

Hydrogeologische Anwendung von geophysikalischen Bohrlochmessungen

H. J a n s c h e k (Ferlach)

1. Einführung

Seit etwa 50 Jahren werden in der Erdölexploration geophysikalische Bohrlochmessungen durchgeführt. Ziel und Zweck dieser Messungen sind, physikalische Parameter des Untergrundes zu messen, um aus diesen Aussagen über Schichtmächtigkeiten, Porositäten und Porenhalte machen zu können, um so weitere Informationen zu den Bohrergebnissen zu erhalten. Eine Anwendung von geophysikalischen Methoden ist nur dann sinnvoll, wenn Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften des Materials vorhanden sind.

Es wird auch besonders darauf hingewiesen, daß nicht unbedingt eine geophysikalische Grenze einer geologischen entsprechen muß. In vielen Fällen können aber geophysikalische Grenzen geologisch interpretiert werden.

Fig. 1 zeigt eine Reihe von geophysikalischen Bohrlochmeßverfahren. In der linken Spalte ist die gemessene physikalische Größe angegeben und auf der rechten Seite der gebräuchlichste Name.

Physikalischer Parameter:

elektr. Widerstand
 natürliche elektr. Potentiale
 Schallgeschwindigkeit
 natürliche Radioaktivität
 Absorption von Gammastrahlen
 Absorption von Neutronen
 Temperatur

Name des Logs:

Resistivity Log
 Self Potential Log
 Sonic Log
 Gamma Log
 Gamma-Gamma Log (Density L.)
 Neutron-Gamma Log
 Temperatur Log

Fig. 1: Geophysikalische Bohrlochmeßverfahren.

Diese für die Erdölexploration entwickelten Verfahren lassen sich nicht ohne weiteres auf hydrogeologische Probleme übertragen, da folgende prinzipielle Unterschiede bestehen. Das Erdöl ist meistens in konsolidierten Schichten gespeichert. Dadurch liegt eine größere Homogenität vor, und man kann die Verhältnisse an der Bohrlochwand auf die dahinterliegende Formation extrapolieren.

Dieser Zustand trifft in vielen Fällen bei der Grundwasserexploration nicht zu, da das Grundwasser meist aus unkonsolidierten Schichten, die lateral sehr inhomogen sind, gewonnen wird. Es scheiden daher für hydrogeologische Zwecke alle jene Verfahren aus, welche eine sehr geringe Eindringtiefe von wenigen Zentimetern besitzen, wie zum Beispiel die Nuklear-Logs.

Es kommen daher in der Regel folgende Meßverfahren für hydrogeologische Zwecke in Frage:

Resistivity Log, Mud Log, Self Potential Log, Sonic Log, Gamma Log, Temperatur Log und Kaliber Log.

Man muß sich immer wieder vor Augen halten, daß bei allen geophysikalischen Bohrlochmeßverfahren nur physikalische Parameter gemessen werden, welche aber verschiedene Ursachen haben können. So kann zum Beispiel ein niedriger Widerstand von Ton, Salzwasser oder einer Vererzung hervorgerufen werden. Wird bei einer Bohrung nur der elektrische Widerstand gemessen, so läßt sich keine stoffbezogene Aussage treffen. Werden aber mehrere physikalische Parameter in einer Bohrung gemessen, so läßt sich in vielen Fällen eine eindeutige Aussage, wie bei einem Puzzle-Spiel, erarbeiten. Selbstverständlich wird man bei der Interpretation von Bohrlochmessungen sämtliche andere Informationen wie zum Beispiel regionale geologische Kenntnisse und geologische sowie petrographische Ergebnisse der Bohrung einbeziehen.

Dem verständlichen Wunsch des Geophysikers entsprechend, möglichst viele physikalische Parameter in einer Bohrung zu messen, steht in manchen Fällen entgegen, daß sich der Auftraggeber mit der Messung eines Parameters begnügt oder daß technische Voraussetzungen eine Messung von weiteren Parametern verhindern.

So werden viele Wasserbohrungen in Kieskörpern mit Stahlfilterrohren ausgestattet, und es kann dann kein Resistivity Log gemessen werden. In letzter Zeit haben sich aber immer mehr Kunststofffilterrohre für die Ausstattung von Grundwasserbohrungen durchgesetzt, die eine Messung des elektrischen Widerstandes der Formation ermöglichen.

2. Besprechung der theoretischen Grundlagen

In dieser Abhandlung werden nur das Self Potential Log, Resistivity Log und Temperatur Log besprochen, da sich diese Kombination für hydrogeologische Problemstellungen als sehr aussagekräftig erwiesen hat.

2.1. Self Potential Log

Die Messung des Eigenpotentials kann nur im offenen Bohrloch erfolgen. Theorie:

Das Eigenpotential wird von bewegten Ionen verursacht und kann im Untergrund durch folgende Ursachen auftreten:

- a) Konzentrationspotentiale
- b) Membranpotentiale
- c) Strömungspotentiale
- d) Oxydations- und Reduktionspotentiale.

Fig. 2 zeigt schematisch die Entstehung des Eigenpotentials. Hat die Spülung im Bohrloch eine andere Salinität als das Formationswasser, so entsteht ein Konzentrationspotential E_j , in der angrenzenden undurchlässigen Schicht hingegen baut sich ein Membranpotential E_m auf. Die Potentialunterschiede setzen die positiven und negativen Ionen in Bewegung.

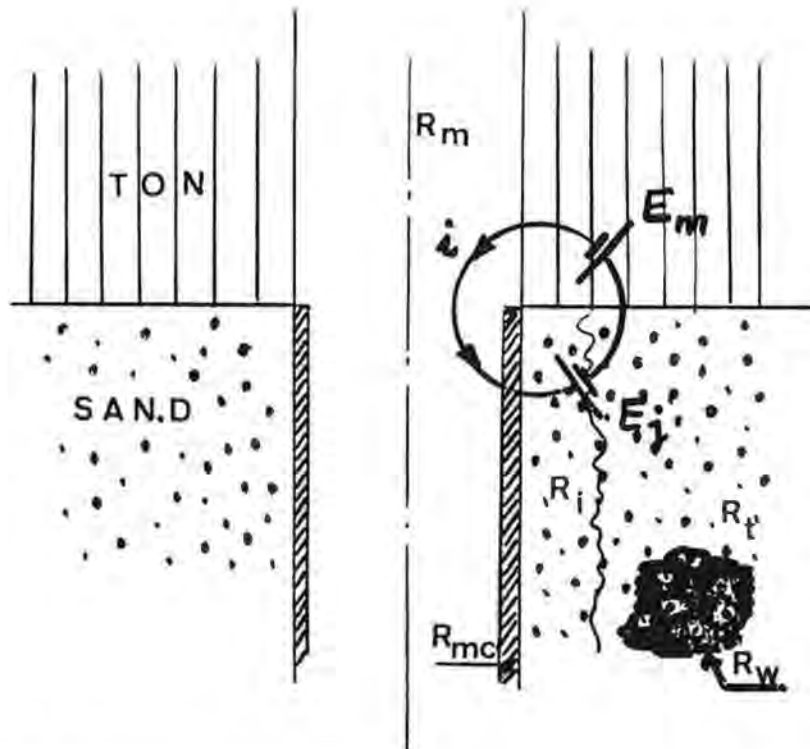


Fig. 2: Die Entstehung des Eigenpotentials.

In grundwassererfüllten Sanden wird nur dann ein Eigenpotential registriert, wenn der Widerstand der Spülung einen anderen elektrischen Widerstand aufweist als das Formationswasser.

Die Höhe des Eigenpotentialausschlages und seine Richtung ist mit gewissen Einschränkungen ein Maß für den Konzentrationsunterschied zwischen Spülung und Formationswasser.

Fig. 3 zeigt drei poröse Formationen, in denen verschieden große Verhältnisse von R_w und R_m vorliegen. R_m ist der spezifische elektrische Widerstand der Spülung, und R_w ist der spezifische elektrische Widerstand des Formationswassers. Im obersten Sandhorizont ist R_w größer als R_m . Das Eigenpotential zeigt gegenüber der Tonlinie einen positiven Ausschlag. Sind R_w und R_m gleich groß, so ist kein Eigenpotential vorhanden (Fig. 3, zweiter Aquifer). Im untersten Aquifer ist R_w kleiner als R_m . Das Eigenpotential Log zeigt einen negativen Ausschlag gegenüber der Tonlinie. Zum besseren Verständnis ist in dieser Darstellung auch ein Resistivity Log dieser schematischen Anordnung gezeichnet (R). Der Sand im obersten Aquifer hat einen hohen Widerstand. Es könnte sich um einen Süßwasserhorizont handeln. Ebenso könnte im mittleren Sandhorizont Süßwasser vorhanden sein. Da der elektrische Widerstand im Sand des untersten Aquifers sehr gering ist, kann Salzwasser vermutet werden. Bei Grundwasserbohrungen in Kieskörpern, bei denen meistens Frischwasser ohne Zusätze verwendet wird, kann kein Eigenpotential gemessen werden ($R_m = R_w$).

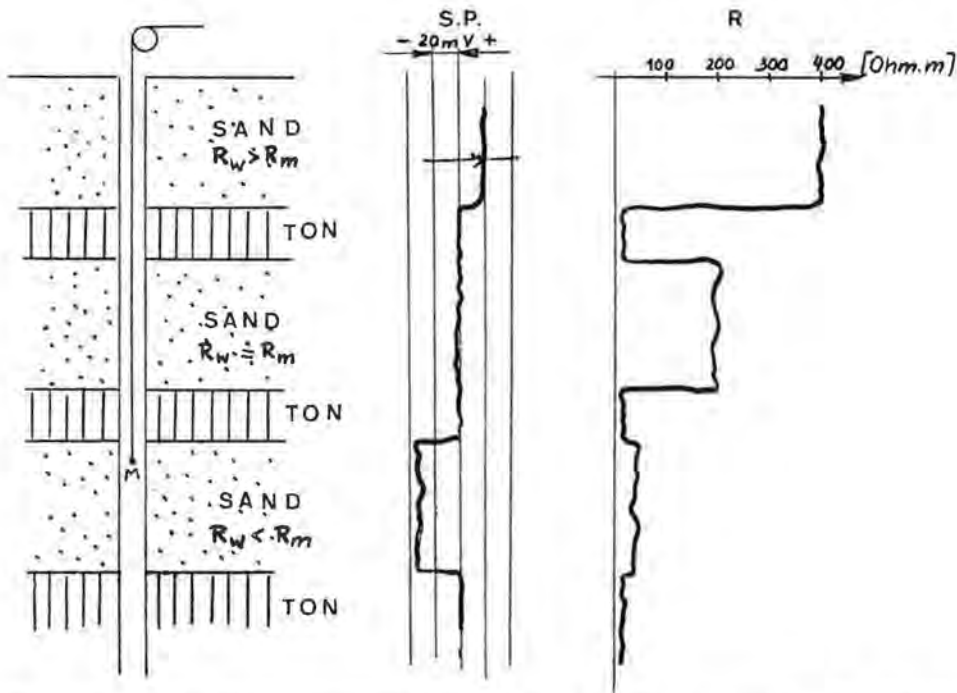


Fig. 3: Drei poröse Formationen mit verschieden großen Verhältnissen von R_w und R_m .
S. P. = Self Potential Log, R = Resistivity Log.

Fig. 4 zeigt das Schema einer Messung des Eigenpotentials.

Die Sonde M wird an einem Kabel in die Bohrung eingelassen, und die Sonde N wird in die Spülungsgrube gesetzt. Das nun zwischen M und N vorhandene Potential wird mit einem hochohmigen Millivoltmeter (R_i ist größer als zehn Megaohm) gemessen.

Resultate der Eigenpotentialmessung sind:

- a) Erkennen von porösen Formationen
- b) Mächtigkeit der porösen Formation

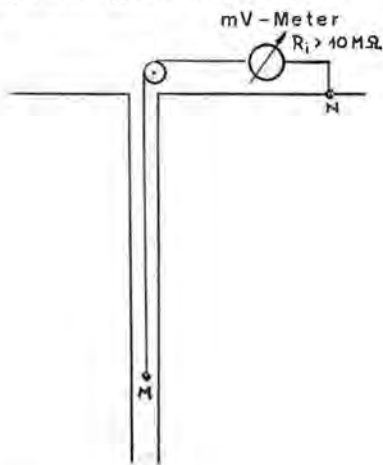


Fig. 4: Meßanordnung für ein Self Potential Log

- c) Hinweise auf die Salinität des Wassers
- d) Berechnung von R_w
- e) Korrelation von mehreren Bohrungen.

2. 2. Resistivity Log

Das Resistivity Log kann wie das Eigenpotential Log nur im offenen Bohrloch oder in Bohrungen, die mit einem Kunststofffilterrohr ausgestattet sind, gemessen werden.

Theorie:

Durch zwei Elektroden (AB) wird dem Untergrund Strom zugeführt, und zwischen zwei Sonden (M, N) wird das dadurch entstehende Potential gemessen.

Meßanordnung:

Fig. 5 zeigt das Schaltschema für die Widerstandsmessung. Um Kontaktpotentiale auszuschalten, wird in den meisten Fällen eine Wechselspannung mit einer Frequenz von etwa vier Hertz verwendet. Der spezifische elektrische Widerstand kann für die in Fig. 5 dargestellte Anordnung folgendermaßen berechnet werden:

$$R_t = 4 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (1)$$

R_t = spezifisch elektrischer Widerstand der Formation (Ohmmeter),

a = Sondenabstand (Meter),

V = elektrische Spannung zwischen M und N (Volt),

I = durch die Formation fließender Strom (Ampère).

Die Eindringtiefe einer Widerstandsanordnung wird durch den Elektrodenabstand a bestimmt. Je größer der Abstand a wird, um so größer wird die Eindringtiefe. Das Auflösungsvermögen sinkt dann, und man kann zum Beispiel dünne Sandlagen nicht erkennen. Der Elektrodenabstand ist daher dem Verwendungszweck anzupassen. Für hydrogeologische Aufgaben hat sich eine Eindringtiefe von etwa 0,5 m bis 1 m als günstig erwiesen.

In der Erdölindustrie gibt es eine Reihe von standardisierten Resistivity Tools. Zum Beispiel die sogenannte kurze Normale, die lange Normale, die Inverse, die Mikronormale, die Mikroinverse und das Latero Log. Wenn die Spülung einen unendlich hohen elektrischen Widerstand besitzt (Luft oder Öl),

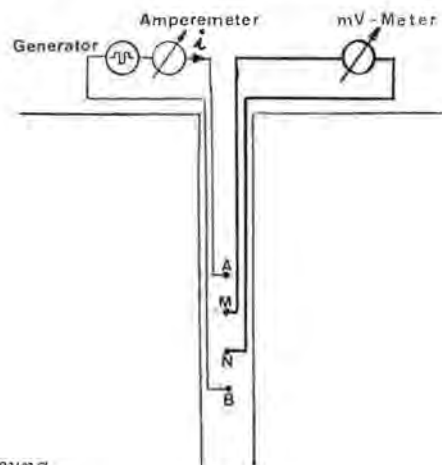


Fig. 5: Schaltschema für die Widerstandsmessung.

kann der Formationswiderstand mit dem Induktions-Tool gemessen werden. Dieses arbeitet im Prinzip des Transformators mit einer Primär- und einer Sekundärspule, wobei die Formation die Kopplung zwischen beiden Spulen übernimmt.

2. 2. 1. Interpretation von tonfreien Formationen

Der spezifische elektrische Widerstand der meisten Speichergesteine (Sande, Kiese) ist sehr hoch (R_{Rock} größer als 1000 Ohmmeter). Süßwasser hat spezifische Widerstände in der Größenordnung von $R_w = 20$ bis 100 Ohmmeter, während Salzwässer elektrische Widerstände kleiner als zehn Ohmmeter aufweisen. Wenn eine Formation eine geringe Porosität hat, so zeigt das Resistivity Log hohe Widerstände. Steigt die Porosität an, so nimmt, verursacht durch den erhöhten Wasserinhalt, der elektrische Widerstand ab.

Fig. 6 zeigt drei Fälle auf. Im Fall 6,1 ist die Porosität 0%, und es wird mit dem Resistivity Log ein R_t gemessen, welcher dem Widerstand des Gesteins R_{Rock} gleichzusetzen ist. Wenn der Bohrlochdurchmesser d wesentlich kleiner ist als der Sondenabstand a , so braucht keine Widerstandskorrektur ausgeführt werden. Ist hingegen der Bohrlochdurchmesser groß, so muß darauf geachtet werden, daß die Sonde im Bohrloch zentriert ist, und es muß eine Bohrlochdurchmesserkorrektur vorgenommen werden. Im Fall 6,2 wird eine Porosität von 7% angenommen. Der Widerstand R_t sinkt von 5000 Ohmmeter im Fall 6,1 auf 500 Ohmmeter ab.

Im Fall 6,3 wurde eine Porosität von 20% angenommen. Ein noch geringerer Widerstand (R_t ist 200 Ohmmeter) wird gemessen.

Es besteht folgende mathematische Beziehung:

$$F = \frac{R_t}{R_w} \quad (2)$$

F = Formationsfaktor

R_t = wahrer Formationswiderstand (Ohmmeter)

R_w = Widerstand des Formationswassers (Ohmmeter)

Große Werte von F entsprechen kleinen Porositäten, und kleine F -Werte ergeben hohe Porositäten.

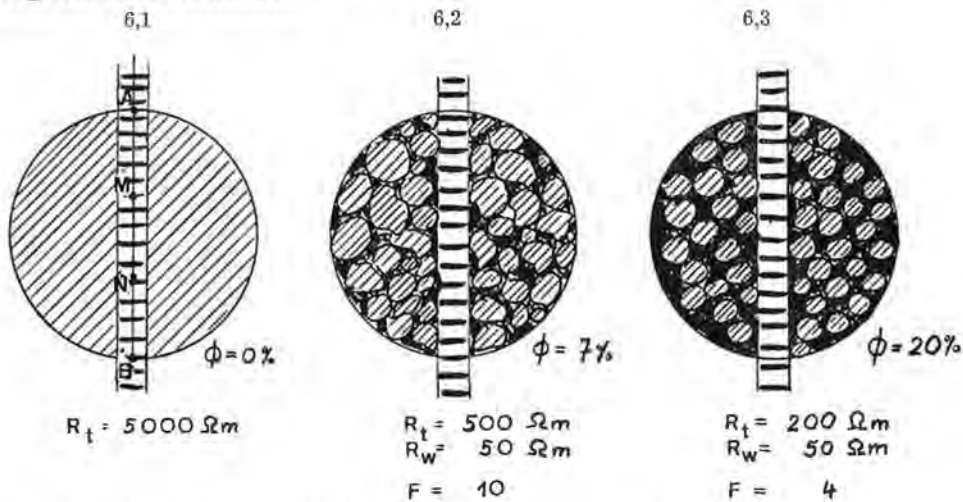


Fig. 6: Drei Beispiele verschiedener Ergebnisse von Resistivity Logs.

Fig. 7 zeigt ein Diagramm, welches einen Zusammenhang zwischen Formationsfaktor F und der Porosität ϕ angibt. Abhängig von der Form des Porenraumes ist nun die Linie für Kalk, Sandstein, unverfestigte Sande und Kies zu verwenden. Man kann sich in der Praxis manchmal so behelfen, daß man an Bohrproben die Porosität bestimmt und mit den aus dem Widerstands-Log berechneten F -Werten in dem Diagramm kombiniert. Man kann durch diese so erhaltenen Punkte eine mittlere Gerade ziehen und erhält somit eine Linie, welche für ein bestimmtes Gebiet repräsentativ ist.

Bei Grundwasserproblemen kann man den spezifischen Widerstand des Formationswassers auf drei verschiedene Arten bestimmen:

a) Bestimmen des R_w -Wertes anhand einer Wasserprobe. Es wird eine aus dem zu interpretierenden Teufenintervall genommene Wasserprobe im Laboratorium auf den spezifischen elektrischen Widerstand untersucht. Bei dieser Messung muß die Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes des Formationswassers berücksichtigt werden.

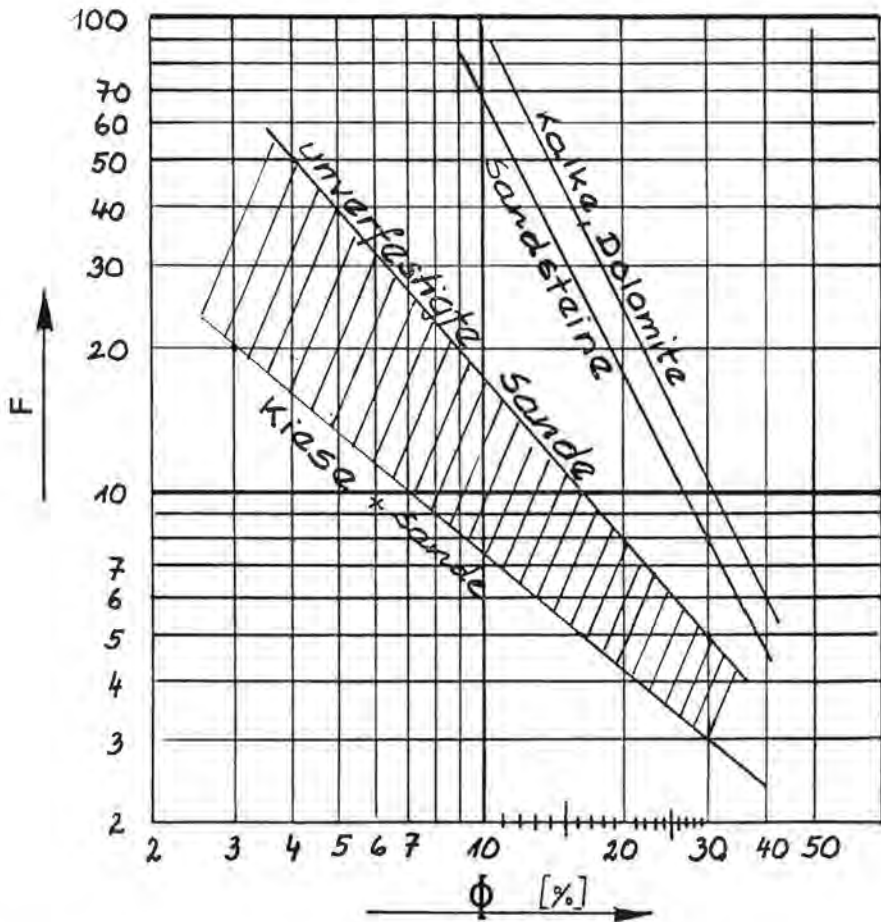


Fig. 7: Beziehung zwischen Formationsfaktor F und Porosität.

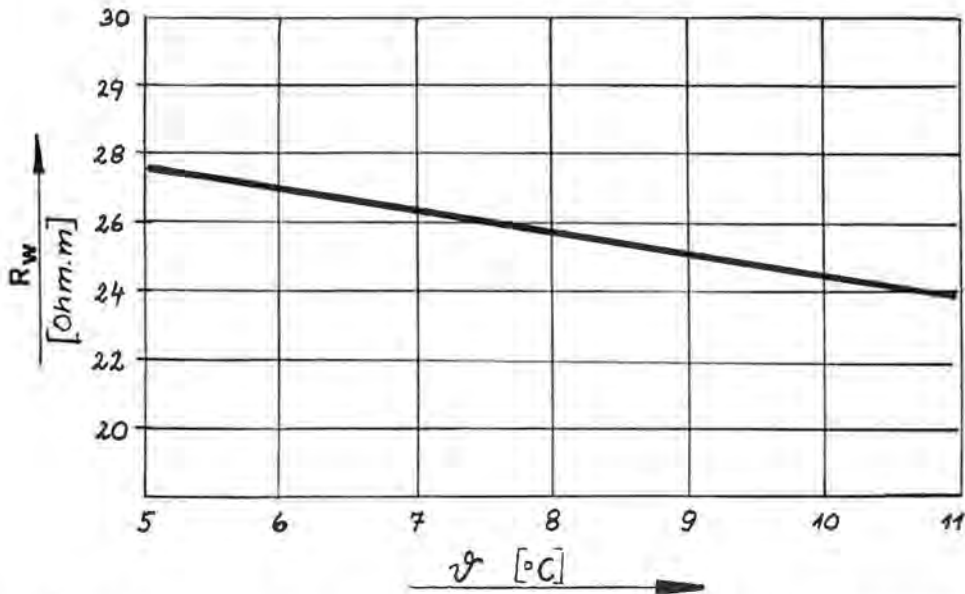


Fig. 8: Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes des Formationswassers R_w als Funktion der Temperatur.

Fig. 8 zeigt die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes des Formationswassers R_w als Funktion der Temperatur.

b) Bestimmen des R_w -Wertes durch direktes Messen in der Bohrung. Diese Bestimmung hat gegenüber der vorher genannten Methode den Vorteil, daß man für jedes Teufenintervall ohne Korrekturen den wahren R_w -Wert mißt. Zu beachten ist aber, daß mit einer Spülung ohne chemische Zusätze gebohrt wurde oder diese nach Ausbau der Bohrung restlos entfernt wurde.

c) Bestimmung des R_w -Wertes aus dem Eigenpotential Log und dem Wert des Spülungsfiltrates R_{mf} . Diese R_w -Wertbestimmung kann nur ausgeführt werden, wenn im Eigenpotential Log Anomalien vorliegen. Das Spülungsfiltrat erhält man, wenn man die Feststoffe der Spülung durch Abfiltern ausscheidet. Der spezifisch elektrische Widerstand R_{mf} wird im Laboratorium bestimmt. Empirische Zusammenhänge zwischen dem Eigenpotential und dem Spülungsfiltrat liefern den Wert von R_w .

Interpretationsvorgang:

Für die Berechnung der Porosität benötigt man die Werte R_w und R_t . Mit der Formel (2) wird der Formationsfaktor F berechnet und mittels Fig. 7 die Porosität bestimmt.

Beispiel: Sandstein

$$R_t = 30 \text{ Ohmmeter}$$

$$R_w = 300 \text{ Ohmmeter}$$

$$\text{Formel (2): } F = \frac{R_t}{R_w} = \frac{300}{30} = 10$$

aus Fig. 7: $F = 10$ ergibt $\phi = 28\%$

2. 2. 2. Interpretation von tonhaltigen Formationen

Die Porositätsberechnung von tonhaltigen Formationen ist äußerst schwierig, weil Ton ebenso wie Wasser einen geringen Widerstand besitzt. Es wird durch die Anwesenheit von Ton eine große Nutzporosität vorgetäuscht, welche in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Fig. 9 veranschaulicht die Reduktion des Wasservolumens durch die Anwesenheit von Ton.

Wenn man von der Voraussetzung ausgeht, daß tonfreie Grundwasserträger ein R_t von 100 bis etwa 500 Ohmmeter besitzen, so erkennt man tonhaltige Formationen durch Widerstände, die unter 100 Ohmmeter liegen.

Man kann daraus ersehen, daß das Resistivity Log alleine für die Porositätsberechnung in manchen Fällen zuwenig aussagt. Kombiniert man aber das Resistivity Log mit dem Selfpotential Log, so sieht man, daß Formationen, bei denen der Porenraum völlig mit Ton ausgefüllt ist, kein Eigenpotential zeigen. Es wird aber auch kein Eigenpotential gemessen, wenn $R_w = R_m$ ist. In diesem Fall kann das Temperatur Log eine bessere Aussage liefern, wie im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

Resultat der Widerstandsmessung:

- a) Erkennen von porösen Formationen
- b) Berechnung der Porosität
- c) Bestimmen des spezifisch elektrischen Widerstandes des Formationswassers
- d) Korrelation zwischen Bohrungen.

2. 3. Temperatur Log

Das Temperatur Log kann sowohl im offenen Bohrloch als auch im verrohrten gemessen werden.

Theorie:

In dichten Formationen ohne Wasserdurchlässigkeit bestimmt die Wärmeleitfähigkeit des Materials die Temperatur. Sobald das Wasser aber im Porenraum einer Strömung unterliegt, wird die Temperatur des Untergrundes gestört. Hat

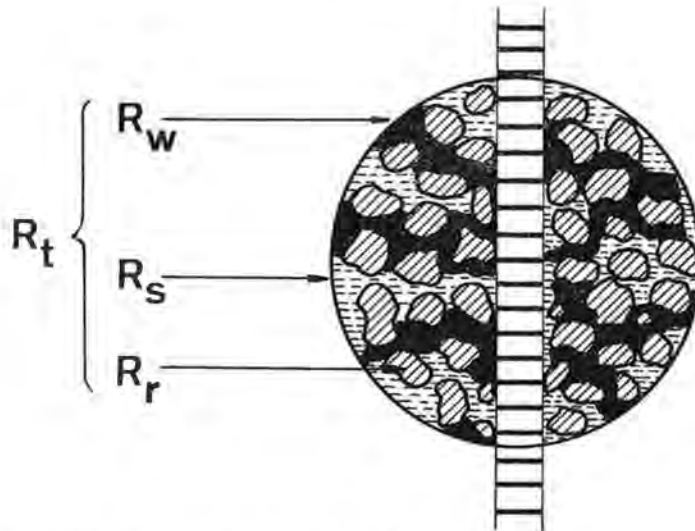


Fig. 9: Reduktion des Wasservolumens durch Ton.

das Wasser eine Strömungsgeschwindigkeit, so wird im Temperatur-Log eine konstante Temperatur (Temperaturgradient = 0 °C/m) gemessen, was in einer Reihe von Grundwasserbohrungen beobachtet werden konnte.

Fig. 10 zeigt die prinzipielle Anordnung zur Messung der Temperatur. Als Temperaturfühler wird heute meistens ein Thermistor verwendet, dessen Widerstand entweder direkt mit einem digitalen Multimeter oder einer Meßbrücke gemessen wird. Für hydrogeologische Messungen wird eine relative Genauigkeit der Temperaturmessung von mindestens 10^{-2} °C gefordert, hingegen genügt eine absolute Genauigkeit von 10^{-1} °C.

Interpretationsvorgang:

Sind im Temperatur-Log Bereiche mit konstanter Temperatur vorhanden, so können diese als gut durchlässig angesehen werden. Diese Zonen müßten sich auch im Resistivity Log durch hohe Porositäten auszeichnen.

Tonhaltige Sande oder Kiese erkennt man nun dadurch, daß sie eine auffallend hohe Porosität, berechnet aus dem Resistivity Log, aufweisen, im Temperatur-Log aber einen Temperaturgradienten besitzen.

Vorsicht ist nur dann geboten, wenn über weite Bereiche im Bohrloch eine konstante Temperatur vorliegt, das Resistivity Log aber stärkere Unterschiede aufweist. Es besteht dann die Gefahr, daß im Bohrloch eine vertikale Strömung vorliegt.

Resultate der Temperaturmessung:

- a) Absolutwert der Temperatur
- b) Temperaturgradient

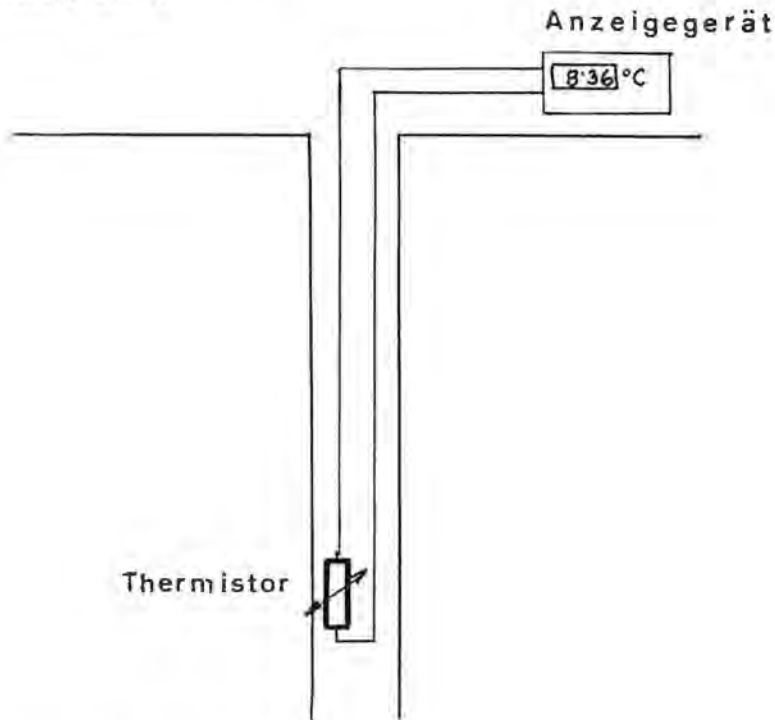


Fig. 10: Schema eines Temperatur-Logs.

3. Schlußfolgerungen

Wie schon eingangs erwähnt, werden bei den geophysikalischen Bohrlochmessungen nur physikalische Parameter des Untergrundes gemessen.

Da ein und dieselbe physikalische Meßgröße durch verschiedene Umstände hervorgerufen werden kann und daher nicht immer sofort eine stoffbezogene Aussage liefert, ist man gezwungen, durch Messen von verschiedenen physikalischen Größen eine Präzisierung herbeizuführen. Die in den letzten Jahren in der Erdölexploration eingeführte sogenannte „Crossplott-Technik“ kombiniert verschiedene physikalische Größen in einem Schaubild. Derartige Ergebnisse sind am Sektor der Hydrogeologie noch ausständig. So wäre es vorstellbar, daß ein Sonic-Resistivity Plot oder ein Resistivity-Temperatur-Plot vor allem bei tonhältigen Formationen Aussagen über die Porosität im Untergrund ermöglicht.

Literatur

- SCHLUMBERGER: Log Interpretation Charts, Edition 1969, Schlumberger Limited, Houston, Texas.
- RÜLKE, O.: Bohrlochmessungen bei der Wassererschließung. In: H. Schneider, „Die Wassererschließung“, Vulkanverlag, Essen 1973.
- JANSCHKE, H.: Temperaturmessungen in den Bohrungen im Murtal zwischen St. Stefan und Kraubath. Berichte der Wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 34, Graz 1976.

Summary

Hydrogeological appliance of borehole Logs. Selfpotential, and Resistivity, and Temperature Logs are able to give additional information in groundwater investigations. Basical theories are only dealt with to an extent, that illustrates the interpretation procedure.

Selfpotential Logs give in waterbearing sands good results about the thickness of porous formations, and the salinity of the water, and is also used in cases of correlation problems.

Resistivity Logs allow to calculate the porosity of nonshaly formations and is also used for the solution of correlation problems.

Temperature Logs: Sometimes the absolute value of the temperature is the point of interest, especially in thermalwater investigations. In usual groundwater studies the temperature gradient indicates, whether the water is still present in the formation (no permeability) or flowing.

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Dr. Heinrich JANSCHKE,
Ressnigweg 46, A-9170 Ferlach.