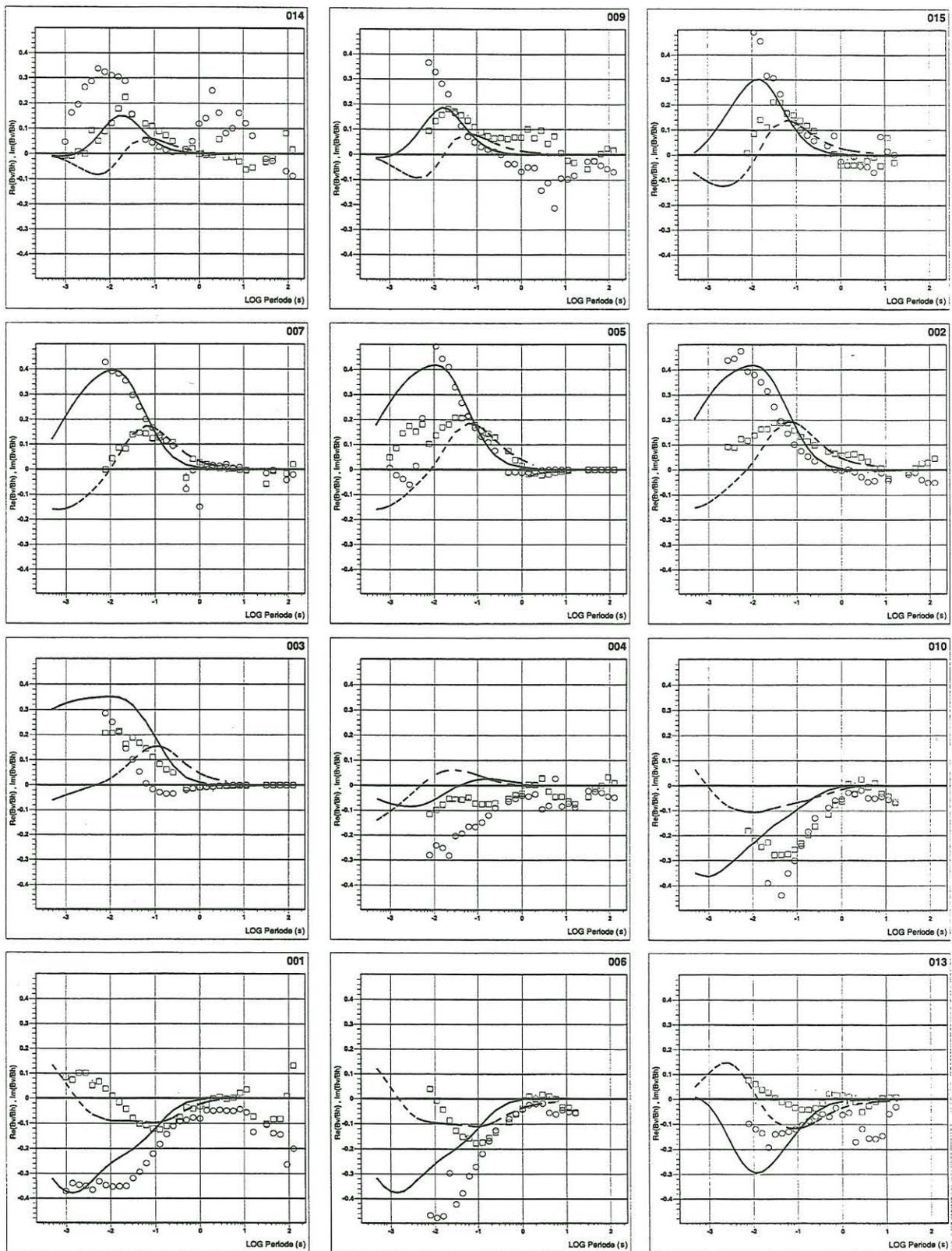


Abbildung 4: Vergleich von Real- und Imaginärteil der magnetischen Übertragungsfunktionen mit den Modellkurven des Real- und Imaginärteils von B_v/B_h .

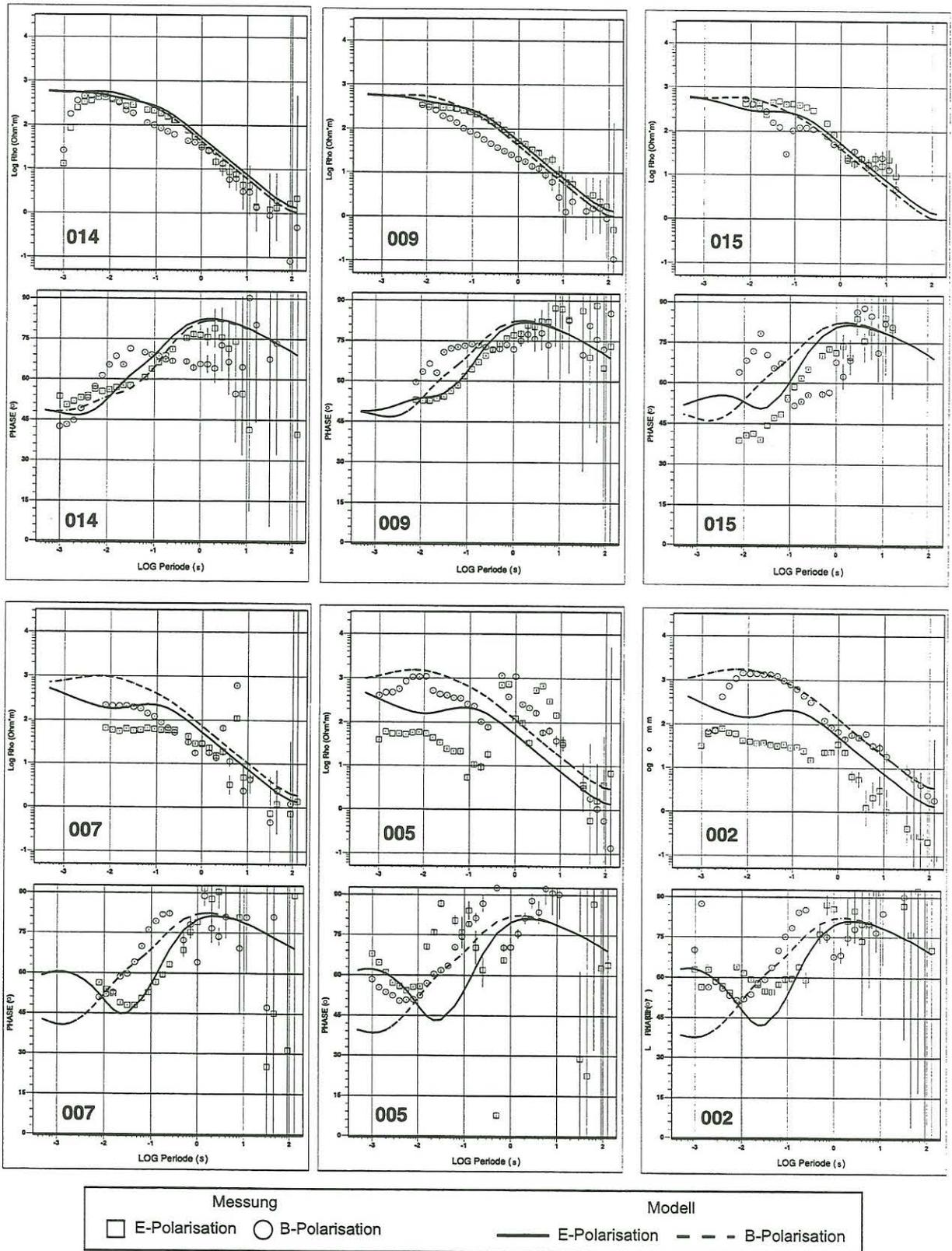


Abbildung 5: Vergleich der Phasen- und ρ_a -Kurven der E- und B-Polarisation mit den Modellkurven für die Stationen 014, 009, 015, 007, 005 und 002.

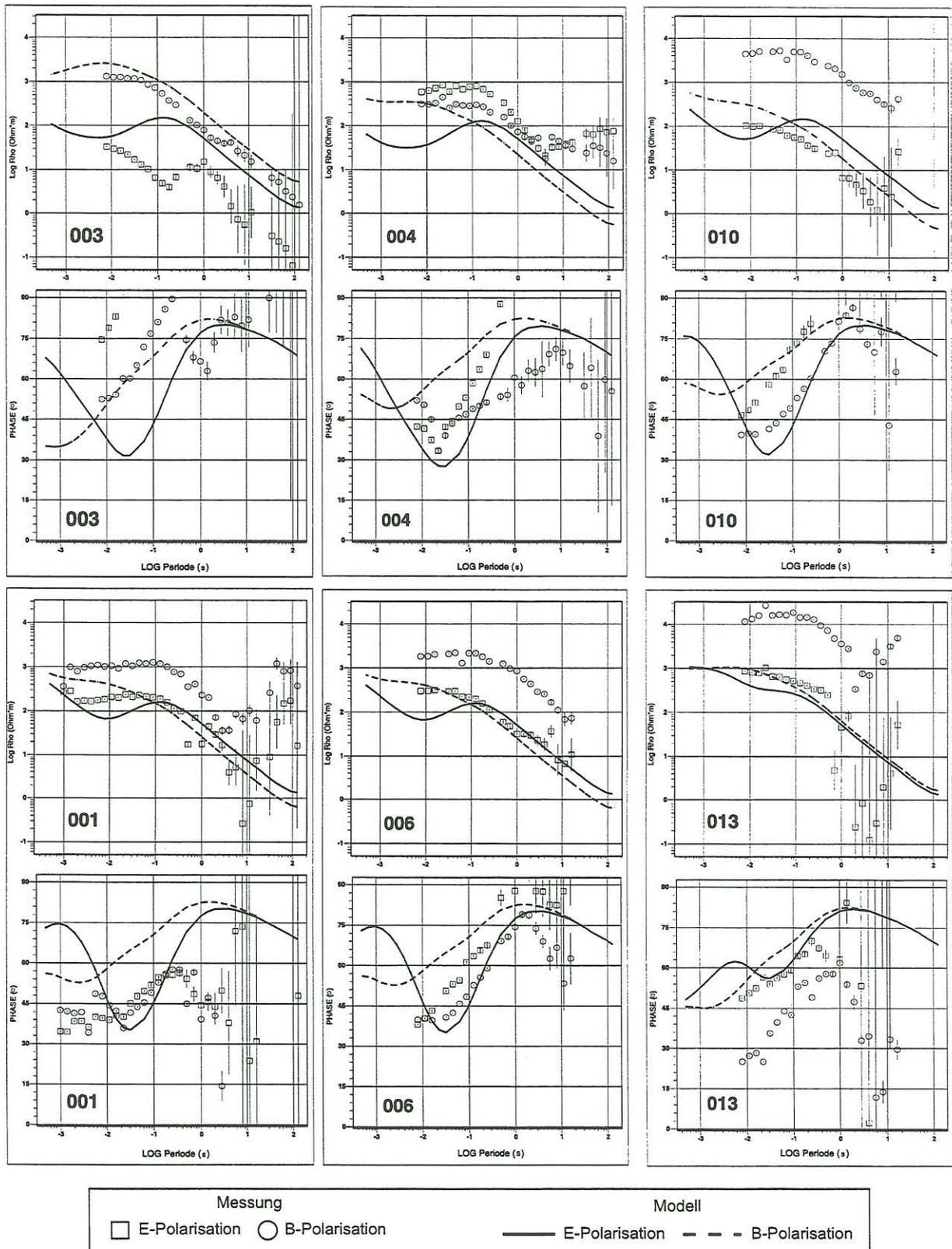


Abbildung 6: Vergleich der Phasen- und ρ_a -Kurven der E- und B-Polarisation mit den Modellkurven für die Stationen 003, 004, 010, 001, 006 und 013.