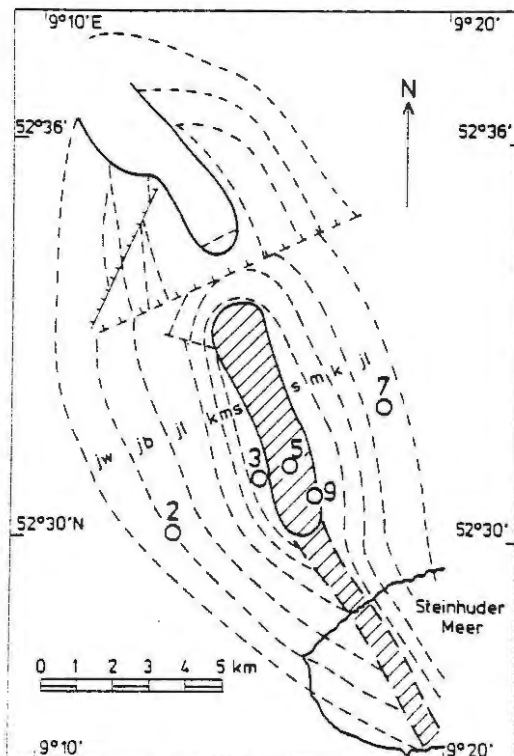


E. STEVELING, B. FLUCHE

Test einer vertikalen Gradientensondierung in der Bohrung Mardorf

Nachdem vom Institut für Geophysik Göttingen in den letzten Jahren mit einigen Experimenten der vertikale Gradient des horizontalen magnetischen Variationsfeldes in Bergwerkschächten gemessen wurde und während des Kolloquiums in Neustadt 1982 über Ergebnisse entsprechender Modellrechnungen vorgetragen worden ist, soll hier nun über erstmalige Variationsmessungen in einem Bohrloch berichtet werden.

Durch Absprache innerhalb der Gruppe "Bohrlochmagnetometer" der ARGE2 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 Salzstocks 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

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 100-200 m südlich von MA9.

mit Induktionsmagnetometern und Tellurikverstärkern und vom 24.6. bis zum 22.8.1985 als langperiodische Ergänzung mit einem Fluxgatemagnetometer und Tellurikverstärkern bei MA2 gemessen.

Für den Vergleich ist es besonders wichtig, die Leitfähigkeit der oberflächennahen Schichten zu kennen. Das NLfB Hannover hat unser Vorhaben daher mit Geoelektrischen Tiefensondierungen (Auslagen bis zu 6,8 km Länge) unterstützt. Außerdem wurden an den Stationen MA2, MA5 und MA9 vom Institut für Geophysik der TU Berlin AMT-Messungen durchgeführt.

Nach dem in Göttingen üblichen Verfahren wurden aus den MT-Registrierungen gute gleichzeitige Einzeleffekte ausgewählt, analysiert und dann im Frequenzbereich Übertragungsfunktionen zwischen den Feldkomponenten bestimmt. Für den Vergleich zwischen den Stationen wurde MA2 als Normalstation angenommen, da MA2 außerhalb des Salzstocks liegt und die beste Datenqualität sowie den weitesten Periodenbereich aufweist.

Eine Rotation des Koordinatensystems in Vorzugsrichtungen nach dem SWIFT-Kriterium ergab die nahezu periodenunabhängigen Ergebnisse in Tabelle 1.

	MA2	MA3	MA5	MA7	MA9
α	45°	5°	-5°	40°	-5°

Tabelle 1: Rotationswinkel α (nach SWIFT) .

Es ist also nicht gelungen, für die 5 Stationen eine einheitliche Vorzugsrichtung zu finden. Dies wird auch in Abb.2 deutlich. Für die Darstellung von Perturbationspfeilen wurde das Koordinatensystem in die Streichrichtung des Salzstocks rotiert. Für eine durch den Salzstock verursachte zweidimensionale Anomalie hätte die oberste Zeile der Perturbationspfeile verschwinden müssen. Dagegen passen die Vektoren (h_D , d_D) recht gut zu der vermuteten Salzstockanomalie. An den Randstationen MA2 und MA7 ist das anomale D-Feld praktisch Null, an den drei anderen Stationen im unmittelbaren Bereich des schlechtleitenden Salzstockes wird d_D negativ und es gilt $|d_D| \gg |h_D|$. Von der Vertikalkomponente paßt

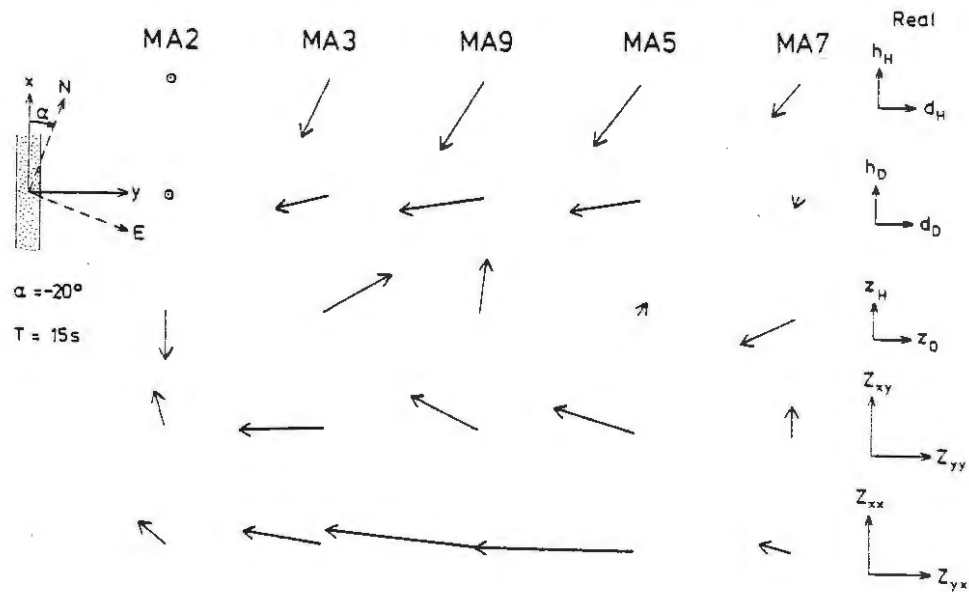


Abb.2: Realteil der Übertragungsfunktionen für die Periode $T = 15s$ als Perturbationspfeile (obere 3 Zeilen) bzw. tellurische Vektoren (untere 2 Zeilen) dargestellt. Die x-Richtung ist die Streichrichtung des Salzstocks und ist gegenüber Nord um 20° gedreht. Die in der rechten Spalte dargestellten Vergleichskomponenten sind für das Magnetfeld 0.1 Einheiten und für das tellurische Feld 2 mV/(nT · km) lang.

nur der z_D -Anteil einigermaßen zu dieser Anomalie. Ebenso wie der große (h_H, d_H) -Vektor spricht auch die z_H -Komponente für eine deutliche Dreidimensionalität der Anomalie.

An Hand der tellurischen Vektoren ist eine starke Verzerrung des elektrischen Feldes zu vermuten. Zwar sind die elektrischen Felder, wie zu erwarten, über dem Salz am stärksten, doch stehen die Vektoren (z_{xy}, z_{yy}) und (z_{xx}, z_{yx}) nicht senkrecht aufeinander. Wiederum "richtig" ist der Befund $|z_{yx}| \gg |z_{xx}|$.

Aus den Messungen an den beiden Randstationen MA2 und MA7 läßt sich am ehesten ein für das Meßgebiet typisches eindimensionales Widerstandsmodell ableiten. Auf die nach Tabelle 1 rotierten Daten wurde SCHMUCKER's ψ -Algorithmus angewandt und 4-, 5- und 6-Schichtmodelle gewonnen. Als Beispiel ist der Verlauf der integrierten Leitfähigkeit von 4-Schichtmodellen rechts in Abb.3 wiedergegeben. In dieser Darstellungsart weichen die Modelle mit höherer Schichtenzahl kaum von den 4-Schichtmodellen ab.

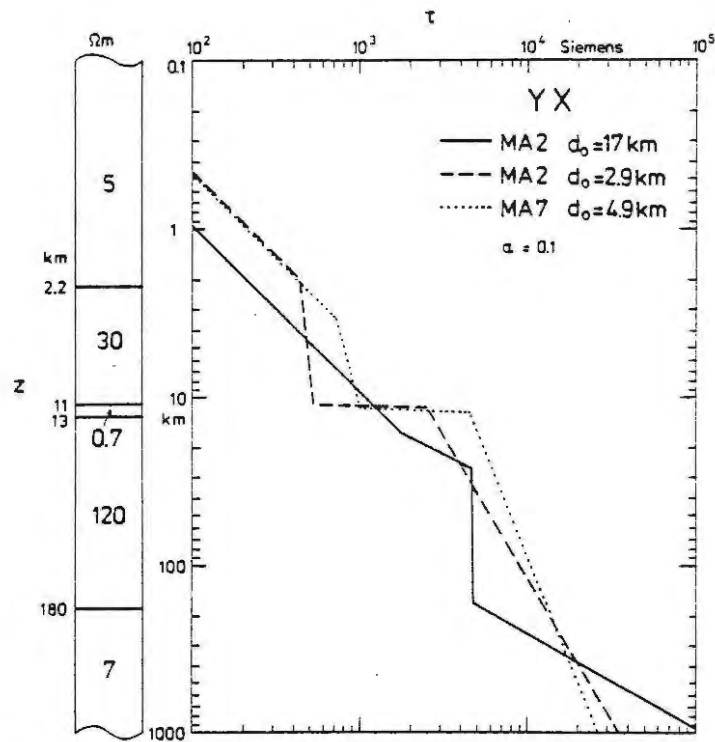


Abb.3: Aus Registrierungen in MA2 und MA7 mit dem ψ -Algorithmus bestimmte eindimensionale Widerstandsverteilung. Der Glättungsparameter ist $\alpha = 0.1$, d_0 sind die Schichtparameter. Rechts ist als Funktion der Tiefe z die integrierte Leitfähigkeit τ ab der Oberfläche dargestellt.

Die Steigung der Kurven ist hier ein Maß für den spez. Widerstand. Die Widerstandssäule links ist ungefähr als Mittelwert der Kurven für MA2 und MA7 anzusehen. Entsprechend der beiden Minima bei $d_0 = 2.9$ km und $d_0 = 17$ km gibt es für MA2 zwei Modelle. Im ersten wird der obere Bereich besser aufgelöst, im zweiten der untere. Entsprechend zugeordnet sind die beiden guten Leiter von 11-13 km und ab 180 km Tiefe.

Abb.4 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 2.2 km Tiefe identisch mit dem Modell in Abb.3, stammt also von MT-Messungen. Für das Gesamtmodell wurde die als fette Kurve dargestellte $\rho^*(z^*)$ -Kurve berechnet.

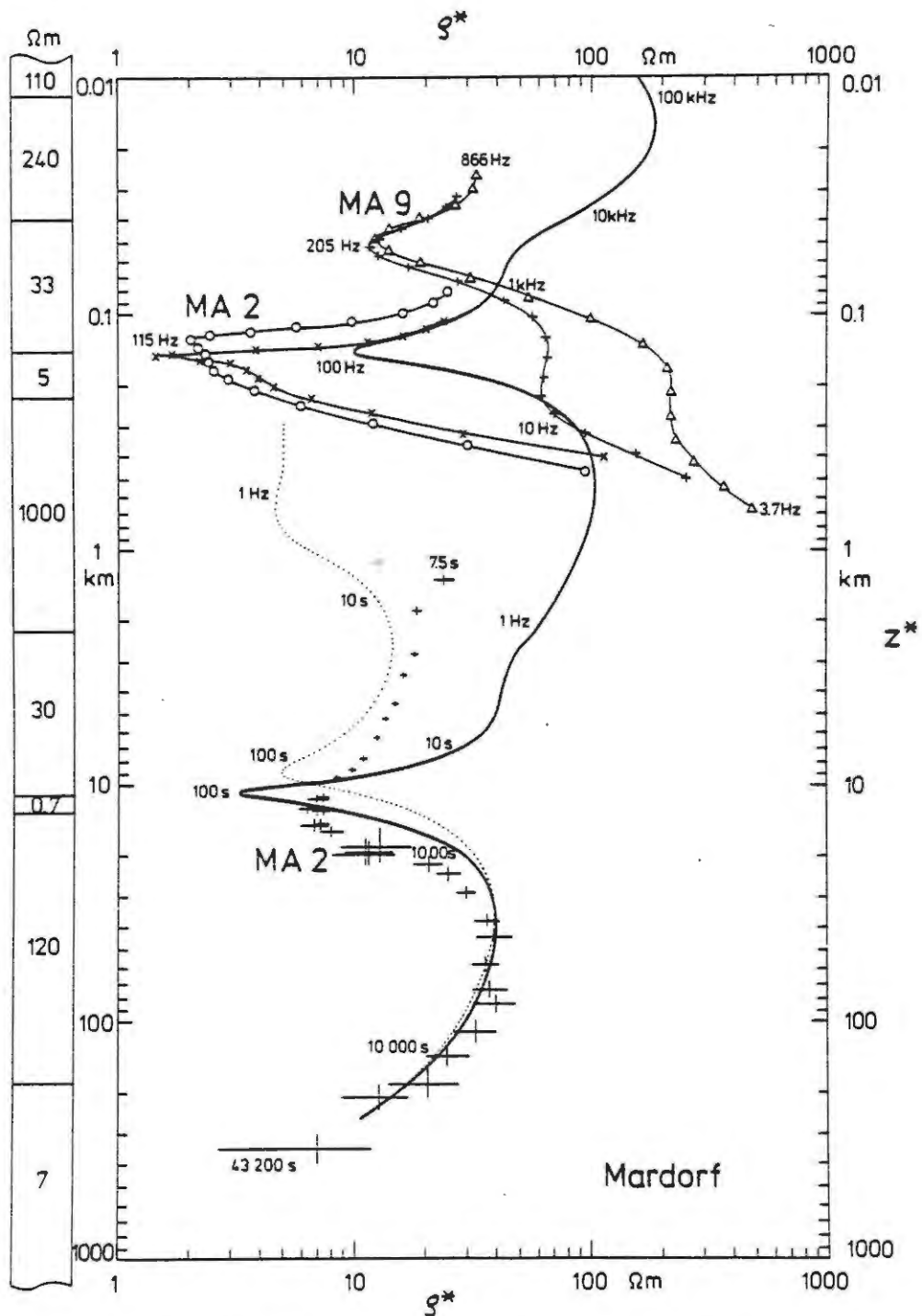


Abb.4: Gemeinsames Modell aus Messungen der Magnetotellurik, Audiomagnetotellurik und Geoelektrischen Tiefensondierung abgeleitet. Die fette Kurve ist die aus dem links angegebenen Widerstandsmodell berechnete $\rho^*(z^*)$ -Verteilung. Im oberen Drittel sind für beide Polarisierungen Bostick-Transformationen von AMT-Messungen in MA2 und MA9 angegeben. Die Fehlerkreuze in der unteren Hälfte sind MT-Messungen der um 45° rotierten YX-Komponente von MA2. Die gestrichelte Kurve gehört zum Widerstandsmodell der Abb.3 .

Im oberen Bilddrittel kann man beurteilen, ob AMT und GTS zu ähnlichen Ergebnissen kommen. Die durchgezogenen Kurven für den Frequenzbereich 3.7 - 866 Hz sind Bostick-Transformationen der AMT-Messungen in MA2 und MA9. Mit x bzw. + sind die xy-, mit 0 bzw. Δ die yx-Elemente markiert. Die Kurven von MA2 treffen die Tiefe des guten Leiters sehr gut, doch liegt MA2 ca. 4 km 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.

Die gestrichelte Kurve gehört zum Modell in Abb.3. Sie stimmt nicht sehr 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 (siehe Beitrag in diesem Protokoll).

Grundlage des Modells ist das Inversions-Modell aus Abb.3. Dorthinein wurde als symmetrische Aufwölbung der schlechtleitende Salzstock gelegt (Abb.5). 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 wir in Abb.2 gesehen hatten, daß eigentlich eine 3D-Interpretation nötig wäre. Wohl aus diesem Grunde ist die hier nicht gezeigte Anpassung der anomalen Vertikalkomponente weniger gut gelungen.

Das Modell zeigt über dem hochohmigen Salz (1000 Ω m) eine 200 m mächtige gutleitende Deckschicht mit 10 Ω m spez. Widerstand, d.h. einer integrierten Leitfähigkeit von 20 S.

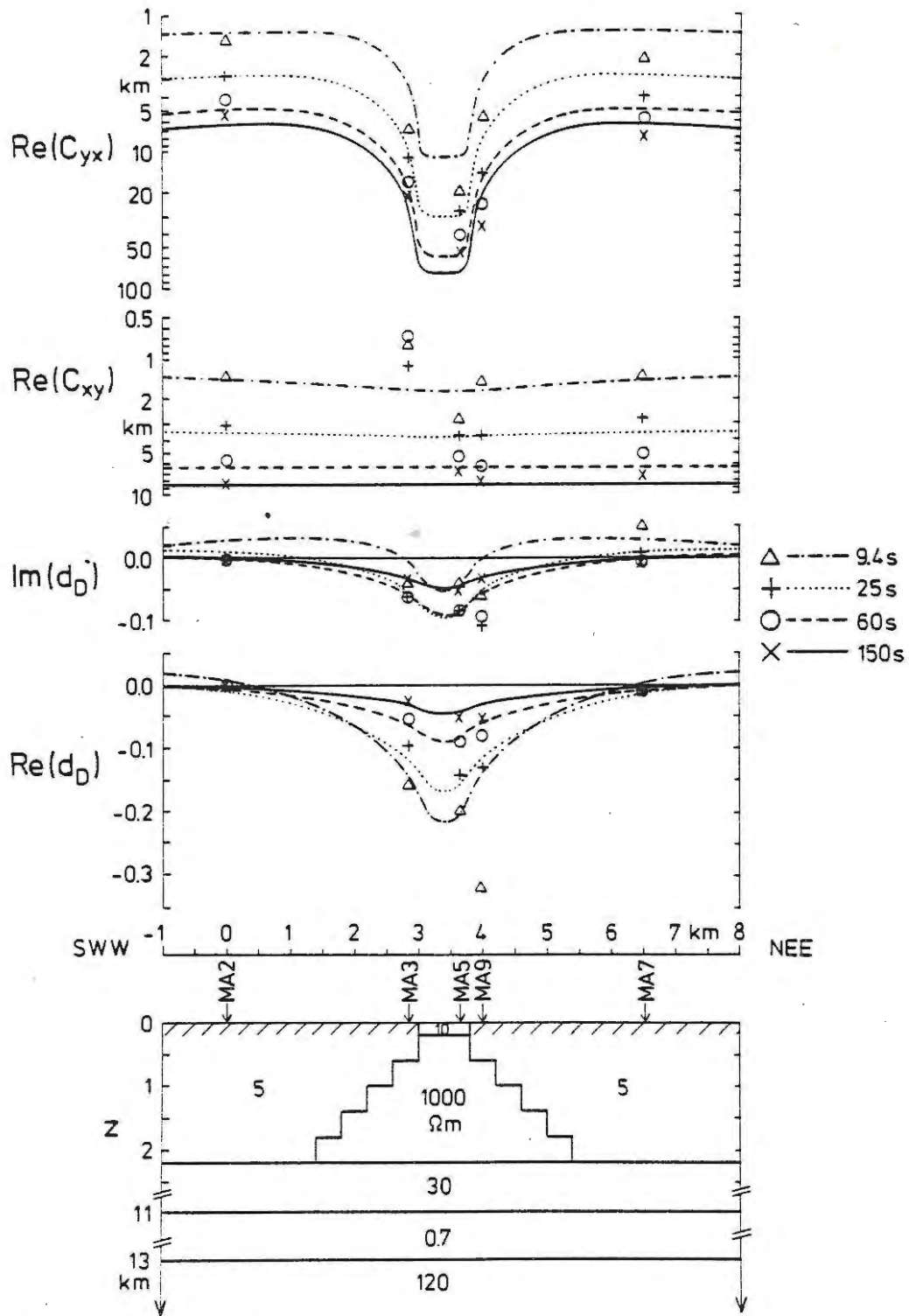


Abb.5: 2D-Widerstandsmodell des Salzstocks Husum. Für 4 Perioden von 9.4s bis 150s werden gemessene Übertragungsfunktionen (mit Symbolen markierte Punkte) mit aus dem Modell berechneten (Linien) verglichen.

Die Geoelektrische Tiefensondierung (vgl. Abb.5) ergab eine integrierte Leitfähigkeit von 19.4 S, also eine gute Übereinstimmung. Außerdem passen die integrierten Leitfähigkeiten der normalen Deckschicht bis in 2.2 km Tiefe und des guten Leiters in 11-13 km Tiefe gut zu Ergebnissen eines Magnetotellurik-Profiles südlich des Steinhuder Meeres von LOSECKE und KNÖDEL.

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 1.5 nT, 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 350 m Teufe abgesenkt, legte sich dort wegen einer 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 205 m Tiefe erbohrt. Nur die oberen 242 m der Bohrung sind verrohrt. Das Magnetometer befand sich also unverrohrt im Salz.

Die 6 Kanäle des Bohrlochmagnetometers und die 4 Kanäle (einschließlich Temperatur) des Oberflächenmagnetometers wurden mit einer Taktrate von 6s aufgezeichnet. Der technische Ablauf verlief problemlos ohne Zwischenfälle. Wegen eines fehlenden Ersatzkreisels konnte eine ursprünglich geplante, deutlich längere Meßzeit nicht realisiert werden. Insbesondere fiel der wegen einer genauen Kalibrierung der Systeme vorgesehene Parallel-Lauf 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 dieser Zeitintervalle ist in Abb.6 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.

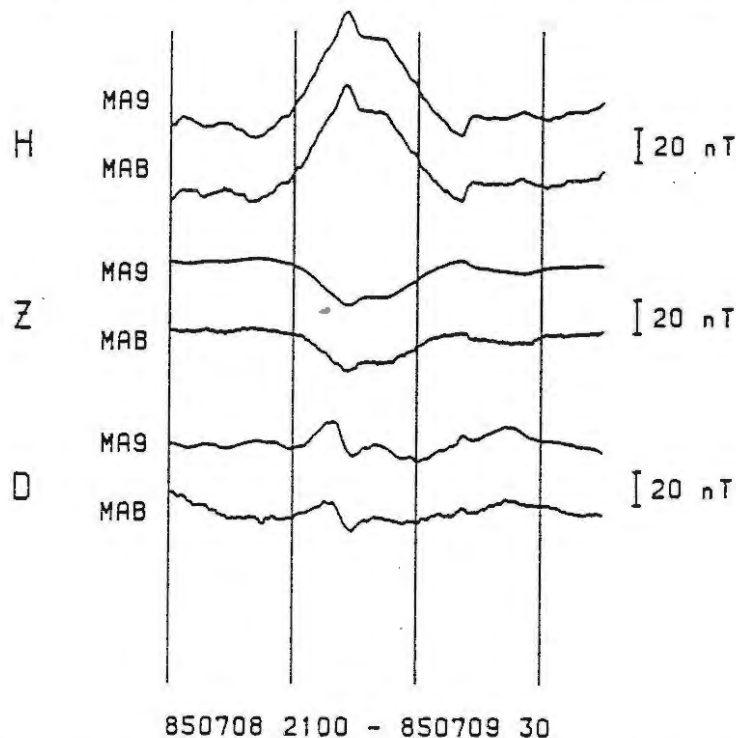


Abb.6: Gleichzeitige dreieinhalbstündige Registrierung von Variationen in einem Bohrloch (MAB) und darüber auf der Erdoberfläche (MA9).

Wegen der zu geringen Anzahl der Effekte kam nur eine mono- und bivariate Analyse im Zeitbereich in Frage. Die bivariaten Ergebnisse weichen nicht signifikant von den monovariaten ab. Im Mittel über die 3 Effekte ergibt die monovariante 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 verhältnismäßig 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 viel zu groß ist. Die ausgewerteten Effekte haben eine überwiegende Grundperiode von ca. 1 Stunde. Mit dem Modell der Abb.5 erhält man für diese Periode am Ort des Bohrlochmagnetometers nur eine Abschwächung im Promillebereich. Sicher nachweisbare Abschwächungen $>5\%$ erhält man erst für Perioden $<100s$.

Die beobachtete Abschwächung kann also nicht reell sein und ist vermutlich auf eine nicht ausreichend genaue Kenntnis der Skalenfaktoren der Magnetometer zurückzuführen. Variationsperioden $<100s$ mit ausreichenden Amplituden wären höchstens während eines magnetischen Sturms beobachtbar gewesen.

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 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.