

Vortrag Dr. Flathe, Hannover

Autoren: H. Flathe und O. Rülke
Übersicht über Werte der Horizontal-Leitfähigkeit,
berechnet aus Bohrlochmessungen in Niedersachsen

Freitag, den 11.10.1963

Die folgenden Ausführungen sollen einen quantitativen Beitrag zur Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit der Sedimentdecke im nordwestdeutschen Flachland liefern. Elektrische Bohrlochmessungen in den sehr zahlreichen Erdölbohrungen bieten die Möglichkeit, die Leitfähigkeit bis in ca. 5 km Tiefe direkt aus den Bohrlochdiagrammen zu ermitteln. Auf diese Weise läßt sich das Leitvermögen etwa der oberen Hälfte der mit rund 10 km Mächtigkeit zu veranschlagenden Sedimentdecke unmittelbar quantitativ fassen.

Die Leitfähigkeit der Sedimentdecke ist richtungsabhängig. Für das vorliegende Problem einer Leitfähigkeitsanomalie interessiert in erster Linie die Horizontalleitfähigkeit im Untergrund. Um diesen Begriff sauber zu fassen, denken wir uns als Modell eine Folge von horizontal liegenden Schichten mit den Mächtigkeiten m_1, m_2, \dots (s. Fig.1, S.114) und den Widerständen ρ_1, ρ_2, \dots . Greifen wir aus dieser Schichtfolge ein Paket mit der Gesamtmächtigkeit h heraus, so besitzt dieses Paket senkrecht zur Schichtung den

spez. Querwiderstand $\rho_t = \frac{1}{h} \sum_i m_i \rho_i$; $(h = \sum_i m_i)$

und parallel zur Schichtung die

spez. Längsleitfähigkeit $\frac{1}{\rho_l} = \frac{1}{h} \sum_i \frac{m_i}{\rho_i}$

Es handelt sich bei diesen Summen um Spezialfälle einer Leitfähigkeitsverteilung, die sich nur in vertikaler Richtung ändert, d.h. wo der spez. Widerstand ρ nur von der Tiefe z abhängt: $\rho = \rho(z)$. MAILLET hat 1947 ⁺) diese Größen als DAR ZARROUK - Parameter bezeichnet.

$R(h) = \int_0^h \rho(z) dz$; $C(h) = \int_0^h \frac{dz}{\rho(z)}$

⁺) R. MAILLET: The fundamental equations of electrical prospecting, Geophysics, vol. 12, 1947, p. 529 - 556

Die DAR ZARROUK - Kurve C (h) spielt bei der Auswertung geoelektrischer Tiefensondierungen eine bedeutende Rolle hinsichtlich des Äquivalenzprinzips, worauf in diesem Zusammenhang nicht eingegangen zu werden braucht.

Wie wir sehen werden, unterscheiden sich in der Sedimentdecke der Querwiderstand ρ_t und der Längswiderstand ρ_l oft beträchtlich. Die Horizontale stellt für den Strom eine Vorzugsrichtung dar. Als Maß für die Anisotropie nimmt man die Größe $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}}$, den Anisotropiefaktor.

Durch elektrische Widerstandsmessungen im Bohrloch lassen sich die Größen ρ_i und m_i der durchteuften Schichten bestimmen. Die Berechnung der spez. Widerstände ρ_i erfolgt mittels theoretisch berechneten Standardmaterials aus den Daten des Widerstandslogs mit verschiedenen Elektrodenanordnungen bzw. des Laterologs. Auf die Auswertungstechnik, bei der die Elimination des Widerstandes der Spülung ρ_m im Bohrloch, des Bohrloch-Durchmessers, des Durchmessers und Widerstandes der Infiltrationszone und (in Einzelfällen) der Schichtmächtigkeit eine Rolle spielen, soll in diesem Rahmen nicht näher eingegangen werden. Hingegen interessiert sehr die tatsächliche physikalische Bedeutung des aus dem Bohrlochdiagramm errechneten wahren Widerstandes ρ_i einer Schicht. Denn im Sedimentbereich ist auch in einer als homogen zu bezeichnenden Schicht der Widerstand meist richtungsabhängig. Durch Schieferung des Gesteins etc. ergeben sich Vorzugsrichtungen. Nehmen wir zur Veranschaulichung als Modell einen aus einer solchen homogenen, aber anisotropen Schicht herausgeschnittenen Einheitswürfel (s. Figur 2, S.114). Die Mikroschichtung werde parallel zur x, y - Ebene angenommen. Dann haben wir in der x- und y-Richtung einen Widerstand $\rho_{||}$, in der z-Richtung einen größeren Widerstand ρ_{\perp} . Die Mikroanisotropie beträgt $\Theta = \sqrt{\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{||}}}$. Mittels des Tensorkalküls läßt sich nun zeigen, daß jeder homogene anisotrope Körper sich durch einen homogenen isotropen Körper mit einem spez. Widerstand $\bar{\rho}$ ersetzen läßt, ohne daß sich die äußeren Feldwirkungen ändern. Für unseren Fall wäre der Ersatzkörper ein Quader mit den Kantenlängen 1 in der x- und y-Richtung aber der Höhe $\Theta = \sqrt{\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{||}}} > 1$ in der z-Richtung. Der "Ersatzwiderstand"

$\bar{\rho}$ des Quaders ist das geometrische Mittel von ρ_n und ρ_1 :

$$\bar{\rho} = \sqrt{\rho_n \rho_1}$$

Für die Messung des sog. "scheinbaren" Widerstandes ρ_s an den Außenflächen ergibt sich daraus, daß bei einer Messung in der x-y-Ebene die Verlängerung um Θ in der z-Richtung ohne Belang ist. In der x-y-Ebene gilt somit

$$\rho_s = \bar{\rho} = \sqrt{\rho_n \rho_1}$$

Diese Größe erhält man also durch eine geoelektrische Sondierung zu der Oberfläche.

Im Bohrloch hingegen bewegt sich die Meßanordnung längs der z-Achse. Hier bedeutet nun die Dehnung um den Anisotropiefaktor Θ daß der Längenmaßstab in der Meßanordnung um den Faktor Θ zu ändern ist. In der bekannten Formel für den scheinbaren Widerstand

$$\rho_s = K \frac{U}{I}$$

geht die Länge linear in K ein (z.B. $K=2\pi a$ bei der Wanner-Anordnung). Wir haben also zu setzen

$$\Theta \rho_s = \bar{\rho} = \sqrt{\rho_n \rho_1}$$
$$\rho_s = \frac{\sqrt{\rho_n \rho_1}}{\Theta} = \rho_n$$

Eine Messung in z-Richtung liefert also nicht, wie man zunächst annehmen sollte, den Querwiderstand in z-Richtung, sondern den Widerstand in der x-y-Ebene.

Dies sog. Anisotropie-Paradoxon besagt für unser Problem, daß die Auswertung der Bohrloch-Diagramme für die Horizontalleitfähigkeit der durchteuften Schichten richtige Werte liefert. Die ρ_1 sind die wahren Widerstände in der Horizontalen. Über die Querwiderstände lassen sich keine Aussagen machen. Man weiß jedoch, daß Θ die sog. Mikroanisotropie, Werte in der Größenordnung 3 erreichen kann (Untersuchungen von Schlumberger im rumänischen Erdölgebiet), daß sich also ρ_1 und ρ_n um eine Zehnerpotenz unterscheiden.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen hat O. RÜLKE aus einer Reihe ausgewählter Bohrlochdiagramme aus dem Gebiet zwischen Weser und Ems, dem Emsland und Ostfriesland die Leitfähigkeitsverhältnisse im Untergrund ermittelt.

Fig. 3 (s.S.115) zeigt (vereinfacht) links das Bohrlochdiagramm aus einer Erdölbohrung im Weser-Ems-Gebiet. Aufgezeichnet sind ein Widerstandslog bzw. ein Laterolog im tieferen Teil und die Spülungswiderstände ρ_m . Danebengesetzt ist das aus dem Bohrlochdiagramm errechnete Profil der wahren Schichtwiderstände. Nach dem

vorher erläuterten Anisotropie-Paradoxon handelt es sich hier um Längswiderstände ρ_l . Im rechten Teil des Bildes sind die daraus resultierenden Längswiderstände für die einzelnen geologischen Formationen aufgetragen sowie die Werte für Längswiderstand ρ_l , Querwiderstand ρ_t und Anisotropiefaktor λ für die gesamte Schichtfolge, und zwar von der Oberfläche an bis zu 1000 m, 2000 m und 3000 m Tiefe. Hier ist anzumerken, daß die Werte für den Querwiderstand ρ_t und damit auch für den Anisotropiefaktor λ in Wahrheit höher liegen, da in die Berechnung die Längswiderstände der Einzelschichten eingehen anstatt der unbekannteren, aber sicher höheren Querwiderstände.

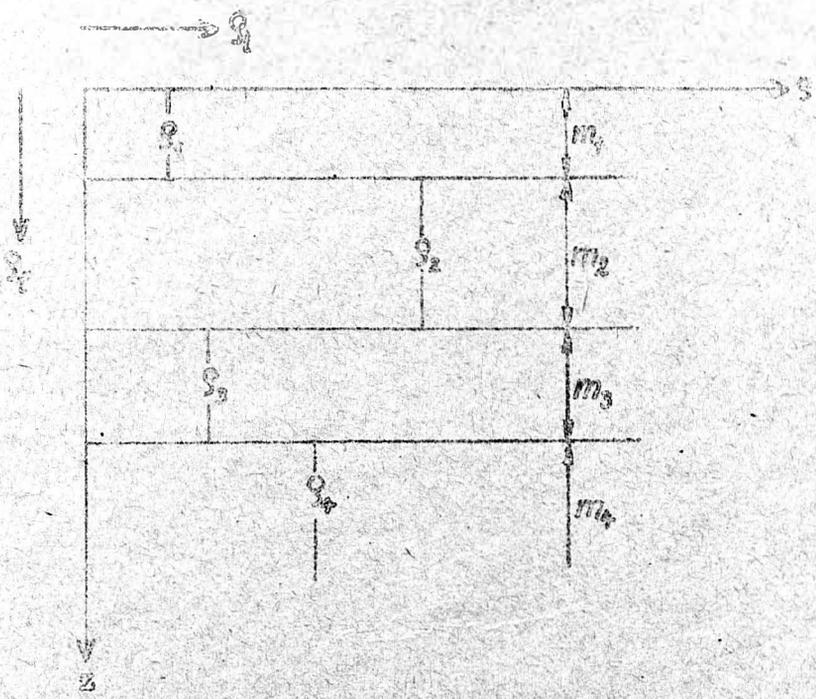
Die in Figur 3 gezeigte Bohrung ist für die Geologie des nordwestdeutschen Raumes nicht als charakteristisch anzusehen, da sie an einer Stelle abgeteuft wurde, wo das Perm aus einer rund 1000 m mächtigen Salzfolge mit sehr hohen Widerständen besteht. An dieser Bohrung läßt sich jedoch gut erkennen, daß trotzdem der Längswiderstand ρ_l der gesamten Schichtfolge den Wert von $10 \Omega \text{ m}$ kaum überschreitet. Daß der Wert von $10 \Omega \text{ m}$ in etwa als obere Grenze für den Längswiderstand im nordwestdeutschen Flachland angesehen werden kann, zeigt Figur 4 (s.S.116). Hier sind die Ergebnisse aus charakteristischen Bohrungen in Ostfriesland, dem Weser-Ems-Gebiet und dem Emsland einander gegenübergestellt. Man sieht, daß trotz der ganz verschiedenen Geologie (man beachte die stark voneinander abweichenden Mächtigkeiten der einzelnen Formationen) der Längswiderstand der insgesamt durchteuften Schichten vom Quartär bis ins Karbon zwischen 1 und $10 \Omega \text{ m}$ variiert, also in einem vergleichsweise engen Bereich, obwohl in den einzelnen Formationen die Längswiderstände stärkeren Schwankungen unterworfen sind. Die Querwiderstände liegen, wie zu erwarten, wesentlich höher und erreichen für die Gesamtfolge in Ostfriesland Werte von nahezu $10^3 \Omega \text{ m}$. Längs- und Querwiderstand unterscheiden sich hier, beeinflusst durch starke Versalzung der Sedimente und durch eine mehrere hundert Meter mächtige Salzfolge in der Trias, um 3 Zehnerpotenzen (!). Man sieht daran, daß man durch einfache Mittelbildung über die im Untergrund zu erwartenden Schichtwiderstände zu Werten gelangt, die sich von den wahren Leitfähigkeitsverhältnissen in horizontaler Richtung -

und auf diese kommt es ja an - um mindestens 2 Zehnerpotenzen unterscheiden.

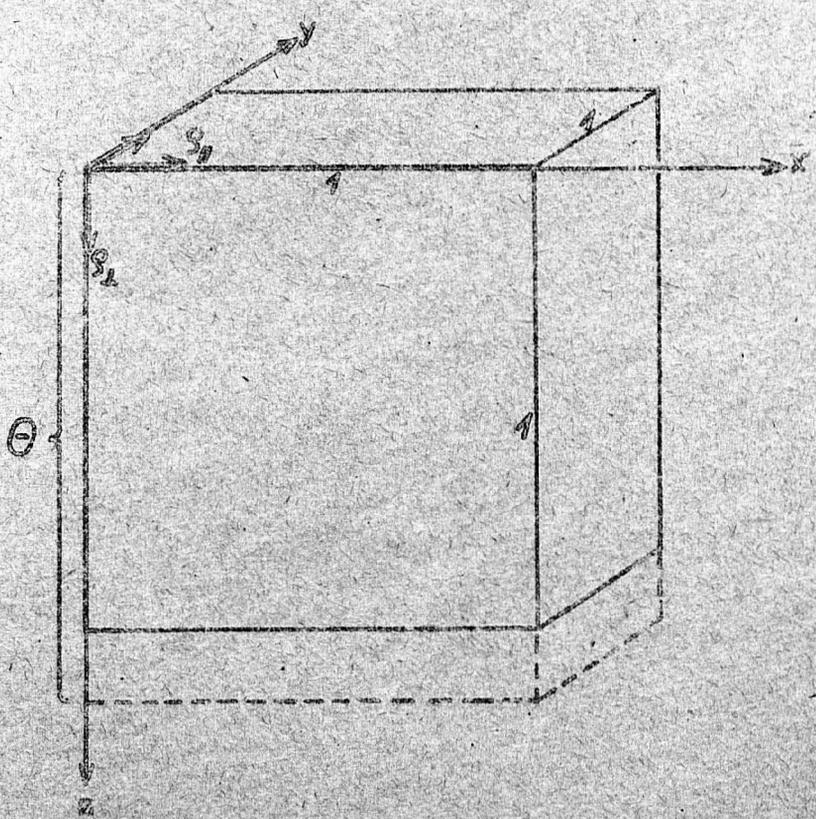
Wie wenig der Wechsel im geologischen Aufbau die Horizontalleitfähigkeit beeinflusst, zeigt die Zusammenstellung der Häufigkeit für Werte des Längswiderstandes, wie sie aus ca. 30 Bohrungen im Emsland für die einzelnen Formationen zusammengestellt wurde. (Fig. 5, s.S. 117) Als ausschlaggebend für den mittleren Längswiderstand erweisen sich eindeutig die Werte für das Tertiär und das gesamte Mesozoikum. Diese Werte liegen generell unter $10 \Omega \text{m}$. Erhöhungen des Längswiderstandes durch Quartär und Perm können infolge der relativ zur Gesamtfolge geringen Mächtigkeit dieser Schichten nur geringes Ausmaß haben. Das Karbon besitzt nur einen wenig höheren Längswiderstand von im Mittel $20 \Omega \text{m}$. Aus dem älteren Paläozoikum gibt es bisher keine Meßwerte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß im nordwestdeutschen Sedimentbecken vom Quartär hinunter ins Karbon bis in rund 5 km Tiefe der spez. elektrische Widerstand in horizontaler Richtung im Mittel $5 \Omega \text{m}$ beträgt. Die obere Grenze ist bei $10 \Omega \text{m}$ anzusetzen. Dieser Wert wird nur lokal geringfügig überschritten. Die bisherige Durchsicht der Bohrlochdiagramme hat gezeigt, daß trotz des unterschiedlichen geologischen Baues im nordwestdeutschen Sedimentbecken die elektrische Leitfähigkeit in horizontaler Richtung vergleichsweise einheitlich ist. Diese Tatsache zwingt dazu, in jeder Modellvorstellung über die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund des nordwestdeutschen Flachlandes (entgegen bisheriger Literaturangaben) an der Oberfläche eine elektrisch gut leitende "Platte" mit einer Mächtigkeit $> 5 \text{ km}$ einzubauen. Diese "Platte" ist als Einheit anzusehen, in der lokale Abweichungen in der Leitfähigkeit nicht in Erscheinung treten.

Figur 1



Figur 2



Figur 3

Bohrlochdiagramm

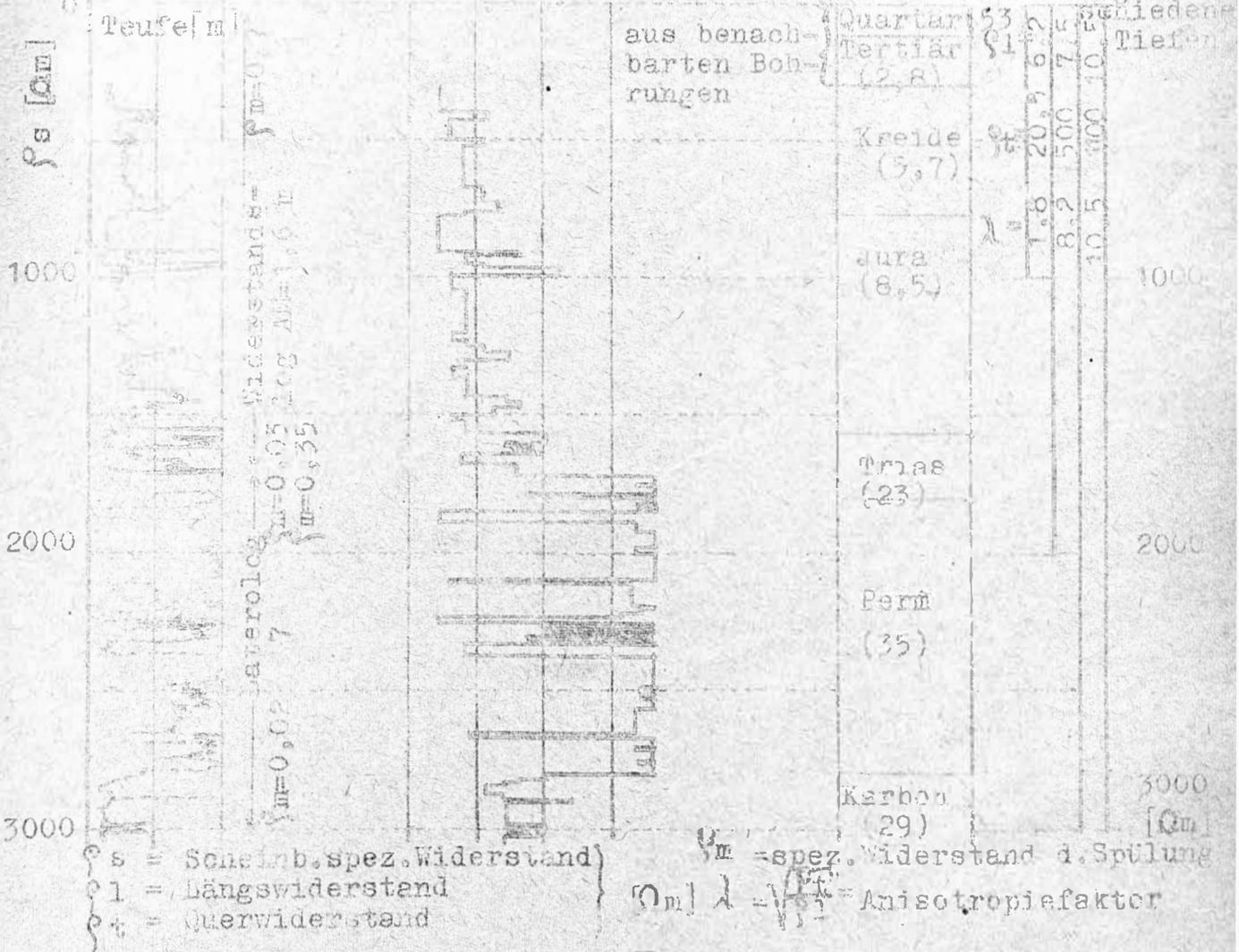
Wahrer Längswiderstand

Längswiderstand Elektr. der Formationen Widerstande a. Anisotropie

0 10 20
0 100 200
0 1000 2000

ρ_l [Ohm]
log. Skala
10 100 1000

Teufe [m] bis in verschiedene Tiefen

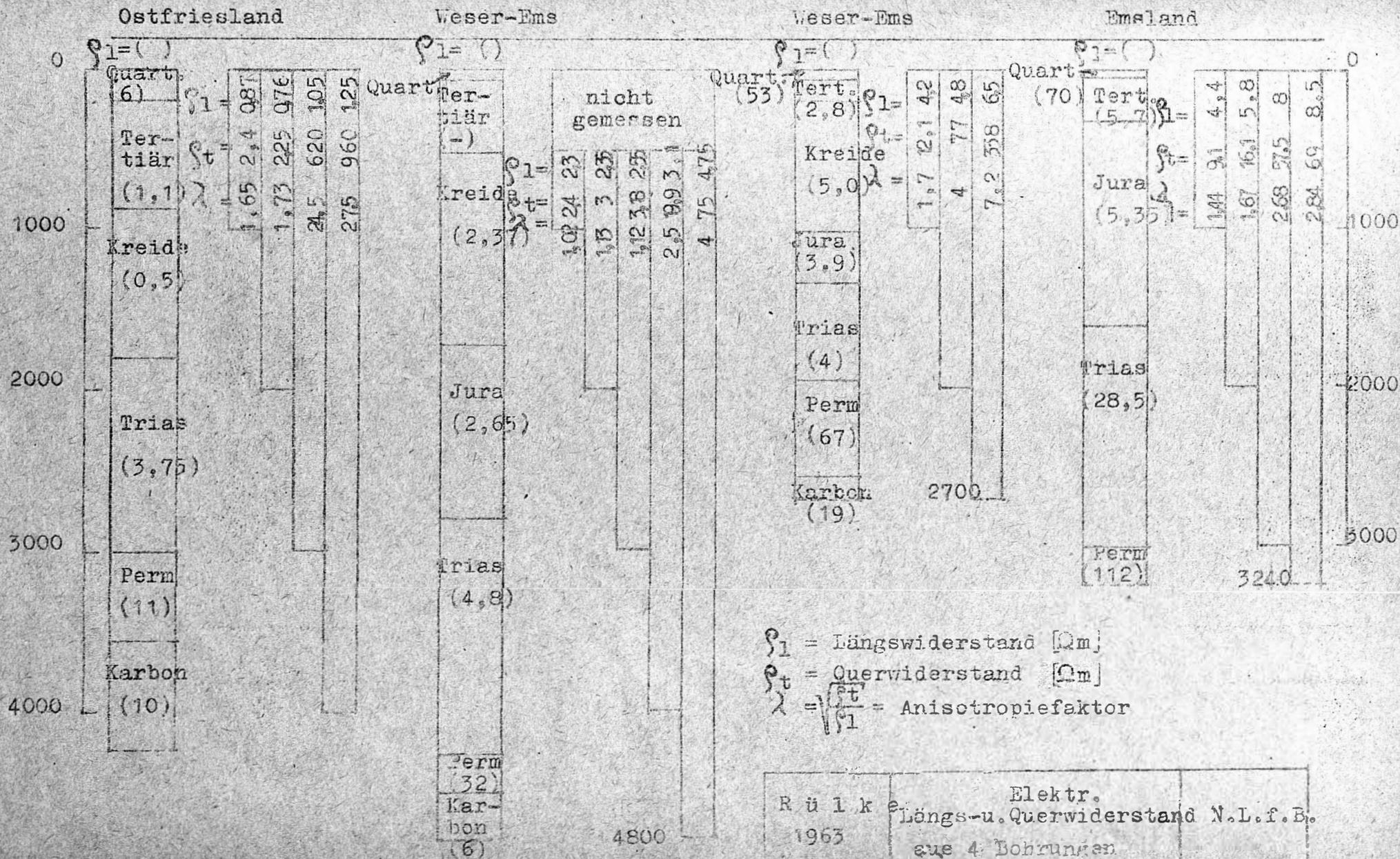


Rülke 1963

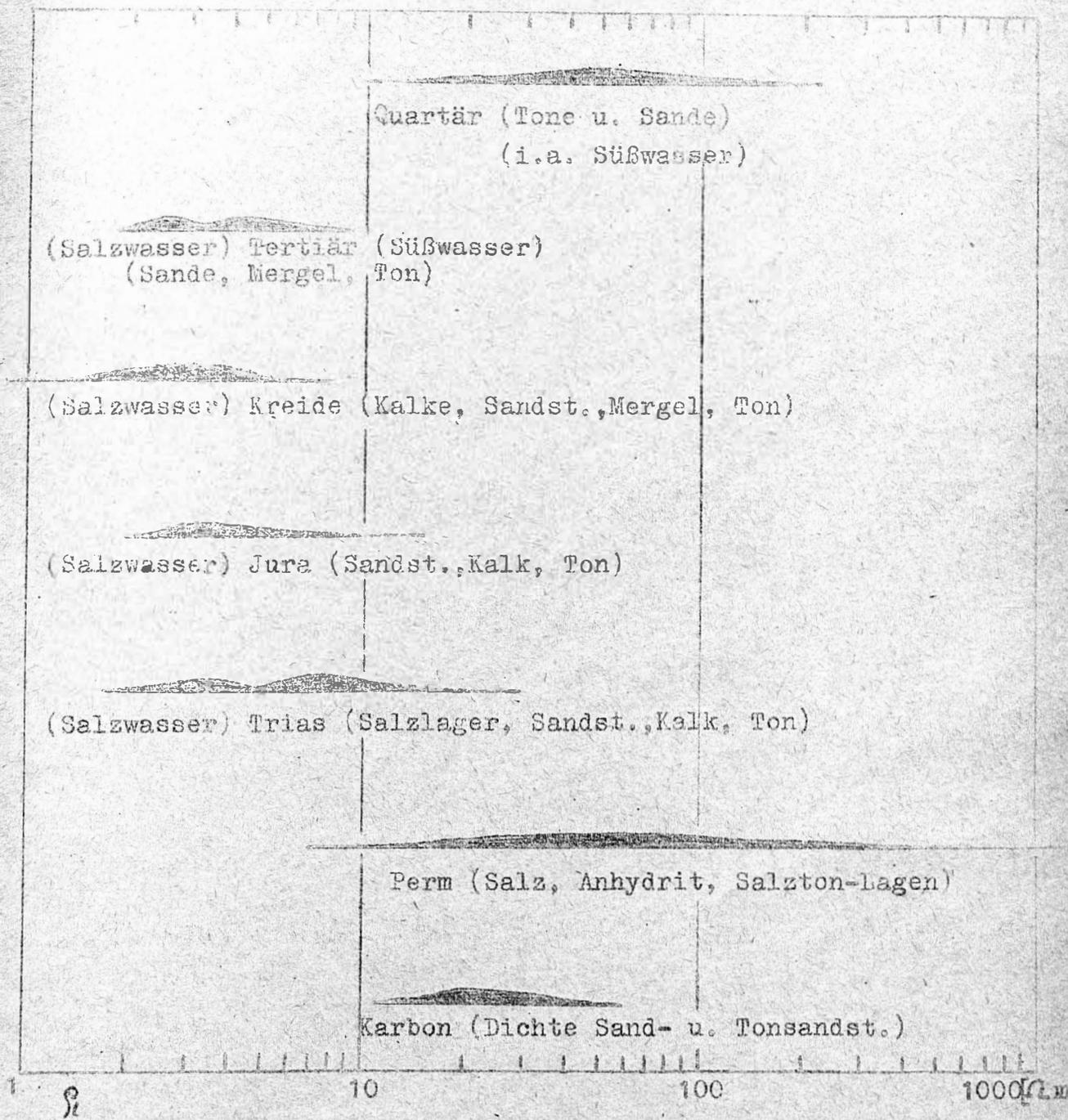
Bestimmung des elektr. Längs- und Querswiderstandes aus einer Bohrung (Weser-Ems-Gebiet)

N.L.f.B.

Figur 4



Figur 5



<p>R ü l k e 1963</p>	<p>Häufigkeitswerte für den Längswiderstand ρ_1 (nach ca. 30 Emsland-Bohrungen)</p>	<p>N.L.f.B.</p>
---------------------------	---	-----------------