

## Gleichstromgeoelektrik: 2D-Inversion der Baruth-Messungen sowie erste Ergebnisse von 3D-Inversionen.

Rodemann, H. & Worzyk, P.

Dieses Paper zeigt Auswertungsergebnisse (1D- und 2D-Inversionen) von Baruth-Messungen und erste Resultate von 3D-Inversionen.

### Baruth-Messungen

#### Einleitung

Die Struktur eines tertiären Maars in der Nähe von Baruth kann aus einer gravimetrischen Anomalie geschlossen werden (s. Abb. 1). Über der Anomalie wurde eine Kreuzmessung (vier Halbmessungen) durchgeführt. Auswertungsergebnisse wurden auf dem EMTF-Kolloquium 1998 dargestellt, einschließlich einer Beschreibung des verwendeten Marquardt-2D-Inversionsprogramms. Inzwischen wurde eine Forschungsbohrung niedergebracht. Die hier gezeigten Ergebnisse stellen eine Weiterentwicklung der Auswertung von WORZYK (1997) sowie RODEMANN & WORZYK (1998) dar. Elektrische Widerstandstomographie wurde durchgeführt, um die optimale Bohrlochlokation zu finden (BRUNNER et al. 1999). Im folgenden wird eine Neuinterpretation unter Berücksichtigung der Bohrlochmessungen dargestellt. Weiterhin werden Verbesserungen der 2D-Inversion beschrieben.

Abb. 1 zeigt die Position der vier Schlumberger-Halbmessungen, die direkt über der gravimetrischen Anomalie durchgeführt wurden.

Die geoelektrischen Untersuchungen ergeben u.a. Informationen über Schichtmächtigkeiten und spezifische Widerstände. Abb. 2 und 3 zeigen die Kurven des scheinbaren Widerstands für die Schlumberger-Halbmessungen Ost und West. Die übersteilen Anstiege und der Kurvenversatz deuten darauf hin, daß es sich um eine mehrdimensionale Struktur handelt.

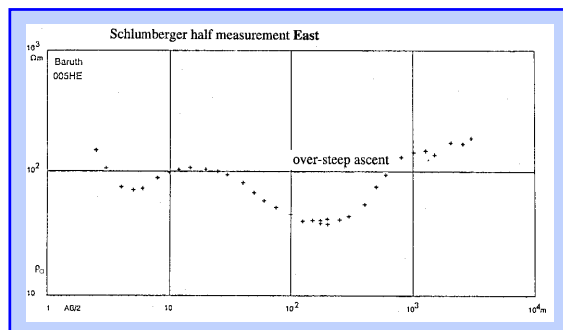
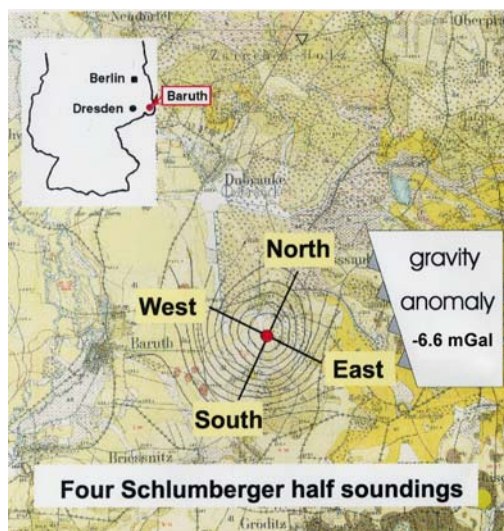


Abb. 2: Schlumberger-Halbmessung Ost, Kurve des scheinbaren Widerstands mit übersteilem Anstieg.

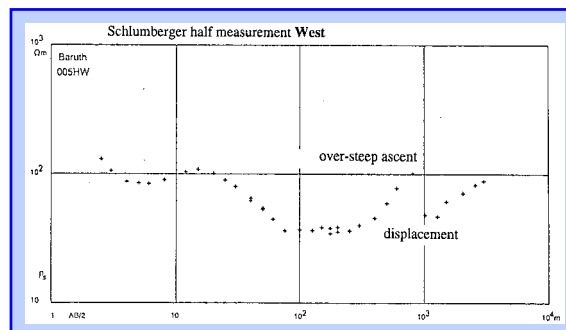


Abb. 3: Schlumberger-Halbmessung West, Kurve des scheinbaren Widerstands mit übersteilem Anstieg und deutlichem Kurvenversatz bei  $AB/2 = 1000$  m.

### Nach 1D-Inversionen

und Berücksichtigung geologischer und geophysikalischer Informationen wurden die Messungen benutzt, um ein Trogmodell zu entwickeln, das in Abb. 4 dargestellt ist. Auf der Basis dieses Modells wurden 2D-Vorwärtsrechnungen und Inversionen für die Daten des West-Ost-Profiles durchgeführt.

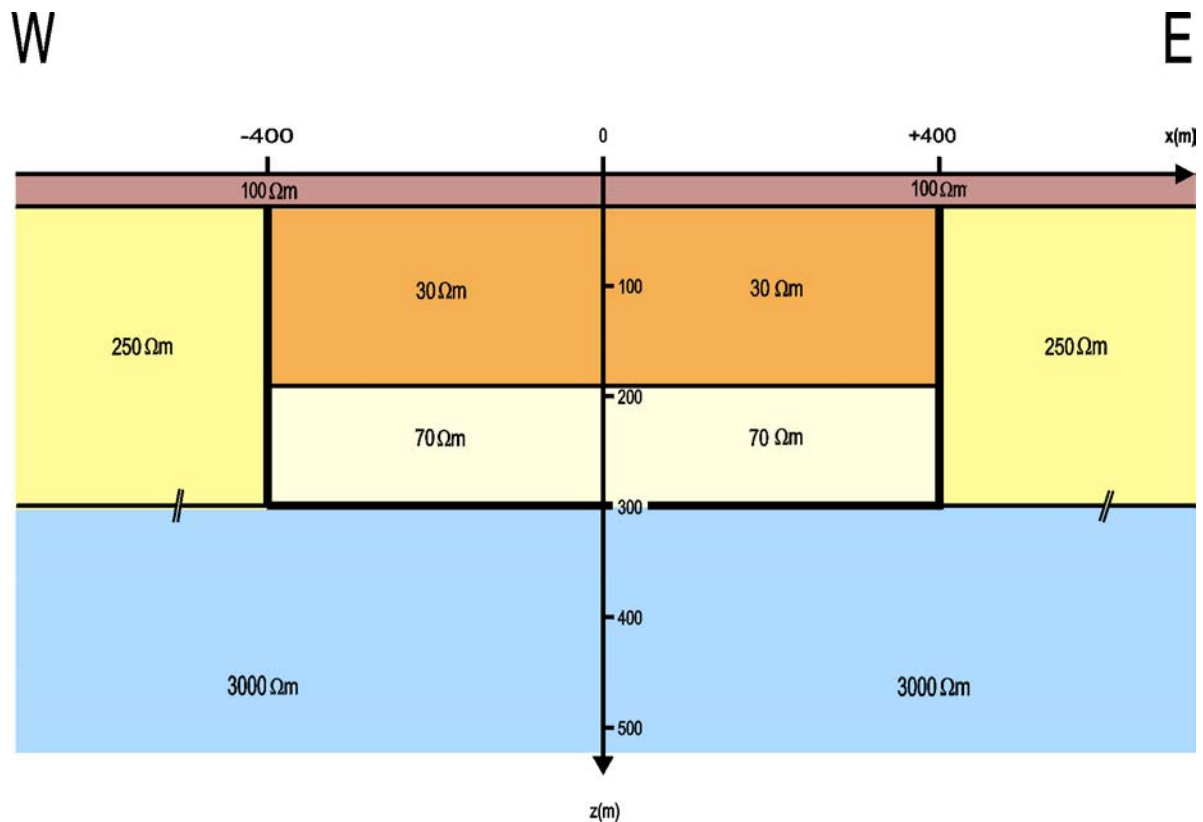


Abb. 4: Trogmodell „Baruther Maar“ (2D- Modell für die Meßdaten auf dem West-Ost- Profil, als Ergebnis von 1D-Inversionen).

Die rhos-Kurven (Inversionsergebnis), im Vergleich mit den Meßkurven, werden in der folgenden Abb. 5 gezeigt. Während der Anpassung wurden nur rhos-Werte mit  $AB/2 \geq 20$  m berücksichtigt. Die Modellparameter werden auf der linken Seite der Abb. 5 dargestellt. Die Zeichengruppe unter „wv:“ (Widerstandsverteilung) zeigt die angenommene Struktur der Widerstandselemente (rechtwinklige Prismen). Diese Struktur wird vor Beginn der Rechnung definiert und bleibt unverändert, während spezifische Widerstände und Längen sich ändern können. Das Modell weicht vom Modell in Abb. 4 in folgenden Details ab:

- „dike“-Struktur im Gebiet -1100 bis -800 m. Diese Struktur erklärt den erwähnten Kurvenversatz. Die Struktur wird durch Material mit hohem spezifischen Widerstand bestätigt, das an der Oberfläche gefunden wurde. Es ist nicht bekannt, bis zu welcher Tiefe sich dieses Material erstreckt. Möglicherweise handelt es sich um eine Caldera-ähnliche Struktur (PAPE, Uni Aachen, pers. Mitt.).
- Laterale Änderung des spez. Widerstands der obersten Deckschicht
- Asymmetrie der Trogform (ca. -400 bis 500 m)
- Eine Trichterform des Troges (Diatrem) ist mit den Messungen vereinbar, ergibt gegenüber einem einfachen Trog jedoch keinen signifikanten Meßeffect.
- Resultate aus der Forschungsbohrung (Bohrlochmessungen) wurden berücksichtigt. Die Widerstandsverteilung ist in Abb. 6 dargestellt.

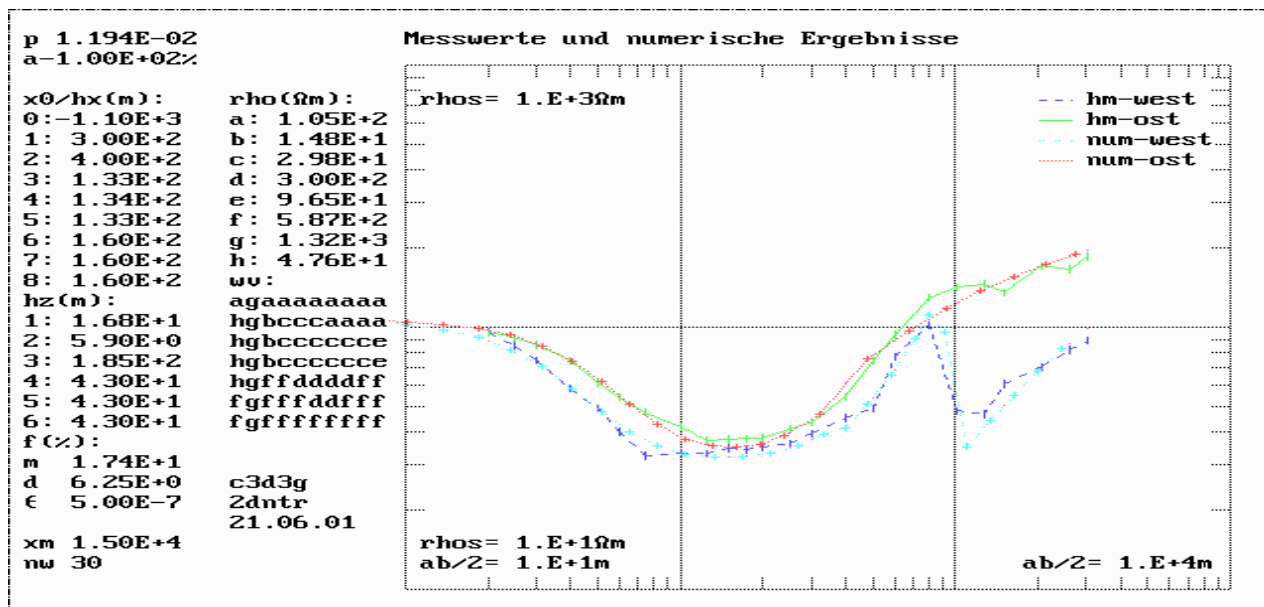


Abb. 5: 2D-Inversionsergebnisse, im Vergleich zu den Meßkurven: Mehrere Parameter wurden vom Modell der Abb. 4 übernommen, die restlichen Parameter wurden durch Inversionen optimiert. Die AB/2-Achse (nach rechts) erstreckt sich von 1 (1.E+0) m bis 10000 (1.E+4) m, die rhos-Achse von 10 bis 1000  $\Omega\text{m}$ .

Es werden vier, u.a. farblich unterschiedene Kurven gezeigt: hm-Ost (Halbmessung) und -West sowie die numerischen Ergebnisse. Links oben ist das Anpassungsmaß  $\psi$ , mit p bezeichnet, angegeben (Least Squares Abweichung bei logarithmiertem rhos). Darunter ist die jeweils letzte Änderung von  $\psi$  in % wiedergegeben, mit a bezeichnet. Es folgen die Parameter  $x_0$  (x-Koordinate mit dem am meisten negativen x-Wert), die x-„Mächtigkeiten“  $h_x$  und die z-Mächtigkeiten  $h_z$ , weiterhin die spezifischen Widerstände  $\rho$ . Rechts davon wird im Block „wv:“ die „grobe“ Widerstandsverteilung gezeigt, die den Trog und das Diatrem annähern soll. Sie ist in Abb. 6 graphisch dargestellt. Sie wird während der Anpassung jeweils auf die feinere, für die FD-Vorwärtsrechnung erforderliche Verteilung abgebildet. Unten sind weitere Abweichungsmaße in % zu sehen: m ist die maximale, d die durchschnittliche Abweichung.  $\epsilon$  bezeichnet das Abbruchkriterium für die FD-Iteration (Maximale Potentialänderung pro Iteration in %). Die Distanz des Randes zum Modellmittelpunkt wird als  $x_m$  angegeben. Schließlich wird mit nw die Zahl der Wellenzahlen bezeichnet, die zur Erhöhung der Rechengenauigkeit bei großen Auslagen verdoppelt wurde (das Modell besitzt mit  $x_{\min}=1.5\text{m}$  und  $x_{\max}=15\text{km}$  eine große Dynamik).

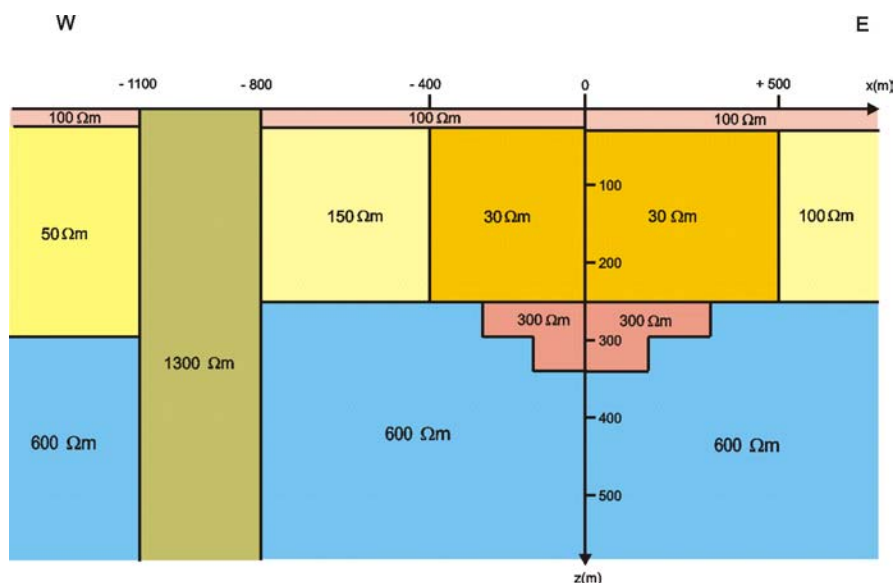


Abb. 6: Trogmodell „BARUTHER Maar“, nach 2-D Inversion. Die Widerstandsverteilung wird in gleicher Art gezeigt wie in Abb. 4.

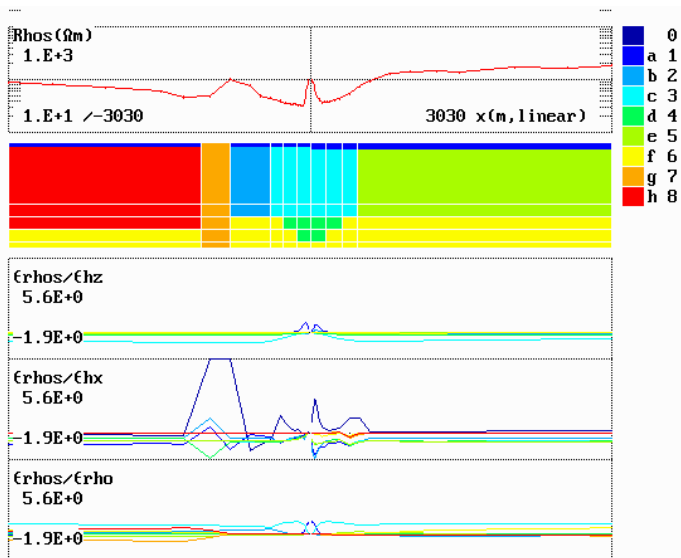


Abb.7: Sensitivitäten

Die Elemente der Jacobi-Matrix werden in Form von Quotienten, z.B. der Art  $d \log(\rho_{hsj}) / d \log(h_{zj}) = \epsilon_{\rho_{hsj}} / \epsilon_{h_{zj}}$  dargestellt, entsprechend für  $\epsilon_{h_{xi}}$  und  $\epsilon_{h_{oi}}$ .  $\epsilon_{\rho_{hsj}}$  und  $\epsilon_{h_{zj}}$  sind dabei relative Änderungen. Bei Verwendung der Maximum-Norm und Vernachlässigung des Effekts der Kombination von Parametern sowie von Nicht-Linearitäten folgt:  $\Delta h_{zj} = \Delta \rho_{hsj} / \max(j) |\epsilon_{\rho_{hsj}} / \epsilon_{h_{zj}}|$ . Dabei kann  $\Delta \rho_{hsj}$  ein relativer statistischer Fehler von  $\rho_{hsj}$  und  $\Delta h_{zj}$  ein Vertrauensbereich in  $h_{zj}$  sein.  $\epsilon_{\rho_{hsj}} / \epsilon_{h_{x0}}$  ergibt sich aus  $d \log(\rho_{hsj}) / d \sinh(x_0)$  ( $x_0 < 0$ ).

Die  $x_0$ -Sensitivitäten sind besonders groß, weil mit  $x_0$  die gesamte Widerstandsverteilung lateral verschoben wird. Der größte Effekt zeigt sich bei der dike-ähnlichen Struktur. Mit  $\max_j |\epsilon_{\rho_{hsj}} / \epsilon_{h_{x0}}| = 5.6$  und einem angenommenen konstanten relativen Fehler von  $\Delta \rho_{hs} = 3\%$  folgt  $\Delta h_{x0} = 0.5\%$ . Die anderen Vertrauensbereiche sind z.T. wesentlich größer. Vgl. die Legende mit Abb. 5 und 6. Eine genauere Bestimmung der Vertrauensbereiche (z.B. bei Dünnschichteffekten) analog zu 1D-Inversionen ist wünschenswert, aber, wie erwähnt, z.Zt. noch zeitaufwendig. Es können erheblich größere Vertrauensbereiche resultieren, ebenso bei Verwendung der L2-Norm (least squares).

### 3D-Inversion, erste Ergebnisse

Eine 3D-Geoelektrik-Inversion mit konjugierten Gradienten stellen ZHANG, MACKIE, & MADDEN (1995) vor. Eine 3D-Inversion nach der SIRT-Methode beschreibt SEICHTER (1998). Ein 3D-Inversionsprogramm entwickelt GÜNTHER, Uni Freiberg, dieser Band. Auf der Basis der erwähnten 1D- und 2D-Marquardt-Inversionen wurde ein Programmsystem für 3D-Marquardt-Inversionen und verschiedene Vorwärtsrechnungen geschrieben. Rechner: PC. Betriebssysteme: DOS /Windows NT. Compiler: Power Basic (DOS) und Power Basic Console Compiler (NT/2000). Das Steuerprogramm erlaubt, ein oder zwei Vorwärtsprogramme aufzurufen:

a) Analytische Modellrechnungen (Unterprogramme): Halbraum, 2 Viertelräume (MUNDRY 1979), dike-Strukturen: dike2 und dike3 (HANSTEIN, Uni Köln, pers. Mitt.)

b) Numerische Rechnungen (FD), Tochterprogramme

b1) (Gauß-Seidel): GS3D

b2) (Konjugierte Gradienten): DREID (Autor: SPITZER, Uni Freiberg)

Zuvor werden jeweils Unterprogramme zur Gitterkonstruktion (automatic gridding) aufgerufen.

Der Algorithmus zur Marquardt-Inversion entspricht u.a. dem bei der 2D-Inversion verwendeten; zusätzlich wurden Details eines Programms zur 1D-Magnetotellurik-Inversion berücksichtigt (Autor: WEIDELT, Uni Braunschweig).

Statt beliebiger Auslagen kann das Programm z.Zt. nur x-Halbmessungen berücksichtigen (Elektroden und Sonden auf der x-Achse, Vorwärtsrechnung mit reziproker Auslage). Eine Verallgemeinerung, zunächst auf eine Kreuzauslage (Baruth-Meßdaten), ist geplant. Die Widerstandsverteilung kann, speziell bei in y asymmetrischen Strukturen, z.T. auch in y optimiert werden. Die Inversion konvergierte für ein in y asymmetrisches Quader-Modell bei den einzeln freigegebenen Parametern:  $x_0/h_x$ ,  $y_0/h_y$ ,  $h_z$  und  $\rho_0$ , analog zur 2D-Inversion, jedoch z.B. nicht bei der Kombination  $h_x$  &  $h_y$ . Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß die x-Auslage eine kleine Sensitivität bezüglich Änderungen in y besitzt.

Das Problem der Mehrdeutigkeiten (auch der dünnen Schichten) wurde bisher nicht berücksichtigt. Während sich eine lineare Fehleranalyse, ähnlich wie für den 2D-Fall angedeutet, aus der Jacobi-Matrix ergibt, wird eine nichtlineare Fehleranalyse analog zum 1D-Fall noch durch die Rechengeschwindigkeit erschwert.

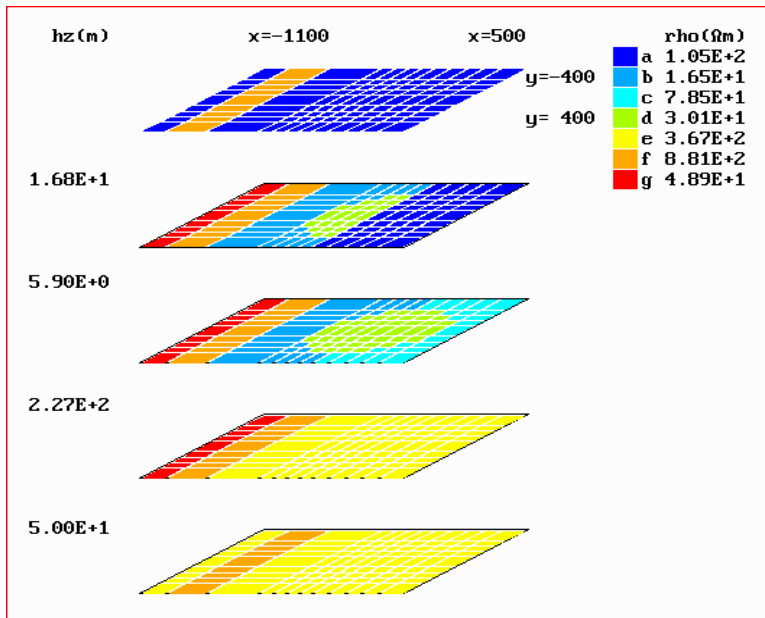


Abb.8 : 3D-Widerstandsverteilung

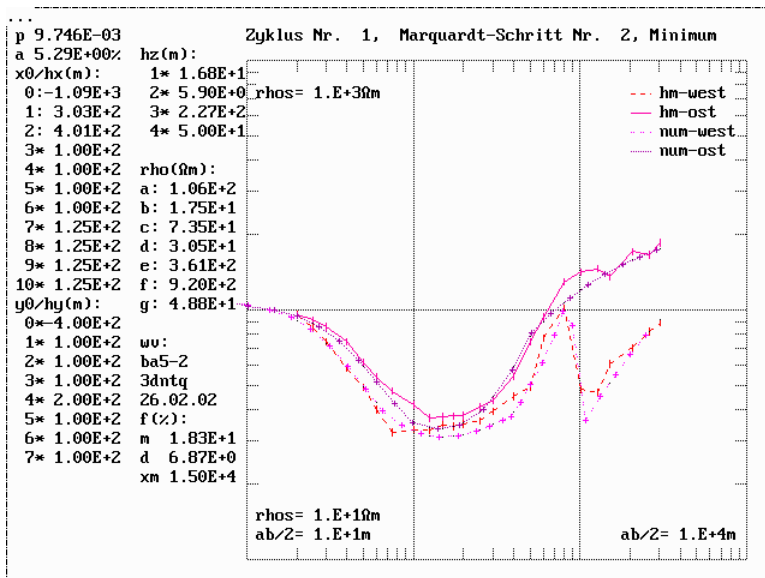


Abb. 9: Ergebnisse der 3D-Inversion mit m=18%

Das Ergebnis einer Inversion, bei der alle spezifischen Widerstände sowie  $x_0$ ,  $hx_1$  und  $hx_2$  (dike-Umgebung) variabel waren, und die restlichen Parameter für die Inversion fest blieben (\*-Symbol), wird in Abb. 9 gezeigt. Für  $hz$  wurden Werte festgehalten, die sich aus Bohrlochmessungen ergaben.  $y_0$  und  $hy$ -Werte wurden entsprechend der angenommenen kreisähnlichen Form des Maars festgelegt (Ergebnisse der Gravimetrie, vgl. Abb. 1). Eine versuchsweise Inversion eines  $hy$ -Parameters ergab entsprechend der diskutierten geringen Sensitivität der  $x$ -Auslage in  $y$ -Richtung keine signifikante Verbesserung der Anpassung.

Die Parameter und Fehlergrößen sind analog zu den 2D-Resultaten bezeichnet. Die Widerstandsverteilung ist in Abb. 8 dargestellt. Die beste Anpassung hat eine maximale Abweichung von  $m=18\%$ . Dabei ergaben sich für die Werte  $x_0$ ,  $hx_1$  und  $hx_2$  geringe Korrekturen gegenüber der Ausgangslösung ( $x_0 = -1100\text{m}$ ,  $hx_1 = 300\text{m}$ ,  $hx_2 = 400\text{m}$ ). Auffällig ist der niedrige Wert von  $\rho(b) = 18 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ . Der entsprechende Wert bei der 2D-Inversion ist ähnlich niedrig, s. Abb. 5. Lediglich bei der 1D-Inversion (Auswertung der Schlumberger-Vollmessung) erhält man hier einen Wert von  $250 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ , s. Abb. 4. Bei Festhalten dieses Parameters auf  $250 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$  ergibt sich bei einer 3D-Modellrechnung die wesentlich höhere maximale Abweichung von  $>50\%$ .

Übergang zum 3D-Modell: Aus einem früheren Vergleich zwischen numerischen Modellrechnungen (2D: Dike-Struktur, 3D: endlicher vertikaler Kreiszyylinder, Kreis durch ein Quadrat dargestellt) ergab sich eine Vergleichbarkeit dieser Strukturen. Eine Wiederholung des Vergleichs mit einer Kombination von Rechtecken als Kreis ergab für „Baruth-Parameter“ eine näherungsweise Übereinstimmung der Effekte über dem Zylinder (kleine  $AB/2$ -Werte), während bei größeren  $AB/2$ -Werten die beiden  $\rho$ -s-Kurven zunehmend voneinander abwichen. Damit sind die 2D-Modellrechnungen außer für sehr große  $AB/2$ -Werte relativ gut zur Beschreibung der 3D-Effekte geeignet. Für den Grenzfall extrem großer  $AB/2$ -Werte läßt sich die Abweichung analytisch angeben, siehe u.a. (ASHOUR&CHAPMAN 1965):

$$\rho_s(2D) / \rho_s(3D) = (1 + \rho_1 / \rho_2) / 2,$$

wobei  $\rho_1$  = spez. Widerstand des Kreiszyinders bzw. des Dikes,

$\rho_2$  = spez. Widerstand der Umgebung. Deshalb wurden die 2D-Inversionsergebnisse durch 3D-Modellrechnungen ergänzt. Aus der 3D-Inversion resultieren z.T. niedrigere  $\rho$ -Werte als aus der 2D-Inversion.

Literatur:

- ASHOUR, A. A. & CHAPMAN, S. (1965): The magnetic field of electric currents in an unbounded plane sheet, uniform except for a circular area of different uniform conductivity.- *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **10**: 31-44.
- BRUNNER, I., FRIEDEL, S., JACOBS, F. & DANCKWARDT, E. (1999): Investigation of a Tertiary maar structure using three-dimensional resistivity imaging.- *Geophys. J. Int.*, **136**: 771-780.
- MUNDRY, E. (1979): Geoelektrische Modellkurven in der Nähe vertikaler Störungen.- Bericht NLFb-GGA, Archiv-Nr.: **80 147**; Hannover.
- RODEMANN, H. & WORZYK, P. (1998): Forschungsbohrung BARUTH, Schlumberger-Sondierungen, Vorwärtsrechnung, 2-D-Inversion, in: JUNGE, A. & BAHR, K. (Hrsg.): Protokoll über das 17. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Neustadt a. d. Weinstraße, 9.-13.3.1998.
- SEICHTER, M. (1998): Rekonstruktion der räumlichen Verteilung der komplexen elektrischen Leitfähigkeit.- Diss., TU Braunschweig.
- WORZYK, P. (1997): Geoelektrische Tiefensondierungen im Bereich der Forschungsbohrung Baruth. – Bericht, NLFb-GGA Archiv-Nr.: **115 788**; Hannover.
- ZHANG, J., MACKIE, R. L. & MADDEN, T.R. (1995): 3-D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients.- *Geophysics*, **60**.