

# Untersuchungen zu erdmagnetischen Bohrlochmessungen innerhalb einer Stahlverrohrung

U. Barckhausen und E. Steveling (*Institut für Geophysik der Universität Göttingen*)  
F. Fieberg (*Institut für Geophysik und Meteorologie der TU Braunschweig*)

## Einleitung

Tiefbohrungen werden in aller Regel mit Stahlverrohrungen versehen, um eine Erosion der Bohrlochwand zu vermeiden und um sie permanent offen zu halten. Viele auf elektromagnetischen Verfahren beruhende Meßinstrumente lassen sich bisher nicht einsetzen, da die elektrisch leitende Verrohrung das Eindringen der elektrischen Ströme und elektromagnetischer Felder in das umgebende Gestein stark dämpft. Gesucht werden verbesserte Meß- und Auswertetechniken für Bohrlochmessungen durch die Verrohrung hindurch. Damit könnten teure Unterbrechungen des Bohrbetriebes für Messungen vor dem Einbau der Verrohrung vermieden und Änderungen physikalischer Gesteinsparameter lange nach Abschluß der Bohrarbeiten gemessen werden. Wir zeigen hier einige Ergebnisse von Messungen erdmagnetischer Pulsationen in der verrohrten Hauptbohrung des GFZ-Tiefenobservatoriums in Windischeschenbach/Oberpfalz (GFZ-TO).

## Bohrlochmagnetometer und Oberflächeninstrumente

Das GFZ-TO bietet die einzigartige Möglichkeit für folgende Versuchsanordnung:

1. Oberflächenstation: An der Oberfläche wird eine Standard LMT-Station Göttinger Bauart, bestehend aus einem MAGSON-Magnetometer, zwei Tellurikstrecken und einem RAP-Datenlogger, aufgebaut (Beschreibung bei STEVELING und LEVEN (1994)).
2. Hauptbohrung: In die verrohrte Hauptbohrung wird das Göttinger Bohrlochmagnetometer (GBM) eingefahren. Mit dem GBM werden sowohl teufenabhängige Logs als auch zeitabhängige Registrierungen bei fester Teufe durchgeführt. Das GBM wurde speziell für Messungen zeitlicher Variationen des Erdmagnetfeldes in Tiefbohrungen gebaut (STEVELING et al. 1991). Der magnetische Sensor besteht aus einem dreiachsigen Fluxgatemagnetometer mit einer Auflösung von 0.01 nT zur Messung der Komponenten des erdmagnetischen Feldvektors. Zusätzlich sind zwei Neigungsmesser und zwei Temperatursensoren eingebaut. Während der Messungen verhindern Zentrierer Bewegungen der Sonde im Bohrloch. Die Signale werden innerhalb der Sonde in einem 14 bit A/D-Wandler digitalisiert und über einen Mikroprozessor nach Übertage übertragen, wo sie auf einem PC mit einer Taktrate von 1s aufgezeichnet werden. Das Bohrlochmagnetometer ist für Temperaturen bis 100°C und Drücke bis 70 MPa ausgelegt und kann damit bis zu Teufen von ca. 4000 m eingesetzt werden.
3. Vorbohrung: Ein zweites Bohrlochmagnetometer vom Institut für Geophysik und Meteorologie der TU Braunschweig (BBM) wurde im open-hole-Bereich im untersten Teil der Vorbohrung bei 3980 m fixiert. Mit dem BBM konnten nur wenige Tage lang Zeitreihen registriert werden. Es ist hauptsächlich für teufenabhängige Logs konstruiert worden (KUHNIKE und MUSMANN, 1990).

## Teufenabhängige Messungen in der Hauptbohrung

Die Hauptbohrung des GFZ-TO wurde mehrfach im Teufenbereich von der Oberfläche bis maximal 3300 m mit dem Göttinger Bohrlochmagnetometer durchfahren.

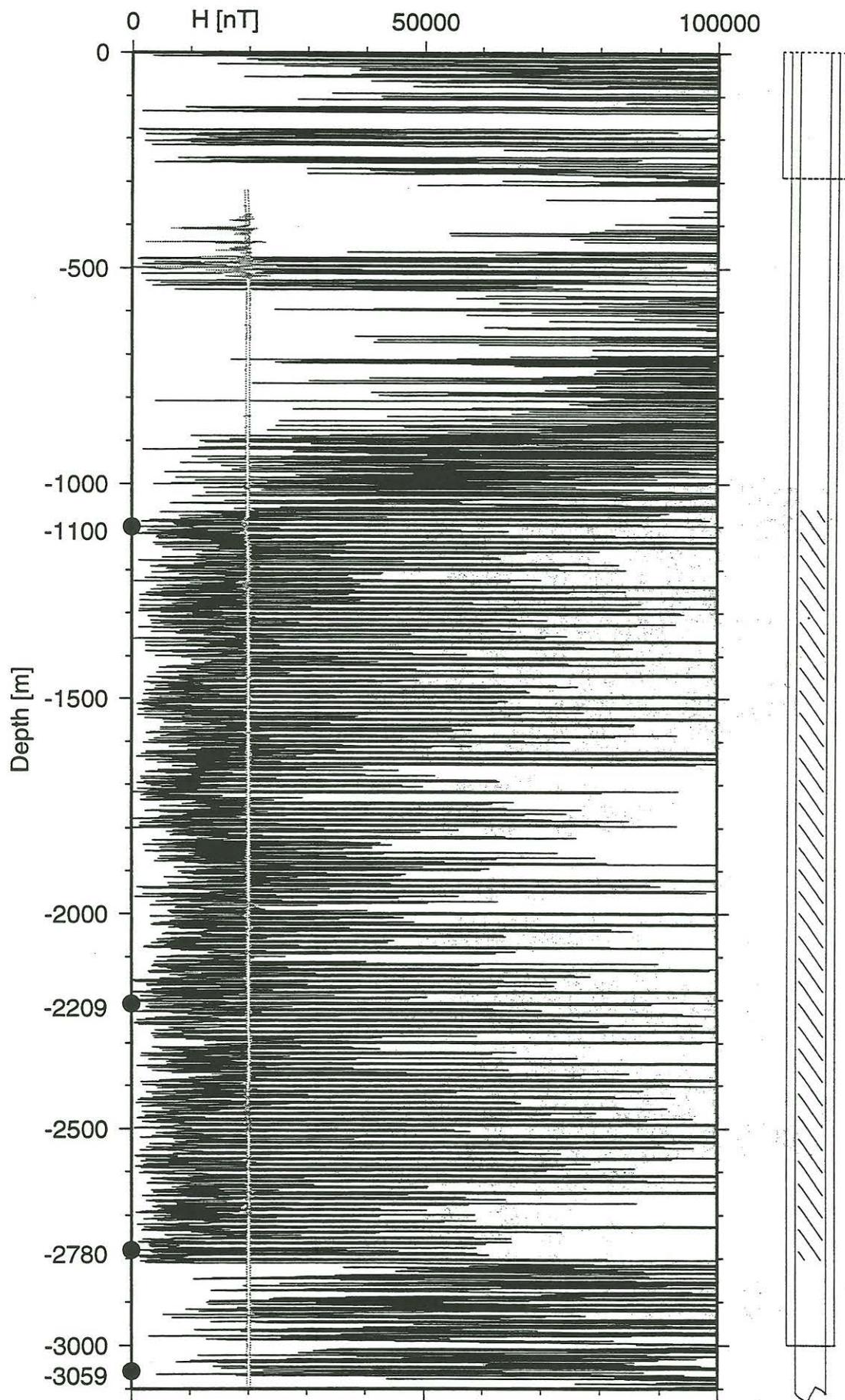


Abb. 1: Logs der magnetischen Horizontalkomponenten in der Hauptbohrung vor (weiße Linie) und nach (schwarze Linie) Einbau der Stahlverrohrung. Rechts ist das Verrohrungsschema skizziert. Der schraffierte Bereich ist mit der Stahlgüte P-110 verrohrt worden.

Abb. 1 zeigt Logs der magnetischen Horizontalkomponente, die vor (weiße Linie) und nach (schwarze Linie) Einbau der Stahlverrohrung gemessen wurden. In der verrohrten Bohrung treten starke Schwankungen des statischen Magnetfeldes mit Maximalamplituden um 100000 nT auf, die von wechselnden Magnetisierungen der Stahlverrohrung verursacht werden.

Das Störfeld variiert erheblich mit den verschiedenen Rohrtypen, die in verschiedenen Teufen eingebaut worden sind. Um dies zu verdeutlichen, ist rechts in Abb. 1 das Verrohrungsschema skizziert. Von 0 bis -290 m ist die Bohrung 3-fach, von 0 bis -3000.5 m 2-fach verrohrt. Außerdem sind innerhalb einer Rohrtour unterschiedliche Stahlgüten verwendet worden. Die innerste Verrohrung hat folgende Stahlgüten und Durchmesser:

V-150, 13 5/8",	(	0.0 m bis	-551.3 m)
Q-125, 13 5/8",	(	-551.3 m bis	-1062.0 m)
P-110, 13 5/8",	(	-1062.0 m bis	-2805.6 m)
Q-125, 13 3/8",	(	-2805.6 m bis	-5386.6 m)

Entscheidend für die magnetischen Messungen ist offenbar die Stahlgüte. In Teufen zwischen -1060 m und -2810 m sind die Störungen mäßig; dieser Bereich ist deutlich mit der Stahlgüte P-110 korreliert. Dagegen sind die Übergänge von der 3- auf die 2-fache und von der 2- auf die 1-fache Verrohrung nicht so eindeutig in der magnetischen Horizontalkomponente zu erkennen.

Gleitende Mittelwerte über den Teufenbereich -1062 m bis -2800 m betragen durchweg etwa 20000 nT. Dieser Wert stimmt erstaunlich gut mit der Horizontalkomponente ohne Stahlverrohrung überein. Das Maximum einer Häufigkeitsverteilung über den gleichen Teufenbereich liegt dagegen bei 12000 nT. Dies würde bedeuten, daß die Verrohrung das statische erdmagnetische Horizontalfeld auf etwa 60% abschirmt. Im Gegensatz dazu bleiben Mittelwert und Maximum der Häufigkeitsverteilung der Vertikalkomponente unverändert (hier nicht dargestellt).

### **Zeitabhängige gleichzeitige Messungen in beiden Bohrungen und an der Oberfläche**

Mit zeitabhängigen Messungen ist die übliche Registrierung von Zeitreihen gemeint. Das Göttinger Bohrlochmagnetometer (GBM) und die Oberflächenstation erfassen die Daten aller Kanäle mit der Digitalisierungsrate 1 Hz, das Braunschweiger Bohrlochmagnetometer (BBM) mit einer Rate von fast 10 Hz. Um die Zeitreihen besser vergleichen zu können, wurden die BBM-Daten auf 1 Hz dezimiert.

Eine gleichzeitige Registrierung der drei Magnetfeldkomponenten an der Erdoberfläche, in der offenen Vorbohrung und in der verrohrten Hauptbohrung ist in Abb. 2 wiedergegeben. In allen drei Komponenten sind die Registrierungen in den beiden Bohrungen mit der Oberflächenstation gut korreliert. Die beiden mit dem GBM innerhalb der Stahlverrohrung in 2209 m Teufe gemessenen Horizontalkomponenten sind offenbar deutlich stärker abgeschwächt als die mit dem BBM im unverrohrten Bereich in 3980 m Teufe registrierten Komponenten. Mit dem BBM wird der normale, durch die Gesteinsleitfähigkeit verursachte Skineffekt beobachtet. Das GBM sieht eine zusätzliche Abschwächung der Horizontalkomponenten durch die Stahlverrohrung der Hauptbohrung. Dagegen gibt es in der Vertikalkomponente keine großen Unterschiede zwischen der Oberfläche und den Bohrungen.

Da vom BBM keine langen Zeitreihen existieren, konnten nur wenige Zeitintervalle wie in Abb. 2 für eine Zeitreihenanalyse herangezogen werden. Der Vergleich des BBM mit der Oberflächenstation ist in Form von Übertragungsfunktionen in Tabelle 1 zusammengestellt.

Das Ergebnis entspricht nicht den Erwartungen! Die Abschwächung aller Komponenten ist im Vergleich zu den Ergebnissen von SPITZER (1991) zu stark und die kurzperiodischen Variationen sollten stärker gedämpft werden als die langperiodischen. Daß die Frequenzabhängigkeit nicht richtig herauskommt, könnte an der zu geringen Anzahl der Analyseintervalle liegen.

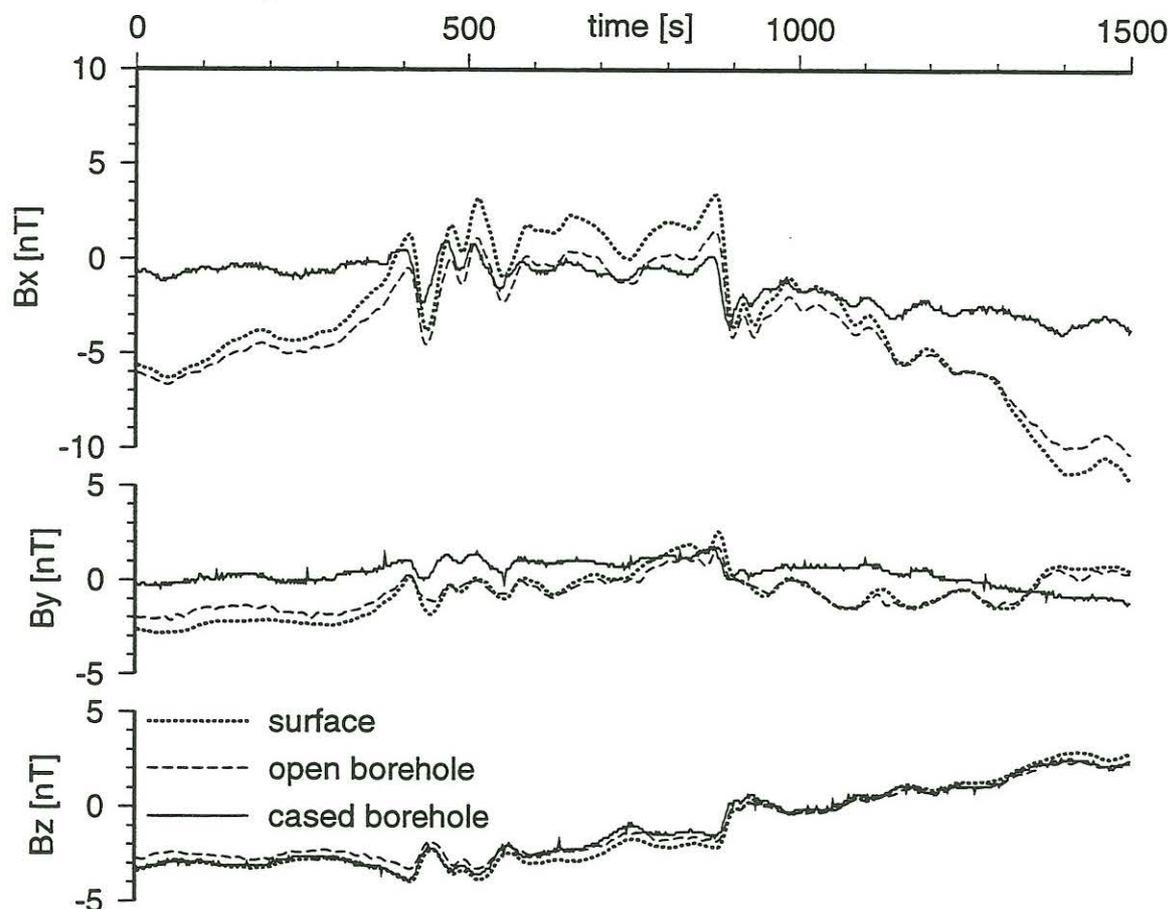


Abb. 2: Eine gleichzeitige, 25 Minuten lange Registrierung der drei Magnetfeldkomponenten  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  an der Erdoberfläche, in der offenen Vorbohrung (BBM, Teufe = 3980 m) und in der verrohrten Hauptbohrung (GBM, Teufe = 2209 m).

		Ax			Ay			Az		
T[s]	d[m]	Re	Im	Err	Re	Im	Err	Re	Im	Err
857	3958	.753	.017	.050	.837	-.103	.105	.860	-.019	.026
545	3958	.751	.046	.016	.805	.052	.129	.817	-.061	.032
400	3958	.760	.034	.014	.764	-.042	.171	.873	.028	.046
286	3958	.769	.117	.031	1.019	-.118	.193	.824	.094	.075
222	3958	.786	.024	.018	.779	-.012	.075	.809	.123	.054
158	3958	.784	.067	.015	.763	.123	.039	.857	.110	.036
113	3958	.783	.087	.016	.771	.067	.029	.844	.104	.038
80	3958	.784	.110	.015	.788	.046	.059	.831	.145	.056
57	3958	.804	.183	.012	.652	.121	.075	.883	.110	.056
40	3958	.812	.253	.031	.740	.279	.086	.878	.043	.113

Tabelle 1: Komplexe Übertragungsfunktionen  $A$  (mit Fehlern  $Err$ ) erdmagnetischer Variationen zwischen der Oberfläche und dem Braunschweiger Bohrlochmagnetometer im unverrohrten Bereich der Vorbohrung ( $d=3958$  m) als Funktion der Periode  $T$ .

Die scheinbare große Dämpfung führen wir auf eine unzulänglich genau bekannte Kalibrierung des BBM zurück. Unter der Voraussetzung, daß der Kalibrierfaktor für die 3 Komponenten gleich falsch ist und die Vertikalkomponente im Bohrloch tiefsten der Vorbohrung in erster Näherung (für homogene Schichtung) mit jener an der Oberfläche identisch sein sollte, können die Übertragungsfunktionen mit Hilfe von  $Z$  neu normiert werden. Für kurze Perioden gäbe es dann eine Amplitudendämpfung von 7% im Vergleich zu der von SPITZER (1991) mit etwa 5% ermittelten (für ca. 1000 m geringere Teufe).

### **Zeitabhängige gleichzeitige Messungen in der Hauptbohrung und an der Oberfläche**

Die Positionen -1100 m, -2209 m, -2780 m und -3059 m, an denen das Magnetometer für mehrtägige zeitabhängige Messungen in der Hauptbohrung fixiert wurde, sind in Abb. 1 mit runden Punkten auf der Teufenachse markiert. Exemplarisch sind Ergebnisse für die -2209 m Teufe in Abb. 3 dargestellt.

Wenn das Bohrlochmagnetometer an einer bestimmten Position in der Bohrung fixiert wurde, ist seine Orientierung zunächst unbekannt und muß daher rechnerisch bestimmt werden. Da die Hauptbohrung in den uns interessierenden Bereichen sehr gut senkrecht in  $Z$ -Richtung verläuft, ist lediglich eine Rotation der Daten um die vertikale Achse erforderlich. Dazu werden die Übertragungsfunktionen des Bohrlochmagnetometers bezogen auf die Oberflächenstation in einer bivariaten Ausgleichsrechnung bestimmt. Dann werden die Daten der Bohrlochsonde solange rotiert, bis in der Matrix der Übertragungsfunktionen die Summe der Beträge der Nebendiagonalelemente minimal ist.

Im oberen Teil der Abb. 3 sind höher als in Abb. 1 aufgelöste (teufenabhängige) Logs der Horizontalkomponenten um die Teufe -2209 m herum wiedergegeben. Die Messungen innerhalb der Verrohrung sind mit der unruhigen schwarzen Kurve dargestellt. Besonders auffallend sind regelmäßige Doppelspitzen im Kurvenverlauf. Der Abstand der Doppelspitzen entspricht einer Rohrlänge. Ein Vergleich mit Kalibermessungen der Verrohrung hat die ursprüngliche Vermutung widerlegt, daß die Spitzen an den Rohrenden auftreten. Wir gehen jetzt davon aus, daß die Magnetisierungsspitzen durch das Verladen der Rohre mit Hilfe von starken Hubmagneten auf dem Bohrplatz verursacht worden ist. Die vertikale weiße Linie markiert die entsprechenden Messungen vor dem Einbau der Verrohrung.

In der Mitte von Abb. 3 befindet sich eine 30 Minuten lange zeitgleiche Registrierung kurzperiodischer erdmagnetischer Variationen an der Erdoberfläche und bei der Teufe -2209 m, gewonnen mit dem dort fixierten Göttinger Bohrlochmagnetometer. Wieder ist in allen drei Magnetfeldkomponenten  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  eine sehr gute Korrelation zwischen oben und unten und eine starke Abschwächung der Horizontalkomponenten in der Verrohrung der Hauptbohrung zu erkennen.

Die gewonnenen Zeitreihen sind ausreichend lang und von guter Qualität, so daß frequenzabhängige Übertragungsfunktionen der Magnetfeldkomponenten zwischen Untertage und Übertage bestimmt werden konnten. Die Übertragungsfunktionen  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  für die Teufe  $d=2209$  m sind zusammen mit jenen für die Teufen  $d=1100$  m und  $d=2780$  m in Tabelle 2 zusammengestellt.

$$X(\text{Bohrl.}) = A_x * X(\text{Oberfl.}), Y(\text{Bohrl.}) = A_y * Y(\text{Oberfl.}), Z(\text{Bohrl.}) = A_z * Z(\text{Oberfl.})$$

Unten in Abb. 3 sind die Übertragungsfunktionen  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  für die Teufe  $d=2209$  m getrennt nach Real- und Imaginärteil geplottet. Im Plot ist  $A_x$  mit  $X$ ,  $A_y$  mit  $Y$  und  $A_z$  mit  $Z$  gekennzeichnet. Die Dämpfung der  $Z$ -Komponente ist relativ gering, sie liegt zumindest bei den langen Perioden bei Null ( $Z_{re}=1.0$ ).

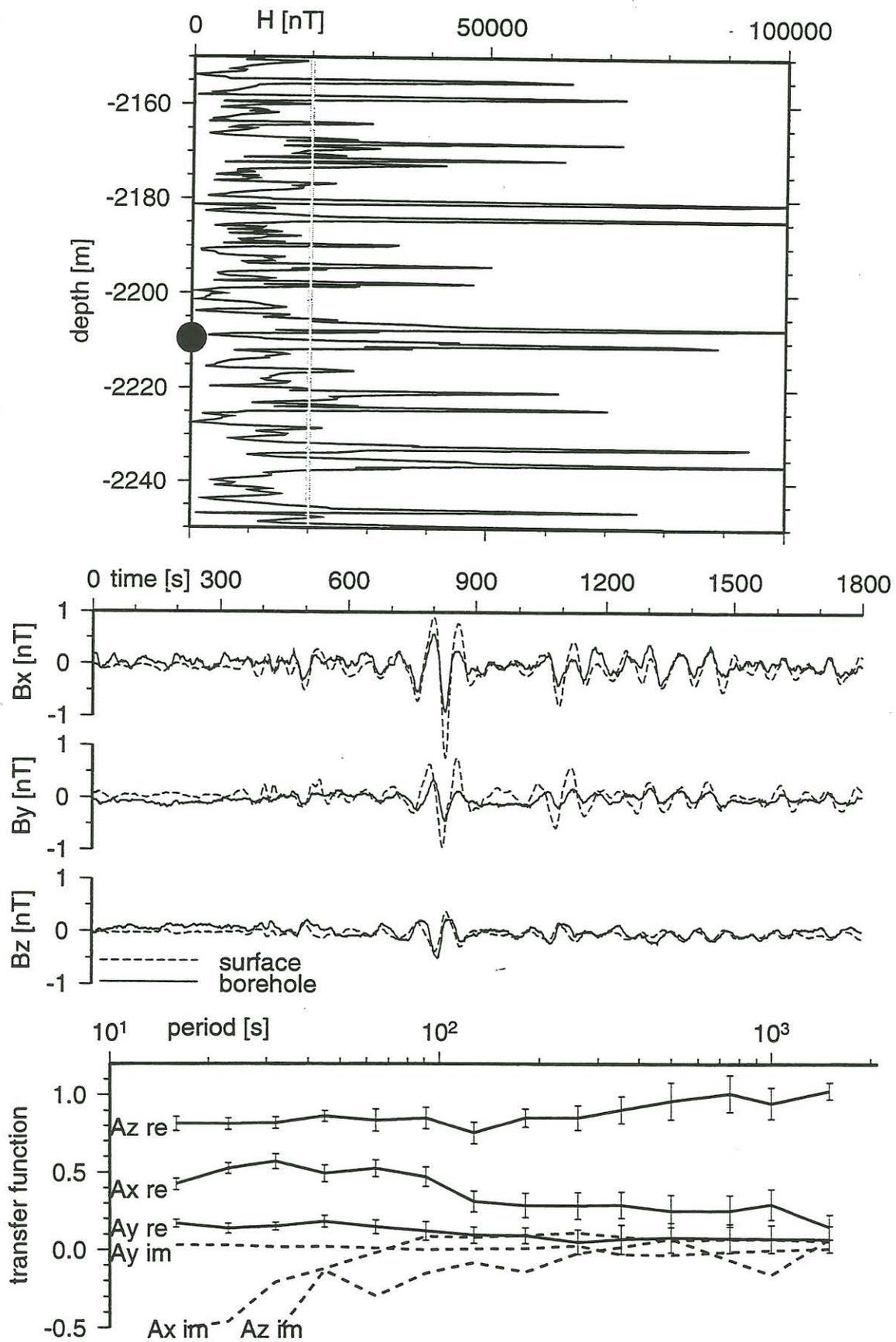


Abb. 3: Magnetfeldmessungen in der verrohrten Hauptbohrung bei der Teufe -2209 m (oben): teufenabhängige Messungen der Horizontalenkomponenten (Ausschnitt von Abb. 1) (Mitte): zeitabhängige Magnetfeld-Registrierungen in der Bohrung und an der Oberfläche (unten): Übertragungsfunktionen zwischen der Bohrung und der Oberfläche

Sowohl die X- als auch die Y-Komponente werden wesentlich stärker gedämpft als die Z-Komponente, und dabei wiederum die Y- deutlicher als die X-Komponente. Dies gilt auch für die Teufen -1100 m und -2780 m. Die Übertragungsfunktionen der beiden Horizontalkomponenten sind meistens  $< 0.2$ . Eine Ausnahme ist die X-Komponente bei der Teufe -2209 m. Die X-Amplitude nimmt im Widerspruch zum normalen Skineffekt mit abnehmender Periode deutlich zu. Es werden Werte von etwa  $\text{Re}(A_x)=0.5$  und  $\text{Im}(A_x)=-0.5$  bei kurzen Perioden erreicht.

T[s]	d[m]	Ax			Ay			Az		
		Re	Im	Err	Re	Im	Err	Re	Im	Err
1500	1100	.133	-.151	.035	.086	-.082	.031	.985	.015	.019
1000	1100	.136	-.122	.039	.077	-.054	.034	1.004	.056	.047
750	1100	.145	-.124	.046	.083	-.016	.037	.911	.008	.071
500	1100	.163	-.105	.042	.087	-.070	.041	.980	.056	.070
353	1100	.131	-.085	.046	.093	-.023	.039	.940	.010	.084
261	1100	.154	-.080	.046	.126	-.028	.044	.908	-.153	.109
182	1100	.134	-.097	.041	.100	.000	.021	.962	.044	.106
128	1100	.164	-.069	.035	.092	.008	.022	.906	-.074	.084
91	1100	.138	-.066	.032	.084	.028	.024	.716	-.008	.068
64	1100	.150	-.026	.033	.088	.065	.028	.720	-.083	.058
45	1100	.174	-.059	.034	.076	.118	.033	.750	.087	.021
32	1100	.231	.031	.033	.099	.183	.037	.720	-.148	.022
23	1100	.174	.008	.025	.097	.105	.028	.651	-.258	.021
16	1100	.160	.000	.036	.084	.120	.036	.670	-.262	.060
1500	2209	.146	.053	.080	.068	.006	.084	1.026	.067	.054
1000	2209	.294	.068	.100	.070	-.004	.091	.948	-.160	.100
750	2209	.253	.067	.102	.073	-.013	.094	1.010	-.069	.118
500	2209	.252	.060	.105	.080	-.034	.097	.964	.070	.118
353	2209	.292	.085	.086	.069	-.029	.095	.905	.020	.086
261	2209	.287	.111	.086	.052	.029	.079	.853	-.019	.080
182	2209	.289	.094	.078	.092	.008	.051	.854	-.014	.059
128	2209	.313	.079	.068	.094	.006	.053	.754	-.084	.070
91	2209	.471	.087	.062	.122	.000	.061	.852	-.151	.070
64	2209	.524	-.021	.054	.146	.008	.044	.836	-.298	.072
45	2209	.492	-.121	.055	.182	.019	.039	.865	-.133	.035
32	2209	.570	-.209	.048	.150	.015	.025	.819	-.546	.038
23	2209	.524	-.461	.035	.138	.029	.032	.813	-.800	.038
16	2209	.424	-.511	.038	.170	.027	.025	.815	-.911	.046
1500	2780	.133	.024	.019	.105	.005	.037	.976	.039	.010
1000	2780	.147	.014	.023	.126	.025	.038	1.000	-.004	.026
750	2780	.146	.015	.027	.123	-.013	.041	1.010	-.009	.043
500	2780	.134	.019	.025	.115	-.019	.045	.958	.034	.044
353	2780	.111	.018	.024	.105	.025	.044	.828	.062	.059
261	2780	.127	.031	.025	.099	-.031	.047	.970	.012	.080
182	2780	.196	.034	.029	.108	.034	.043	.908	.042	.063
128	2780	.138	.065	.023	.087	.065	.042	1.000	.016	.067
91	2780	.186	.057	.024	.098	.033	.040	.814	.009	.058
64	2780	.181	.062	.023	.089	.075	.039	.847	-.040	.056
45	2780	.185	.075	.014	.096	.114	.038	.914	.103	.031
32	2780	.203	.114	.013	.098	.118	.025	.826	.202	.026
23	2780	.198	.119	.022	.087	.168	.022	.866	.196	.015
16	2780	.160	.131	.067	.070	.209	.036	.843	.181	.036

Tabelle 2: Komplexe Übertragungsfunktionen A (mit Fehlern Err) erdmagnetischer Variationen zwischen der Oberfläche und der verrohrten Hauptbohrung als Funktion der Periode T und in Abhängigkeit von den Teufen  $d=1100$  m,  $d=2209$  m,  $d=2780$  m.

## **Ergebnisse der Messungen**

1. Es ist möglich, natürliche geomagnetische Variationen und Pulsationen innerhalb eines stahlverrohrten Bohrlochs zu registrieren.
2. Die Vertikalkomponente des Erdmagnetfeldes wird von der Verrohrung praktisch nicht beeinflußt. Die Amplituden der Pulsationen in den Horizontalkomponenten werden um 40% bis 90% gedämpft. Die Dämpfung der Y-Komponente ist bei unseren Messungen grundsätzlich stärker als die der X-Komponente ausgefallen. Ursache ist möglicherweise eine elektrische Anisotropie in der Umgebung des GFZ-TO.
3. Unter identischen Verrohrungsbedingungen treten in verschiedenen Teufen erhebliche Unterschiede in den magnetischen Übertragungsfunktionen zwischen Oberfläche und Bohrloch auf. Dieses betrifft besonders Perioden  $< 1000$  s, während sie für längere Perioden konvergieren. Dieses könnte von unterschiedlichen elektrischen Widerständen der Gesteine in der Umgebung des Magnetometers verursacht werden. Die auffälligsten Übertragungsfunktionen gehören zu Messungen, bei denen das Magnetometer im Bereich einer stark graphitisierten Störungszone in 2209 m Teufe registrierte.
4. Bei exakter Kenntnis der Rohrgeometrie und der Suszeptibilität des Stahls könnte es möglich sein, den Einfluß der Verrohrung vom natürlichen Skineffekt zu trennen.

Unter dem Zeichen Ste 371/5 hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft unser Forschungsvorhaben im Rahmen des ICDP/KTB Schwerpunktprogramms unterstützt.

## **Literatur**

**Barckhausen, U. und E. Steveling (1996):** Erdmagnetische Messungen innerhalb der Stahlverrohrung: Erfahrungen aus dem Meßbetrieb und erste Ergebnisse. In: Bahr, K. und Junge, A. (Hrsgb.), Protokoll 16. Kolloquium „Elektromagnetische Tiefenforschung“, Burg Ludwigstein, 197-203

**Kuhnke, F. und G. Musmann (1990):** KTB-Hochtemperatur Drei-Komponenten-Magnetometer. In: KTB-Report 90-6a, 71-109

**Spitzer, K. (1991):** Ein triaxiales Magnetometer zur fortlaufenden Registrierung erdmagnetischer Variationen in tiefen Bohrungen - erste Erprobung in der Vorbohrung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fachbereiche der Universität Göttingen

**Spitzer, K. (1993):** Observations of geomagnetic pulsations and variations with a new borehole magnetometer down to depth of 3000 m. *Geophys. J. Int.* 115, 839-848

**Steveling, E., Spitzer, K. and M. Leven (1991):** Vertical gradient of horizontal geomagnetic variations - first results with the Göttingen borehole magnetometer in the KTB-Oberpfalz VB. *Scientific Drilling 2*, 180-187

**Steveling, E. und M. Leven (1994):** Stand der RAP-Geräteentwicklung. In: Bahr, K. und Junge, A. (Hrsgb.), Kolloquium „Elektromagnetische Tiefenforschung“, Höchst im Odenwald, 431-438