

A szeizmikus sebesség és a hőtermelés összefüggése kristályos kőzetekben

L. RYBACH*

*Kristályos kőzetekben a V_p szeizmikus sebesség és a ρ sűrűség növekszik, míg a radióaktív hőtermelés csökken savanyútól a bázikus összetétel felé haladva. Különböző nyomások alatt a földkéreg közeleinek sebesség-sűrűség rendszeréből kiindulva a dolgozat empirikus $A(V_p)$ összefüggést ismertet az 5,0–8,0 km/sec tartományban, mely a $(V_p) = a \cdot \exp(-bV_p)$ törvényt követi, ahol az a és b számfaktor függ az *in situ* nyomástól. A dolgozat diagramot közöl, amelynek segítségével a hőtermelés eloszlása $A(z)$ bármely $V_p(z)$ szerkezetre kiszámítható.*

В кристаллических породах сейсмическая скорость V_p и плотность ρ возрастают, а радиоактивное теплопроизводство снижается от кислого до основного состава. Под разными давлениями для системы скорость-плотность пород земной коры приводится в работе эмпирическое отношение $A(V_p)$ в диапазоне от 5,0 до 8,0 км/сек, которое следует закону $(V_p) = a \cdot \exp(-bV_p)$ где факторы a и b зависят от давления при условиях естественного залегания. В работе приводится диаграмма, с помощью которой вычисляется распределение теплопроизводства $A(z)$ для любой структуры $V_p(z)$.

*In crystalline rocks seismic velocity V_p and density ρ increase, whereas radioactive heat production A decreases from acidic to basic compositions. For the velocity-density systematics for crustal rocks at different pressures an empirical $A(V_p)$ relationship has been derived for the range 5.0–8.0 km/sec which follows the exponential law: $A(V_p) = a \cdot \exp(-bV_p)$, where the numerical factors a and b depend on the *in situ* pressure. A graph is given by means of which the heat production distribution $A(z)$ can be obtained for any given $V_p(z)$ structure.*

Egy adott kőzet radióaktív hőtermelése A függ a benne levő urán, tórium és kálium mennyiségétől. Ez skaláris izotróp kőzefizikai tulajdonság, amely független az *in situ* hőmérséklettől és nyomástól, és döntő szerepet játszik a földi hőáram-elosztás értelmezésében, valamint a földkéregre vonatkozó termális modellek kiszámításában. A -nak kísérleti meghatározása rendszerint gammasugár spektrometriával történik, amely alkalmas U, Th, és K egyidejű meghatározására. Örölt, vagy szilárd kőzetminták analizálhatók (lásd Adams és Gasparini, 1970, vagy Rybach 1971).

Közvetlen mintavételezéssel csak a földkéreg legfelső néhány km-re érhető el (felszíni minták, fúrómagok stb). Abból a célból, hogy a termikus viszonyokra és folyamatokra fényt derítsünk, a kéreg mélyebb rétegeiben elhelyezkedő radióaktív hőforrások eloszlására indirekt úton kell következtetni.

A nyomáshullámok sebessége V_p és annak változása a mélység függvényében meghatározható a föld felszínén végrehajtott szeizmikus mérésekkel. Ha fennáll egy összefüggés A és V_p között, a hőtermelés értéke kivehető bármely z mélységre a mért $V_p(z)$ eloszlásból az $A(V_p)$ formula alkalmazásával.

Hasonló lehetőség merül fel a sűrűség ρ és a sebesség V_p kölcsönös függésében: a mért szeizmikus sebességekből nyert sűrűség-értékek széles kör-

* Institut für Geophysik der ETH Zürich, ETH-Hönggerberg CH – 8093 Zürich Switzerland

ben használatosak gravitációs modellek számításához Bouguer anomália szelvények értelmezésében. Számos törvényt javasoltak a sebesség – sűrűség összefüggésre, hogy kifejezzék azt a tapasztalati kapcsolatot, amit először Nafe és Drake (1959) talált. További tapasztalati $\rho(V_p)$ összefüggéseket mutatott be Bateman és Eaton (1967), Gangi és Lamping (1971) és Woollard (1975). Birch (1961) kimutatta, hogy kristályos kőzetekben a $\rho(V_p)$ összefüggés első közelítésben lineáris és a kérdéses anyag átlagos atomsúlyától függ. A sebesség – sűrűség összefüggés általánosítható a hidrodinamikussá alakításával:

$$V_p = (V_p^2 - 4 V_s^2/3)^{1/2},$$

lásd Shankland (1970), Mao (1974).

A sebesség és a hőtermelés közötti összefüggés

Hasonló empirikus összefüggést ismertetett A és V_p (vagy ρ) között kristályos kőzetre vonatkozóan Rybach (1973a, 1973b) és görbét adott meg, amely azt mutatja, hogy A csökken V_p növekedésével. Ez a tendencia egyszerűen tükrözi azt az általános kőzefizikai szabályt, hogy a mafik-ásványok százalékos arányának növekedésével a szeizmikus sebesség növekszik és a radióaktivitás csökken; ez a tendencia igaz metamorf kőzetekre is (Rybach 1976a, 1976b). Újabban Buntebarth (1975) általánosította az $A(V_p)$ összefüggést egy k mennyiségnek – a kation térkitöltési indexnek – bevezetésével, továbbá azzal, hogy a V_p érték standard p/T viszonyokra vonatkoztatott:

$p_{ref} = 4$ kb, $T_{ref} = 20$ °C. A k index jellemző a szóban levő kőzet ásványos összetételére:

$$k = \frac{Z}{N \cdot v_M}, \quad (1)$$

ahol

Z a mólsúlyban levő kationok száma, v_M a szóban levő ásvány móltérfogata és N az Avogadro féle szám.

Egy kőzetösszetételben, amelynek kémiai összetétele a savanyútól (gránitos) a bázikusig változik, k változása $4,7 \cdot 10^{-12}$ mol/cm³-től (gránit) $5,3 \cdot 10^{-12}$ mol/cm³ (gabbrodiorit) közepes értékeken keresztül egészen $6,0 \cdot 10^{-12}$ mol/cm³ (eklogit)-ig terjed. Ugyanekkor A kb 7 HGU-tól $0,1$ HGU-ig, csökken. (1 HGU = 10^{-13} cal/cm³ sec = $0,417 \mu$ W/m³). Míg k és A függetlenek az *in situ* hőmérséklettől és nyomástól, V_p jelentős hőmérséklet- és nyomás-hatásokat mutat. V_p -nek a nyomással történő növekedése a $0-1,5$ kb tartományban ($0-6,0$ km-ig terjedő kéregmélység) különösen figyelemreméltó (lásd Press 1966, Lebedev és munkatársai 1974). Így V_p -nek a mélységgel történő általánosan megfigyelt növekedése a közettípus változására, továbbá a földkéregben levő nyomás- és hőmérsékleti viszonyok változására utal. A hőmérsékleti hatás azonban sokkal kevésbé kifejezett.

Következésképpen az $A(V_p)$ értékek megadhatók a kéreg különböző mélység szintjeinek megfelelő különböző nyomásokra. Az $A(V_p)$ korreláció egyrészt a $\rho(V_p)$ összefüggésen – melyet különböző nyomásokra kísérleti úton Volarovich (1966, 1967) állapított meg – másrészt A -nak és ρ -nak savanyú kőzetektől a bázikusig terjedő szisztematikus változásain alapul. (*1. táblázat*). Az *1. ábra*

különböző nyomásokhoz tartozó ρ (V_p) összefüggéseket mutatja. Figyelembe kell venni, hogy ezek az egyenesek, a Nafe – Drake görbéhez hasonlóan, szórt adatpontok közelítését jelentik.

I. táblázat – таблица – Tabelle

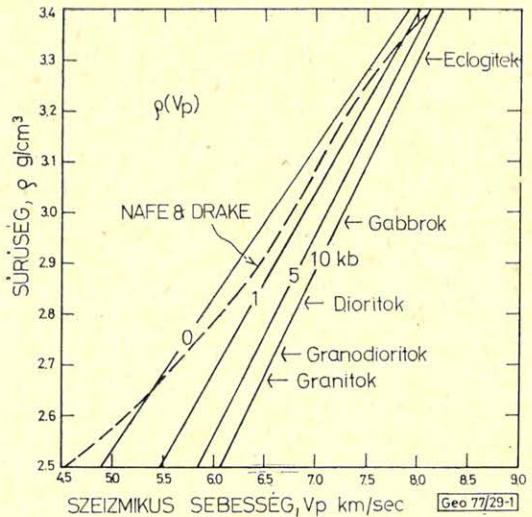
Átlagos sűrűségek (ρ), hőtermelési értékek (A) és kation tértöltési indexek (k) a legfőbb kristályos kőzetekre.

Rybach (1973b) és Buntebarth (1975) adatai

Средние плотности (ρ), значения производства тепла (A) и показатели наполнения катионами (k) для важнейших кристаллических пород. Данные Рыбаха (1973б) и Бунтебарта (1975)

Average densities (ρ), heat production values (A) and cation packing indices (k) of major crystalline rock types. Data from Rybach (1973b) and Buntebarth (1975)

Kőzetfajta	ρ (g/cm ³)	A		k · (10 ⁻¹² mol/cm ³)
		(HGÜ)	(μ W/m ³)	
Gránit	2,67	7,0	2,93	4,70
Granodiorit	2,72	3,6	1,50	4,85
Diorit	2,82	2,7	1,13	5,20
Gabbro	2,98	1,0	0,417	5,40
Eklogit	3,00	0,15	0,063	6,10



I. ábra.
Рис. 1.
Fig. 1.

Az exponenciális törvény

A 2. ábra az $A(V_p)$ összefüggést mutatja különböző nyomásokon. A féllogaritmikus ábrázolásban megjelenő egyes vonalak jelzik, hogy A V_p -vel exponenciális kapcsolatban van:

$$A(V_p) = a \cdot \exp(-b \cdot V_p), \quad (2)$$

ahol

a és b numerikus faktorok, melyeknek dimenziója (HGU) , illetve $(\text{km}/\text{sec})^{-1}$. Ezeknek a nyomástól való függését a II. táblázat mutatja.

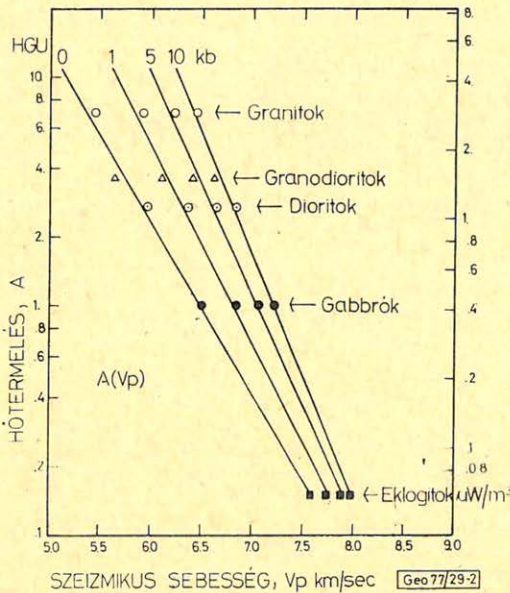
II. táblázat – таблица – Tabelle

A 2. egyenletben levő a és b számfaktorok nyomástól való függése a 2. ábra alapján

Зависимость численных факторов a и b в уравнении 2 от давления на основании рис. 2.

The pressure dependence of the numerical factors a and b in Equ. (2) as determined from Fig. 2

Nyomás (kb)	a	b
0	$7,90 \cdot 10^4$	1,735
1	$6,02 \cdot 10^5$	1,951
5	$5,29 \cdot 10^6$	2,193
10	$3,96 \cdot 10^7$	2,483



2. ábra.

Рис. 2.

Fig. 2.

A 2. ábrán bemutatott $A(V_p)$ összefüggés átalakításából keletkezik a 3. ábra azáltal, hogy a lithosztatikus nyomások helyett (kb-ban) a megfelelő mélységek (km-ben) kerültek az abcissa tengelyre. Az ábrából bármely adott $V_p(z)$ szerkezetre az $A(z)$ hőforrás-eloszlás kivehető. A 3. ábra görbéi azokat a mélységeket (és nyomásokat) tartalmazzák, amelyekhez kísérleti adatok állnak rendelkezésre (2. ábra); a vonalak azonban extrapolációval kiterjeszthetők nagyobb nyomásokra is.

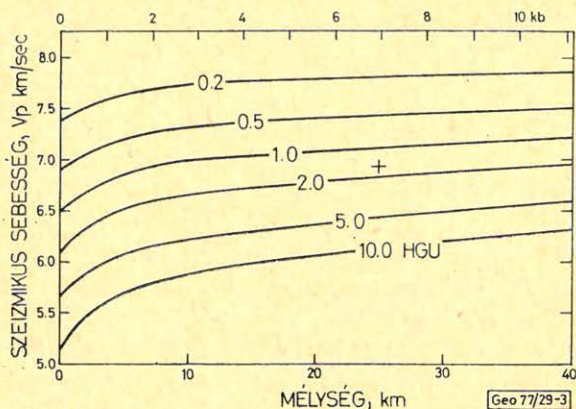
Elemzés

Több érv hozható fel arra vonatkozóan, hogy a kontinentális kéreg lecsökkent szeizmikus sebességű övezeteiben (kisebb sebességű kéregrétegek, melyeket először Mueller és Landisman 1966, és Landisman és Mueller 1966 említett), az $A(V_p)$ összefüggés nem érvényes. Az kis szeizmikus sebességek nagyobb hőtermelődéésre utalnak az alacsony sebességű rétegben. Ez azonban ellentmondásban lenne egyrészt a felszíni hőáram által adott feltételekkel, másrészt a köpeny hőáramával (lásd Rybach és munkatársai 1977.) Továbbá a radióizotópok hőtermelésének ilyenfajta eloszlása valószínűleg nem eléggé stabilis a köpeny nyomás-hőmérsékleti mezejében (Rybach 1976). Érdeemes megjegyezni, hogy Markis (1971) közleménye szerint a $\rho(V_p)$ összefüggés

3. ábra.

Рис. 3.

Fig. 3.



szintén nem érvényes az Alpok alacsony sebességű zónáiban. Az alacsony sebességű réteg tetejénél és talpánál nyert A értékekből interpolációval nyert hőtermelési értékek kielégíthetik a fent említett feltételeket.

Minthogy az 1. ábra a $\rho(V_p)$ vonalait szobahőmérsékleten határozzák meg, a hőmérsékletnek V_p -re való hatása (ami csupán néhány százalékot tehet ki) figyelembe veendő a 3. ábra használata előtt a $V_p(20^\circ\text{C})$ meghatározásával. A III. táblázatban $V_p(T)/V_p(20^\circ\text{C}) = f$ hányados néhány kőzettípusra van megadva.

III. táblázat – таблица – Tabelle

A hőmérséklet hatása V_p -re különböző kőzetekben. A $V_p(T)/V_p(20^\circ\text{C})$ értékek Fielitz (1971) és Buntebarth (1975) szerint

Влияние температуры на V_p в различных породах. Значения $V_p(T)/V_p(20^\circ\text{C})$ по Филиц (1971) и Бунтебарт (1975)

The effect of temperature on V_p for different rocks. $V_p(T)/V_p(20^\circ\text{C})$ values from Fielitz (1971) and Buntebarth (1975)

T ($^\circ\text{C}$)	Gránit	Gabro	Peridotit
200	0,995	0,995	0,996
400	0,979	0,983	0,985
600	0,948	0,965	0,973
800	—	(0,932)	(0,957)

Átmeneti összetételű kőzeteket a III. táblázat nem tartalmaz, a megfelelő értékek interpolációval határozhatók meg. Az eljárást a következő példa mutatja be: Meghatározandó a hőtermelési érték $z = 25$ km-re, ahol $V_p = 6,8$ km/sec értéket mértek (ez bázikus kőzetet jelez \approx gabró) kontinentális övezetben normális geotermikus viszonyokkal. Így az *in situ* hőmérséklet $T(25 \text{ km}) \approx 400$

$^{\circ}\text{C}$ -nak tételezhető fel. Így a III. táblázat alapján $V_p(20^{\circ}\text{C}) = V_p(400^{\circ}\text{C}) \frac{1}{f} = 6,8/0,983 = 6,92 \text{ km/sec}$. Ezekkel az adatokkal a hőtermelési érték $1,6 \text{ HGU}$ -nak olvasható le a 3. ábráról.

Következtetések

Kristályos kőzetekben az A hőtermelés szisztematikusan változik az V_p szeizmikus sebességgel az $5,0-8,0 \text{ km/sec}$ intervallumban (ami tartalmazza a legtöbb kéregkőzet fajtát) A csökken növekvő V_p -vel. Az empirikus úton megállapított összefüggés $A(V_p) = a \cdot \exp(-bV_p)$ jól illeszkedik a tapasztalati úton megállapított közepes A és V_p értékekhez. Kiindulva a földkéreg egy adott $V_p(z)$ sebesség eloszlásából, ami szeizmikus mérésekből meghatározható, az ennek megfelelő radióaktív hőforrás-eloszlás, $A(z)$ megkapható. Ez utóbbi alkalmas termikus modellek számítására, valamint a köpeny hőáramának meghatározására, ha a felszíni hőáram ismert.

Köszönetnyilvánítás

Ez a tanulmány a szerző 1976-os budapesti tartózkodása alatt készült. Köszönet jár azért az inspiráló légkörért, amiben a szerzőnek az Eötvös Loránd Tudományegyetemen (Stegena Lajos professzor és geotermikus munkacsoportja) része lehetett.

IRODALOM

- Adams, J. A. & Gasparini, P., 1970. Gamma-ray Spectrometry of rocks. Elsevier, Amsterdam
- Bateman, P. C. & Eaton, G. P., 1967, Sierra Nevada. Science 158, 1407–1417
- Birch, F. (1961): The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars. J. Geophys. Res. 66, 2199–2224
- Buntebarth, G., 1975. Geophysikalische Untersuchungen über die Verteilung von Uran, Thorium und Kalium in der Erdkruste sowie deren Anwendung auf Temperaturberechnungen für verschiedene Krustentypen. Diss. Univ. Clausthal
- Fielitz, K., 1971. Elastische Wellengeschwindigkeiten in verschiedenen Gesteinen unter hohem Druck und bei Temperaturen bis zu 750°C . Z. Geophys. 37, 943–956
- Gangi, A. F. & Lamping, N. E., 1971. An in situ method of determining the pressure dependence of phase-transition temperatures in the crust; in The Structure and Physical Properties of the Earth's Crust, ed. John G. Heacock, American Geophysical Union Geophysical Monograph 14, Washington, 185–190
- Landisman, M. & Mueller, S., 1966. Seismic studies of the Earth's crust in continents, 2, Analysis of wave propagation in continents and adjacent shelf areas. Geophys. J. R. astr. Soc. 10, 539–548
- Lebedev, T. S., Sapoval, V. I. & Korcin, V. A., 1974. Untersuchungen der Geschwindigkeit von elastischen Wellen in Gesteinen unter den thermodynamischen Bedingungen der tieferen Erdkruste. Veröff. Zentralinst. Phys. der Erde Nr. 22, 17–28, Postdam
- Makris, J. (1971): Aufbau der Erdkruste in den Ostalpen aus Schwerkermessungen und die Ergebnisse der Refraktionsseismik. Hamburger Geophys. Einzelschriften 15. De Gruyter & Co., Berlin
- Mao, N. H., 1974. Velocity-density systematics and its implications for the iron content of the mantle. J. Geophys. Res. 79, 5447–5454
- Mueller, S. & Landisman, M., (1966). Seismic studies of the earth's crust in continents, 1, Evidence for a low-velocity zone in the upper part of the lithosphere. Geophys. J. R. astr. Soc. 10, 525–538

- Nafe, J. E. & Drake, C. L.* (1959), in Talwani, M., Sutton, G. A. & Worzel, J. L.: A crustal section across the Puerto Rico Trench. *J. Geophys. Res.* 64, 1545–1500
- Press, F.* (1966). Seismic velocities, in Handbook of Physical Constants, ed. Sydney P. Clark, Geol. Soc. America Memoir 97, Washington, p. 197–218.
- Rybach, L.*, 1971. Radiometric Techniques, in Modern Methods of Geochemical Analysis, ed. Richard E. Wainardi & Ernst A. Uken. Plenum Press, New York, 217–318.
- Rybach, L.*, 1973a. Radioactive heat production of rocks from the Swiss Alps; geophysical implications. 1st European Geophysical Society Meeting, Zurich (Abstract)
- Rybach, L.*, 1973b. Wärmeproduktionsbestimmungen an Gesteinen der Schweizer Alpen. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Ser. Liefg. 51, Kümmerly & Frey Bern.
- Rybach, L.*, 1976a. Radioactive heat production; A physical property determined by the chemistry of rocks, in The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks, ed. R. G. J. Strend, Wiley & Sons, London
- Rybach, L.*, 1976b. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters. *PAGEOPH* 114, 309–318.
- Rybach, L.*, 1976c. Die Gesteinsradioaktivität und ihr Einfluss auf das Temperaturfeld in der kontinentalen Kruste. *J. Geophys.* 42, 93–101.
- Rybach, L., Werner, D., Mueller, S. & Berset, G.*, 1977 Heat flow, heat production and crustal dynamics in the Central Alps, Switzerland. *Tectonophysics* 41, 113–136
- Shankland, T. J.*, 1972. Velocity-density systematics: Derivation from Debye theory and the effect of ionic size. *J. Geophys. Res.* 77, 3750–3758
- Volarovich, M. p., Galdin, J. E. & Levikin, A. N.*, 1966. Study of the velocity of longitudinal waves in samples of extrusive and metamorphic rocks at pressures up to 20 kb. *Izvest., Earth Phys. Ser.*, no. 3, engl. transl., 15–23
- Volarovich, M. P., Kurskeyev, A. K., Tomashevskaya, I. C., Tuzova, I. L. & Urazayev, B. M.*, 1967. Relation between the longitudinal wave propagation velocity and the rock density at high hydrostatic pressures. *Izvest., Earth's Phys. Ser.*, no 5, engl. transl. 276–279
- Woollard, G. P.*, 1975. Regional changes in gravity and their relation to crustal parameters. Bureau Gravimétrique Intern., Bull. d' Inform. 36, 106–110

(Ford.: Kapitány S-né)

Lapszemle

Földtani Kutatás XX. évf. 1. sz. 1977.

Az Országos Földtani Ankét (Budapest, 1976 márc. 29–31., MÁFI előadásai, 1–59 old.

Cseh Németh József: Az ércbányászati kutatások célkitűzései és feltételei az V. ötéves tervben, 3–10 old.

Mátyás Ernő: A Tokaji-hegység ásványi nyersanyag-kutatásainak helyzete és perspektívái, 11–24 old.

Podányi Tibor: Technológiai kísérletek és vizsgálatok az ásványvagyongáz bázis bővítése érdekében, 25–27 old.

Gyurkó László: A mélyfúrásos kutatás feladatai és problémái az Országos Érc- és Ásványbányák vállalatnál, 28–35 old.

Jámbor Áron–Szabadváry László: A bauxit földtani előkutatásának feladatai, 36–37 old.

Fodor Béla: Ásványvagyongazdálkodási kérdések a bauxitbányászat gyakorlatában, 38–39 old.

Falu János: Az építőanyagipari nyersanyagkutatás feladatai, 40–45 old.

Fodor Tamásné: Részletes és átfogó mérnökgeológiai vizsgálatok és térképszerkesztés, 46–47 old.

Gabos György: A Földmérő és Talajvizsgáló Vállalat az építőipari nyersanyagkutatás bázisintézte, 48–49 old.

Székely István: A cementipari nyersanyagkutatással szemben támasztott követelmények, 50–52 old.

Várhegyi Győző: A bauxit ritkafém-tartalmának hasznosítása, 53–56 old.