

Messungen mit dem Göttinger Bohrlochmagnetometer zur vertikalen Gradientensondierung in der KTB-Oberpfalz VB.

E.Steveling, K.Spitzer, M.Leven

1. Einleitung

Die vertikale Gradientensondierung ist in den Protokollen der Kolloquien "Elektromagnetische Tiefenforschung" gut dokumentiert. 1965 regte J.MEYER diese Methode in Goslar an, 1986 berichteten in Lerbach U.SCMUCKER über Untertageregistrierungen in Bergwerken sowie E.STEVELING über Bohrlochmessungen in Mardorf und 1988 folgten von E.STEVELING in Königstein Modellrechnungen.

Inzwischen ist in Göttingen ein Bohrlochmagnetometer speziell für die vertikale Gradientensondierung gebaut worden. Es gab 1989/90 Messungen mit dem Magnetometer in der KTB-Vorbohrung, und ein Teil dieser Messungen ist jetzt ausgewertet.

2. Beschreibung des neuen Göttinger Bohrlochmagnetometers

Um die neue Sondierungsmethode in der KTB-Vorbohrung testen zu können und um herauszufinden, welche Anforderungen an das benötigte spezielle Bohrlochmagnetometer gestellt werden, wurde im Institut für Geophysik Göttingen ein derartiges Meßsystem entwickelt und gebaut.

Anhand des Blockschaltbildes (Abb.1) ist zu erkennen, daß eine Unterteilung vorgenommen werden kann in Geräte, die übertage verbleiben (Datenerfassung) und andere, die Bestandteile der Bohrlochsonde im engeren Sinne sind.

2.1 Datenerfassung

Die eigentliche Datenerfassung besteht im wesentlichen aus einem Personalcomputer, einer Uhr und einer Stromversorgung und steht natürlich übertage. Im Rechner werden die Meßdaten der Sonde mit der zugehörigen genauen Zeit abgespeichert, auf dem Monitor des Rechners kann der zeitliche Verlauf der Messungen beobachtet, und über den Rechner können auch Einstellungen innerhalb der Sonde vorgenommen werden. Im Prinzip ist dann ein 3-adriges Kabel zwischen der Datenerfassung und der Sonde ausreichend, um die Sonde mit Strom zu versorgen und den Datenaustausch zwischen Computer und Sonde zu gewährleisten.

Die Datenerfassung ist in 19 Zoll-Einschübe untergliedert, die in ein fahrbares Gestell eingebaut wurden, so daß die ganze Anlage problemlos in einen VW-Transporter paßt. Sie besteht im einzelnen aus:

- Nadeldrucker
- DCF-Uhr
- Kabeltreiber
- Farbmonitor mit VGA-Grafik
- Rechner mit Tastatur (80286+80287, 49 MByte Festplatte,
40 MByte Streamer, Telemetriekarte)
- DC/DC-Wandler
- DC/AC-Wandler
- Batterieladegerät und Bleiakкумуляtor

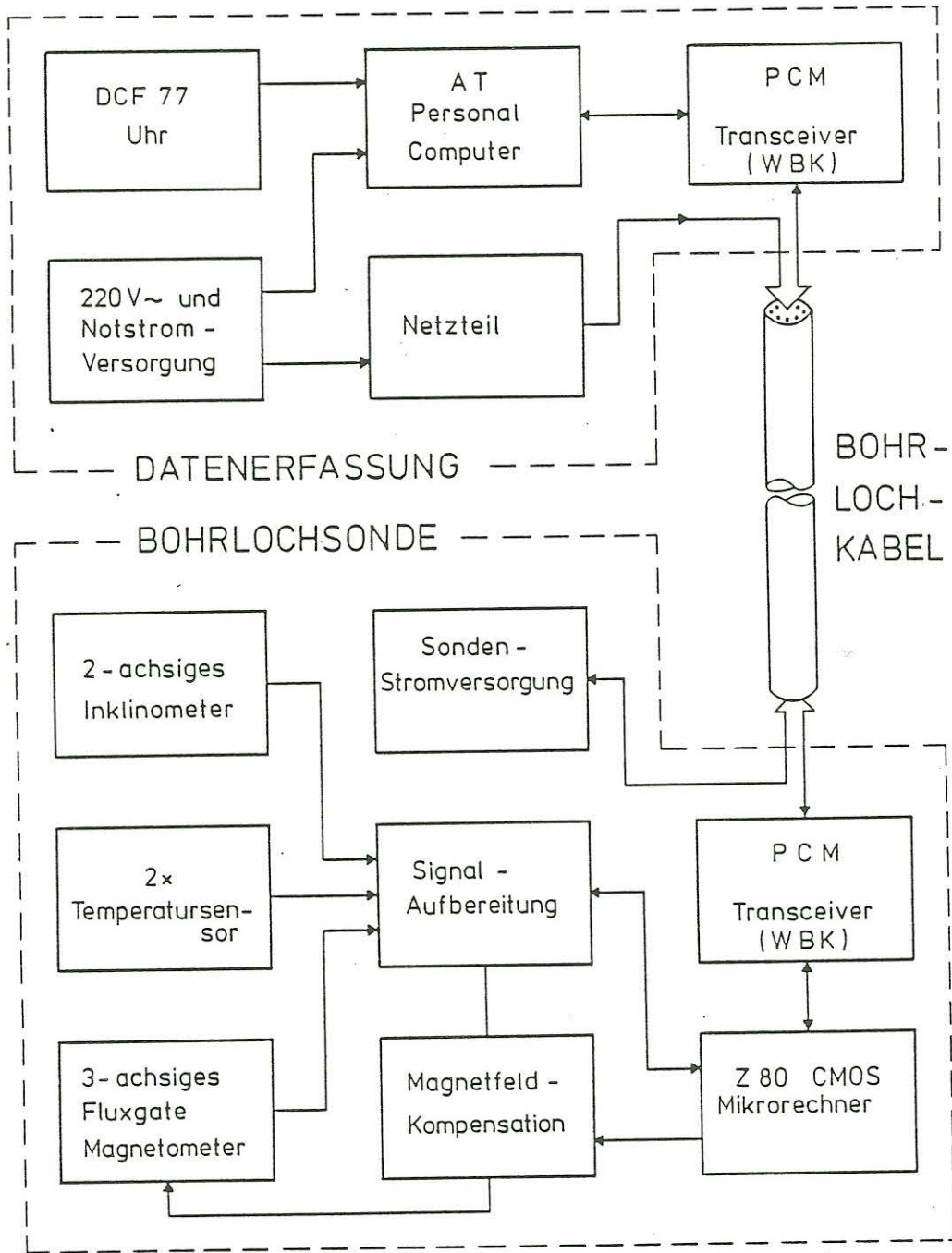


Abb. 1: Blockschaltbild des gesamten Meßsystems (Datenerfassung und Bohrlochsonde).

Als zentrale Einheit der Datenerfassung- und steuerung wird ein AT-kompatibler Personalcomputer im Industriegehäuse mit DOS-Betriebssystem benutzt. Das Steuerprogramm für die Kommunikation mit der Sonde ist in Turbo C geschrieben. Die Hochsprache Turbo C ermöglicht ein maschinennahes Programmieren und damit einen schnellen Datentransfer sowie eine schnelle Bildschirmgrafik.

Über eine serielle Schnittstelle ist die DCF-Uhr mit dem Rechner verbunden. Jeder Sekundenimpuls dieser Uhr kann einen Datenerfassungszyklus auslösen. Dies bedeutet, daß die Aufzeichnung der Sondensignale mit dem DCF-Zeitzeichen synchronisiert ist und über die exakte Zeituordnung Vergleiche mit simultanen Registrierungen anderer Meßstationen sehr erleichtert werden.

Der Übertrager des von uns modifizierten WBK-Kabeltreibers ist primärseitig direkt an das Bohrlochkabel angeschlossen und damit das Gegenstück zum Kabeltreiber in der Bohrlochsonde. Sekundärseitig ist er über die innerhalb des Rechners befindliche WBK-Telemetrikarte mit dem Bussystem des Personalcomputers verbunden.

Ein besonderes Problem ist die Stromversorgung der Bohrlochsonde. Um möglichst geringe Störungen im Bohrlochkabel zu erzeugen, haben wir uns für eine Gleichstromversorgung entschieden. Die Leistungsaufnahme der Sonde beträgt nur 6W. Unser Übertagenetzteil ist ein DC/DC-Wandler, der die 12V Spannung eines 230 Ah Bleiakкумуляtors auf einstellbare 50V-60V heraufsetzt.

Die Kapazität des Bleiakкумуляtors wurde so hoch angesetzt, da er gleichzeitig einen DC/AC-Wandler versorgt, der die Batteriespannung in geregelte 220V Wechselfrequenz für den Personalcomputer umsetzt. Damit ist es möglich, die gesamte Anlage etwa fünf Stunden lang nur aus dem Akku zu betreiben und Lücken in der Langzeit-Datenerfassung durch Ausfälle der öffentlichen Netzversorgung weitgehend zu vermeiden.

2.2 Mechanischer Aufbau der Sonde

Gehäuse

Typ:	Schlumberger ECH-MSA, Low Magnetic
Material:	vermutlich Monel
Durchmesser:	außen 85,7 mm (3 3/8 Zoll) innen 70,5 mm
Länge:	3190 mm 3580 mm mit Endstopfen und AH-64 Adapter
zul. Maximaldruck:	20000 psi bei 400°F (ca. 1380 bar bei 204°C)

Chassis

Typ:	Eigenbau
Material:	Messing
Durchmesser:	außen 70,5 mm (Halbschalen) innen 65,0 mm (freies Maß für Einbauten)
Länge:	3105 mm

Tabelle 1: Mechanischer Aufbau der Bohrlochsonde

Da mit der Sonde äußerst schwache Magnetfelder gemessen werden sollen, muß auch der mechanische Aufbau der Sonde möglichst unmagnetisch sein. Das Chassis wurde in Halbschalen-Bauweise in institutseigener Werkstatt gefertigt. Es ist zur Aufnahme von jeweils 65 mm breiten Elektronikplatinen eingerichtet.

2.3 Sondenelektronik

Die Bohrlochsonde enthält als Sensoren außer dem Magnetometer auch Inklinometer und Temperaturfühler. Die Analogdaten dieser Sensoren werden verstärkt, gefiltert und in digitale Daten umgewandelt. Die Wandlung der Daten und die Kommunikation mit der Datenerfassung werden von Mikroprozessoren gesteuert.

Das Magnetometer ist eine triaxiale Förstersonde IDA 1.752, die den räumlichen Magnetfeldvektor in den orthogonalen sondenbezogenen x,y,z-Komponenten mißt. Die Sonde enthält außer den 3 Sensoren auch Vorverstärker, die von uns modifiziert wurden. Ihre Ausgangsspannung ist um den Faktor 2,5 auf nun 0,1 mV/nT angehoben, und rausch- und driftärmere Operationsverstärker sind eingesetzt worden.

Bedingt durch die im Erdfeld zu erwartenden ± 50000 nT erhält man dementsprechend Ausgangsspannungen im Bereich von $\pm 5,0$ V. Ein Tiefpaß-Meßverstärker verstärkt und filtert die Ausgangssignale der Förstersonden-Meßelektronik. Bei der Messung von Feldwerten ist der Betrag der Verstärkung gleich 1 und die 3dB-Grenzperiode 2,9 s.

Nach der Messung der Feldwerte (Hauptfeld) im stationären Zustand, d.h. bei festgesetzter Sonde, werden in den X-,Y- und Z-Meßspulen der Förstersonden Gegenfelder erzeugt, die genau dem gemessenen Hauptfeld entsprechen. Auf diese Weise erfolgt eine Kompensation des momentan gemessenen Magnetfeldes in allen drei Komponenten.

Durch Anheben der Verstärkung des Tiefpaß-Meßverstärkers um den Faktor 40 können nun erdmagnetische Variationen gut aufgelöst werden. Mit der Umschaltung der Verstärkung erfolgt gleichzeitig eine Anhebung der 3dB-Grenzperiode von 2,9 s auf 11,53 s.

Der Ausgang des Meßverstärkers ist einerseits direkt mit einem Kanal des Multiplexers und andererseits mit einem nachgeschalteten Hochpaßverstärker verbunden. Hier werden die Signale um den Faktor 9 nachverstärkt und außerdem bei 115 s hochpaßgefiltert, so daß als Summe ein Bandpaß für den Periodenbereich 11,53-115 s entstanden ist. Der Ausgang wird dann auch auf den Multiplexer geführt. Diese Nachverstärkung und Nachfilterung eröffnet die Möglichkeit, auch Pulsationen aufzuzeichnen. Wegen dieser doppelten Aufzeichnung der Magnetfeldkomponenten gibt es 6 Magnetfeldkanäle.

Mit dem zweiachsigen Inclinometer soll die Neigung der Sonde im Bohrloch gegenüber der Vertikalen in der x- und y-Richtung gemessen werden. Dabei ist x die Richtung des X- und y die Richtung des Y-Sensors im Magnetometer. Statt der beiden Neigungskomponenten kann wahlweise die Temperatur an zwei Stellen innerhalb der Sonde zu Kontrollzwecken gemessen werden.

	Feldwerte (1x)	Variationen (40x)
Kanal 1: Magnetfeld x	(FTX) 100 μ V/nT	(VIX) 4 mV/nT
Kanal 2: Magnetfeld y	(FTY) 100 μ V/nT	(VTY) 4 mV/nT
Kanal 3: Magnetfeld z	(FTZ) 100 μ V/nT	(VTZ) 4 mV/nT
Kanal 4: Magnetfeld x	(FBX) 900 μ V/nT	(VBX) 36 mV/nT
Kanal 5: Magnetfeld y	(FBY) 900 μ V/nT	(VBY) 36 mV/nT
Kanal 6: Magnetfeld z	(FBZ) 900 μ V/nT	(VBZ) 36 mV/nT
Kanal 7: entweder Temperatur T1 oder Neigung x (NX)	33,3 mV/K 100,0 mV/Grad	
Kanal 8: entweder Temperatur T2 oder Neigung y (NY)	33,3 mV/K 100,0 mV/Grad	

Tabelle 2: Belegung der Multiplexer-Kanäle

Der Multiplexer dient dazu, acht verschiedene analoge Signale nacheinander auf den Eingang des Analog/Digital-Wandlers zu schalten. In Tabelle 2 ist die Belegung der Kanäle mit Signalen einschließlich der Skalenfaktoren angegeben. Die Größe der Skalenfaktoren ist davon abhängig, ob Feldwerte (Verstärkung 1) oder Variationen (Verstärkung 40) registriert werden.

Unter Berücksichtigung der Auflösung des A/D-Wandlers (14bit; 0,61 mV/bit) könnten also Magnetfeldvariationen von 0,017 nT aufgelöst werden. Allerdings wird diese Auflösung in der Praxis wegen des Rauschens der Förstersonden nicht ganz erreicht. Genaue Messungen sind sehr schwierig, nach den bisherigen Erfahrungen schätzen wir die Auflösung auf etwa 0,03 nT bis 0,05 nT.

Von entscheidender Bedeutung für die Registrierung zeitlicher Magnetfeldvariationen ist die Güte der Feldkompensation. Sie muß so rauscharm sein, daß die Magnetometerauflösung nicht verschlechtert wird und außerdem langzeitstabil, um die Basisstabilität zur Messung langperiodischer Variationen zu gewährleisten. Zur Feldkompensation wird zunächst jede Hauptfeldkomponente gemessen und mit dem A/D-Wandler digitalisiert. Der Digitalwert wird nun fest in einen 14bit breiten D/A-Wandler eingespeichert. Der D/A-Wandler liefert während der gesamten Dauer der Variationsmessung eine konstante Analogspannung, mit der eine Stromquelle gesteuert wird, die wiederum in einer Zusatzspule um die Förstersonde herum ein Kompensationsmagnetfeld erzeugt. In Abhängigkeit von der Polarität des Hauptfeldes kann die Richtung des Kompensationsstromes umgeschaltet werden. Die Kompensation erfolgt wegen der zusätzlichen Vorzeichenerkennung nicht nur mit der 14bit-Genauigkeit des D/A-Wandlers, sondern so insgesamt sogar mit 15bit.

Als zentralen Steuerrechner enthält die Sonde ein vollständiges kleines Z80-Mikrorechnersystem in CMOS-Technologie. Telemetriekarte und Kabeltreiber sind keine Eigenentwicklungen, sondern von der Westfälischen Berggewerkschaftskasse Bochum (WBK) gekauft worden. Die Telemetriekarte dient als Sende- und Empfangsstation zum Austausch digitaler Daten und Kontrollwörter mit dem PC übertage. Durch diese Art der Datenübertragung benötigen wir im Prinzip nur 3 Kabeladern, je eine für die positive Stromversorgung, für die Datenübertragung und für die gemeinsame Masse von Stromversorgung und Datenübertragung. Es wird also auf der gleichen Leitung wechselweise gesendet und empfangen.

3. Messungen in der KTB-Vorbohrung

Mit dem neuen Magnetometer gab es bisher insgesamt 3 Experimente an und in der KTB-Vorbohrung. Die Teilerperimente während der 3 Meßphasen sind im folgenden durchnummeriert.

1. Anpassung der Telemetrie an das Bohrlochkabel
2. Erste Testmessungen in der Vorbohrung bis 2410 m Teufe
3. Absolutmessungen auf dem Hauptbohrplatz
4. Variationsregistrierungen neben dem Bohrturm (10 Stunden)
5. Teufenabhängige Registrierungen (Teufen 0-1590 m)
6. Zeitabhängige Registrierungen (Teufe 1590 m, 65 Stunden)
7. Teufenabhängige Registrierungen (Teufen 1590-2121 m)
8. Zeitabhängige Registrierungen (Teufe 2121 m, 44 Stunden)
9. Teufenabhängige Registrierungen (Teufen 2050-2401 m)
10. Zeitabhängige Registrierungen (Teufe 2401 m, 44 Stunden)
11. Teufenabhängige Registrierungen (Teufen 2401-3005 m)
12. Zeitabhängige Registrierungen (Teufe 3005 m, 32 Minuten)
13. Absolutmessungen auf dem Hauptbohrplatz
14. Eichungen auf dem Hauptbohrplatz
15. Teufenabhängige Registrierungen (Teufen 0-3000 m)
16. Zeitabhängige Registrierungen (Teufe 3000 m, 12 Tage)

Tabelle 3: Übersicht über das Meßprogramm

- 1- 2 5./6. Juni 1989
- 3-12 29.Juni - 7.Juli 1989
- 13-16 19.Dez. - 2.Jan. 1990

3.1 Ein teufenabhängiges Registrierbeispiel

Die hier vorgestellten Registrierungen stammen aus der 3. Meßphase (Teilerperiment 15). Nach einer schnelleren Fahrt in der Verrohrung wurde der Teufenbereich von 460 m bis 3000 m während des Absenkens des Bohrlochmagnetometers kontinuierlich mit 10 m/min vermessen. Das Teufeninkrement zwischen 2 Messungen eines vollständigen Datensatzes mit 8 Kanälen betrug 167 mm. Für die Anfertigung der Plots in der Abb.2 sind die während der Fahrt notierten Teufenablesungen geglättet und dann in 0.2 m-Inkrementen den interpolierten Feldwerten der Sonde über die mitregistrierte Uhrzeit zugeordnet worden. Von links nach rechts sind aufgetragen:

NRM	natürliche remanente Magnetisierung (Feldlabordaten)
FTT	magnetisches Totalfeld (berechnet aus FTX,FTY,FTZ)
FTX	x-Komponente Magnetfeld, Feldwerte, Tiefpaß
FTY	y-Komponente Magnetfeld, Feldwerte, Tiefpaß
FTZ	z-Komponente Magnetfeld, Feldwerte, Tiefpaß
FBX	x-Komponente Magnetfeld, Feldwerte, Bandpaß
FBY	y-Komponente Magnetfeld, Feldwerte, Bandpaß
FBZ	z-Komponente Magnetfeld, Feldwerte, Bandpaß
NX	x-Komponente Neigungsmesser
NY	y-Komponente Neigungsmesser

Alle Kurven wurden ohne Angabe der Basis auf ihren Mittelwert zentriert. Dadurch konnten die Vertikalkomponente (FTZ und FBZ) sowie das Totalfeld (FTT) gegenüber den Horizontalkomponenten 50x empfindlicher geplottet werden!

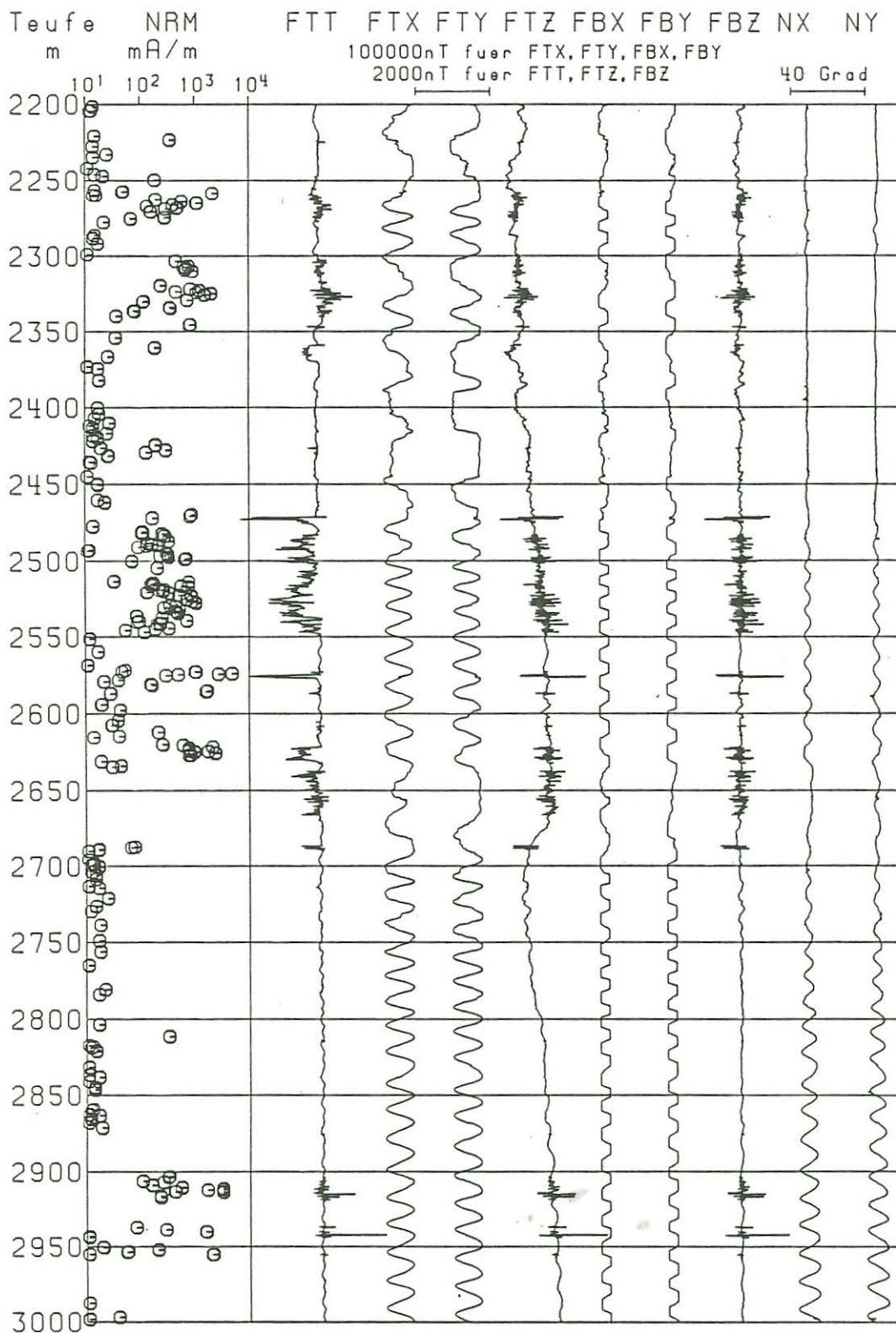


Abb.2: 7 Magnetfeldkomponenten, 2 Neigungskomponenten und natürliche remanente Magnetisierung, Teufen 2200-3000 m

Die im Feldlabor (Bücker, pers. Mitteilung) an Bohrkernen gemessene natürliche remanente Magnetisierung ist am linken Rand in einem logarithmischen Maßstab von 10 bis 10000 mA/m aufgetragen worden. Alle Teufenbereiche (z.B. 2470 m - 2630 m) mit einer erhöhten NRM sind in den Komponenten FTT, FTZ und FBZ deutlich an kleinräumigen Feldschwankungen von einigen 100 nT zu erkennen. Hohe Werte (NRM > 100 mA/m) verursachen Spikes von sogar einigen 1000 nT (z.B. Teufen 2475 m und 2575 m).

Außer in den Neigungskomponenten NX und NY sind Lotabweichungen der Bohrung auch im großräumigen Gang der FTZ-Magnetfeldkomponente sichtbar. Dieser Gang ist wegen des Bandpasses aus FBZ herausgefiltert. Eine durch das dort glatte Bohrloch begünstigte, sehr gleichförmige Sondenrotation von 1 Umdrehung/18m ist von 2700 m bis 3000 m gut zu sehen. Die zunehmenden Doppelamplituden zeigen den Aufbau der Bohrlochneigung bis auf etwa 6° bei 3000 m. Auf diese Rotation sind auch die Oszillationen der Horizontalkomponenten des Magnetfeldes FTX und FTY zurückzuführen. In Übereinstimmung mit der Horizontalkomponente des Erdmagnetfeldes betragen die Doppelamplituden etwa 40000 nT. Wegen ihrer 9-fach höheren Empfindlichkeit werden die Kanäle FBX und FBY während der Rotation übersteuert, was zu dem erkennbaren Kappen der Spitzenwerte geführt hat. In FTZ ist der Neigungsabbau längs der Richtbohrstrecke 2635 m - 2687 m deutlich sichtbar.

3.2 Ein zeitabhängiges Registrierbeispiel

Abb.3 zeigt die zeitabhängige Registrierung der erdmagnetischen Pulsationen mit dem Bohrlochmagnetometer (Index 1) am 07.07.89 in der Zeit zwischen 14:50 Uhr und 15:10 Uhr UT und einer Teufe von 3005 m aus dem Teilexperiment 12 und zum Vergleich die Registrierung eines Induktionsspulenmagnetometers an der Erdoberfläche (Index 2). Es handelt sich beim Bohrlochmagnetometer um die bandpaßgefilterten, hochempfindlichen Pulsationskanäle mit der größten Auflösung. Die Skalierung bezieht sich auf eine Periodenlänge von $T=20$ s. Diese Zeitreihen sind, wie man deutlich sieht, nicht direkt miteinander vergleichbar, da

1. die Orientierung der Geräte nicht übereinstimmt und
2. die unterschiedlichen, frequenzabhängigen Empfindlichkeiten der Meßgeräte nicht berücksichtigt sind.

Den Orientierungsfehler erkennt man daran, daß sich die spektrale Energie beim Bohrlochmagnetometer fast gleich auf die Komponenten VBX1 und VBY1 verteilt, während die Komponente VBX2 der Induktionsspulen an der Oberfläche den Hauptanteil beinhaltet. Es ist zu erwarten, daß der Orientierungsfehler in erster Linie durch eine Rotation um die vertikale Achse verursacht wird. Auf eine unterschiedliche spektrale Empfindlichkeitsverteilung weist die Schwingung in den X-Komponenten mit großer Amplitude und einer Periodenlänge von etwa 75 s in der Mitte des Intervalls hin. Sie ist beim Bohrlochmagnetometer deutlich größer ausgeprägt als beim Induktionsspulenmagnetometer. Hingegen sind die Oszillationen gegen 14:55 Uhr mit einer Periodenlänge von etwa 30 s bei beiden Instrumenten etwa gleich groß.

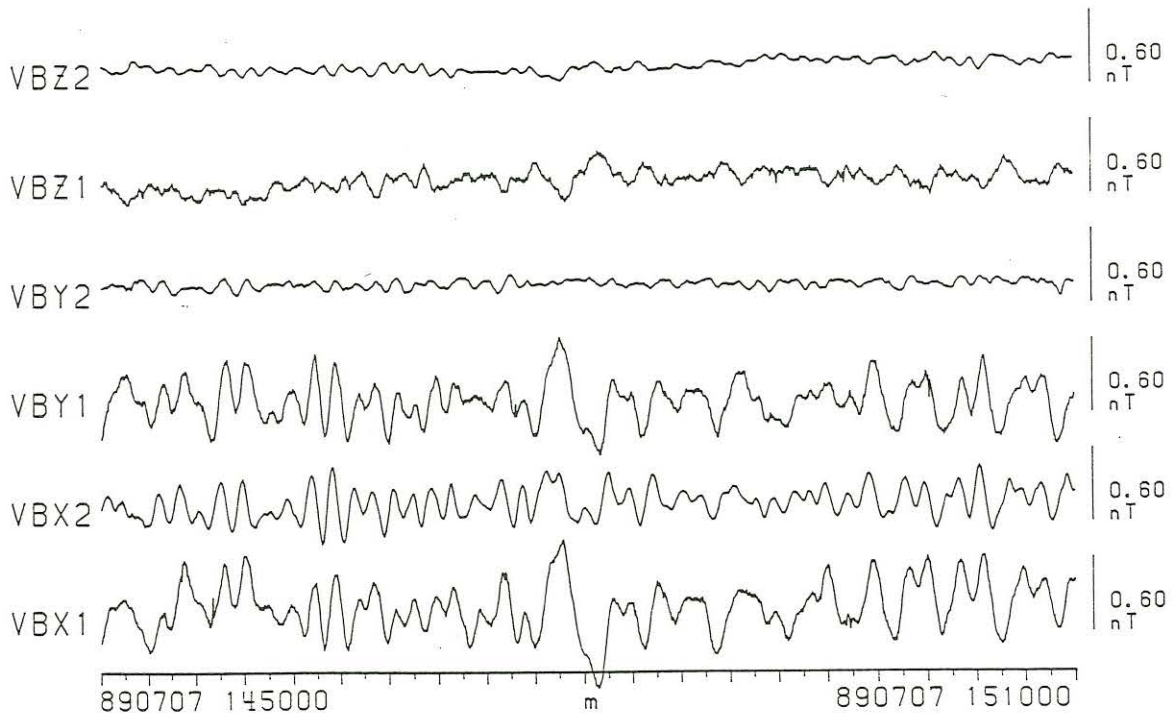


Abb.3: Pulsationsregistrierung des Bohrlochmagnetometers (Index 1) in einer Tiefe von 3005 m und eines Induktionsspulenmagnetometers an der Erdoberfläche (Index 2). Bei den Daten handelt es sich um unbehandelte Rohdaten.

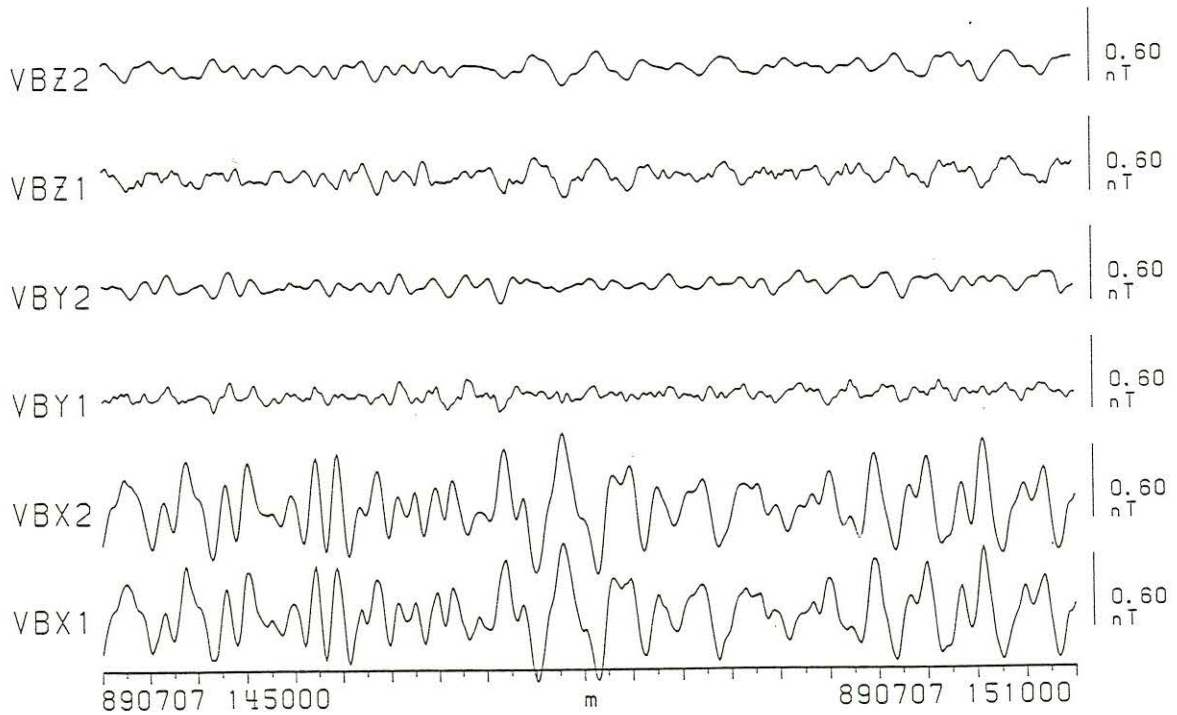


Abb.4: Das gleiche Intervall wie in Abb.3 nach der Orientierung der Bohrlochsonde und Berücksichtigung der Geräteresonanzkurven.

Um vergleichbare Registrierungen zu erhalten, müssen beide Fehler korrigiert werden. Deshalb wurde erstens ein Verfahren entwickelt, das die Sondenorientierung allein mit eigenen Messungen möglichst genau ermittelt und zweitens eine genaue dynamische Eichung durchgeführt.

Bei Bohrlochmessungen stellt die Ermittlung der Orientierung der Sonde ein grundsätzliches Problem dar. Während die mathematische Rotation um bekannte Eulerwinkel (Vorwärtsproblem) mit Hilfe einfacher Matrixmultiplikationen ausgeführt werden kann, gestaltet sich der Lösungsweg der Umkehraufgabe, also die Bestimmung der Eulerwinkel, als nicht trivial. Als Meßgrößen dienen die drei orthogonal zueinander stehenden Komponenten des Erdmagnetfeldes, die einmal an der Erdoberfläche (\underline{F}^0) und zum zweiten im Bohrloch (\underline{F}^u) gemessen werden müssen. Die Matrix \underline{X}^u ergibt sich durch Multiplikation von \underline{F}^u mit den Einheitsvektoren des Bohrlochkoordinaten Systems. \underline{F}^0 ist die Summe der Spaltenvektoren von \underline{X}^0 . Eine Rotationsmatrix \underline{R} soll gefunden werden, die das Koordinatensystem der Bohrlochsonde in das der Oberflächenmagnetometer wie folgt überführt:

$$\underline{X}^0 = \underline{R} * \underline{X}^u$$

Das Koordinatensystem von \underline{X}^0 ist nach magnetisch Nord (x) und Ost (y), sowie senkrecht nach unten (z) ausgerichtet. Das obige Gleichungssystem ist nichtlinear und inhomogen und läßt sich ohne Zusatzinformationen nicht eindeutig lösen. Die benötigten Zusatzinformationen können jedoch durch einen eingebauten Neigungsmesser von der Sonde selbst geliefert werden. Eine Newton-Iteration führte nicht zum Erfolg, da die dazu benötigte Jacobi-Matrix von \underline{R} singularär ist. Ein einfacher Algorithmus symmetrischer, orthogonaler Matrizen auf der Basis einer Householder-Transformation ergibt eine Rotationsmatrix \underline{R}' und das Gleichungssystem $\underline{X}' = \underline{R}' * \underline{X}^u$. \underline{R}' ist eine Lösung, die bis auf eine Rotation um \underline{F}^0 festgelegt ist. Für das weitere Vorgehen benötigt man den genauen Neigungswinkel der Sonde. \underline{R}' wird um \underline{F}^0 gedreht, bis die z-Achse des gestrichenen Systems den gemessenen Neigungswinkel mit der Senkrechten bildet. Da dieser Winkel im allgemeinen zweimal auf dem Rotationskegel vorkommt, kann die eindeutige Lösung durch einfaches Probieren oder durch ungefähre Kenntnis des Azimut gewonnen werden. Jedes Wertetripel der ursprünglichen Zeitreihe wird dann mit der so erhaltenen Matrix \underline{R} multipliziert.

Abb.4 zeigt das gleiche Intervall wie in Abb.3, jedoch nach Korrektur der oben beschriebenen Fehler. Dazu wird die Rotationsmatrix für das Bohrlochmagnetometer bestimmt und mit den Rohdaten multipliziert. Die harmonischen Koeffizienten des Zeitintervalls werden mit einer Fast Fourier Transformation (FFT) bestimmt, mit den Faktoren der Resonanzkurve multipliziert und mit einer inversen FFT in den Zeitbereich rücktransformiert. Beim Bohrlochmagnetometer macht sich in erster Linie die Rotation bemerkbar. Wie man sieht, enthält die Komponente VBX1, wie auch bei den Induktionsspulen VBX2, die höchste spektrale Energie. Durch die relativ einfache Filtercharakteristik hat sich die Form der Kurve kaum verändert. Anders beim Induktionsspulenmagnetometer: vergleicht man hier die Komponente VBX2 aus Abb.3 mit der aus Abb.4, so erkennt man deutlich eine andere Frequenzcharakteristik. Die oben erwähnte Schwingung in der Mitte des Intervalls hat eine merklich größere Amplitude erhalten, während die Schwingungen gegen 14:55 Uhr etwa gleich bleiben. Das Ergebnis zeigt die erhoffte gute Übereinstimmung der vom Prinzip her völlig unterschiedlichen Meßinstrumente.

4. Übertragungsfunktionen zum Skineffekt

Die Analyse des Datenmaterials ist noch nicht abgeschlossen. Die bisher beste Bestimmung der Übertragungsfunktionen \underline{A} für das horizontale Magnetfeld zwischen der Bohrlochsonde und den Magnetometern an der Erdoberfläche ist für die Tiefe 2400 m gelungen (Abb.5).

Für den Periodenbereich 10-6000s sind die Real- und Imaginärteile des Tensors \underline{A} angegeben. Die Fehler sind so klein und die Kurven so glatt, wie man sie von einer guten Bestimmung von Übertragungsfunktionen zwischen zwei Stationen an der Erdoberfläche erwarten würde. Dies spricht für eine gute Bestimmung der Geräte-Übertragungsfunktionen und eine gelungene Orientierungsbestimmung der Bohrlochsonde.

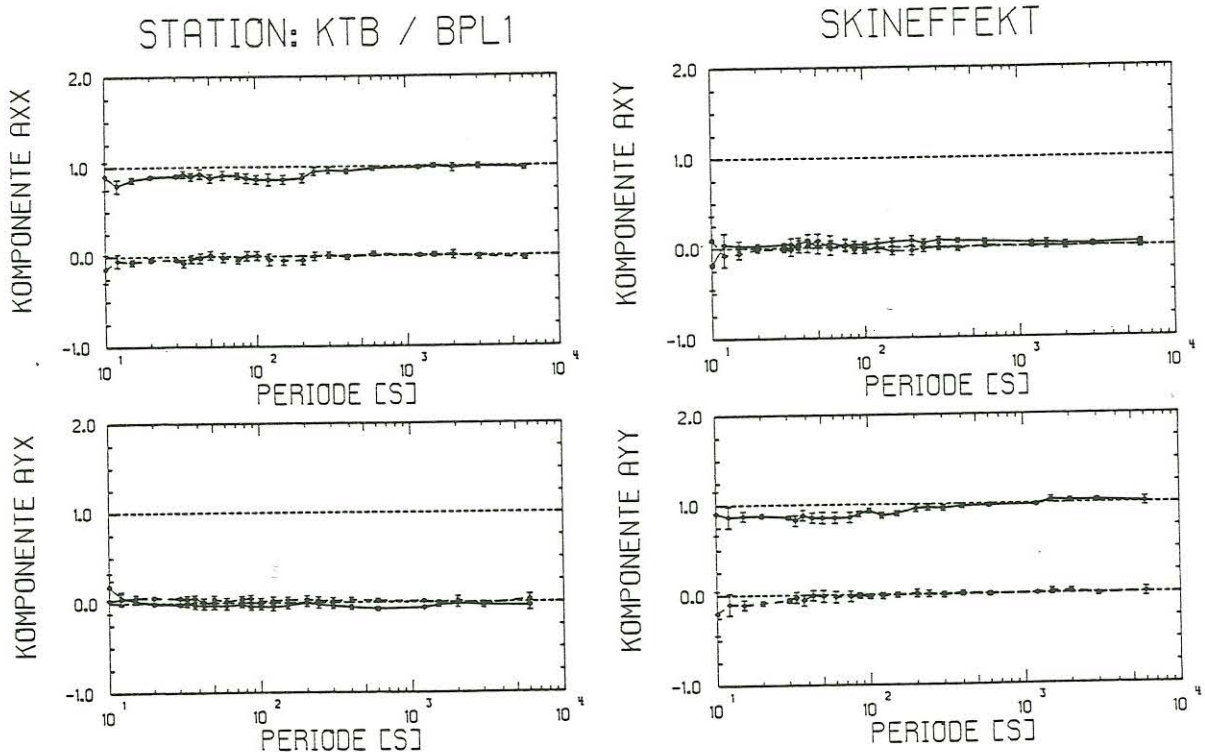


Abb.5: Übertragungsfunktionen des horizontalen Magnetfeldes zwischen dem Bohrlochmagnetometer (2400m Tiefe) und übertage. Periodenbereich 10-6000s, Realteile durchgezogen und Imaginärteile gestrichelt.

Zu kurzen Perioden hin nimmt der Realteil der Hauptdiagonalelemente wie zu erwarten ab und der Imaginärteil wird negativ. Mit längeren Perioden nähert sich jeder Realteil der Eins und der Imaginärteil der Null. In diesem Bereich tritt so gut wie keine Abschwächung des Feldes mehr auf. Die Nebendiagonalelemente liegen erwartungsgemäß nahe bei Null im Real- und Imaginärteil. Dem längerperiodischen Bereich 240-6000s liegen die tiefpaßgefilterten Variationskanäle der Bohrlochsonde und die Fluxgaterregistrierungen an der Erdoberfläche zugrunde. Der Bereich zwischen 10s und 240s ist aus den bandpaßgefilterten Pulsationskanälen der Sonde und den Induktionsspulenaufzeichnungen übertage berechnet.

Bei den von uns beobachteten kürzesten Perioden wird das horizontale Magnetfeld in 2400m Tiefe um etwa 5% abgeschwächt. Die Größenordnung der Abschwächung stimmt mit den Modellrechnungen zum erwarteten Skineffekt in der KTB-Vorbohrung überein (STEVELING, 1988). Beim jetzigen Stand der Auswertung wäre es aber verfrüht zu sagen, daß die vertikale Gradientensondierung das zugrundegelegte Leitfähigkeitsmodell der KTB-Lokation Oberpfalz bestätigt hat.

5. Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter Ste 371/3 gefördert.

6. Literatur:

MEYER,J.: Übertragung des Cagniardschen Verfahrens auf den Fall der Beobachtung nur magnetischer Größen. Protokoll Symposium "Erdmagnetische Tiefenforschung", Goslar, 1965.

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

STEVELING,E.: Test einer vertikalen Gradientensondierung in der Bohrung Mardorf. Protokoll Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", Lerbach bei Köln, 239-248, 1986.

STEVELING,E.: Modelluntersuchungen zur vertikalen Gradientensondierung erdmagnetischer Variationen im KTB-Tiefenlabor. Protokoll Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", Königstein im Taunus, 299-310, 1988.