

H. Winter und J. Stoll

## DIE NEUE EIGENPOTENTIAL-BOHRLOCHSONDE FÜR DIE KTB

### 1. EINFÜHRUNG

Die Entdeckung einer ausgedehnten Eigenpotentialanomalie im Umfeld der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) hat das Interesse für die Ursachen solcher anomalen elektrischen Felder neu belebt (Stoll, 1990). Da sie normalerweise nur an der Erdoberfläche vermessen werden, ist über ihre Tiefenerstreckung kaum etwas bekannt, und damit auch wenig über ihre Quellen. Einen wichtigen Ansatz liefert die Arbeit von Sato und Mooney (1960). Die Autoren vermuten die Quellen des Feldes in elektrochemischen Vorgängen in tieferen Erdschichten. Voraussetzung ist eine vertikale Zonierung des Redoxpotentials in der Erdkruste von oxidierenden zu reduzierenden Bedingungen in der Tiefe. Eine besondere Rolle spielen dabei elektronenleitende Bahnen, die den "Kurzschlußbügel" zwischen zwei Zonen unterschiedlichen elektrochemischen Potentials bilden. Die Potentialdifferenz führt zu einem Stromfluß durch diesen Elektronenleiter und einem Rückfluß über die Ionen im umgebenden Gestein. Dabei entsteht ein elektrisches Dipolfeld, dessen oberer Teil an der Erdoberfläche gemessen werden kann. Eigenpotentialfelder könnten daher als Ausdruck von Differenzen des Redoxpotentials in der Erdkruste angesehen werden. Eine Verifizierung dieser Modellvorstellung kann durch Beobachtung dieser elektrischen Felder mit der Tiefe erfolgen. Der KTB fällt hierbei eine außerordentlich wichtige Rolle zu, da die Bohrung nur etwa 100 m vom Hauptminimum der Eigenpotentialanomalie (-600 mV) entfernt ist. Die steilstehenden, graphitisierten Kataklastiziten, die in NW-SE-Richtung das Bohrgelände überqueren, könnten die von der Modellvorstellung geforderten elektronenleitenden Strukturen verkörpern.

Verbunden mit der Frage nach der Ursache von Eigenpotentialanomalien ist deren Stärke. Die Differenz der möglichen Redoxpotentiale wird in der Theorie von Sato und Mooney auf den Stabilitätsbereich des Wassers beschränkt. Bezüglich dieses eingeschränkten Bereichs kann aber die Stärke vieler Eigenpotentialanomalien nicht erklärt werden. Nach Sato und Mooney sind Anomalien bis maximal -400 mV möglich, jedoch existieren unmittelbar neben der KTB-Vorbohrung bereits Anomalien um -600 mV und im weiteren Umfeld sogar um -900 mV (Siwczyk et al., 1990). Dies unterstreicht die Bedeutung von elektrischen Potentialmessungen in der KTB zur Gewinnung neuer Erkenntnisse über die Entstehung von Eigenpotentialen. Darüberhinaus könnten sich neue geochemische und petrologische Aspekte in der Verteilung des Redoxpotentials in der Kruste ergeben.

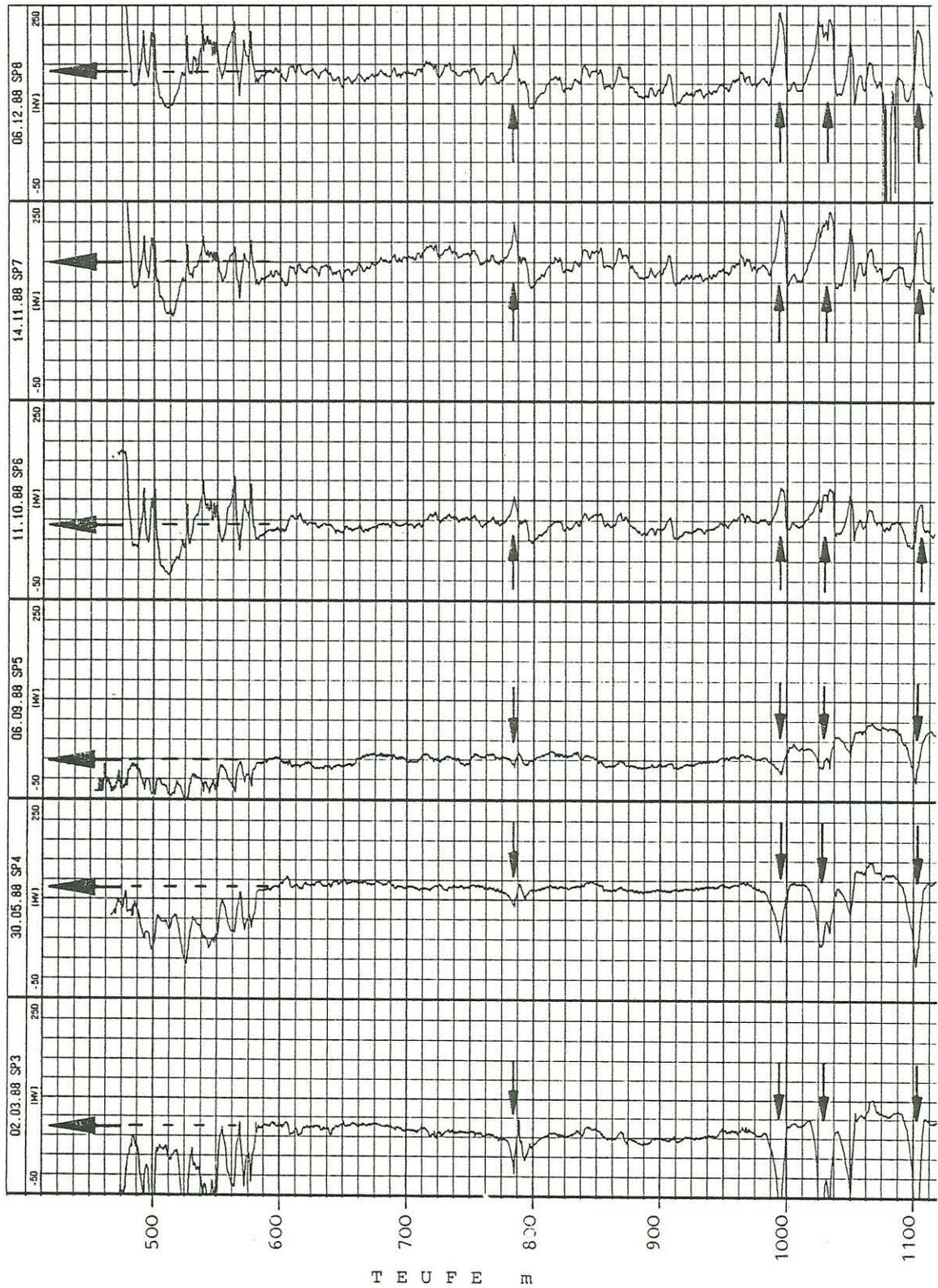


Abb. 1: SP-Logs aus der KTB-Vorbohrung / SP-logs from KTB predrilling hole (Zusammengestellt von W.Kessels, 1989, persönliche Mitteilung). Unterschiede sind mit Pfeilen markiert / Differences are marked by arrows.

## 2. BEGRÜNDUNG FÜR DIE NEUENTWICKLUNG DER BOHRLOCHSONDE

Die Messung des Eigenpotentials ist als SP- (spontaneous potential) Log seit langem ein fester Bestandteil in der Bohrlochmeßtechnik. Dabei wird die Spannungsdifferenz zwischen einer Metallelektrode am Bohrlocheingang und einer im Bohrloch auf- und abfahrenden Metallelektrode hochohmig gemessen. An der Kontaktstelle zwischen Metall und Bohrspülung bewirken jedoch Raumladungen eine elektrische Polarisierung der Elektrode. Dieser Vorgang wird von den lokal vorherrschenden elektrochemischen Bedingungen bestimmt: Ionenkonzentration, Redoxpotential und pH-Wert. Diese Polarisationsspannung kann die Größenordnung des zu messenden elektrischen Feldes erreichen oder sogar übersteigen. In Abb. 1 sind sechs SP-Logs aus der KTB-Vorbohrung zu verschiedenen Zeiten dargestellt. Deutlich sind die Unterschiede sowohl im Trend wie auch in den kurzwelligen Amplituden zu erkennen. In den Logs SP6, SP7 und SP8 scheint sogar eine Umpolung stattgefunden zu haben. Bei Oberflächen-Eigenpotentialmessungen beseitigt man diese Schwierigkeiten durch den Einsatz von unpolarisierbaren Sonden (Winter et al., 1988). Deren wesentliche Eigenschaft besteht darin, trotz von Ort zu Ort verschiedener elektrochemischer Verhältnisse, eine *konstante Bezugsspannung* beizubehalten. Verwendet man die gleichen unpolarisierbaren Sonden als Basis und Sensor, dann heben sich die Bezugsspannungen auf und man mißt ein *von lokalen Einflüssen befreites elektrisches Feld*. Aus diesem Grund wurde eine unpolarisierbare Bohrlochsonde entwickelt, die in ihrem prinzipiellen Aufbau der bei Oberflächenmessungen eingesetzten entspricht.

## 3. KONSTRUKTION DER BOHRLOCHSONDE

Die Vorarbeiten für die Sonde begannen im Sommer 1989 mit Überlegungen zur unpolarisierbaren Sonde. Diese besteht im Prinzip aus einem Metall, das von einer Lösung seiner Salze umgeben ist. Über Diaphragmen wird der elektrische Kontakt zur Umgebung hergestellt. Die Konstruktion eines solchen Systems für die Druck- und Temperaturbedingungen im Bohrloch auszuliegen stellt hohe technische Anforderungen. Abb. 2 zeigt die Konstruktion der neuen Bohrlochsonde. Das Gehäuse ist aus nichtrostendem Stahl gefertigt. Oberteil und Elektrolytkammer sind zur elektrischen Isolation mit einem hochtemperaturbeständigen Kunststoff beschichtet. Diese Isolation ist enorm wichtig, da jeder Kontakt des Elektrolyten mit dem Stahl die elektrochemische Stabilität des Meßsystems beeinflusst. Im Inneren der Kammer befindet sich ein von Dr. J. Filloux entwickeltes Silber/Silberchlorid-Element. Solche Elemente haben sich bei magnetotellurischen Ozeanbodenmessungen bereits bestens bewährt (Filloux, 1987). Das Element ist von einer Kaliumchloridlösung umgeben, die über vier Keramikdiaphragmen den elektrischen Kontakt mit der Spülung herstellt. Eine

Abb. 2:

Konstruktions-  
zeichnung

Construction  
drawing

pressure-tight electrical leads

Pt - electrode for redox - potential ...

Pt 100 thermo - sensor

PTFE - coated electrolyte chamber

ceramic diaphragm

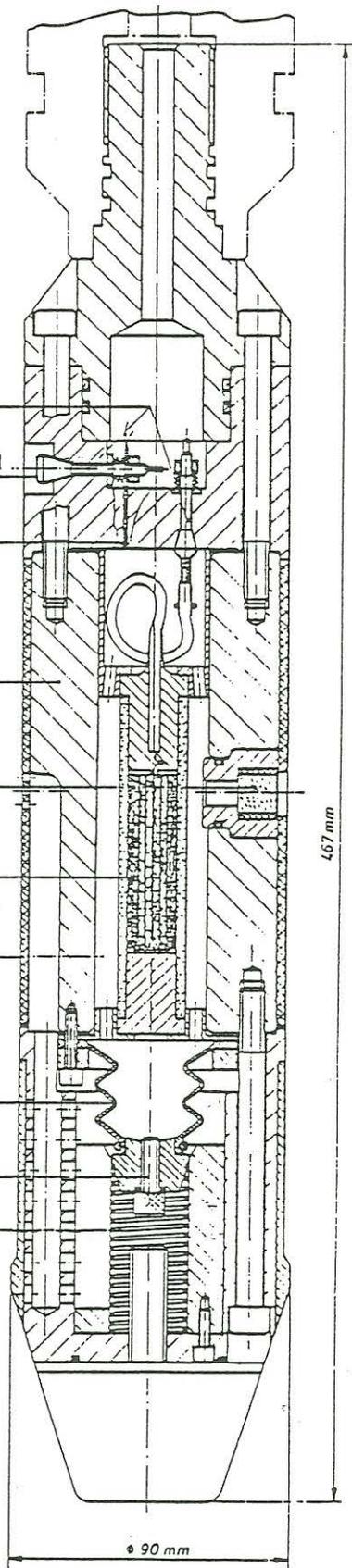
Ag / Ag Cl - electrode

saturated K Cl - electrolyte

pressure - equalization - bellows

filling - screw

compression - spring



druckdichte Durchführung im Oberteil stellt die elektrische Verbindung zwischen dem Element und dem unter Atmosphärendruck stehenden Kabelraum her. Um das Eintreten von Spülung in die Elektrolytkammer zu verhindern, wurde im unteren Teil eine Druckausgleichsvorrichtung eingebaut. Ein Balg gleicht die Druckdifferenzen zwischen Kammer und Sondenumgebung aus. Eine auf den Balg wirkende Feder sorgt zusätzlich für einen kleinen Überdruck in der Kammer. Damit wird eine Kontamination des Sonderelektrolyten zuverlässig verhindert. In einer Bohrung des Oberteils befindet sich ein Pt 100-Element. Damit kann die Sondentemperatur für spätere Korrekturen mitregistriert werden. Eine zweite Durchführung im Kabelraum ist an der Außenseite platinbeschichtet und dient als Sensor für den Redoxzustand im Bohrloch. Der untere blanke Teil der Bohrlochsonde dient als Sensor für das herkömmliche SP-Log. Auf diese Weise erhält man einen direkten Vergleich der Meßergebnisse von unpolarisierbarer Sonde mit der Stahlelektrode.

Die Bohrlochsonde ist für Drucke bis 150 MPa und Temperaturen bis 160°C ausgelegt. Die Betriebszeit bis zum erforderlichen Nachfüllen des Elektrolyten beträgt etwa 24 Stunden.

#### 4. DIE MESSUNGEN

##### 4.1 MESSAUFBAU

Bei dem Logging-Experiment wird die Eigenpotential-Bohrlochsonde ohne weitere aktive Meßeinrichtungen eingesetzt. Am unteren Ende der Meßeinheit befindet sich die neue Sonde mit dem Geocom/Schlumberger-Adapter, es folgen Isolierstück, Isolierstrecke mit Gewicht, Kabeladapter und Kabelkopf. Alle sieben Adern des Meßkabels sind belegt von EP-, SP-, Redox-Kanal und dem Pt 100-Anschluß in Vierdrahtschaltung (Abb. 3). Die Gegenelektrode für die konventionelle SP-Messung besteht aus einer Metallfeder und wird wie üblich im wassergefüllten Bohrkeller neben das Standrohr gelegt. Als Basiselektroden für den EP- und Redox-Kanal werden die Silber/Silberchlorid-Sonden von Filloux verwendet. Beide werden 40 m nördlich des Hauptbohrpunkts im KTB-Gelände mit 10 m Abstand untereinander eingegraben. Die Registrierung aller vier Kanäle erfolgt mit der KTB-Dauermeßstation. Von deren Mitarbeitern wurde die Meßstation dafür speziell ausgerüstet und die Eingangswiderstände der Verstärker für die Spannungsmessung von 200 k $\Omega$  auf 2 M $\Omega$  angehoben. Dies stellt ein Kompromiß dar, ideal wären Eingangswiderstände  $> 10^8 \Omega$ . Parallel dazu werden EP- und SP-Kanal auch von einem Datenlogger MMS03E mit höherer Taktrate (32 Hz) und größerer Amplitudenauflösung (1  $\mu$ V) aufgezeichnet (nicht im Schaltbild). Dies erfolgt im Hinblick auf zeitabhängige Einflüsse und die Registrierung der Vertikal-komponente  $E_z$  des induzierten erdelektrischen Feldes für die Magnetotellurik (Bahr und Eisel, 1990).

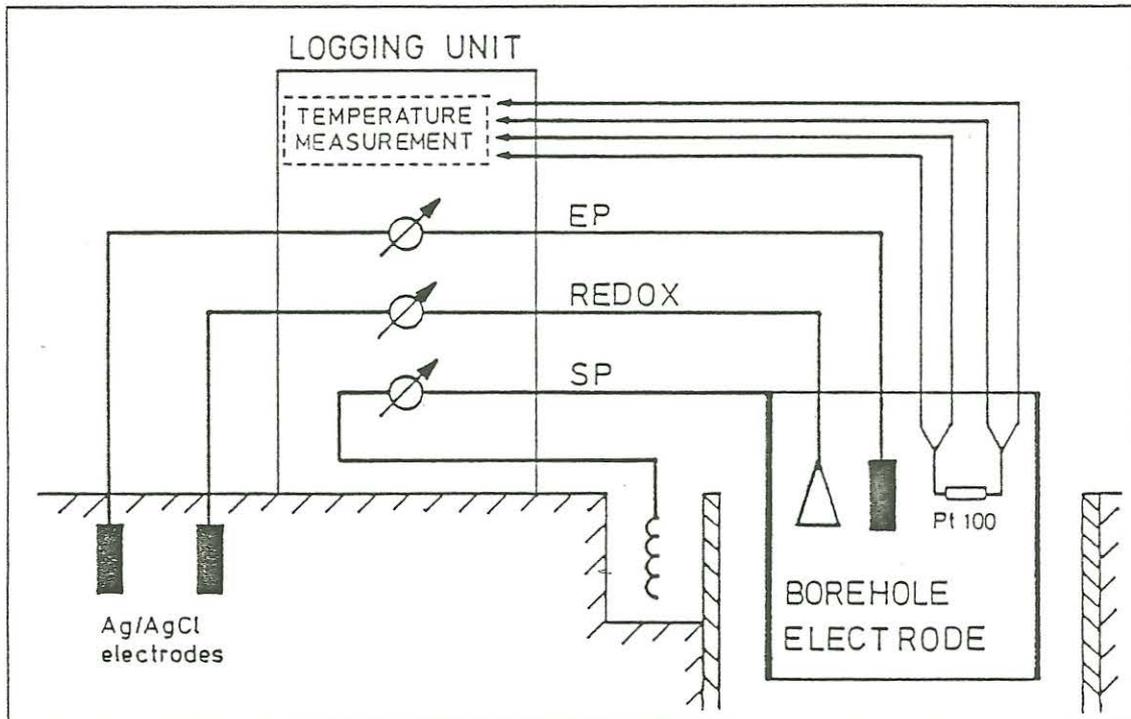


Abb. 3: Schaltbild des Bohrlochexperiments.

#### 4.2 MESSDURCHFÜHRUNG

Die Bohrlochmessung erfolgte am 29. und 30.1.1990. Bereits am Vortag wurden die Basissonden und die Verkabelung aufgebaut. Vor der Einfahrt und nach der Ausfahrt wird von dem Sonden-elektrolyten je eine Probe zur Analyse genommen. Damit kann überprüft werden, inwieweit die Konzentration sich geändert hat bzw. ob Spülung eingetreten ist.

##### Zeitlicher Ablauf:

29.1.1990	LOG 1	Abwärts	12 m/min	0 - 3700 m
29.1.1990	LOG 2a	Aufwärts	12 m/min	3700 - 2411 m
29./30.1.1990	Zeitregistrierung über Nacht mit Datenlogger			
30.1.1990	LOG 2b	Aufwärts	24 m/min	2411 - 0 m

Sondenwartung: Überprüfung der Sensoren und des Druckausgleichs, Entnahme einer Elektrolytprobe, Austausch des Sonden-elektrolyten.

30.1.1990	LOG 3	Abwärts	36 m/min	0 - 4000 m
30.1.1990	LOG 4	Aufwärts	36 m/min	4000 - 447 m

Auf den insgesamt 15 km Logging-Strecke funktionierte die Sonde einwandfrei. Die chemischen Analysen zeigten, daß sich der Ionengehalt des Sonden-elektrolyten nicht wesentlich geändert hat (wichtig ist vor allem  $\text{Cl}^-$ ). Ein Eintreten von Spülung konnte nicht nachgewiesen werden. Es kann davon ausgegangen werden, daß während der gesamten Registrierung in der Kammer stabile elektrochemische Verhältnisse herrschten.

## 5. ERGEBNISSE

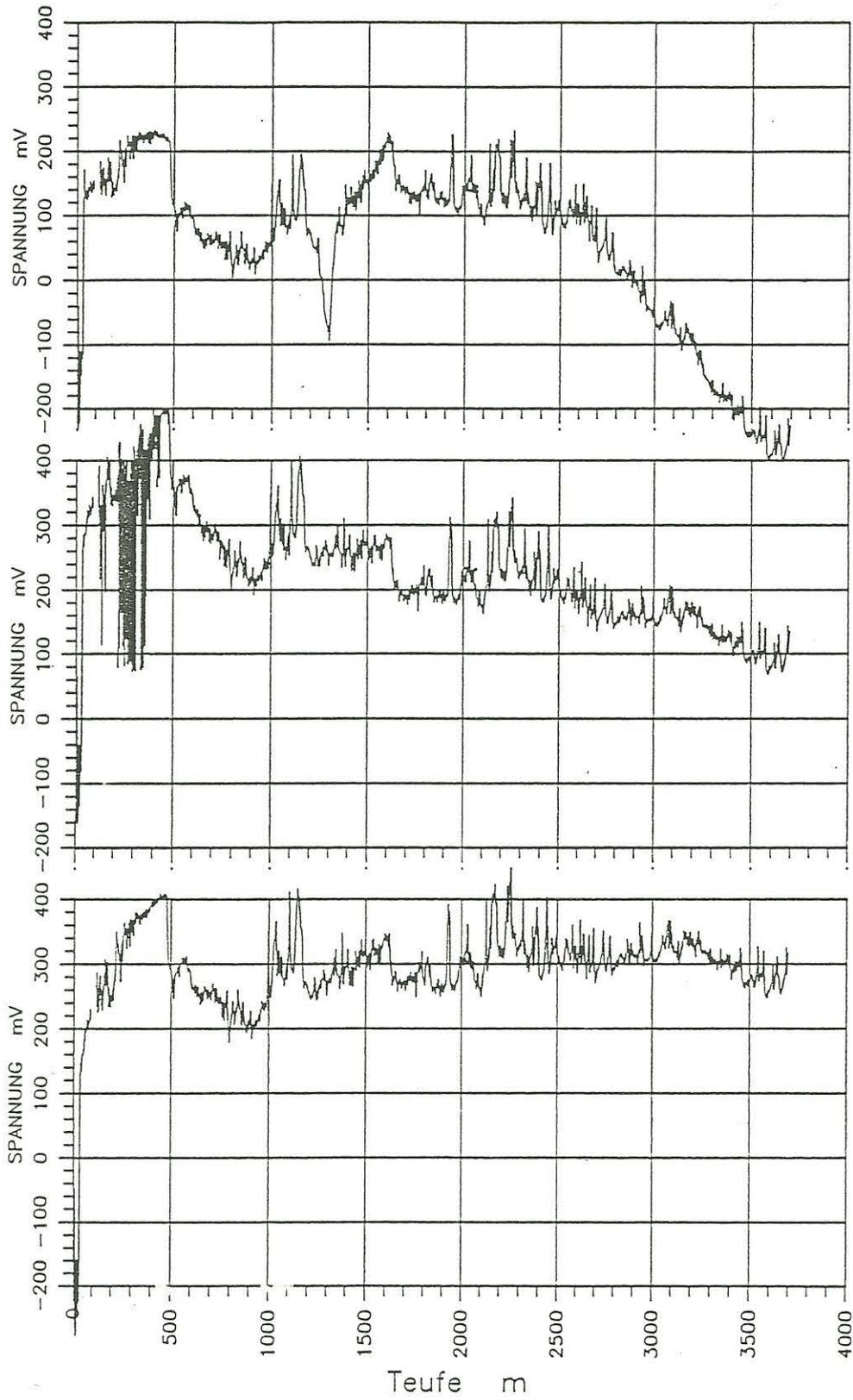
### 5.1. ROHDATEN

In den Abb. 4 - 7 sind die Meßergebnisse der herkömmlichen Eigenpotentialmessung (SP), der neuen unpolarisierbaren Silber-Silberchlorid-Sonde (EP) und der Platinelektrode (Redox) aller Logs, die zu unterschiedlichen Zeiten und mit verschiedenen Geschwindigkeiten gefahren wurden, nebeneinandergestellt. Die Spannungswerte beziehen sich auf eine Basis am Bohrlocheingang.

Der Vergleich der EP-Logs zeigt hinsichtlich des gemeinsamen Trends und der Übereinstimmung der kurzwelligen Amplituden eine gute Reproduzierbarkeit. Die verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten dämpfen die Amplituden unterschiedlich. Der Verlauf der EP-Kurve zeigt in den ersten 500 m innerhalb der Verrohrung einen starken Gradienten. Das Ende der Verrohrung (Teufe 480 m) macht sich durch einen Sprung in allen Potentialkurven bemerkbar.

Auffällig ist das Abweichen der SP-Messung von der EP-Messung. Im Bereich der Verrohrung läßt die SP-Messung kein eindeutiges Signal erkennen. Mit zunehmender Tiefe divergieren die EP- und SP-Logs immer stärker und besitzen in 4000 m Teufe eine Differenz von ca. 150 mV. Die SP-Logs zeigen bezüglich des Trends weniger gute Reproduzierbarkeit. Jedoch herrscht eine gute Übereinstimmung zwischen EP-Log und SP-Log bei den kurzwelligen Amplituden.

Die Platinelektrode mißt den Redoxzustand der Bohrspülung. Die Meßkurve zeigt in den ersten 500 m eine starke Zunahme der Spannung von negativen zu positiven Werten. Danach nimmt die Spannung, abgesehen von den kurzwelligen Anteilen, stetig zu negativen Werten ab. Der synchrone Verlauf aller Kurven bezüglich der kurzwelligen Amplituden weist auf eine gleichzeitige Beeinflussung aller Kanäle durch äußere elektrische Potentialfelder hin.



Redox-Log

SP-Log

EP-Log

Abb. 4: Log 1, abwärts mit 12 m/min, 0 - 3700 m.

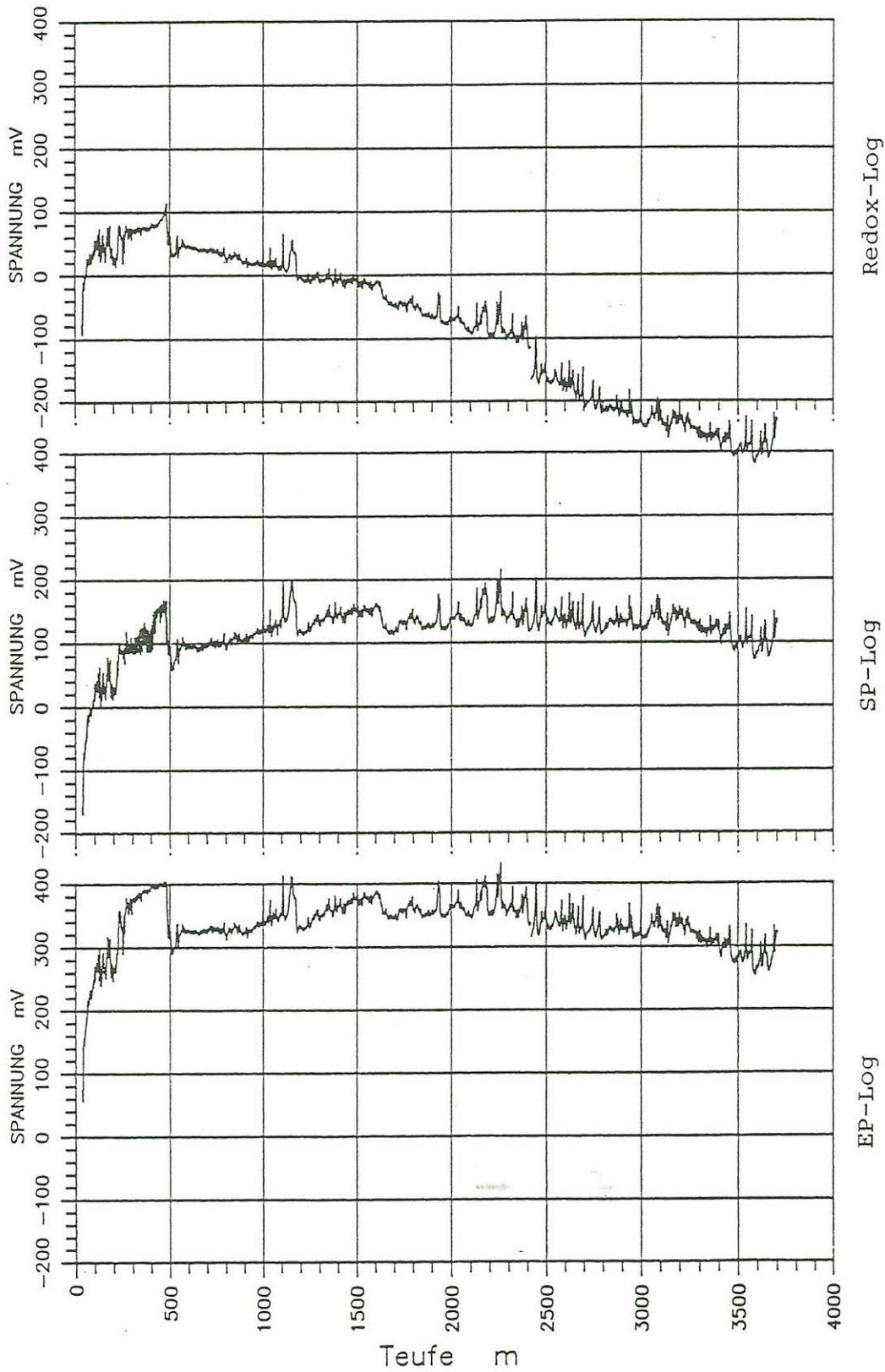


Abb. 5: Log 2, aufwärts mit 12 m/min (3700-2411 m), 24 m/min (2411-0 m).

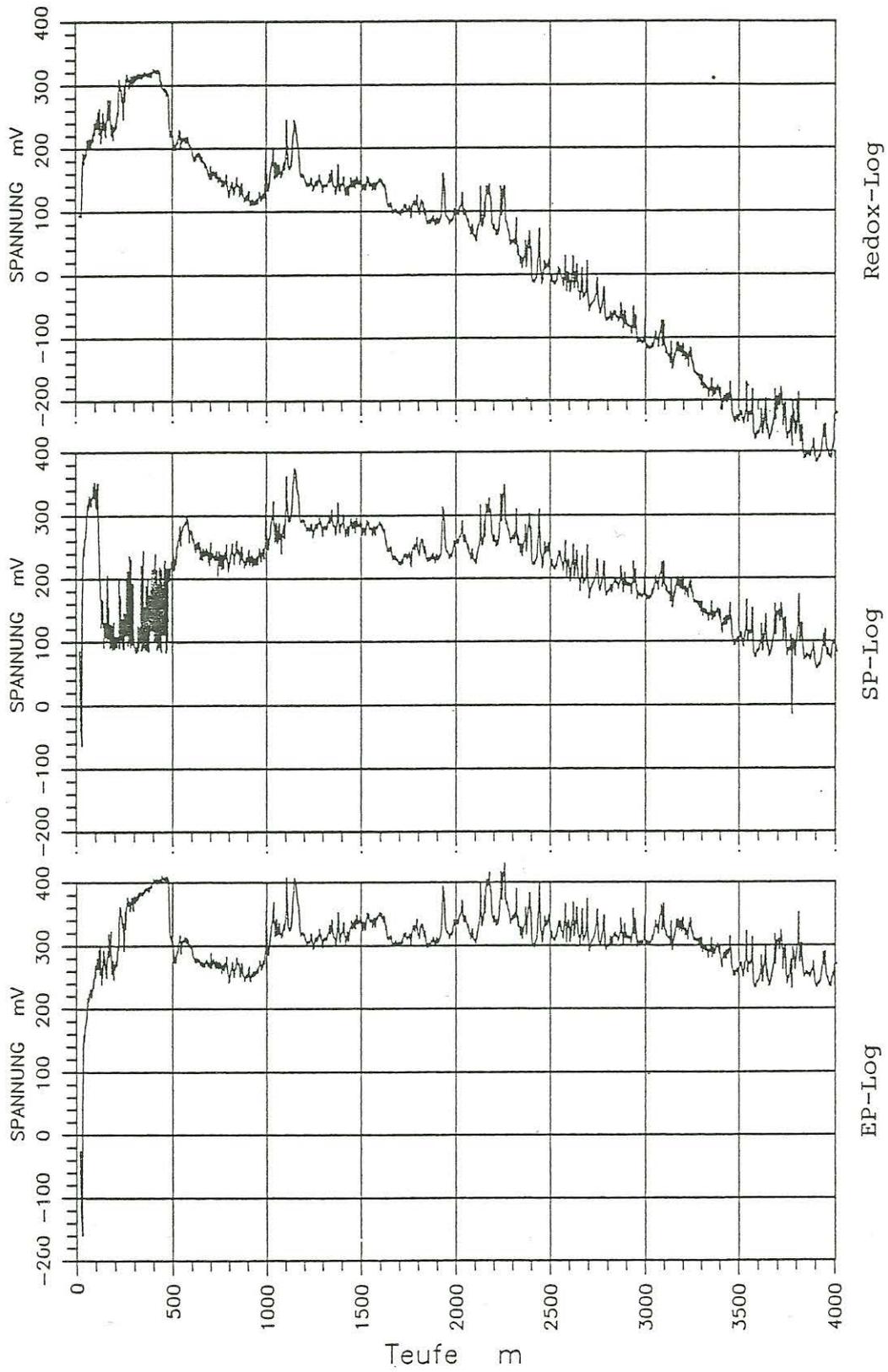
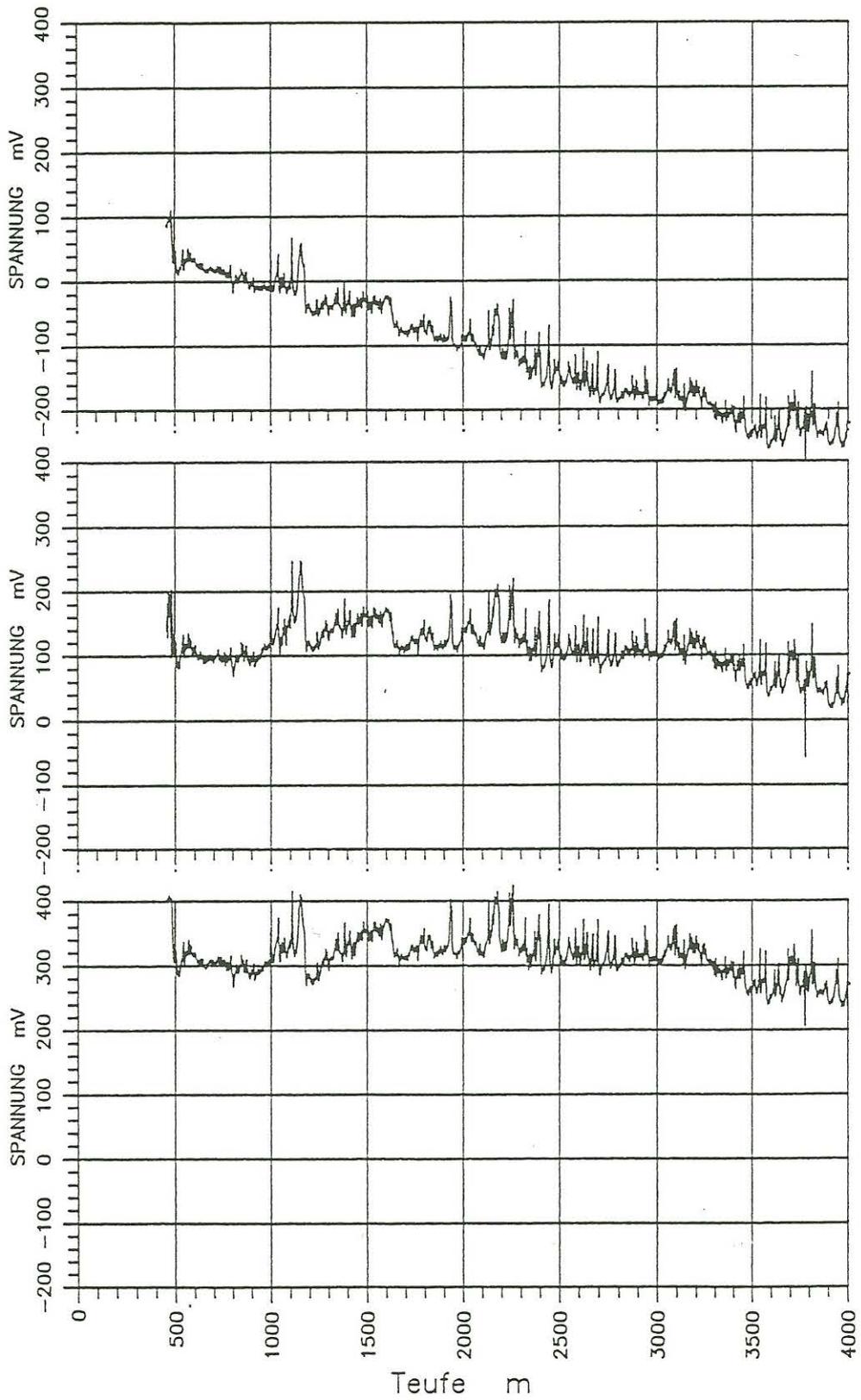


Abb. 6: Log 3, abwärts mit 36 m/min, 0 - 4000 m.



Redox-Log

SP-Log

EP-Log

Abb. 7: Log 4, aufwärts mit 36 m/min, 4000 - 447 m.

## 5.2. BEARBEITETE DATEN

In Kapitel 3 wurde darauf hingewiesen, daß die Messung des Eigenpotentials mit einem Stahlstab wegen der Polarisationserscheinungen am Metall keine definierte Spannung ergibt. Vielmehr setzt sich die gemessene Spannung aus dem Potential des elektrischen Feldes, in dem sich der Stab befindet, dem Redoxpotential und dem Einfluß der jeweiligen Wasserstoffionenkonzentration (pH-Wert) zusammen (SP-Log). Eine Platinelektrode ist vom pH-Wert unabhängig und mißt elektrisches Feld und Redoxpotential (Redox-Log). Dagegen bleibt die unpolarisierbare Silber-Silberchlorid-Sonde vom Redoxpotential und dem pH-Wert unabhängig und mißt nur das äußere elektrische Feld, in dem sie sich befindet (EP-Log).

$$U \text{ (SP-Log)} = U \text{ (E-Feld)} + U \text{ (Redox)} + U \text{ (pH)}$$

$$U \text{ (Redox-Log)} = U \text{ (E-Feld)} + U \text{ (Redox)}$$

$$U \text{ (EP-Log)} = U \text{ (E-Feld)}$$

Um nun den Verlauf des Redoxpotentials mit der Tiefe zu erhalten, wird vom Redox-Log das mit der EP-Sonde gemessene Potentialfeld abgezogen :

$$U \text{ (Redox)} = U \text{ (Redox-Log)} - U \text{ (EP-Log)}$$

Das Redoxpotential  $U \text{ (Redox)}$  besitzt jetzt in den ersten 100 m einen steilen negativen Gradienten (Abb. 8 - 11). Man beachte den entgegengesetzten Verlauf verglichen mit der Darstellung in Abb. 4 - 7. Bei einer Teufe von etwa 100 m erfolgt der Übergang von positiven zu negativen Redoxwerten. Insgesamt sinkt die Redoxspannung bis zur Tiefe von 4000 m auf etwa -600 mV. Die gesamte Amplitude beträgt etwa 800 mV. Dies entspricht der geochemischen Vorhersage in einer Abnahme des Redoxpotentials von oxidierenden in der Nähe der Erdoberfläche zu reduzierenden Bedingungen mit zunehmender Tiefe. Die kurzwelligen Schwankungen in 500 m und 3700 m Tiefe in der Redoxkurve deuten auf reduzierende Zuflüsse aus dem umgebenden Gebirge hin (Erzinger, 1990, pers. Mitt.).

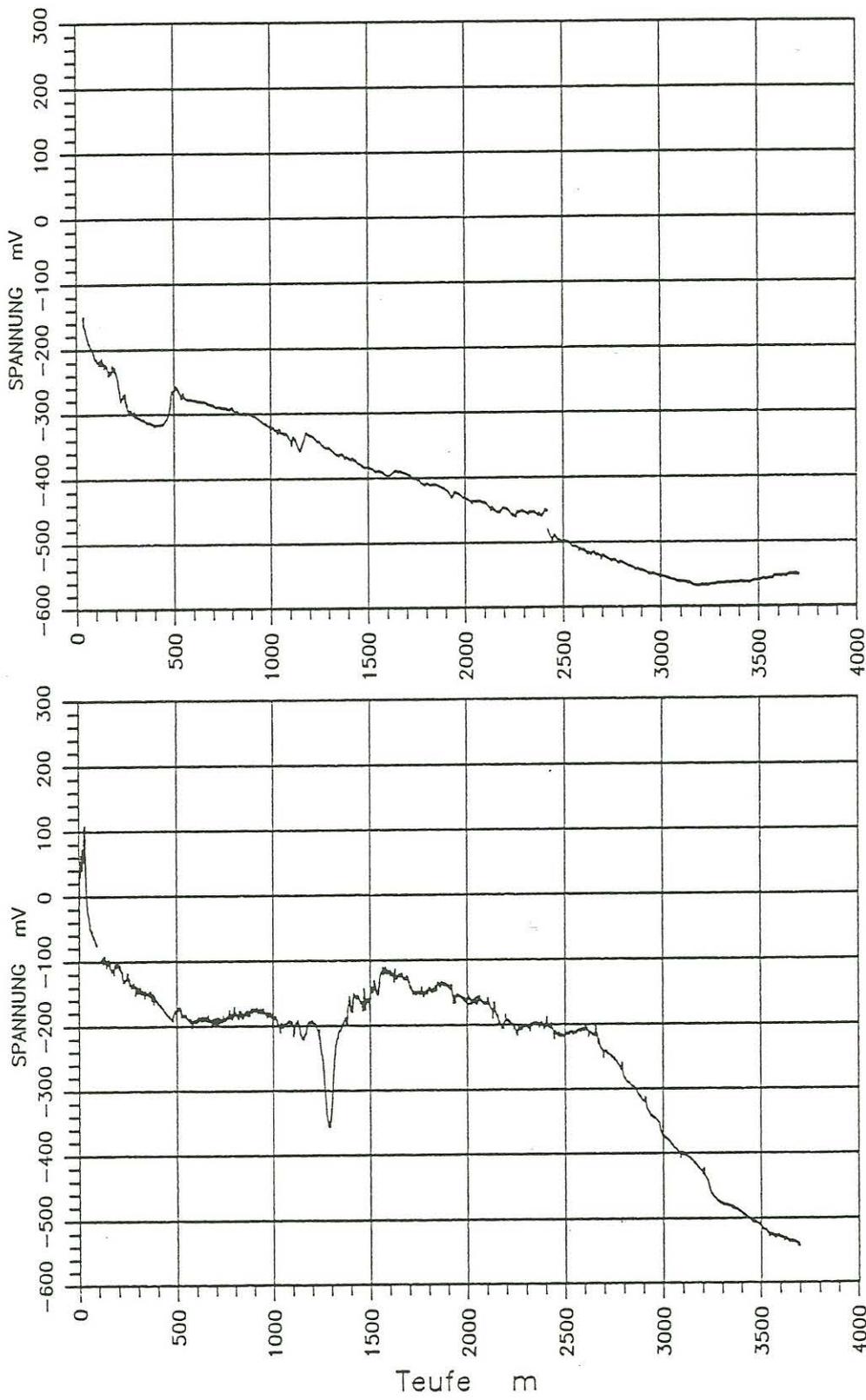


Abb. 8: Redoxpotential in der KTB aus Log 1.

Abb. 9: Redoxpotential in der KTB aus Log 2.

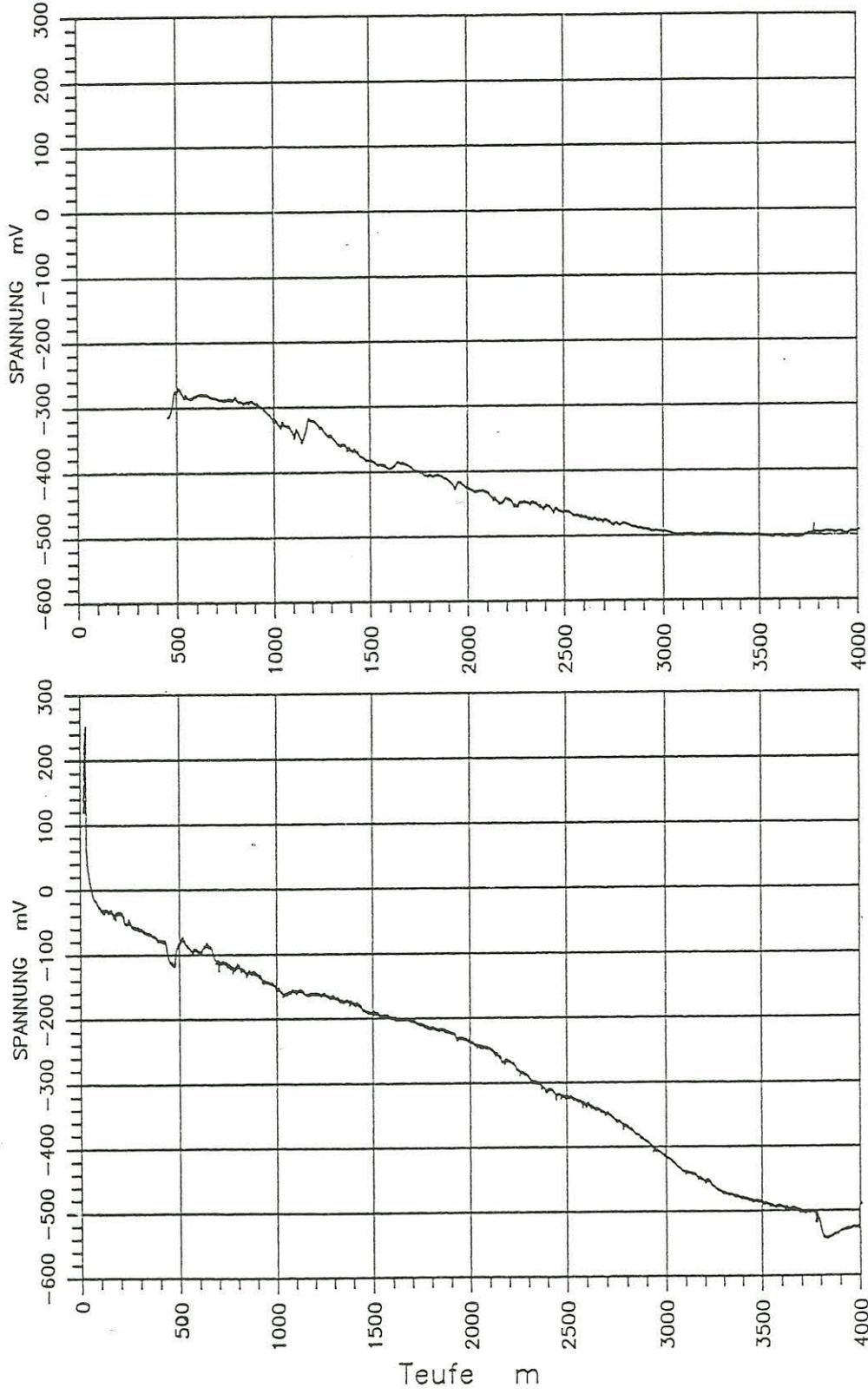


Abb. 10: Redoxpotential in der KTB  
aus Log 3.

Abb. 11: Redoxpotential in der KTB  
aus Log 4.

## 6. BEWERTUNG UND AUSBLICK

Mit der neuen unpolarisierbaren Eigenpotential-Bohrlochsonde ist es gelungen, *ein elektrisches Potentialfeld im Bohrloch reproduzierbar zu messen*. Im Gegensatz zu den bisher verwendeten Metallsensoren bleibt die unpolarisierbare Sonde unbeeinflusst von den örtlichen elektrochemischen Bedingungen. Die herkömmlichen SP-Logs zeigen Abweichungen untereinander im Trend, die kurzwelligen Amplituden sind aber reproduzierbar. Als erstaunlich gilt die Messung eines starken Potentialfeldes innerhalb der Verrohrungsstrecke, in der eigentlich durch ihre Abschirmung von äußeren Feldern kein Meßeffect auftreten dürfte. Vermutlich ist diese Abschirmung infolge einer schlecht leitenden Oxidschicht auf der Verrohrung unwirksam. Dieses starke Potentialfeld deutet auf die Quelle eines elektrischen Feldes hin, die an der Erdoberfläche die Eigenpotentialanomalie erzeugt (Aulbach et al., 1990).

Zusätzlich ist es gelungen, mit der Platinelektrode ein *Redoxpotential in situ zu messen*. Das von den äußeren elektrischen Feldern befreite Redoxpotential zeigt einen mit geochemischen Vorhersagen übereinstimmenden Verlauf von oxidierenden zu reduzierenden Bedingungen. Außerdem können Fluidzuflüsse aus dem Gebirge festgestellt werden. Die Unterschiede in dem Verlauf der einzelnen Kurven (Abb. 8 - 11) müssen noch diskutiert werden.

Mit der neuen Eigenpotential-Bohrlochsonde wurde ein *definiertes Meßsystem* geschaffen, das es ermöglicht, elektrische Potentialfelder unter den Druck- und Temperaturbedingungen im Bohrloch zu messen. Damit ist eine Grundlage geschaffen worden, auf der die Ursachen des Eigenpotentials untersucht werden können.

### Danksagung

Herr Prof. Dr. V. Haak (Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt) motivierte uns zu dieser Arbeit und gab viele hilfreiche Anregungen. Herr Dr. E.W. Grabner (Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Universität Frankfurt) half bei der Klärung elektrochemischer Fragen. Die technische Realisierung der Bohrlochsonde lag in den Händen von Herrn Dipl.-Ing. E. Aulbach. Das KTB-Feldlabor übernahm die Analyse der Elektrolytproben. Die Mitarbeiter der KTB-Dauermeßstation trugen mit ihrem Engagement maßgeblich zum Meßerfolg bei. Herr Dr. J. Erzinger (Institut für Geowissenschaften und Lithosphärenforschung der Universität Gießen) diskutierte mit uns die Ergebnisse und gab Impulse für die erste Interpretation. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützte diese Arbeit mit dem Forschungsvorhaben Ha 1210/8-1. Allen sei herzlich gedankt.

LITERATURVERZEICHNIS

- AULBACH, E., V. HAAK, J. STOLL and H. WINTER (1990): The third dimension of the KTB self-potential anomaly. Poster at 3. KTB Kolloquium, 28.2.-2.3.1990, Gießen. In: KTB-Report 90-4, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover.
- BAHR, K. und M. EISEL (1990): Vertikale tellurische Pulsationen in der KTB-Vorbohrung. Laterale Leitfähigkeitskontraste und virtuelle zeitliche Variationen des Eigenpotentials. In: K. Bram (ed.), KTB-Report 90-6a, NLfB, Hannover.
- FILLOUX, J.H. (1987): Instrumentation and experimental methods for oceanic studies. In: J.A. Jacobs (ed.), Geomagnetism, Vol. 1, Academic Press, London.
- SATO, M. and H.M. MOONEY (1960): The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials, Geophysics, 25, No. 1, pp. 226-249.
- SIWCZYK, J., V. HAAK and J. Stoll (1990): Electrical Self-Potential Anomalies along the Boundary of a Crystalline Nappe. Poster at 3. KTB-Kolloquium, 28.2.-2.3.1990, Gießen. In: KTB-Report 90-4, NLfB, Hannover.
- STOLL, J. (1990): Messung der Eigenpotentialanomalie im KTB-Umfeld und deren Interpretation, In: K. Bram (ed.), KTB-Report 90-3, NLfB, Hannover.
- WINTER, H., E. AULBACH und J. STOLL (1988): Kupfer-Kupfersulfatsonden für Eigenpotential- und magnetotellurische Messungen. In: V. Haak und J. Homilius (Hrsg.), Protokoll über das 12. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung" vom 1.3.-3.3.1988 in Königstein im Taunus, p. 349-350, Hannover.