

# Teufenabhängigkeit petrophysikalischer Parameter und deren Verwendung in der angewandten Geophysik

M. K O P F

*Az Északnémet-Lengyel-medencéből származó kiterjedt fűrómag-anyag alapján különböző kőzetekre a következő petrofizikai paraméterek vertikális gradiensének menetét vizsgálták meg: sűrűség, hangsebesség (longitudinális hullámokra), szuszceptibilitás, radioaktivitás, hangkeménység és reflexió-koefficiens. Megvizsgálták a jelenségek okait és klasszifikációt dolgoztak ki.*

*По большому объему вычислений, проведенных на ядрах из Северо-германско-Польского бассейна, изучается поведение вертикального градиента плотности, скорости звука продольных волн, восприимчивости, радиоактивности, твердости звука и коэффициента отражения для различных разновидностей горных пород. Обсуждаются причины явлений и предлагается соответствующая классификация.*

*Am Hand eines sehr umfangreichen, an Bohrkernen des Norddeutsch-Polnischen Beckens ermittelten Zahlenmaterials wird der Verlauf des vertikalen Gradienten der Dichte, der Schallgeschwindigkeit longitudinaler Wellen, der Suszeptibilität, der Radioaktivität, der Schallhärte und des Rx-Koeffizienten von verschiedenen Sedimentiten dargestellt, die Ursache erläutert und eine Klassifizierung vorgenommen.*

## Vorbemerkung

Die gezielte Ansetzung der verschiedenen Methoden der angewandten Geophysik, die Korrektur, Reduktion, Auswertung und Interpretation der mit Hilfe geophysikalischer Verfahren gewonnenen Ergebnisse verlangen eine möglichst genaue Kenntnis der physikalischen Eigenschaften der im jeweiligen Untersuchungsgebiet vorhandenen Gesteine bzw. Gesteinsarten. Hierbei ist für die geophysikalische Erfassung grösserer Tiefen der vertikale Gradient einzelner petrophysikalischer Parameter (vor allem Dichte, Schallgeschwindigkeit, Suszeptibilität, Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit und Radioaktivität), oder daraus abgeleiteter Kenngrößen (Schallhärte, Reflexionskoeffizient, Anisotropiekoeffizient) von verschiedenen, im Deckgebirge überwiegend auftretenden Gesteinsarten (Ton, Tonstein, Schiefer Ton, Schluff, Schluffstein, Feinsand, Mittelsand, Grobsand, Feinsandstein, Mittelsandstein, Grobsandstein, Kies, Konglomerat, Brekzie, Mergel, Mergelstein, Gips, Anhydrit, Steinsalz, Kalkstein, Dolomitstein) von grundlegender Bedeutung.

Die benötigten vertikalen Gradienten können aus den Ergebnissen der Bohrlochgeophysik, der Geophysik und an Hand von Modellberechnungen gewonnen werden.

Eine direkte, eindeutige Zuordnung dieser petrophysikalischen Werte zu petrographischen Daten ist allerdings nur mit Hilfe der Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der Gesteine, speziell der Bohrkernaus verschiedenen Tiefen und auf Grund laborativer Messungen unter erhöhten, die jeweilige Teufenlage bzw. den jeweiligen in-situ-Wert simulierenden Druck- und Temperaturbedingungen möglich.

Die Schwierigkeit bei der Untersuchung allgemeiner Gesetzmässigkeiten der Teufenabhängigkeit petrophysikalischer Parameter liegt in der Auswahl des zu benutzenden Gesteinsprobenmaterials, da einerseits wegen der Vergleichbarkeit möglichst monomikt (sog. reine) Gesteine bzw. Gesteinsarten zur

Untersuchung und Auswertung herangezogen werden müssen, andererseits aber in der Natur vorwiegend polymikte Gesteine anzutreffen sind. Dadurch ist (zumindest zur Zeit) grundsätzlich nur ein Übertragen der am monomikten Sedimentit festgestellten Beziehung auf das jeweils zur Debatte stehende polymikte Gestein möglich.

Eine weitere Schwierigkeit liegt in der „Repräsentanz“ der Probe; d. h., dass die aus Bohrungen, also aus verschiedenen Teufen entnommen und untersuchten Bohrerne nicht die natürlichen Sättigungs-, Druck- und Temperaturverhältnisse widerspiegeln, wobei selbst ein Simulieren mit Schichtwasser, allseitigem Druck bei erhöhter Temperatur nicht den absolut wahren Teufenverlauf des jeweils untersuchten Parameters widerspiegeln kann.

### 1. Teufenabhängigkeit der Porosität

Mit wachsender Lagerungstiefe nimmt sowohl die Gesamtporosität als auch die Nutzporosität deutlich, gesetzmässig, nicht linear ab. Ab 3000 bis 5000 m Teufe ist die Nutzporosität nahezu null, während die Gesamtporosität in diesem Bereich meist  $< 3\%$  ausmacht (W. TUNN 1963). Es ist möglich, aus der Porosität direkt den Verfestigungskoeffizienten abzuleiten (S. NAGUMO 1965).

Die Ursache der verringerten Porosität ist sowohl in der Verdichtung bei Dehydratisierung als auch in der Zementation durch Ausfüllung mit autogenem Material meist als Bindemittel zu suchen. Hierbei hängt die Grösse der Porositätsminderung nicht direkt vom Alter, sondern nur von der Dauer der Einwirkung und der Grösse des Druckes und der Temperatur sowie von der Eigenschaft zirkulierender wässriger Lösungen ab (J. C. MAXWELL 1964; W. L. KOMAROVA und D. W. POSTNIKOV 1964; M. KOPF 1967).

### 2. Teufenabhängigkeit der Dichte

Es gibt verschiedene Dichten (M. KOPF 1966), die ihrerseits ein unterschiedliches Verhalten bezüglich der Teufenabhängigkeit aufweisen.

Die *Mineraldichte* (die Dichte der einzelnen Mineralien) ist bei einem meist äusserst geringen Porenvolumen teufenunabhängig. Die Dichte des Minerals zeigt also bis zu einer bestimmten, mineralspezifischen Teufe, ab der mineralinterne Umwandlungen erfolgen, keinen vertikalen Dichtegradienten.

Die *Gesteinskorndichte* (die Dichte der Festsubstanz eines Gesteins) lässt ebenfalls keinen vertikalen Dichtegradienten erkennen, da die Mineraldichte der am Gesteinsaufbau beteiligten Mineralien eben teufenunabhängig ist.

Die *Gesteinsraumdichte* (die Dichte der Festsubstanz und des Poreninhaltes eines Gesteins) kann dagegen sowohl teufenunabhängig als auch teufenabhängig sein, je nach dem, ob das betreffende Gestein eine nennenswerte Porosität ( $> 1-3\%$ ) aufweist oder nicht.

Die Ursache des vertikalen Dichtegradienten ist in der Porositätsminderung, in der allgemein zu beobachtenden Erhöhung der Gesamtmineralisation der Schichtwässer mit der Tiefe und in der Mineralumwandlung nach der Sedimentation auf Grund des Belastungs- oder Faltungsdruckes bei erhöhter Temperatur zu suchen.

Auf Grund der Erscheinung, dass manche Gesteine auch an der Erdoberfläche ein völlig unbedeutendes Porenvolumen aufweisen und nahezu ausschliess-

lich aus teufenunabhängiger Festsubstanz bestehen, können hinsichtlich der Teufenabhängigkeit der Dichte 2 Klassen von Gesteinsarten unterschieden werden (M. KOPF 1967):

1. die Klasse der porenfreien bis porenarmen Gesteinsarten ohne vertikalen Dichtegradienten (Anhydrit – Abb. 1, Steinsalz, Kalkstein, Dolomitstein, Gips, Kieselschiefer, Quarzit, Grauwacke, Arkose, Tonschiefer, Metamorphite, Magmatite),
2. die Klasse der porenreicheren Gesteinsarten mit vertikalem Dichtegradienten (Ton, Schluff, Sand, Kies, Mergel, Tonstein – Abb. 2, Schluffstein, Feinsandstein, Mittelsandstein, Grobsandstein, Psephit, Mergelstein).

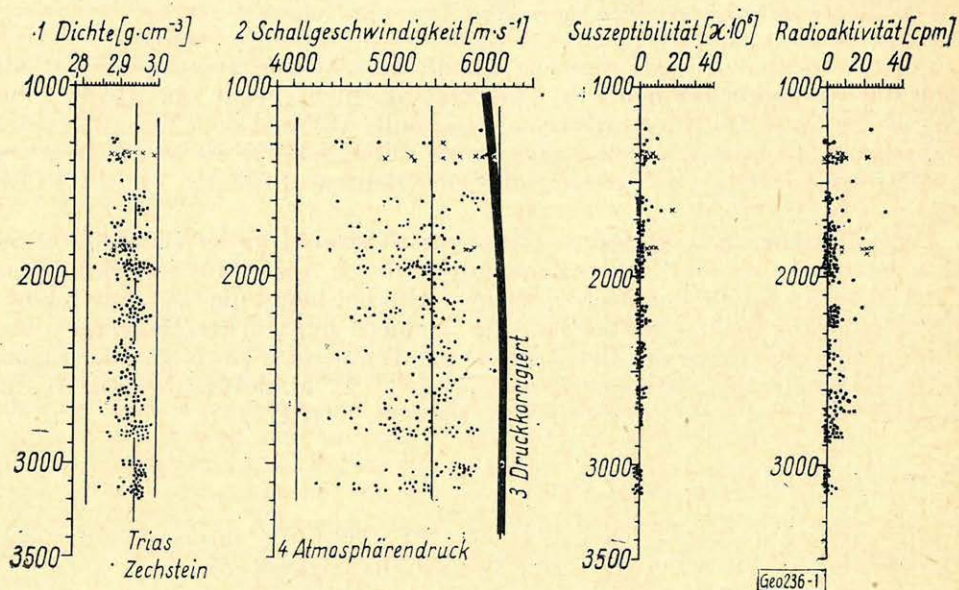


Abb. 1. Der vertikale Gradient von Lufttrocken-Dichte, Schallgeschwindigkeit longitudinaler Wellen unter Atmosphärendruck und unter Druck, Suszeptibilität und Radioaktivität bei Anhydrit.

Фиг. 1. Вертикальный градиент плотности воздушносухой породы и скорости звука продольных волн под атмосферным давлением, а также при давлении, восприимчивости и радиоактивности ангидрита

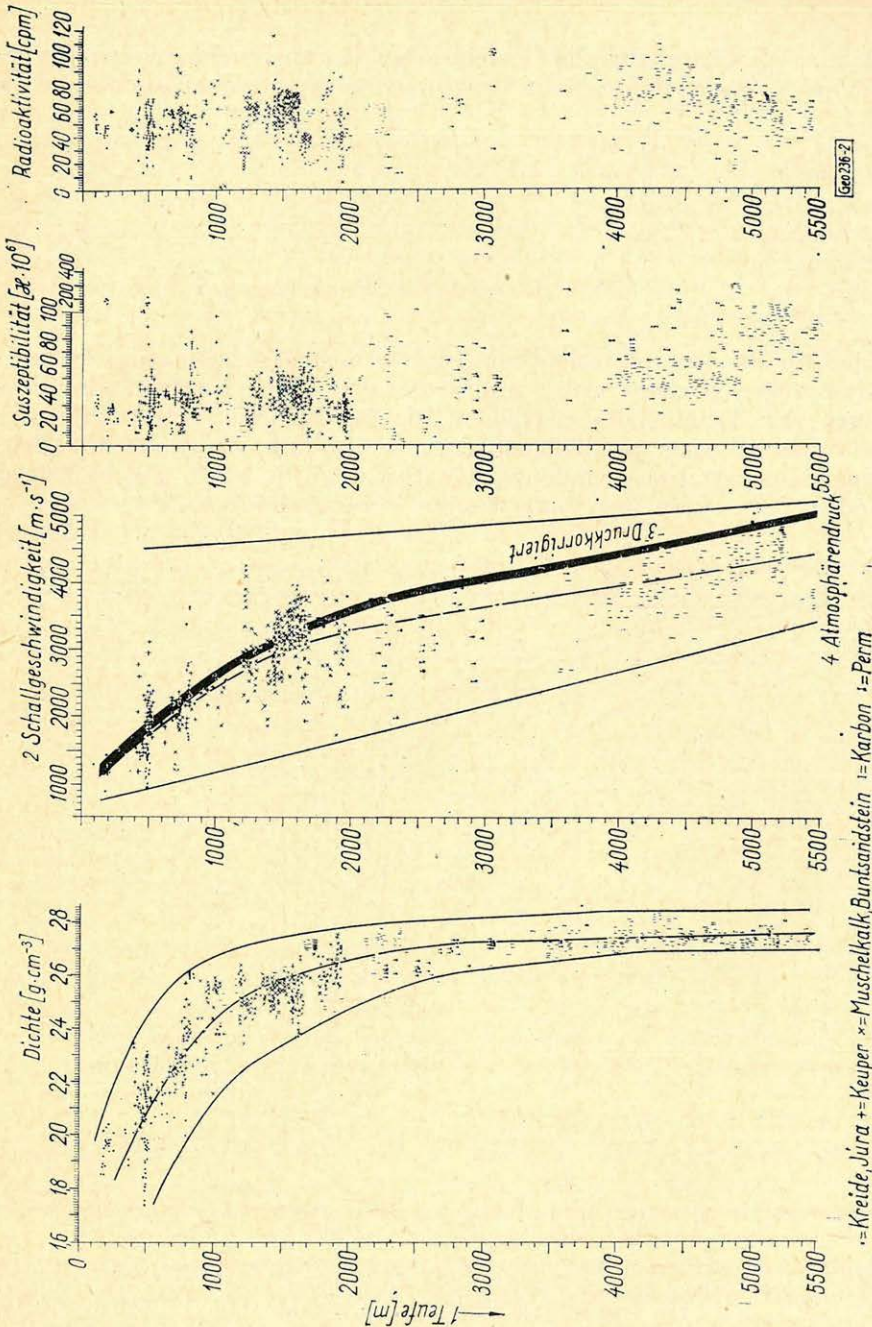
1 – Плотность 2 – скорость звука

1. ábra. A légszárászűrség vertikális gradiense, a longitudinális hullámok hangsebessége légköri nyomásnál és növekvő nyomásnál, szuszceptibilitás és radioaktivitás anhydrit esetén

1 – sűrség 2 – hangsebesség

Der vertikale Dichtegradient ist nicht linear. Der stärkste Gradient ist bis zu einer Teufe von etwa 1000 m zu beobachten, bis 2000 m schwächt er sich ab. Ab der Teufe 2000 m ist die Dichtezunahme auf Grund der Tiefe nur äußerst gering und ab 3000 m fast vernachlässigbar. Eine Unterscheidung zwischen Trockendichte und Sättigungsdichte ist nicht mehr möglich und nötig.

Ab der Teufe 5000 m kann für das Sedimentpaket des Norddeutsch-Polnischen Beckens wegen der absoluten Vorherrschaft des Schluffsteins und



Фиг. 2. Вертикальный градиент плотности воздушной породы и скорости звука продольных волн под атмосферным давлением, а также при давлении, восприимчивости и радиоактивности глинистых отложений  
 1 - Глубина 2 - скорость звука 3 - с поправкой за давлением 4 - давление воздуха  
 2. ábra. A légszáraz-sűrűség vertikális gradiense, a longitudinális hullámok hangsebessége légköri nyomásnál és növekvő nyomásnál, szuszceptibilitás és radioaktivitás agyagpala esetén  
 1 - mélység 2 - hangsebesség 3 - nyomáskorrigált 4 - légköri nyomás

Abb. 2. Der vertikale Gradient von Luftrocken-Dichte, Schallgeschwindigkeit longitudinaler Wellen, unter Atmosphärendruck und unter Druck, Suszeptibilität und Radioaktivität bei Tonstein.  
 = Kreide, Jura = Keuper = Muschelkalk, Buntsandstein = Karbon = Perm



Obwohl es wegen der unterschiedlichen petrographischen Ausbildung (qualitativer und quantitativer Mineralbestand und Gefüge) nicht möglich ist, einen allgemein verbindlichen mittleren vertikalen Dichtegradienten auch für stratigraphische Einheiten aufzustellen, wurde er für die Belange der Profilberechnung oder als Grundlage zur Herstellung der abgedeckten Schwerekarte und der Karten der Feldtransformationen in Abb. 3 doch (gestrichelt) dargestellt. Der aus dem vertikalen Dichtegradienten stratigraphischer Einheiten gewonnene Dichteansatz ist natürlich ungenauer, als der aus dem vertikalen Dichtegradienten petrographischer Einheiten gewonnene.

Hinsichtlich des vertikalen Dichtegradienten stratigraphischer Einheiten, Systeme und Abteilungen müssen im Norddeutsch-Polnischen Becken 5 Klassen unterschieden werden:

1. Quartär, Tertiär, Kreide, Jura, Keuper
2. Muschelkalk (teufenunabhängig,  $2,63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
3. Buntsandstein (ab etwa  $2000 \text{ m}$  wie 1.)
4. Permosiles (ab etwa  $2000 \text{ m}$  wie 1.)
5. Präsilés (teufenunabhängig,  $2,70 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ )

Wie aus Abb. 3 ersichtlich, unterscheiden sich diese 5 Klassen vor allem bis zu einer Teufe von  $2000 \text{ m}$ , während darunter die Differenzen zwischen den einzelnen Klassen nur noch gering sind.

### 3. Teufenabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit

Bezüglich der Veränderung der Schallgeschwindigkeit longitudinaler Wellen mit der Tiefe gibt es nur eine Klasse mit vertikalen Schallgeschwindigkeitsgradienten. Auch die Schallgeschwindigkeit nimmt wie die Dichte mit wachsendem Druck zu, wobei allerdings im Gegensatz zu dieser ab einer bestimmten Tiefe (etwa ab  $3000 - 5000 \text{ m}$ ) auf Grund erhöhter Temperatur die Schallgeschwindigkeit wieder leicht abnehmen kann (D. S. HUGHES und C. MAURETTE 1957; G. M. AVCJAN und A. A. MATVEENKO 1965).

Die Gesteinsgeschwindigkeit hängt ab von der Geschwindigkeit der Mineralien und der porenfüllenden Medien, sowie von der Porosität und von den intergranularen Kontaktbedingungen. Als Ursache des Anwachsens der Schallgeschwindigkeit mit der Teufe können vor allem die Verringerung der Porosität, die Veränderung des Kern-Kern-Kontaktes und Mineralneubildungen herangezogen werden.

Bei der Minderung der Porosität und der Mikrolüftung auf Grund diagenetischer und metamorpher Vorgänge (bei teilweiser Mineralneubildung) auf Grund der in grösserer Tiefe herrschenden neuen *p-t-Bedingungen*, die einen grösseren Anteil der höheren Mineralgeschwindigkeit (Gas oder Flüssigkeit) und eine Vergrösserung der Anzahl der Korn-Kontakte bewirken, ist nicht der absolute Wert der Porosität (wie bei der Dichte), sondern der Charakter des Porenraumes für den vertikalen Schallgeschwindigkeitsgradienten entscheidend.

Diese Vorgänge führen zu Erscheinungen, die die eingetretenen Veränderungen auch nach der Entlastung des Gesteinspaketes, wie es z. B. durch das Bohren geschieht, weitgehend speichern. Dieser Vorgang ist also *irreversibel*.

Die druckbedingten Veränderungen der Korn-Korn-Kontaktbedingungen, die eine Vergrösserung der Kontaktfläche der einzelnen Körner zur Folge

haben, beruhen auf elastischen Deformationsvorgängen, so dass diese Erhöhung der Schallgeschwindigkeit *reversibler* Natur ist. Sie ist auch bei solchen Gesteinen vorhanden, die keine irreversible, porositätsabhängige Erhöhung der Schallgeschwindigkeit und Dichte zeigen.

Die Teufenabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit wird also durch irreversible und reversible (elastische Deformation) Vorgänge bestimmt. Entsprechend dieser beiden Hauptfaktoren müssen die stets schall-teufenabhängigen Gesteine bzw. Gesteinsarten in zwei teufenabhängige Klassen eingeteilt werden:

1. in die Klasse der porenarmen bis porenfreien Gesteine mit nur reversiblen vertikalem Schallgeschwindigkeitsgradienten, wobei nur die veränderten Korn-Korn-Kontaktbedingungen wirksam sind:  
(Anhydrit – Abb. 1, Steinsalz, Kalkstein, Dolomitstein, Gips, Kiesel-schiefer, Quarzit, Grauwacke, Arkose, Tonschiefer, Metamorphite, Magmatite)

Wie der Abb. 1 zu entnehmen ist, ist die Variation der druckunkorrigierten Schallgeschwindigkeitswerte longitudinaler Wellen (bei Atmosphärendruck) gegenüber der der Dichtewerte wesentlich grösser. Ein vertikaler Gradient der unter Atmosphärendruck gemessenen Schallgeschwindigkeitswerte ist nicht zu beobachten.

Auch der an Hand von Hochdruckschallmessungen im Labor errechnete Verlauf des vertikalen Dichtegradienten reversibler Natur lässt nur eine geringe, aber deutliche Zunahme der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe erkennen.

2. in die Klasse der porenreicheren Gesteine mit reversiblen *und* irreversiblen Schallgeschwindigkeitsgradienten, wobei letzter durch Kompaktion, d. h. durch Abnahme des Gesamtporenraumes bei gleichzeitiger Dehydratisierung und beginnender oder erfolgter Mineralneubildung auf Grund grösseren lithostatischen Druckes hervorgerufen ist. (Ton, Schluff, Sand, Kies, Mergel, Tonstein – Abb. 2, Schluffstein, Feinsandstein, Mittelsandstein, Grobsandstein, Psephit, Mergelstein).

#### 4. Teufenabhängigkeit von Schallhärte und Rx-Koeffizient

Für die Ansetzung, Auswertung und Interpretation der seismischen Untersuchungsergebnisse ist der vertikale Gradient der Schallhärte und des daraus abgeleiteten Rx-Koeffizienten bestimmter Gesteinsarten von besonderer Wichtigkeit.

Als Reflexionskoeffizient  $\frac{J_r}{J_e}$  wird das Amplitudenverhältnis (Verhältnis der Amplitude der reflektierten zur einfallenden Welle) berechnet

$$R_x = \frac{J_r}{J_e} = \frac{\rho_2 \cdot v_2 - \rho_1 \cdot v_1}{\rho_2 \cdot v_2 + \rho_1 \cdot v_1} \cdot 100 (\%),$$

wobei die Schallhärte ( $Sh$ )

$$Sh = \rho \cdot v [gs^{-1} cm^{-2} 10^2].$$

Die Berechnung gilt nur für senkrechtes Einfallen der Welle und wird sowohl für Schallhärtezunahme, als auch für Schallhärteabnahme durchgeführt.

Abb. 4 gibt als Beispiel die aus dem mittleren vertikalen Dichtegradienten und dem mittleren druckreduzierten Schallgeschwindigkeitsgradienten berechneten *Rx-Koeffizienten* der Grenze von Kalkstein gegen Tonstein, Schluffstein, Feinsandstein, Mittelsandstein, Grobsandstein, Mergelstein, Anhydrit, Steinsalz und Dolomit wieder.

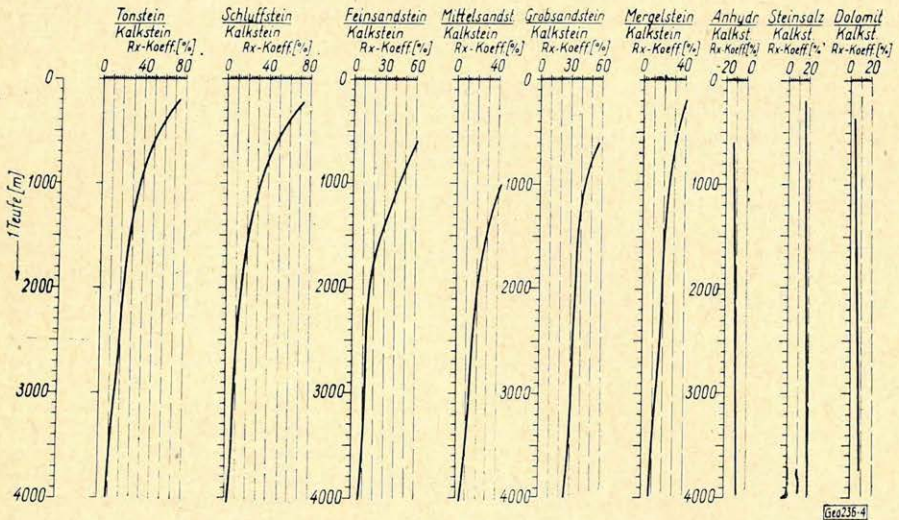


Abb. 4. Die aus dem mittleren vertikalen Gradienten der Lufttrockendichte und Trockenschallgeschwindigkeit errechneten Reflexionskoeffizienten zwischen Kalkstein einerseits und Tonstein, Schluffstein, Feinsandstein, Mittelsandstein, Grobsandstein, Mergelstein, Anhydrit, Steinsalz, Dolomit andererseits.

Фиг. 4. Коэффициенты отражения, подсчитанные из средних величин вертикальных градиентов воздушной плотности и скорости звука, для известняков с одной стороны и для глинистых, илстых отложений, тонкозернистого, среднезернистого и крупнозернистого песчаников, ангидритов, каменных солей и доломитов с другой стороны.

1 — Глубина

4. ábra. A légszárász-sűrűség és a szárász-hangsebesség közepes vertikális gradienséből számított reflexióegyütthatók összevetése egyrészt mészkő, másrészt agyagpala, iszapos pala, finom homokkő, közepes finomságú homokkő, durvaszemés homokkő, márgás pala, anhidrit, kősó és dolomit között. — 1 — mélység

Auf Grund des Verlaufes des vertikalen Schallgeschwindigkeitsgradienten und der Ergebnisse von Modellberechnungen (F. SCHUPPE 1967) kann ausgesagt werden, dass generell bei klastischen, chemischen und organogenen Sedimentiten (mit Ausnahme von Steinsalz und Anhydrit) mit wachsender Tiefe eine Verschlechterung der Reflexionseigenschaften auftritt, wobei nach der Tiefe sowohl eine Zunahme und Abnahme als auch eine Konstanz des Reflexionskoeffizienten abzuleiten ist.

### 5. Teufenabhängigkeit der Suszeptibilität und Radioaktivität

Für alle Gesteinsarten zeigt die Suszeptibilität und die Radioaktivität bis zu der untersuchten Teufe keinen deutlichen vertikalen Gradienten (s. Abb. 1 und 2).

- Arvcjan, G. M. und A. A. Matveenko:* Der Einfluss der Sättigungsflüssigkeit auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen in Sedimentgesteinen bei hohen Drücken und Temperaturen. — *Fizika Zemli*, 3, S. 65–70, Moskau 1965.
- Hughes, D. S. und C. Maurette:* Détermination des vitesses d'onde élastique dans diverses roches — *Rev. de l'Institut Franc. d. Pétrôle*, 12, S. 730–752, Paris, 1957.
- Komarova, V. L. und D. W. Postnikov:* Zusammenhänge zwischen Alter, Teufe und Speichereigenschaften sandiger Gesteine. — *Dok. akad. nauk, SSSR*, 159, Moskau, 1944.
- Kopf, M.:* Zum Begriff der Dichte in Geologie und Geophysik. — *Z. f. angew. Geol.*, 12, S. 145–153, Berlin 1966.
- Kopf, M.:* Der Dichteansatz für das Norddeutsch-Polnische Becken unter besonderer Berücksichtigung des vertikalen Dichtegradienten. — *Geologie*, 16, S. 181–197, Berlin 1967.
- Maxwell, J. C.:* Influence of Depth, Temperature and geologic Age on Porosity of quartzose Sandstones. — *Bull. Am. Ass. Petr. Geol.* 48, S. 697–709, Tulsa 1964.
- Nagumo, S.:* Verfestigung von Sedimentgesteinen. — *Bull. Earthqu. Res. Inst. Tokyo*, 43, S. 339–348, Tokyo 1965.
- Schuppe, F.:* Teufenabhängigkeit von Schallgeschwindigkeit und Reflexionskoeffizient. — *Gutachten VEB Geophysik*, 29. S. Unveröff., Leipzig, 1967.
- Tunn, W.:* Auswertung der Bohrlochmessung der Bohrung Münsterland 1 unterhalb 1870 m Teufe. — *Fortschr. Geol. Rheinl. und Westfalen*, 11, S. 239–242, Krefeld 1963.

## EGYESÜLETI HÍREK

1969. május 14–16. között zajlott le a 4. Geofizikai Vándorgyűlés a Mecsek hegységben. A rendezvény több mint 100 fős hallgatóság előtt lezajlott előadásai és vitái eredményeként az alábbi határozati javaslatok születtek:

1. A bányákban kipróbált geofizikai módszerek hasznosnak bizonyultak műszaki és gazdaságossági szempontból. Folytatni és szorgalmazni kell a geofizikai módszerek bányabeli alkalmazásának kiterjesztését elsősorban bányakutatási, mintázási és bányabiztonsági célokra.

2. A légigeofizikai mérések eddig is hasznos és áttekintő képet adtak nagy területek mágneses és radiometrikus viszonyairól. Ilyen adatok hosszú időre alapul szolgálhatnak további kutatásokhoz, célszerű az illetékes szerveknél szorgalmazni az egész ország légi-geofizikai felvételezésének befejezését.

3. A légi geofizikai mérések során készült káliumelterjedési térképek nemcsak geofizikai és a földtani kutatások számára lehetnek hasznosak, hanem a mezőgazdaság kutatóinak is, ezért felhasználásra kell javasolni a mezőgazdasági kutató szakembereknek is.

4. A Nehézipari Műszaki Egyetem Geofizikai Tanszékén végzett kutató munka ipari alkalmazásbavételének érdekében javasoljuk, hogy a bányavállalatok tegyék lehetővé kísérleti mérések elvégzését a kutatóknak ipari körülmények között és nyújtsanak segítséget a további kutatásokhoz.

5. A mélyfúrások karottázsadatainak számítógépes feldolgozása információszerzés és információhasznosítás szempontjából igen gyümölcsözőnek mutatkozik. Ilyen jellegű munkák módszertani eredményeinek publikálása, széleskörű tanulmányozása nagyon fontos, ennek eredményeképpen célszerű törekedni valamilyen országos szabvány, vagy ajánlás kidolgozására, valamennyi karottázsadatot felvételező és kiértékelő intézmény bevonásával.

6. A hidrológiával foglalkozó szakemberek számára javasoljuk a filtrációs koefficiens geofizikai módszerrel történő meghatározásának módszerét tanulmányozni, a vándorgyűlésen elhangzott előadás publikálása révén.

7. Az elhangzott előadások publikálása útján, javasoljuk felhívni a műszergyártással foglalkozók figyelmét a mágneses-szuszeptibilitást mérő műszerre.

Fenti határozatokat Egyesületünk vezetősége eljuttatja az illetékes szervekhez.