

ERPROBUNG EINES BOHRLOCHMAGNETOMETERS FÜR EINE VERTIKALE GRADIENTENSONDIERUNG ERDMAGNETISCHER VARIATIONEN

E. Steveling, B. Fluche, U. Schmucker

Zusammenfassung

Registrierung des tellurischen Feldes, wie sie in der Magnetotellurik (MT) zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes üblich sind, können durch Messungen des Vertikalgradienten erdmagnetischer Variationen in einem Bohrloch ersetzt werden. Da in dieser vertikalen Gradientensondierung ausschließlich Magnetfeldvariationen registriert werden, entfallen Korrekturen, die in der MT wegen der oft durch kleinräumige Leitfähigkeitsanomalien verzerrten tellurischen Felder notwendig sind.

In der Bohrung Mardorf 9/Steinhuder Meer ist es ertmals gelungen, mit einem für gesteinsmagnetische Messungen gebauten Bohrlochmagnetometer der BGR zeitliche erdmagnetische Variationen zu registrieren und mit gleichzeitigen Aufzeichnungen eines zweiten Magnetometers an der Erdoberfläche zu vergleichen. Aus einem begleitenden Meßprogramm mit MT- und Geoelektrik-Sondierungen in der Umgebung des Bohrlochs konnten Tiefenprofile der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt werden. Die durch den Skineneffekt verursachte, aus dem bestimmten Leitfähigkeitsprofil berechenbare Abschwächung des Magnetfeldes am Ort des Bohrlochmagnetometers ist deutlich kleiner als die in der Gradientenmessung beobachtete.

Genauere Testmessungen zur vertikalen Gradientensondierung sollen mit einem speziell für diesen Zweck gebauten Bohrlochmagnetometer durchgeführt werden, bevor das Verfahren in der kontinentalen Tiefbohrung zum Einsatz kommt.

Nachdem vom Institut für Geophysik Göttingen in den letzten Jahren mit einigen Experimenten der vertikale Gradient des horizontalen magnetischen Variationsfeldes in Bergwerkschächten (SCHMUCKER, 1986) gemessen worden ist, soll hier über erstmalige Variationsmessungen in einem Bohrloch berichtet werden.

Durch Absprache innerhalb der Gruppe "Bohrlochmagnetometer" der damaligen ARGE 2 des Kontinentalen Tiefbohrprogramms wurden uns von der BGR Hannover für die Experimente ein Bohrlochmagnetometer und die Bohrung Mardorf 9 am Steinhuder Meer (nordwestlich Hannover) samt Winde und Bohrlochkabel überlassen. Dadurch konnten diese ersten Testmessungen sehr kostengünstig durchgeführt werden, so daß trotz schwieriger geologischer Verhältnisse - die Bohrung ist über einem Salzstock abgeteuft - Mardorf eine gute Wahl war.

Die Ergebnisse der Gradientensondierung sollten mit magnetotellurischen Messungen verglichen werden. Deshalb wurden auf einem Profil etwa senkrecht zum Streichen des Salzstockes Husum (Abb.1) die gleichzeitig digital auf Kassetten registrierenden Stationen MA2, MA3, MA5, MA7 und MA9 eingerichtet. In der Zeit vom 14.3.-19.4.1985 wurde an allen Punkten mit Induktionsmagnetometern und Tellurikverstärkern und vom 24.6.-22.8.1985 als langperiodische Ergänzung mit einem Fluxgatemagnetometer und Tellurikverstärkern bei MA2 gemessen.

Für einen Vergleich ist es besonders wichtig, die Leitfähigkeit der oberflächennahen Schichten zu kennen. Das NfB Hannover (WORZYK, 1986) hat unser Vorhaben daher mit Geoelektrischen Tiefensondierungen (Auslagen bis zu 6.8km Länge) unterstützt. Außerdem wurden an den Stationen MA2, MA5 und MA9 vom Institut für Geophysik der TU Berlin AMT-Messungen durchgeführt.

Abb.2 ist ein Versuch, Ergebnisse der MT-, AMT- und GTS-Messungen zusammenzustellen. Das ganz links angegebene Widerstandsmodell soll für die Bohrlochlokation bei MA9 gelten. Der Widerstandsbereich von der Erdoberfläche bis zum Salz (1000 Ωm) ist das Ergebnis einer Geoelektrik-Sondierung längs des Salzstocks. Der nach unten anschließende Bereich ist ab 2.2km Tiefe das Ergebnis einer 1D-Inversion, stammt also von MT-Messungen. Für das Gesamtmodell wurde die als durchgehende Kurve dargestellte $\rho^*(z^*)$ -Kurve berechnet.

Im oberen Bilddrittel kann man beurteilen, ob AMT und GTS zu ähnlichen Ergebnissen kommen. Die durchgezogenen Kurven für den Frequenzbereich 3.7 - 866Hz sind Bostick-Transformationen der AMT-Messungen in MA2 und MA9. Mit x bzw. + sind die xy-, mit o bzw. Δ die yx-Elemente markiert. Die Kurven von MA2 treffen die Tiefe des guten Leiters sehr gut, doch liegt MA2 ca. 4km westlich der Bohrung. MA9 liegt an der Bohrung; hier wird der gute Leiter mit dem richtigen Widerstand, aber in geringerer Tiefe gesehen. Möglicherweise wird die Kurvenverschiebung durch eine Verzerrung des tellurischen Feldes verursacht. Die AMT-Kurven von MA5 sind hier nicht dargestellt. Sie sind gegenüber MA2 und MA9 in größere Tiefen und zu höheren Widerständen verschoben. Ein guter Leiter ist dort nicht ganz so deutlich zu erkennen.

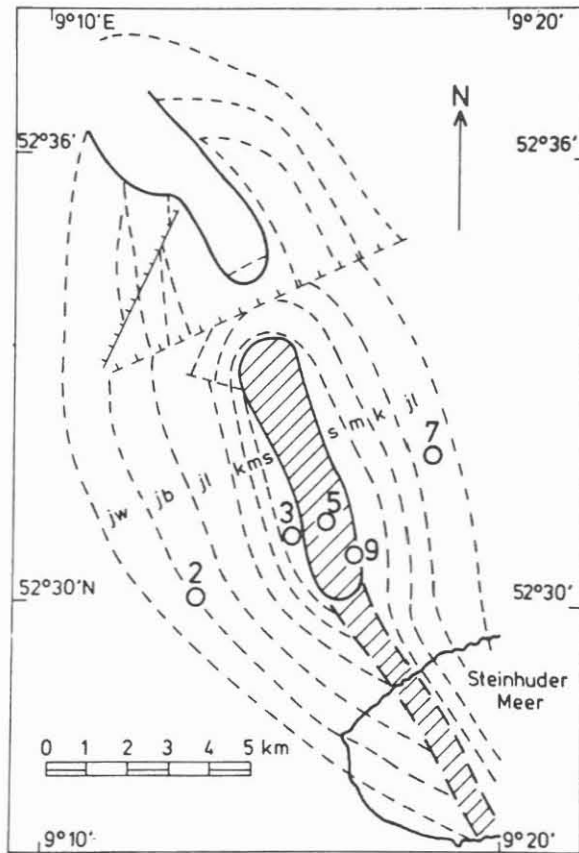


Abb.1: Salzstock Husum (aus Geol.LA Hannover, CLOSS 1946). Die mit 2-9 markierten Kreise geben die Lage der MT-Stationen MA2-MA9 an. Die Bohrung Mardorf 9 liegt 100 – 200m südlich von MA9.

Die punktierte Kurve gehört zu dem aus der 1D-Inversion ermittelten Modell. Sie stimmt im oberen Bereich nicht so gut mit den unten im Bild durch Kreuze dargestellten MT-Messungen von MA2 überein, da das Modell eine Mittelung der Ergebnisse von MA2 und MA7 ist.

Die Lage des Meßprofils senkrecht zum Streichen einer Anomalie legt es nahe, die Daten auch mit einer zweidimensionalen Modellrechnung zu interpretieren. Benutzt wurde dazu ein neu entwickeltes Programmpaket für inhomogene Schichten von SCHMUCKER.

Grundlage des Modells ist eine vorher durchgeführte eindimensionale Inversion der Daten. In das daraus ermittelte Modell wurde als symmetrische Aufwölbung der schlechtleitende Salzstock gelegt. (Abb.3). In vielen Versuchen wurden die Breite der Aufwölbung und der Deckschichtwiderstand solange variiert, bis die Übertragungsfunktionen d_D , C_{xy} und C_{yx} im Periodenbereich 9.4 – 150s mit den gemessenen möglichst gut übereinstimmten. Im Rahmen der Möglichkeiten kann die Anpassung als gelungen angesehen werden. Eine weitere Verfeinerung des Modells ist nicht sinnvoll, da eigentlich eine 3D-Interpretation nötig wäre. Wohl aus diesem Grunde ist die hier nicht gezeigte Anpassung der anomalen Vertikalkomponente weniger gut gelungen.

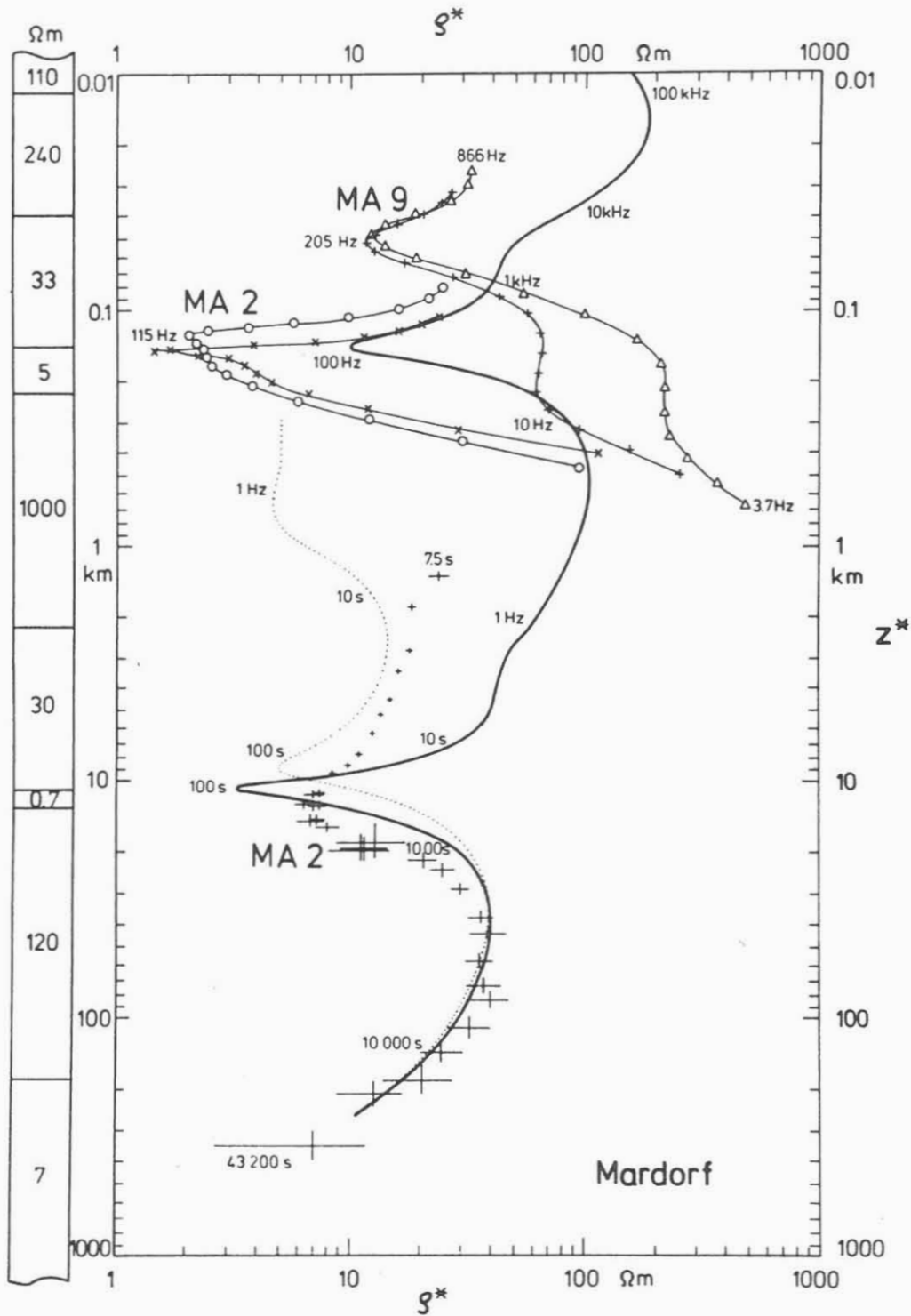


Abb.2: Gemeinsames Modell, aus Messungen der Magnetotellurik, Audiomagnetotellurik und Geoelektrischen Tiefensondierung abgeleitet. Die durchgehende Kurve ist die aus dem links angegebenen Widerstandsmodell berechnete $\rho^*(z^*)$ -Verteilung. Im oberen Drittel sind für beide Polarisationen BOSTICK-Transformationen von AMT-Messungen in MA2 und MA9 angegeben. Die Fehlerkreuze in der unteren Hälfte sind MT-Messungen der um 45° rotierten xy-Komponente von MA2. Die gestrichelte Kurve gehört zu dem aus der 1D-Inversion ermittelten Modell.

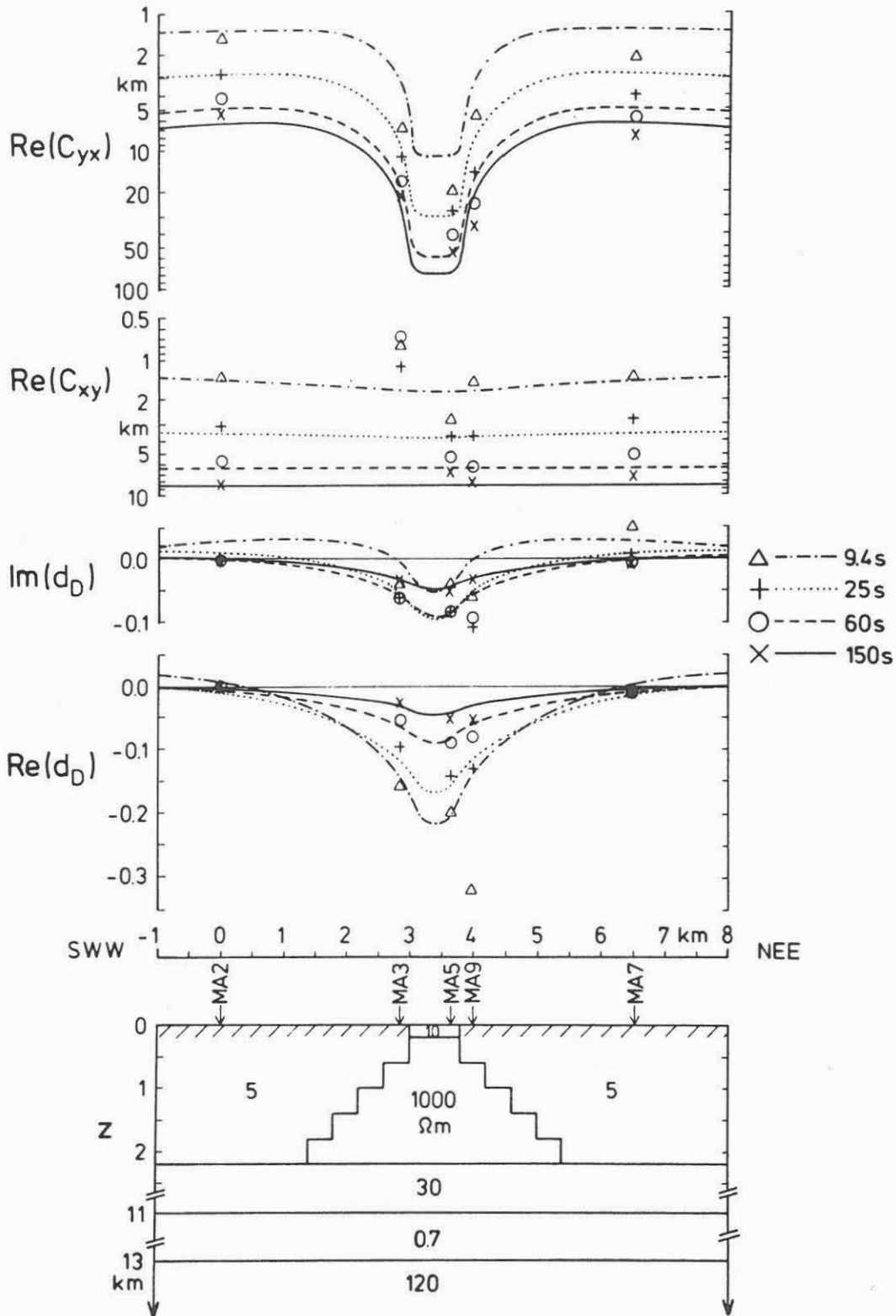


Abb.3: 2D-Widerstandsmodell des Salzstocks Husum. Für 4 Perioden von 9.4 – 150s werden gemessene Übertragungsfunktionen (mit Symbolen markierte Punkte) mit aus dem Modell berechneten (Linien) verglichen.

Das Modell zeigt über dem hochohmigen Salz ($1000\Omega m$) eine $200m$ mächtige gutleitende Deckschicht mit $10\Omega m$ spezifischem Widerstand, d.h. einer integrierten Leitfähigkeit von $20S$. Die Geoelektrische Tiefensondierung (vgl. Abb.3) ergab eine integrierte Leitfähigkeit von $19.4S$, also eine sehr gute Übereinstimmung. Außerdem passen die integrierten Leitfähigkeiten der normalen Deckschicht bis in $2.2km$ Tiefe und des guten Leiters in $11 - 13km$ Tiefe gut zu Ergebnissen eines Magnetotellurik-Profiles südlich des Steinhuder Meeres von LOSECKE (1972).

Soviel zu den begleitenden Messungen zur Erkundung der elektrischen Leitfähigkeit in der Umgebung des Bohrlochs. Das benutzte Bohrlochmagnetometer der BGR enthält u.a. ein triaxiales Fluxgatemagnetometer der Firma Förster mit einer Auflösung von $1.5nT$, einen Kreisel zur Messung des Azimuts und 2 Neigungsmesser. Die Meßdaten dieser Komponenten können über das Bohrlochkabel digital abgefragt werden. Als Vergleichsinstrument an der Erdoberfläche wurde ein EDA-Fluxgatemagnetometer benutzt. Zur gleichzeitigen Aufzeichnung der Bohrlochmagnetometer- und der Oberflächenmagnetometer-Daten ist von uns unter Benutzung eines digitalen 7-Spur Magnetbandgerätes eine mikroprozessorgesteuerte Registrierapparatur gebaut worden.

Am 8.7.1985 begann das Experiment zur vertikalen Gradientensondierung. Das Bohrlochmagnetometer wurde auf $350m$ Teufe abgesenkt, legte sich dort wegen der Neigung der Bohrung an die Bohrlochwand und blieb während der gesamten kontinuierlichen Meßzeit von 46 Stunden in dieser Lage. Das Salz wurde bei Mardorf 9 in $205m$ Tiefe erbohrt. Nur die oberen $242m$ der Bohrung sind verrohrt. Das Magnetometer befand sich also unverrohrt im Salz.

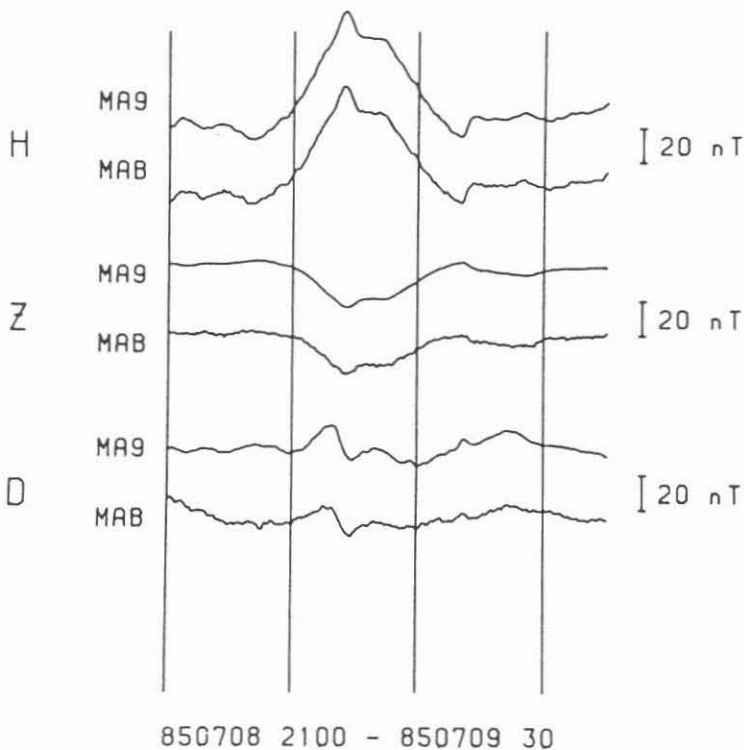


Abb.4: Registrierbeispiel übertage (MA9) und untertage (MAB)

Die 6 Kanäle des Bohrlochmagnetometers und die 4 Kanäle (einschließlich Temperatur) des Oberflächenmagnetometers wurden mit einer Taktrate von 6s aufgezeichnet. Der technische Ablauf war problemlos ohne Zwischenfälle. Wegen eines nicht vorhandenen Ersatzkreisels konnte eine ursprünglich geplante, deutlich längere Meßzeit nicht realisiert werden. Insbesondere fiel der wegen einer genauen Kalibrierung der Systeme vorgesehene Parallellauf beider Magnetometer an der Erdoberfläche aus.

Während der Meßzeit war die erdmagnetische Aktivität recht gering. So gab es für die Datenanalyse nur 3 auswertbare Effekte. Das beste der aufgezeichneten Zeitintervalle ist in Abb. 4 wiedergegeben. Für diese Darstellung wurden die Daten des Bohrlochmagnetometers mit Hilfe der mitregistrierten Lageinformation (Neigungsmesser und Kreisel) auf die üblichen H, D, Z-Richtungen transformiert. Ohne Analyse ist rein visuell die gute Übereinstimmung zwischen MA9 und MAB zunächst einmal erfreulich.

Wegen der zu geringen Anzahl der Effekte kam nur eine uni- und bivariate Analyse im Zeitbereich in Frage. Die bivariaten Ergebnisse weichen nicht signifikant von den univariaten ab. Im Mittel über die 3 Effekte ergibt die univariate Rechnung:

$$H_u = 0.94 \cdot H_o \quad D_u = 0.49 \cdot D_o \quad Z_u = 0.90 \cdot Z_o \quad (u = \text{unten}, o = \text{oben})$$

Die sehr starke Abschwächung der D-Komponente könnte darauf beruhen, daß die Orientierung des Bohrlochmagnetometers nicht mit ausreichender Genauigkeit bekannt war. Mögliche Korrekturen lohnen sich aber nicht, denn es zeigt sich, daß der hier scheinbar beobachtete Skineffekt zumindest in D viel zu groß ist. Für das Modell in Abb.2 erhält man die in der folgenden Tabelle ganz links stehenden Skineffekt-Verhältnisse $B_n(u)/B_n(o)$ (u =unten) / $B_n(o)$ (o =oben), wobei sich $B_n(u)$ auf eine Tiefe von 400m bezieht. Für den hier betrachteten 1D-Fall würde man also Skineffekte zwischen 1% für T=1 Stunde und 15% für T=10 Sekunden erwarten.

	$B_n(u)/B_n(o)$			$B_x(u)/B_x(o)$			$B_y(u)/B_y(o)$		
	Re	Im	Betrag	Re	Im	Betrag	Re	Im	Betrag
1 cph	0.99	-0.01	0.99	0.96	-0.01	0.96	0.97	-0.01	0.97
2 cph	0.98	-0.01	0.98	0.96	-0.02	0.96	0.96	-0.01	0.96
60 cph	0.94	-0.07	0.94	0.86	-0.15	0.88	0.88	-0.13	0.89
360 cph	0.85	-0.08	0.85	0.61	-0.19	0.64	0.70	-0.10	0.70

Tabelle: Berechnete Skineffekt-Verhältnisse

Berechnet man den Skineffekt für das in Abb.3 dargestellte 2D-Modell genau in der Modellmitte, so erhält man je nach Polarisierung unterschiedliche Skineffekte. Für B-Polarisierung (die induzierten Ströme fließen in der Bildebene) erhöht sich der Skineffekt auf 4% und 36%, wobei man sich dem gemessenen Wert für H (6%) annähert. Für E-Polarisierung (Ströme senkrecht zur Bildebene) sind die Skineffekte kleiner (3% bis 30%).

Die generelle Vergrößerung gegenüber dem 1D-Skineffekt ist der Zusammendrängung von Strömen in der dünnen gutleitenden Deckschicht über dem Salzstock zuzuschreiben. Der Unterschied der beiden Polarisierungen kommt durch die Stetigkeit des Stromes bei B-Polarisierung und die Stetigkeit des elektrischen Feldes bei E-Polarisierung an der Grenze Salz-Sediment zustande.

Da das 2D-Modell näherungsweise einen Ostwest-Schnitt darstellt, ist die beobachtete Abschwächung der H-Komponente von 6% diejenige für B-Polarisierung und so mit dem Modellwert von 4% vergleichbar. Zum Nachweis, daß dieser Meßwert tatsächlich als Skineffekt im 2D-Fall zu betrachten ist, fehlt eine Bestätigung durch die Frequenzabhängigkeit und Phasendrehung.

Obwohl wir also das Endziel unserer Messungen nicht erreicht haben, ermöglichen uns nun die gewonnenen Erkenntnisse den Bau eines speziell für die vertikale Gradientensondierung geeigneten Bohrlochmagnetometers. Damit soll dann das Bohrlochexperiment in Mardorf (oder einer anderen Bohrung) wiederholt werden.

Herrn Prof.Dr.Bosum danken wir für die Überlassung des Bohrlochmagnetometers, Herrn Dr.Thierbach für die Bereitstellung der Bohrung, Herrn Dr.Worzyk für die GTS-Ergebnisse, Herrn Brasse für die AMT-Messungen und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Vorhabens.

Literatur:

LOSECKE,W.: Über die Ortung von Salzstöcken mit Hilfe der Magnetotellurik. - BGR, Arch.Nr. 7548, Hannover 1972.

WORZYK,P.: Eine geoelektrische Tiefensondierung auf dem Salzstock bei Mardorf/Steinhuder Meer. Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Lerbach bei Köln, 1986.

SCHMUCKER,U.: Erfahrungen mit magnetischen Untertageregistrierungen. Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Lerbach bei Köln, 1986.

STEVELING,E. und B.FLUCHE: Test einer vertikalen Gradientensondierung in der Bohrung Mardorf. Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Lerbach bei Köln, 1986.