

Beobachtung der Dynamik von Eigenpotentialen in der Kontinentalen Tiefbohrung Oberpfalz

Johannes B. Stoll*

1. Einleitung

Die Diskussion um die Ursachen von Eigenpotentialen in der Erdkruste wurde durch zahlreiche Messungen im Kontinentalen Tiefbohrprogramm (KTB) in der Oberpfalz erneut belebt. Sie hat vor allem den interdisziplinären Charakter dieses Themas - hier besonders zwischen Geophysik und Elektrochemie - deutlich werden lassen. Grundsätzlich können Eigenpotentialanomalien auf elektrische Stromsysteme in der Erdkruste zurückgeführt werden. Aus elektrochemischer Sicht existieren für deren Zustandekommen mehrere Möglichkeiten, die zunächst durch die Eigenpotentialmessung selbst nicht erkennbar sind. In der Elektrochemie sind verschiedene Prozesse bekannt, durch die spontan, also ohne äußeres Zutun, elektrische Stromsysteme in einem Gesteinsmedium entstehen können. Man findet z.B. Eigenpotentialanomalien dort, wo steilstehende, elektronisch leitfähige Mineralisationen, wie Graphit, Zonen unterschiedlichen Redoxzustandes miteinander verbinden und eine galvanische Zelle ausbilden. Eigenpotentialanomalien, deren Existenz auf einer galvanischen Zelle beruht, beobachtet man im KTB-Bereich. Über sie ist bei Stoll et. al. (1994) bereits ausführlich berichtet worden.

In dieser Arbeit werden Eigenpotentialmessungen (SP-Messungen) aus der KTB-Hauptbohrung (KTB-HB) vorgestellt, die zeigen, daß Flüssigkeitszutritte aus dem Gestein in eine Bohrung lokale Variationen des elektrischen Potentials verursachen können. Hinter diesem Zusammenhang wird ein elektrokinetischer Effekt vermutet, der aus der Elektrochemie schon lange als Strömungspotential bekannt ist. Er stellt eine, in erster Näherung lineare Beziehung zwischen Stromdichte des Flüssigkeitsvolumens und dem elektrischen Potential her. Das Ziel dieser Arbeit ist es, aus dem vorliegenden Datenmaterial diejenigen Potentialvariationen aufzufinden, für die sich diese Beziehung nachweisen läßt.

2. Die Eigenpotentialdaten aus der KTB-HB

In der zweiten Märzhälfte 1992 wurde im Teufenabschnitt 3000 bis 6000 m der KTB-HB eine Meßphase durchgeführt, aus der fünf Eigenpotentialregistrierungen (SP-Logs) zur Verfügung stehen, die in zeitlich unregelmäßiger Folge innerhalb eines Zeitraumes von 12 Tagen aufgenommen wurden. Die Abbildung 1 zeigt die Originalregistrierungen vom 20.3. (3:00), 23.3. (16:00), 23.3. (23:00), 26.3. (17:00) und 1.4. (20:30). Die in Klammern angegebenen Uhrzeiten dokumentieren jeweils den Beginn der Messung. Bei den ersten beiden SP-Logs wurde die unpolarisierbare Silber-Silberchlorid-Elektrode der Frankfurter Bohrlochsonde verwendet, während die drei nachfolgenden Logs in konventioneller Weise mit einem Metallring als Sensor gemessen wurden. Die deutliche Verschiebung des Gleichspannungsanteils in den letzten drei SP-Logs um -500 mV wird darauf zurückgeführt.

Institut für Meteorologie und Geophysik, Feldbergstr. 47, 60323 Frankfurt/M.

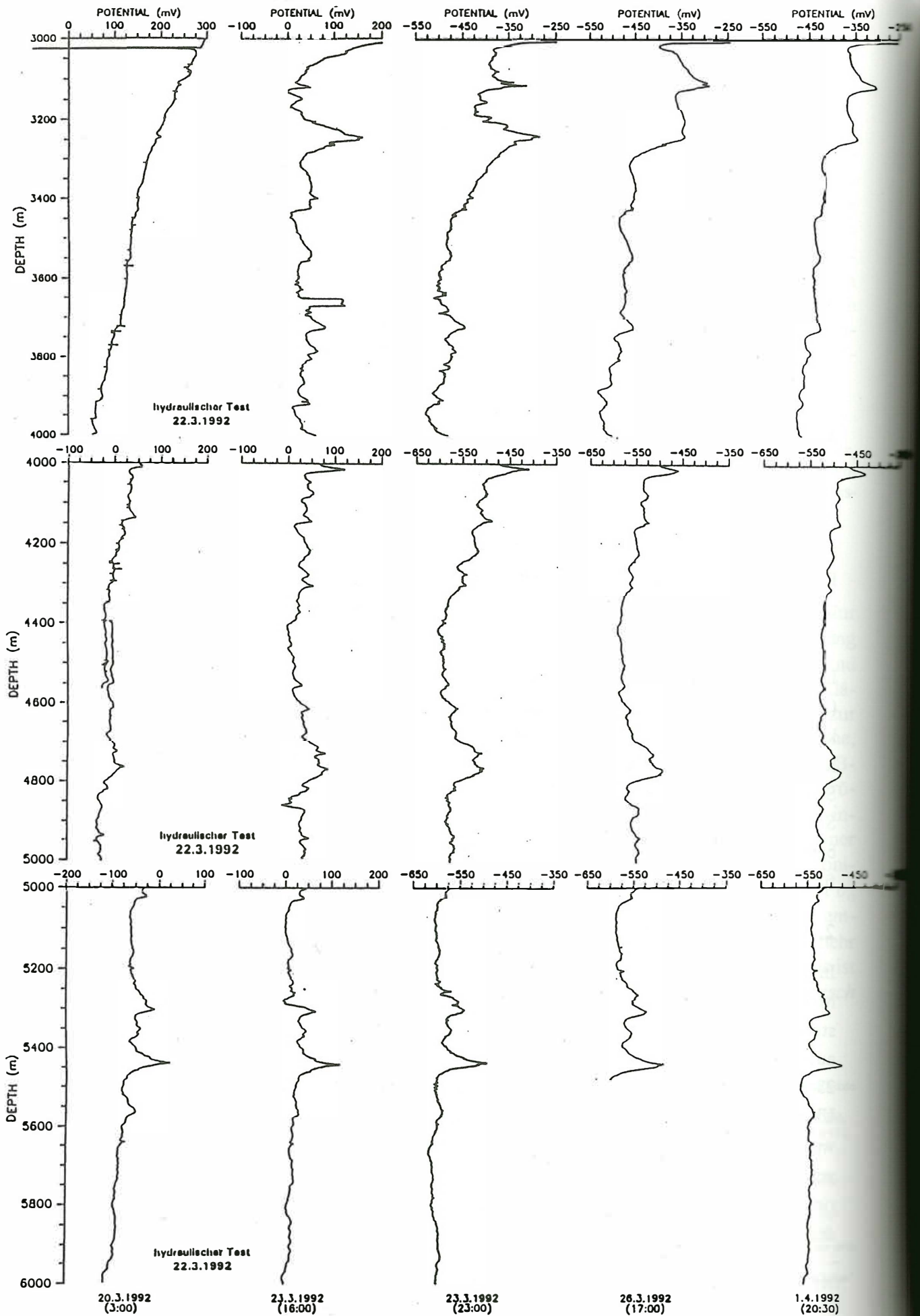


Abb.1: Original-Eigenpotentialdaten aus der KTB-HB 3000-6000 m. Zwischen den Messungen vom 20.3. (3:00) und dem 23.3. (16:00) fand am 22.3. (9:15) der hydraulische Absenkttest statt.

Im ersten SP-Log vom 20.3. (3:00) sind nur kleine Potentialschwankungen mit überwiegend stochastischem Variationscharakter vorhanden. Vereinzelt treten kurzweilige Variationen des Potentials bis maximal 20 mV auf, die um den langwelligen Trend oszillieren. Nur bei 5300 m, 5450 m und 5550 m sind positiv polarisierte SP-Peaks vorhanden, die sich vom übrigen Verlauf deutlich herausheben. Im Gegensatz dazu stehen die vier nachfolgenden SP-Logs, die durch zahlreiche SP-Peaks mit Beträgen von einigen Zehner Millivolt charakterisiert sind. Betrachtet man einzelne SP-Peaks, so fällt auf, daß einerseits die Amplitudenspitzen von einem Log zum anderen ihre Teufenlage kaum verändern, andererseits ihre Beträge mit der Zeit abnehmen. Eine Durchsicht der Logs ergibt, daß diese Beobachtung für zahlreiche SP-Peaks für den gesamten Teufenbereich zutrifft. Dieser deutliche Kontrast im Charakter des Potentialverlaufs zwischen der Messung vom 20.3. und den nachfolgenden Messungen wurde offensichtlich durch einen hydraulischen Absenktest bewirkt, der am 22.3. in der KTB-HB, also zwischen Messung 1 und 2 durchgeführt wurde.

3. Hydraulische Absenkung der Bohrspülung

Der Pegel der Bohrspülung wurde am 22.3. (9:15) durch Herausziehen des Bohrgestänges und Herauspumpen der Bohrspülung auf etwa 540 m unterhalb der Ackersohle abgesenkt (Kessels und Kück, 1993). Die Verminderung des hydrostatischen Auflastdruckes der Bohrspülungssäule stimulierte den Zufluß von Formationswässern. Diese bewirkten wiederum einen Anstieg des Spülungsspiegels, der in der Folge zu einem Ausgleich der hydraulischen Druckdifferenz zwischen Formation und Bohrung führte. Der zeitliche Verlauf dieses Anstiegs wurde mit einem Drucksensor in 1000 m Tiefe über einen Zeitraum von 6 Tagen registriert und ist in Abb. 2a dargestellt.

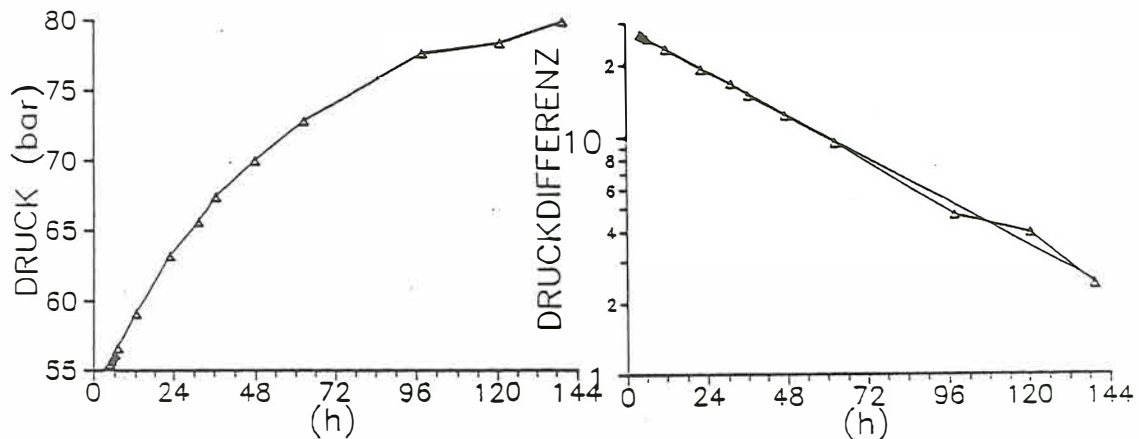


Abb. 2a: Druckverlauf in der KTB-Hauptbohrung über die Zeit nach dem Absenktest vom 22.3.1992. Der hydrostatische Druck der Bohrspülungssäule wurde von einem Sensor in ca. 1000 m Tiefe während eines Zeitraumes von etwa 6 Tagen aufgezeichnet. 2b: Halblogarithmische Darstellung des dynamischen Ausgleichprozesses des durch den Absenktest erzeugten Unterdruckes in der Bohrspülung und des Formationsdruckes. Der Maximalwert $\Delta P = 26.8$ bar entspricht der Druckdifferenz der abgesenkten Spülungssäule etwa 4.5 Stunden nach Beginn der Absenkung gegenüber dem Gleichgewicht. Die durchgezogene Linie wurde nach Glg. 3.2 bestimmt und entspricht einer Ausgleichsgeraden mit der charakteristischen Zeitkonstanten $-0.018/h$.

Er zeigt zunächst eine starke zeitliche Änderung des hydrostatischen Auflastdruckes durch das zunehmende Gewicht der Spülungssäule. Nach etwa 6 Tagen nähert sich der Bohrspülungspegel bei 180 m unterhalb der Ackersohle seinem Gleichgewichtszustand. Einen solchen Verlauf erwartet man, wenn Spülungsdruck und Formationsdruck in einem dynamischen Verhältnis zueinander stehen - je kleiner die Druckdifferenz, desto geringer die Zuflußrate. Trägt man umgekehrt die Druckdifferenz zwischen dem zeitlich veränderlichen Momentandruck und dem End- oder Gleichgewichtszustand über der Zeit auf, dann erhält man bei halblogarithmischer Darstellung einen nahezu linearen Verlauf (Abb.2b).

Mit einer Ausgleichsgeraden im logarithmischen Maßstab läßt sich das zeitliche Abklingverhalten (Zerfallskonstante) der Zuflußmenge bestimmen. Sie entspricht der Steigung dieser Geraden und wird im folgenden als charakteristische Zeitkonstante γ_{Druck} bezeichnet. Für die in Abb. 2b dargestellt Druckkurve wurde ein Wert $\gamma_{\text{Druck}} = -0.018 \text{ 1/h}$ ermittelt. Besteht ein Zusammenhang zwischen elektrischem Potential und der Zuflußrate, so sollte dies auch in den SP-Amplituden sichtbar werden. Ist dieser Zusammenhang linear, dann sollten die SP-Amplituden ebenfalls als Funktion der sich zeitlich ändernden Druckverhältnisse in der KTB-HB variieren. Dieser Zusammenhang wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

4. Das Strömungspotential - Verbindung von Flüssigkeitsbewegung und elektrischem Potential

Gesteinsoberflächen laden sich beim Kontakt mit Flüssigkeiten spontan elektrisch auf und bilden dort eine elektrische Doppelschicht (DS). Ursache dafür sind im wesentlichen Oxidations-, Adsorptions-, Hydratations- und Hydrolysevorgänge an der Gesteinsoberfläche (Ney, 1973, Hamann und Vielstich, 1985). Die Struktur der DS wird aus den Ladungen unmittelbar auf der Gesteinsoberfläche und den Gegenladungen im Elektrolyten gebildet. Die elektrolytseitige Schicht der Gegenladungen teilt sich ihrerseits auf in eine starre Schicht, die fest an der Gesteinsoberfläche anlagert, und eine Schicht, in der die Ladungen diffus verteilt sind. Durch Flüssigkeitsströmungen in permeablen Gesteinsschichten oder in den klüftigen Wegsamkeiten eines Gesteinsvolumens wird der diffuse Teil der DS abgelöst. Im Beispiel von Abb. 3 werden die negativen Ionen jenseits der Gleitfläche mobilisiert, welche den beweglichen Teil vom starren Teil der DS scheidet. Sie bilden einen Konvektionsstrom, der die Enden der Gesteinskapillare gegeneinander elektrisch auflädt. Er hängt von der elektrischen Oberflächenleitfähigkeit σ_0 der Kapillarwand ab. Wegen der endlichen elektrischen Leitfähigkeit σ_q der Kapillarflüssigkeit versucht eine Ionenwanderung längs der Kapillare (Leitungsstrom) in entgegengesetzter Richtung die entstehende Potentialdifferenz wieder auszugleichen, bis ein stationärer Zustand erreicht ist (Abb. 3). Das Strömungspotential wird deshalb wesentlich von der elektrischen Leitfähigkeit der Flüssigkeit abhängen. Je höher das Druckgefälle in der Kapillare, desto stärker ist der Konvektionsstrom und der Leitungsstrom. Weiter ist für den Betrag und besonders das Vorzeichen des Strömungspotentials die Potentialdifferenz quer zur Kapillarachse zwischen dem Elektrolytinneren und der Scherfläche

wichtig, an der die Ladungen aus der elektrischen Doppelschicht abgelöst werden; sie wird Zeta-Potential genannt.

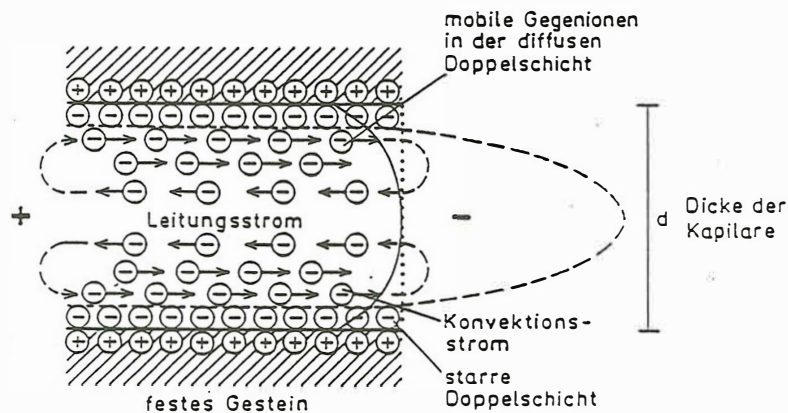


Abb.3: Entstehung des Strömungspotentials: Durch einen Flüssigkeitsstrom $u(\xi)$ werden die Gegenladungen der diffusen Schicht in einer Kapillare von der Strömung mitgerissen. Im wandnahen Teil entsteht ein Konvektionsstrom. Längs der Kapillare baut sich eine elektrische Spannung auf, die einen Gegenstrom, den Leitungsstrom, über den Kapillarquerschnitt hervorruft. Im dargestellten Fall erzeugen negative Ionen den Konvektionsstrom und laden das rechte Ende der Kapillare negativ auf. Durch den positiven Pol am gegenüberliegenden Ende angezogen, wandern sie über den Kapillarquerschnitt zurück.

In Abb. 4a ist der beschriebene Stromkreis bestehend aus Konvektionsstrom (I_{CONV}) und Leitungsstrom (I_{COND}) dargestellt (Morgan, 1989). Der Weg des zurückfließenden Leitungsstromes hängt dabei von den parallelgeschalteten Widerständen des Kapillarquerschnittes R_{COND} und R_{SURFACE} ab. Im Gleichgewicht sind I_{CONV} und I_{COND} gleich groß. Der Zusammenhang zwischen Flüssigkeitströmung und der elektrischen Spannung längs der Fließrichtung wird durch folgende Gleichung beschrieben, die H.v.Helmholtz 1879 aufgestellt hat.

$$U = -\frac{\varepsilon \zeta}{4\pi \eta \sigma_q} \Delta P \quad (1)$$

Darin bedeutet ε die Dielektrizitätskonstante, ζ das Zetapotential, η die dynamische Viskosität der Flüssigkeit, σ_q die Querschnittsleitfähigkeit der Flüssigkeit und ΔP die Druckdifferenz entlang der Kapillare. Eine Abschätzung des Strömungspotentials U für eine Druckdifferenz von 1 bar und $\sigma_q = 0.1 \text{ S/m}$ (Leitfähigkeit des Elektrolyten) ergibt einen Wert von etwa 3 mV, wenn man für $\varepsilon = 80 \cdot 8.8 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$, $\zeta = -0.05 \text{ V}$, $\eta = 10^{-3} \text{ Pas}$ berücksichtigt. Der Wert für ζ leitet sich aus Untersuchungen an KTB-Gesteinsproben ab (Nover, 1994). Durch die Absenkung des Spülungspegels wurde eine Druckdifferenz zwischen Bohrung und Formation von etwa 30 bar erreicht, die nach der obigen Abschätzung Strömungspotentiale bis 90 mV erzeugt. Von diesem Strömungspotentialfeld kann aber nur der dem Bohrloch zugewandte Pol, also maximal die halbe Spannung registriert werden. Seine Stärke beträgt dann 45 mV. In den SP-Registrierungen werden ebenfalls SP-Amplituden derselben Größenordnung beobachtet.

Ein permeables Gestein besteht in erster Näherung aus einer Vielzahl von Kapillaren, die sich zu einem System verbinden. Während in unmittelbarer Nähe der Mineraloberflächen die Ladungen durch den Flüssigkeitsstrom mitgerissen werden und den Konvektionsstrom bilden, fließt der Leitungsstrom von den Kapillarenden über den Querschnitt des Kapillarsystems zurück. Daraus resultiert im Gestein ein elektrisches Dipolfeld (Abb. 4b), das durch Bohrlochmessungen registrierbar ist.

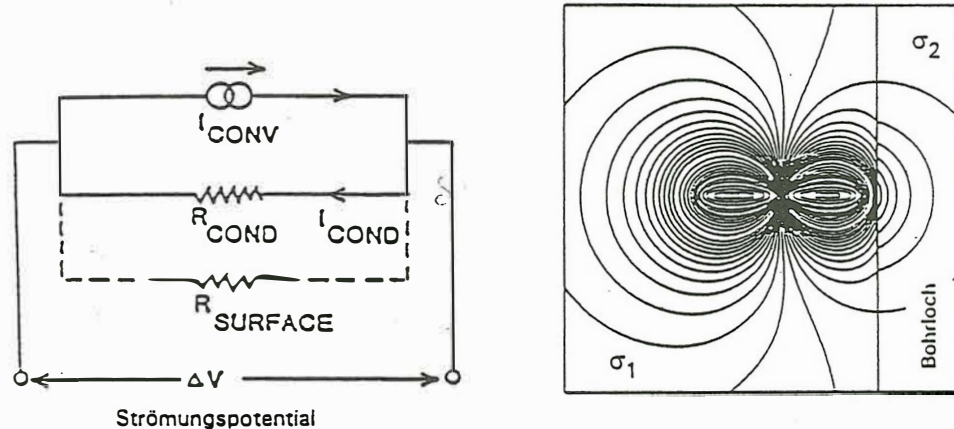


Abb. 4a: Schematische Darstellung des Strömungspotentials nach Morgan (1989): Durch die Flüssigkeitsbewegung werden Ionen der diffusen Schicht mitgerissen und erzeugen den Konvektionsstrom I_{CONV} . Die dabei sich aufbauende Spannung treibt diese Ionen längs der Kapillare zurück und erzeugt einen Leitungsstrom I_{COND} . Für den Gesamtstrom ist der Leitungswiderstand R_{COND} entscheidend. **Abb. 4b:** Beispiel eines elektrischen Dipolfeldes, das durch Strömungspotentiale in einem Kapillarsystem erzeugt wurde. Die Kapillarenden münden in ein Bohrloch (rechts), dessen Spülungsleitfähigkeit 10 mal größer als die der Flüssigkeit in den Kapillaren ist. Die Flüssigkeit strömt von links nach rechts, ebenso der Konvektionsstrom. An den Kapillarenden kehrt sich seine Richtung um. Er fließt als Leitungsstrom über den Kapillarquerschnitt zurück und schließt den Stromkreis. Durch dieses Stromsystem entsteht das dargestellte Dipolfeld, wobei von der Meßsonde nur die Feldlinien im Bohrloch geschnitten werden.

5. Zum dynamischen Verhalten der Eigenpotentiale in der KTB-HB

Gleichung (1) beschreibt eine lineare Beziehung zwischen der hydraulischen Druckdifferenz ΔP und dem Strömungspotential U . Unterliegt die Druckdifferenz einer zeitlichen Änderung, dann sollte das Strömungspotential ebenfalls zeitlich variieren. Der Druckverlauf in Abb. 2b zeigt einen zeitlich exponentiellen Verlauf. Daher sollte für alle SP-Amplituden, die durch Flüssigkeitszuflüsse erzeugt wurden, ebenso ein zeitlich exponentieller Verlauf mit gleicher charakteristischer Zeitkonstante beobachtbar sein. Zur Bestimmung dieser charakteristischen Zeitkonstante aller SP-Amplituden γ_{SP} wurde folgendermaßen vorgegangen:

Da das gesuchte Strömungspotential im kurzwelligen Anteil der Messungen enthalten ist, wurden zunächst die SP-Logs mit einem Trapezfilter (Schmucker, 1978) hochpaßgefiltert. Als Abschneidewellenlänge wurde $\lambda_0 = 180$ m gewählt. Die Abtastrate beträgt 0.15 m.

Nimmt man für die individuellen Potentialwerte der SP-Messungen in der KTB-HB folgenden exponentiellen Ansatz an,

$$x_i(t) = x_{i0} e^{-\gamma_{SP} t} \quad (2)$$

dann kann aus dem Amplitudenverhältnis m zweier zeitlich aufeinanderfolgender Potentialmessungen derselben Teufe die charakteristische Zeitkonstante γ_{SP} bestimmt werden.

$$\gamma_{SP} = \frac{\ln(m_{SP})}{(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

Zwischen zwei Meßwerten x_{i1} und x_{i2} besteht danach der lineare Zusammenhang

$$x_{i2} = m x_{i1} \quad (4)$$

wobei $x_{i1} = x_i(t_1)$ und $x_{i2} = x_i(t_2)$

Für je ein Datenpaar streuen jedoch die Werte m stark. Es werden daher die Potentialpaare über einen Teufenintervall von 150 m ($N=1000$) zusammengefaßt und durch die Methode der kleinsten Abstandsquadrate das mittlere Verhältnis \bar{m}_{SP} für den jeweiligen Teufenabschnitt berechnet.

$$\bar{m}_{SP} = \frac{\sum_{i=1}^{N=1000} x_i(t_1) x_i(t_2)}{\sum_{i=1}^{N=1000} (x_i(t_1))^2} \quad (5)$$

Mit Gleichung (3) erhält man die gesuchte charakteristische Zeitkonstante γ_{SP} für den jeweiligen Teufenabschnitt.

Neben der Berechnung von γ_{SP} wird für die einzelnen Teufenabschnitte auch der Kreuzkorrelationskoeffizient $r_{x_1 x_2}$ für jedes SP-Logpaar bestimmt. Man erhält hierdurch ein weiteres Kriterium, um abzuschätzen, in welchem Maße eine Wiederholung des Potentialverlaufs einzelner Intervalle von einem Log zum anderen stattfindet.

Der Korrelationskoeffizient $r_{x_1 x_2}$ wird folgendermaßen bestimmt (Sachs, 1974):

$$r_{x_1 x_2} = \frac{\sum_{i=1}^{N=1000} x_{i1} x_{i2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N=1000} (x_{i1})^2 \sum_{i=1}^{N=1000} (x_{i2})^2}} \quad (6)$$

Der Wert $r_{x_1 x_2}$ kann zwischen -1 und +1 liegen.

In Anlehnung an Jenkins and Watts (1968) kann aus $\frac{\Delta m_{SP}}{m_{SP}} = \frac{(t_{N-1/\alpha})^2 (1-r^2)}{(N-1)r^2}$ der Konfidenzintervall

$$\gamma_{SP} \pm \Delta\gamma_{SP} = \frac{\ln(m_{SP} \pm \Delta m_{SP})}{\Delta t} \quad (7)$$

bestimmt werden.

Testweise wurde dieses Verfahren auch für Intervallängen 75m (N=500) und 300m (N=2000) durchgeführt. Die Ergebnisse der abschnittswisen Bestimmung von γ_{SP} und $r_{x_1x_2}$ ist in den Abbildungen 5,6 und 7 für je ein Logpaar dargestellt.

6. Identifizierung von Strömungspotentialen in den SP-Messungen

Die Strömungspotentiale in den SP-Logs werden nach folgenden Kriterien identifiziert:

Wegen der Meßungenauigkeit der Meßsonde von etwa $\pm 1\text{mV}$ unterliegt die Bestimmung von γ_{SP} Schwankungen, deren Breite $\Delta\Gamma$ in Abb. 5-7 eingetragen ist. Diese Schwankungsbreite wurde nach Gleichung (3) für eine SP-Amplitude von $10\text{mV} \pm 1\text{mV}$ abgeschätzt. Liegt nun der Wert γ_{SP} innerhalb dieses Bereichs und ist im betreffenden Teufenintervall der Korrelationskoeffizient positiv und größer 0.7, so kann dort ein linearer Zusammenhang zwischen dem Flüssigkeitszufluß und dem elektrischen Potential, also ein Strömungspotential vermutet werden. Die etwas willkürlich gesetzte Schwelle für $r_{x_1x_2} = 0.7$ läßt sich durch die Beobachtung begründen, daß im SP-Logpaar vom 23.3 (16:00) und 26.3. (17:00) die Werte γ_{SP} für Korrelationen besser als 0.7 bereits innerhalb des Schwankungsbereiches $\Delta\Gamma$ liegen.

Anhand des obigen Kriteriums werden Teufenbereiche lokalisiert, in denen Strömungspotentiale auftreten. Die jeweiligen SP-Log-Paare sind in der Spalte I (Abb. 5-7) dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten wurden für unterschiedliche Intervallängen berechnet (Spalte II) und zwar für 75m (N=500), 150m (N=1000) und 300m (N=2000). Sie sind durch verschiedene Symbole gekennzeichnet. Für diese Intervallängen ist ebenfalls die charakteristische Zeitkonstante γ_{SP} in den Spalten III (75m), IV (150m) und V (300m) dargestellt.

Zur Bestimmung der Bereiche, in denen das Kriterium für Strömungspotentiale erfüllt ist, werden zunächst diejenigen Teufenintervalle, in denen die Korrelationskoeffizienten für die Intervallänge 150m den Schwellenwert $r_{x_1x_2} = 0.7$ überschreiten, durch schraffierte Flächen markiert. Dies wird ebenfalls für die Werte γ_{SP} , die innerhalb des Schwankungsbereiches $\Delta\Gamma$ liegen, durchgeführt. Überschneiden sich die Flächen aus Korrelation und charakteristischer Zeitkonstante in bestimmten Bereichen, so markieren sie diejenigen Teufen, in denen das obige Kriterium für Strömungspotentiale erfüllt ist. Sie sind in Abb.5-7 (Spalte I) durch schraffierte Flächen (▨) markiert. Durch entgegengesetzt bzw. senkrecht dazu gerichtete Schraffierungen werden die Ergebnisse der beiden anderen Intervallängen N=500 und N=1000 optisch unterschieden (75m = ▩ und 300m = ≡).

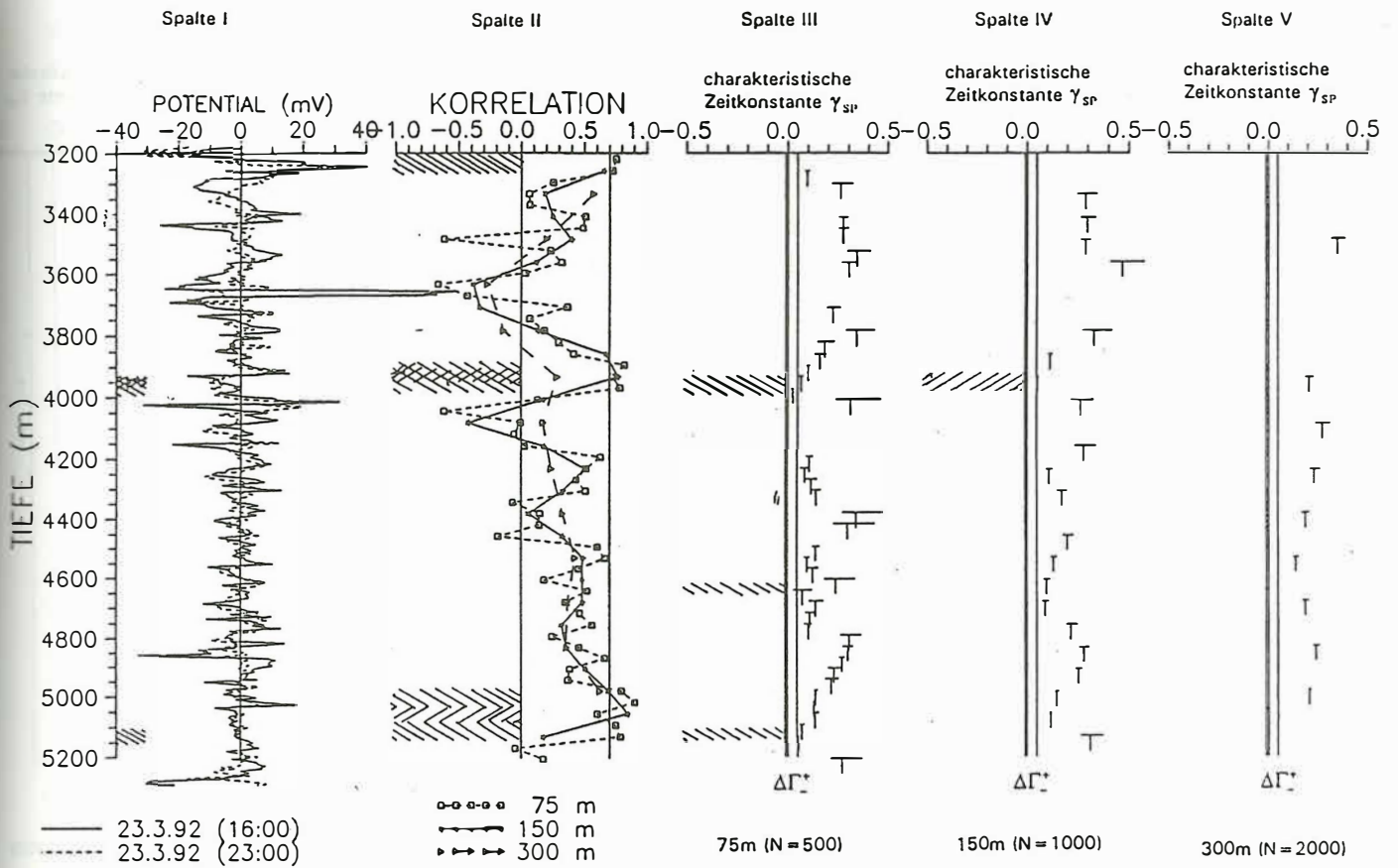


Abb. 5: Auswahl von Zuflußzonen aus verschiedenen Logpaaren. Strömungspotentiale liegen vor, wenn $r_{x_1x_2} > 0.7$ und γ_{SP} innerhalb des Schwankungsbereiches $\Delta\Gamma$ liegt.

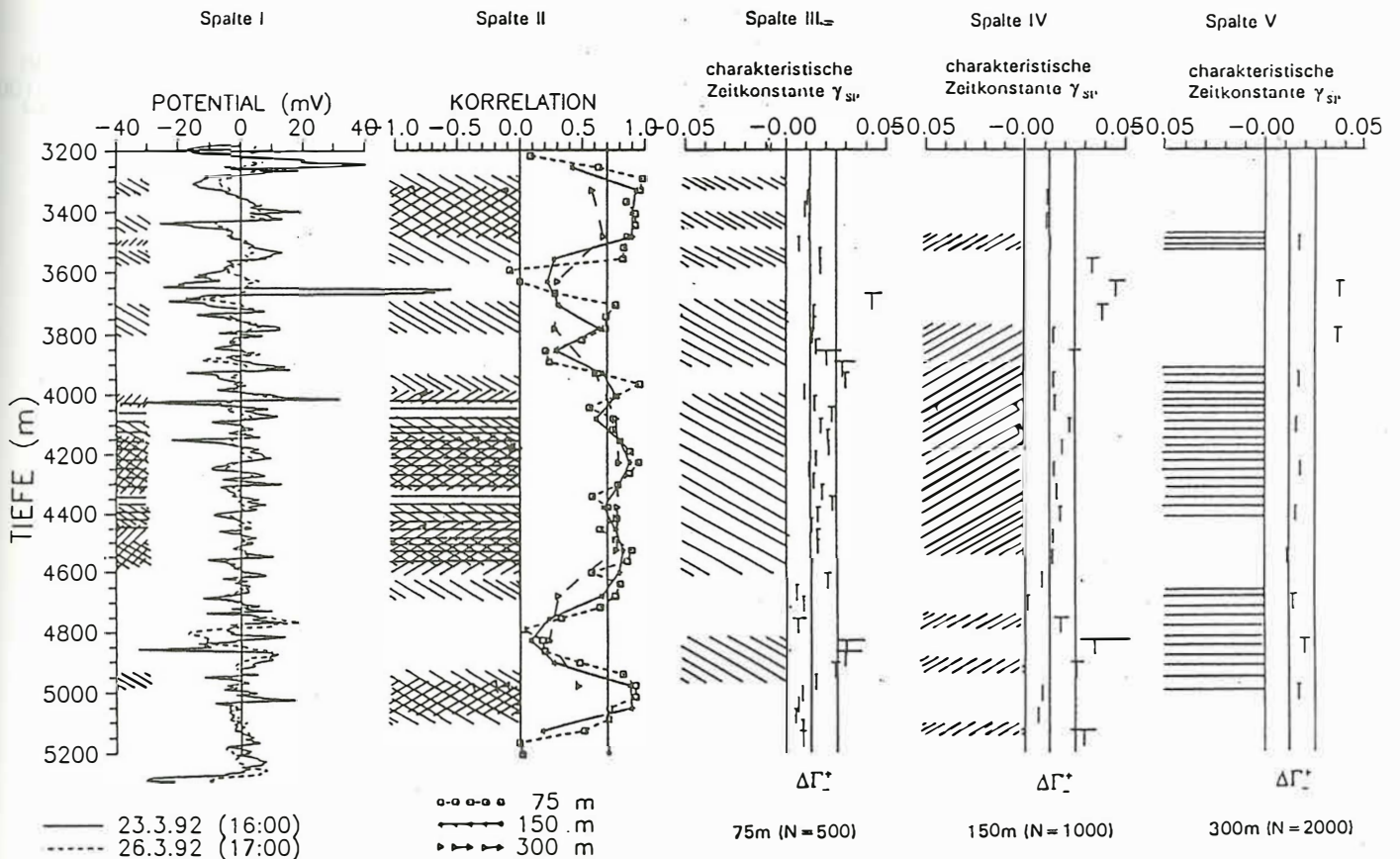


Abb. 6: Auswahl von Zuflußzonen aus verschiedenen Logpaaren. Strömungspotentiale liegen vor, wenn $r_{x_1x_2} > 0.7$ und γ_{SP} innerhalb des Schwankungsbereiches $\Delta\Gamma$ liegt.

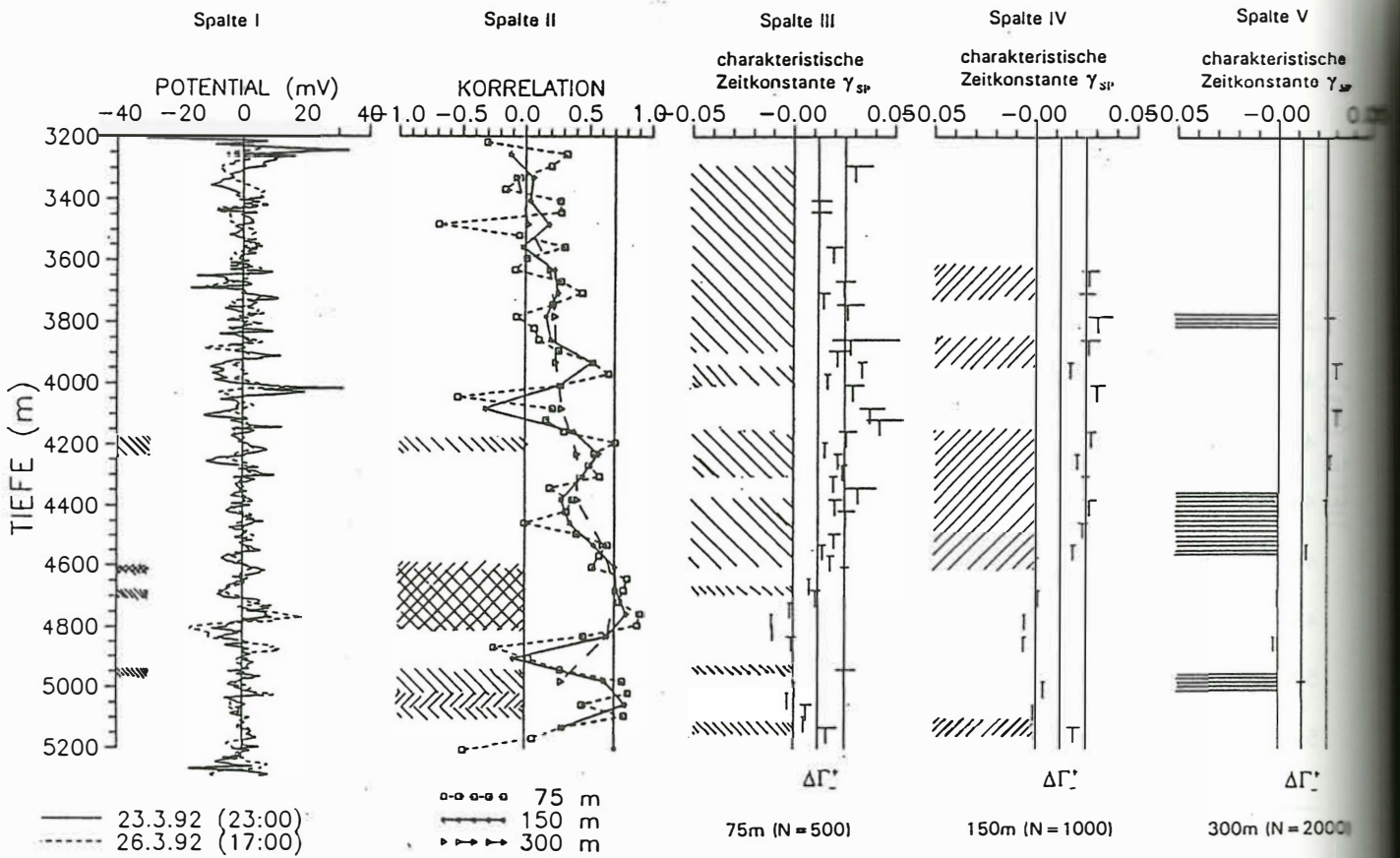


Abb. 7: Auswahl von Zuflußzonen aus verschiedenen Logpaaren. Strömungspotentiale liegen vor, wenn $r_{x_1x_2} > 0.7$ und γ_{SP} innerhalb des Schwankungsbereiches $\Delta\Gamma$ liegt.

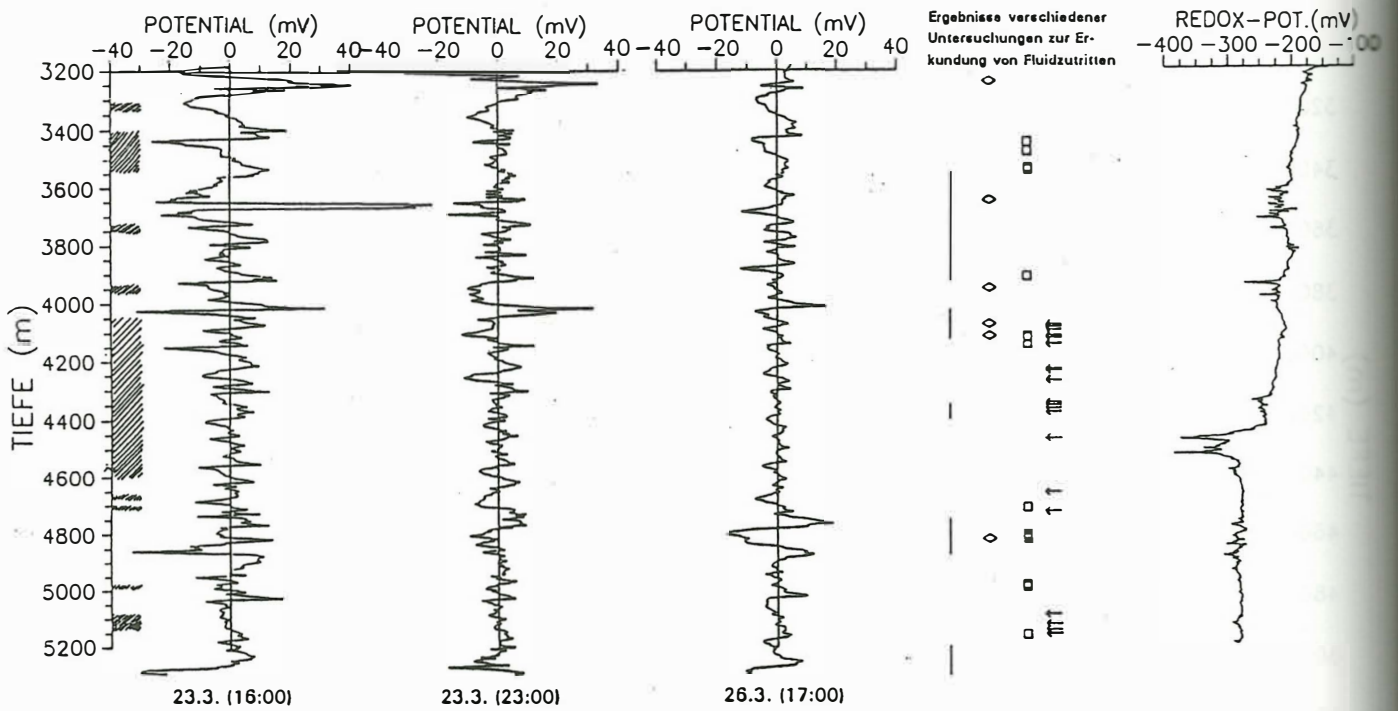


Abb. 8: Vergleich der gefilterten SP-Logs vom 23.3. (16:00), 23.3. (23:00) und 26.6. (17:00) mit den Ergebnissen der Messung der Spülungsleitfähigkeit (mud resistivity), der geochemischen on line Analyse der Spülung, der Beprobung durch Fluidsampler und der Bestimmung der Klüftigkeitsziffer nach den Cuttings. Rechts sind die Ergebnisse der Redoxpotentialmessung vom 23.3. (23:00) nach dem Absenkttest dargestellt. In den scgraffierten Bereichen konnten Strömungspotentiale festgestellt werden.

Faßt man diese Ergebnisse zusammen, so ergeben sich folgende Teufenbereiche, in denen aufgrund dieser Analyse Strömungspotentiale und damit Zuflüsse aus der Gesteinsformation lokalisiert werden können: 3325 m, 3400-3550m, 3750 m, 3950m, 4050-4600m, 4675m, 4700m, 4975m, 5100-5150m. Besonders im Bereich von 3900-4600m ergeben sich einige Überschneidungen der verschiedenen Logpaare.

7. Diskussion

In der Abbildung 8 stehen die gefilterten SP-Logs vom 23.3. (16:00) ②, 23.3. (23:00) ③ und 26.3. (17:00) ④ den Ergebnissen der Gas- und Fluidanalyse, des mud resistivity logging und den Ergebnissen der Fluidsampleranalyse gegenüber. In den mit Symbolen markierten Bereichen wurden signifikante chemische Änderungen der Bohrspülung gegenüber ihrer Anfangszusammensetzung festgestellt.

- Die Spülungsleitfähigkeit (mud resistivity) zeigt dort Änderungen, in denen ebenfalls Strömungspotentiale lokalisiert werden konnten (Symbol |). Dort wurden Zuflüsse mit hohen Anteilen an Na, Cl, Ca-Ionen gefunden.

- Der Vergleich der Teufen mit Strömungspotentialen und den Ergebnissen der geochemischen online-Analyse zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung. Überwiegend wurden dort Zuflüsse chlorid- und methanreicher Formationswässer festgestellt.

- Drei der sechs Fluidsampler wurden in Teufenbereichen gesetzt, in denen Strömungspotentiale nachgewiesen werden konnten. (Symbol ◇). Die Analysen der Fluidproben ergaben auch dort salinare und methanreiche Zuflüsse.

- Besonders im Teufenbereich zwischen 4000 bis 5000m werden zahlreiche Klüftigkeiten anhand der Cuttings festgestellt (Symbol ←). Diese sind ein wichtiger Hinweis für die Existenz hydraulischer Wegsamkeiten, entlang derer Fluide im Gestein migrieren können.

Drüberhinaus ist es mit der Frankfurter Bohrlochsonde möglich, mithilfe eines Platinsensor das Redoxpotential der Bohrspülung zu registrieren. Der parallel zu den SP-Messungen registrierte Verlauf des Redoxpotentials vor und nach dem hydraulischen Absenkttest zeigt auch hier einen deutlichen Kontrast. Der Vergleich mit den oben genannten Zuflußzonen ergibt keine so deutliche Übereinstimmung, wie sie durch die Strömungspotentialanalyse erreicht wurde. Jedoch werden bei 3700m, 3925m, 4450m und 4500m Variationen des Redoxpotentials mit negativen Vorzeichen beobachtet, die mit den Strömungspotentialzonen übereinstimmen. Eine Auswertung des Redoxlogs hinsichtlich des Chemismus' der Bohrspülung bleibt aber immer auf Aussagen einer Veränderung zu mehr oxidierenden oder mehr reduzierenden Eigenschaften der Bohrspülung beschränkt. Denn der Platinsensor reagiert immer nur auf die Summe aller in der Bohrspülung vorhandenen redoxaktiven Substanzen. Ändert sich das Redoxpotential zu positiven Werte, so wechselt die Spülung zu oxidierenden Bedingungen. Ändert es sich zu negativen Werte, dann wirkt das Milieu der Bohrspülung überwiegend reduzierend.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Teufenbereiche, in denen Strömungspotentiale nachgewiesen werden konnten, sich mit Zonen im Bohrloch überdecken, in denen signifikante Änderungen der Spülungszusammensetzung gegenüber der Ausgangszusammensetzung nachgewiesen wurden. Damit könnte die Eigenpotentialmessung im Bohrloch als eine Methode eingesetzt werden, in Verbindung mit einem Absenkttest fluidführende Zonen zu lokalisieren.

Literatur

- HAMANN, C.H. und VIELSTICH, W.**, 1985. Elektrochemie. 2. Auflage, Band 1 und 2, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim.
- HELMHOLTZ, H.**, 1879. Studien über elektrische Grenzschichten. Ann. Physik (3), Vol. 7, S. 337-382.
- JENKINS, G. M. and WATTS, D. G.**, 1968. Spectral analysis and its application. Holden-Day, San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam, 1. Aufl.
- KESSELS W. und KÜCK, J.**, 1993. Hydraulic communication in crystalline rocks between the two boreholes of the Continental Deep Drilling Program in Germany. in: Bram, K und Draxler, J.K. (Hrsg.) KTB-Report 93-1 Basic Research and Borehole Geophysics (Report 14), Borehole logging in the KTB-Oberpfalz HB Intervall 4512.0 - 6018.0 m, S. 337 -365
- MORGAN, F.D., WILLIAMS, E.R., MADDEN, T.R.**, 1989. Streaming potential properties of westerly granite with applications. Journ. Geophys. Res., Vol. 94, No B9, pp. 12449-12461.
- NEY, P.**, 1973. Zeta-Potentiale und Flotierbarkeit von Mineralien. Springer Verlag Wien-New York
- NOVER, G.**, 1994. Bericht über Permeabilitäts- und Zeta-Potentialmessungen im Kontinentalen Tiefbohrprogramm der BRD (unveröffentlicht)
- SACHS, L.**, 1974. Angewandte Statistik, Planung und Auswertung, Methoden und Modelle. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 4. Auflage.
- SCHMUCKER, U.**, 1978. Auswerteverfahren Göttingen. Protokoll "Elektromagnetische Tiefenforschung", Neustadt a.d.Weinstr., S. 163-188.
- STOLL, J., BIGALKE, J. and GRABNER, E.W.**, 1994. Electrochemical modelling of self-potential anomalies. Surveys in Geophysics (in press)