

J. HOMILIUS, Hannover

"Modell zur Interpretation der Schlumberger-Großauslage in
Rheingraben"

Mittwoch, den 15.9.1971

Im Herbst 1967 wurde eine geoelektrische Tiefensondierung im Rheingraben zwischen Karlsruhe und Bellingen ausgeführt, bei dem eine maximale Elektrodenentfernung $AB = 150$ km erzielt wurde (Fig. 1) (BLOHM und FLATHE 1970). Die Messung wurde dadurch ermöglicht, daß eine Hochspannungsleitung in der Zeit der Erprobung von den BADENWERKEN AG zur Verfügung gestellt wurde. Die Strom-einspeisung erfolgte über Erder, die mit der Hochspannungsleitung verbunden wurden.

Die MN-Mitte der geoelektrischen Tiefensondierung war durch die maximal entfernten Einspeisungspunkte AB festgelegt und fiel in das Gebiet Ottenheim - Lahr - Schrammberg. Einen Querschnitt durch das Rheintal bei Lahr gibt Fig. 2 wieder, der von H. SCHÖNEICH (1970 auf Grund von Erdölbohrungen und den bekannten geologischen Abschätzungen entwickelt worden ist. Danach liegt die aus technischen Gründen gewählte Mitte der Tiefensondierung im Bereich einer Kristallinhochlage, nämlich der Nordschwarzwaldschwelle (BOIGK und SCHÖNEICH 1970). Die Gesamtmächtigkeit der Sedimente dürfte 1800 m kaum überschreiten. Der Graben hat eine asymmetrische Struktur, bei der im W Quartär-Tertiär-Mächtigkeiten bis zu 900 m möglich sind, im E dagegen nur solche um 200 m. Insgesamt ist hier die Tertiärmächtigkeit im Vergleich zu den weiter im N beobachteten (Karlsruhe über 2900 m, vgl. DOEBL 1967 und 1970) gering.

Der Verlauf der geoelektrischen Sondierungskurve, die unter Leitung von E.-K. BLOHM von einem Team der Bundesanstalt für Bodenforschung und des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung, unterstützt durch Registrierstationen deutscher Hochschulen, registriert worden ist, ist in Fig. 3 dargestellt. Sie setzt sich aus Kurvenstücken zusammen, die bis $AB/2 = 5$ km mit selbst ver-

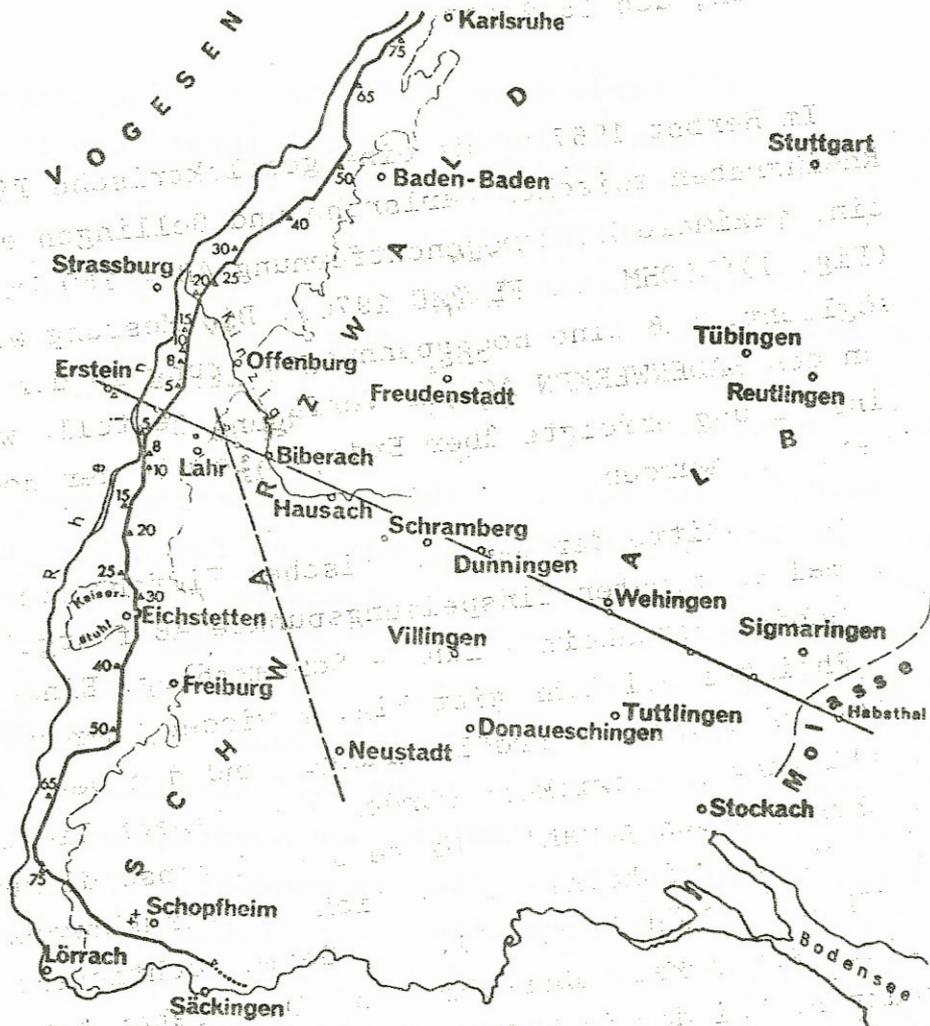


Fig. 1. Verlauf der Hochspannungsleitung im südlichen Rheingraben, die 1967 für eine Schlumberger-Grossauslage genutzt wurde. Δ 40 = Erdungspunkt in 40 km Abstand von der MN-Mitte. o = Registrierstationen.

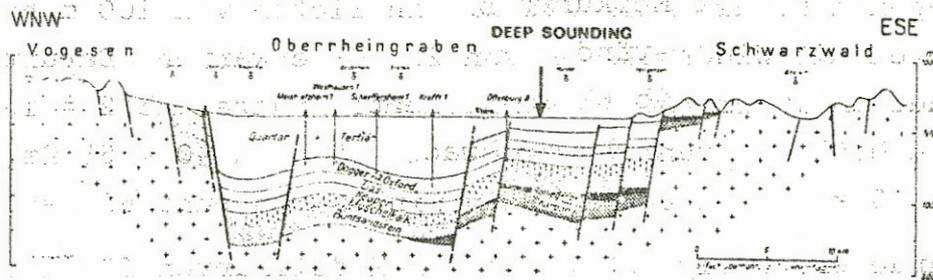


Fig. 2. Geologischer Schnitt durch den Rheingraben bei Lahr auf Grund von Erdölbohrungen. 5-fach überhöht. (Nach Schöneich 1970)

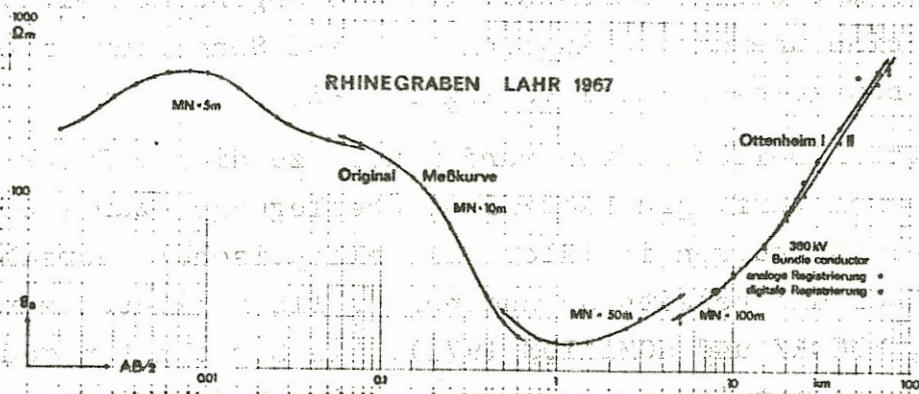


Fig. 3. Registrierte Schlumberger-Meßkurve im Rheingraben, bezogen auf eine MN-Mitte bei Ottenheim in der Nähe von Lahr.

legtem Kabel aufgenommen wurden. Von $AB/2 = 5$ km bis $AB/2 = 75$ km erfolgte die Stromeinspeisung über die Hochspannungsleitung. In groben Zügen läßt die Meßkurve bis in Tiefen von 100 m hochohmige Ablagerungen mit Widerständen von 200Ω m erwarten. Darunter folgen Widerstände um 10Ω m. Ab Elektrodenentfernungen $AB/2 = 1500$ m steigt die Meßkurve zunächst schwach auf etwa $40 - 65 \Omega$ m, danach ab $AB/2 = 15$ km steil unter einem Winkel von rund 60° an.

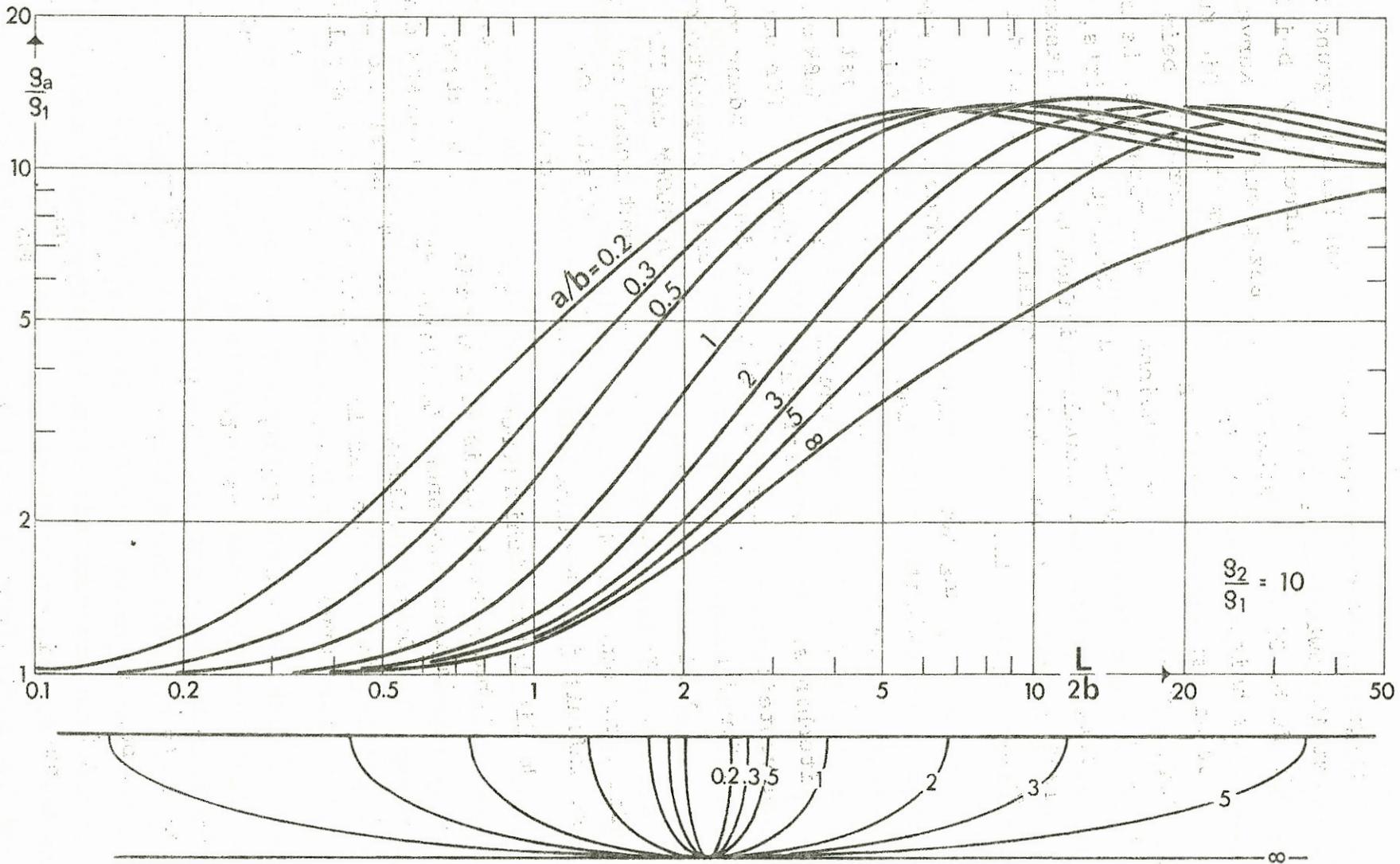
Sie wurde erstmalig 1969/70 durch Modellkurven für horizontale Schichtung interpretiert, welche für diesen Zweck eigens berechnet wurden (BLOHM und FLATHE 1970). Dieses Vorgehen scheint nur für die Meßpunkte bis zu $AB/2 = 10$ km gerechtfertigt zu sein, da die weiteren Meßpunkte bei einer Deutung der Kurve als Horizontal-Schichtenfall nicht genutzt werden können. Wenn der übersteile letzte Kurventeil in die Interpretation ebenfalls einbezogen werden soll, müssen Modelle benutzt werden, welche der räumlich begrenzten Grabenstruktur Rechnung tragen.

Wir haben deshalb vorgeschlagen, den Rheingraben in Bezug auf die Leitfähigkeitsverhältnisse durch ein Modell anzunähern, bei dem ein U-förmiges Tal mit elliptischem Querschnitt angenommen wird. Dabei habe das Tal eine unendliche Ausdehnung; eine Sondierung nach Schlumberger bewege sich dabei völlig im Tal.

In den letzten beiden Jahren wurden u.a. zu diesem Zweck von E. MUNDRY und dem Verf. grundsätzliche Überlegungen zur Theorie von Schlumberger-Sondierungen in Tälern mit elliptischem Querschnitt angestellt, über die bereits an anderer Stelle berichtet wurde (MUNDRY 1970, MUNDRY und HOMILIUS 1971). Die berechneten Modellkurven sind 2-parametrische Kurven, in die einmal das Widerstandsverhältnis ρ_2/ρ_1 von Taluntergrund zur Talfüllung eingeht, zum andern auch das Achsenverhältnis der den Talquerschnitt annähernden Halbellipse mit $2a =$ Talbreite und $b =$ Taltiefe. Die Modellkurven haben für den hier allein interessierenden Fall $\rho_2/\rho_1 > 1$ den Habitus von Dreischichtkurven vom Maximumtyp, sind jedoch bei großem ρ_2/ρ_1 im Anstieg steiler als Dreischichtkurven für horizontale Schichtung.

Als Beispiel sei in Fig. 4 eine Schar dargestellt, welche das typische Verhalten der Modellkurven für elliptischen Talquerschnitt

Fig. 4. Modellkurvenschar für Widerstandsmesskurven, die in Tälern mit elliptischen Querschnitt aufgenommen worden sind. b = Taltiefe, $2a$ = Talbreite. Verhältnis $\epsilon_2/\epsilon_1 = 10$ der Widerstände von Taluntergrund zu den Widerständen der Talfüllung.



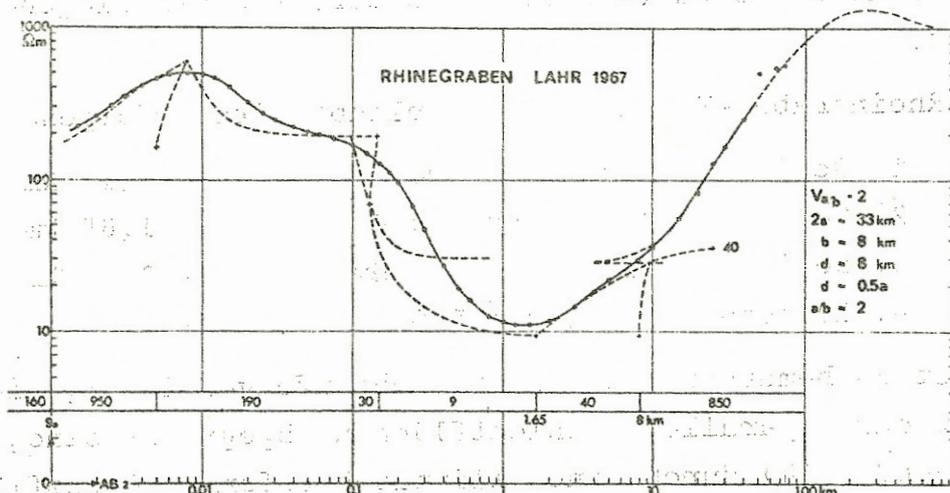
zeigt. Als Widerstandsverhältnis von Taluntergrund zur Talfüllung ist 10 gewählt. Variiert wird die Talbreite $2a$ bei festgehaltener Tiefe b . Die Kurvenschar hat in Bezug auf die Kurve für den Kreisquerschnitt ($a/b = 1$) eine gewisse Symmetrie. Die Kurve $a/b = 1$ ist die steilste Kurve im Anstieg und erreicht beim Überschwingen einen Maximalwert des scheinbaren Widerstandes. Es sei angemerkt, daß sich mit dem Spezialfall des Kreisquerschnitts, bei dem sich Modellkurven vergleichsweise einfach berechnen lassen, bereits 1951 HUBER befaßt hat. Der Grenzfall ($a = \infty$) ist der horizontale Zweischichtenfall.

Die Anwendung der neu berechneten Modellkurven für elliptische Grabenquerschnitte läßt nunmehr eine formal befriedigende Deutung der Meßkurve Lahr im Rheingraben zu. In Fig. 5 ist die vollständige, bezüglich der Sondensprünge korrigierte Meßkurve dargestellt. Weiterhin sind die Interpretationshilfsmittel für den vorderen Kurventeil eingetragen, die sich aus der Anwendung von Modellkurven für den Horizontalschichtenfall und Hilfspunktverfahren ergeben. Analog der früheren Deutung von BLOHM und FLATHE (1970) sind die höheren Schichtgrenzen im wesentlichen erhalten geblieben. Die Benutzung von Modellkurven für elliptischen Grabenquerschnitt beeinflusst jedoch stark die letzte Schichtgrenze.

Um die letzte Schichtgrenze zu erhalten, welche offensichtlich die hochohmige Grabenbasis charakterisiert, benutzen wir die aus einem A-Diagramm gewonnene Leitlinie für den Ansatz der neuen Modellkurven. Diese Leitlinie steigt auf $40 \Omega m$ an und ist die Führungslinie, auf der das Linkskreuz der neuen Modellkurven läuft, bis die Meßkurve mit einer Modellkurve zur Deckung kommt.

Welche Modellkurve für elliptischen Grabenquerschnitt ist zu verwenden? Denn über das a/b -Verhältnis können wir noch verfügen. Der Rheingraben bei Lahr ist ohne Vorbergzone rund 33 km ($= 2a$) breit (vgl. Fig. 6). Die Schichtgrenze der hochohmigen Basalschicht liegt bei rund 8 km ($= b'$). Also ist das Verhältnis $a/b' \approx 16,5/8 \approx 2$. Mithin ist ein Diagramm mit einem Halbachsenverhältnis $a/b = 2$ zu verwenden. Bei Benutzung dieses Diagramms liegt der genaue Wert des Linkskreuzes der Kurvenschar ($L/2b = 1$) bei $AB/2 = 9,5$ km. Wie man Fig. 5 entnehmen kann, beträgt die aus dem A-Diagramm

OH1



Interpretation mit HPV und Modellkurve für elliptische Talquerschnitte

Fig. 5. Geglättete Schlumberger-Meßkurve im Rheingraben, gedeutet unter Benutzung von Hilfspunktverfahren und Modellkurven für horizontale Schichten und für elliptischen Grabenquerschnitt.

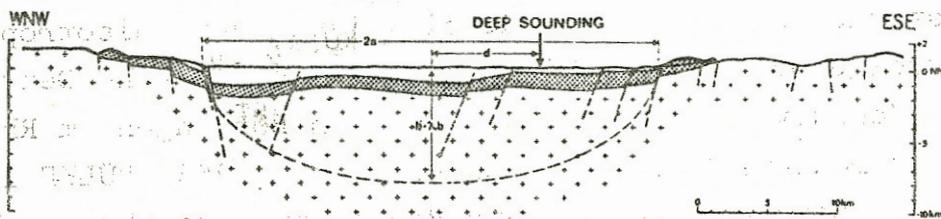


Fig. 6. Geologischer Schnitt durch den Rheingraben bei Lahr. Nicht überhöht. $2a = 33$ km. $b' = 8$ km. $b = 1,8$ km. $\lambda = 4,5$. $d \approx 8$ km. $d/a \approx 0,5$.

folgende Makroanisotropie 1,5 km, mithin liegt die hochohmige Basalschicht bei 8 km (= b'). Der Widerstand des Liegenden ist $\geq 850 \Omega\text{m}$.

Die Rheingraben-Meßkurve Lahr erlaubt mithin folgende Deutung:

1. Schichtenfolge rund 200 Ωm	- 0,1 km
2. Schichtenfolge rund 9 Ωm	- 1,65 km
3. Schichtenfolge rund 40 Ωm	- 8 km
4. Liegendes $\geq 850 \Omega\text{m}$	- ?

Dabei ist zu bemerken, daß die Schichtenfolgen 1 - 3, die gegeneinander durch parallele Schichtflächen abgegrenzt sind, sich von dem Liegenden (4) durch eine elliptisch geformte Grenzfläche abheben (Fig. 6).

Dieses Ergebnis ist insofern zunächst überraschend, als Gesteinsfolgen von nur 40 Ωm bis in Tiefen von 8 km zu den bekannten und gesicherten geologischen Vorstellungen der Grabenfüllung bei Lahr im Widerspruch zu stehen scheinen. Die maximalen Mächtigkeiten für die Grabenfüllung bei Lahr betragen rund 1,8 km. Ein spezifischer Widerstand von nur 40 Ωm für Kristallin, wenn man die 3. Schichtenfolge versuchsweise so deuten wollte, steht auch im Widerspruch zu bekannten Beobachtungen.

Erst die zusätzliche Berücksichtigung der Anisotropie einer Sedimentfolge bringt eine befriedigende geologische Deutung der Rheingraben-Meßkurve. Aus Untersuchungen an Bohrungen im Rheingraben und in Norddeutschland (FLATHE und RÜLKE 1963, RÜLKE 1967, FLATHE 1967) ist bekannt, daß die aus Bohrlochuntersuchungen berechnete Anisotropie einer Schichtenfolge innerhalb einer einzelnen Formation zwischen 1,5 und 2,8 liegen kann, daß die Anisotropie der gesamten Schichten bei tiefen Bohrungen ein Mehrfaches betragen kann. Das würde beispielsweise bedeuten, daß eine im geoelektrischen Widerstandskurvenbild homogen und isotrop erscheinende Schicht mit einer Anisotropie 3 nur den 3. Teil als "wahre" Mächtigkeit aufweist oder umgekehrt gedeutet, eine Schicht der Mächtigkeit 1 und der Anisotropie 3 erscheint im Widerstandsbild einer an der Erdoberfläche gemessenen Widerstandskurve auf die 3-fache Mächtigkeit "aufgebläht".

Legen wir durch den Rheingraben-Schnitt in Fig. 6 eine Halbellipse, welche die Sedimente im Mittel ganz erfaßt, so können wir der

Ellipse eine kleine Halbachse $b = 1,8$ km zuordnen. Aus der Meßkurve wurde eine Halbachse $b' = 8$ km ermittelt. Die Anisotropie der gesamten Grabenfüllung wäre mithin

$$\lambda = b'/b = 8/1,8 \approx 4,5 .$$

Dieser Wert ist sehr plausibel und steht mit den berechneten Gesamtanisotropiewerten an Bohrungen (FLATHE und RÜLKE 1963) durchaus im Einklang. Die Schichtenfolge 2 (9 Ω m) wäre dann als tertiäre Grabenfüllung, die Schichtenfolge 3 als ältere Sedimentfolge (Dogger ... Karbon, 40 Ω m im Mittel) zu deuten. Die Schichtenfolge 1 (200 Ω m) entspricht quartären Kiesen und Sanden; sie besitzt kaum Anisotropie.

In vereinfachender Weise wurde an dieser Stelle nur von "Anisotropie" einer Schichtenfolge gesprochen. Man muß sich darüber im klaren sein, daß darunter ein Summewert zu verstehen ist, in den in komplizierter Weise die Mikro- und Makroanisotropie der einzelnen Schichten der 1.800 m mächtigen Rheingrabenfüllung eingehen. Abgesehen davon bleibt der Anisotropie-Abzug von 1,5 km aus dem A-Diagramm bestehen, der bei der Deutung der Meßkurve von vornherein berücksichtigt worden ist.

Im einzelnen wird Prof. H. FLATHE in seinem Diskussionsbeitrag eine Differenzierung dieser Begriffe vornehmen.

-- Literaturverzeichnis am Ende des folgenden Beitrags --