

FURÓMAGOK KŐZETMECHANIKAI ÁLLANDÓINAK
DINAMIKUS MEGHATÁROZÁSA ÉS
ÖSSZEHASONLITÁSA A STATIKUS ADATOKKAL

Csókás János^{x)}

Bevezetés

Olyan ipari objektumok, mint amilyenek az aknák, vágatok, furólyukak, alagutak és más üregek, vagy az alapozásán keresztül a talajra terhelést okozó létesítmények, utak, vasutak, repülőterek, épületek, gátak, tartályok létesítésének tervezéséhez ismerni kell azoknak a talajoknak vagy kőzeteknek a mechanikai paramétereit, amelyekben a terhelések hatására feszültségek és deformációk keletkeznek. A kőzetmechanikai paraméterek ismeretében következtetések vonhatók le a létesítmények környezetének viselkedéséről és adatok határozhatók meg a tervezési és a méretezési számításokhoz.

A kőzetekre és a talajokra megengedhető terhelések és deformációk becslése céljából elsősorban a modulusok in situ meghatározásának van gyakorlati jelentősége. A kőzetek anizotrópiája miatt és azok rheológiai tulajdonságainak ismerete nélkül terheléssel módszerekkel a statikus modulusok csak túl nagy hibával határozhatók meg. A kőzetekből vett furómagok egy részét képező próbatesteken meghatározott mechanikai állandók csak a kőzettömeg egyes részeinek viselkedését jellemzik és csak a vizsgálati laboratórium körülményeinek megfelelő feltételek mellett. A vizsgálat próbatest a kőzetformációt nem modellezi sem méreteiben, sem szerkezeti felépítésében, sem hidrológiai sajátágaiban.

x) Nehézipari Műszaki Egyetem, Geofizikai Tanszék, Miskolc

A létesítmények legtöbbször statikusan, sok esetben azonban dinamikusan is hatnak a kőzettömegekre. Földrengések, robbantások és más rengetések, tartály-feltöltések és kiürítések, hajó zsilipelések például az általajlt dinamikusan is igénybe veszik.

A rugalmassági és szilárdsági állandók in situ vagy laboratóriumi statikus meghatározása hosszadalmas, költséges és pontatlan. Ezzel szemben a dinamikus meghatározás akár in situ, akár laboratóriumban gyors, pontos, sokkal kisebb költségbe kerül és - ami még fontosabb - a statikus módszer-nél sokkal nagyobb térfogatu kőzettömegekre vonatkozik, tehát jellemzőbb a vizsgált formációkra.

A dinamikus paraméterek azonban a kőzetek rheológiai sajátosságai miatt eltérnek a statikus értékektől, ugyanis dinamikus vizsgálati módszerek esetén a deformációk rugalmasaknak tekinthetők, a statikus méréseknél viszont a feszültség időtartamától és nagyságától is függenek, tehát az egymásnak megfelelő statikus és dinamikus állandók különbsége a kőzetek rheológiai jellegét is tükrözi.

Mivel a kőzetmechanikai paraméterek dinamikus meghatározása a statikusnál könnyebb, pontosabb és a kőzetformációra jellemzőbb, ezért célszerű összefüggéseket keresni az egymásnak megfelelő dinamikus és statikus modulusok között azért, hogy a dinamikus adatok statikus adatokká átszámíthatók legyenek, ha az utóbbiakra van szükség.

1. A kőzetmechanikai paraméterek

A mérnökgeológiai tervezésekhez általában a kőzetek mechanikai paraméterei közül azok Young-modulusát, nyirási modulusát, térfogati (kompresszió)-modulusát, Poisson-hányadosát, a nyomó-, a húzó- és a nyiró szilárdságát szokták meghatározni. A számításokhoz ismerni kell még a kőzetek térfogatsűrűségét, hézagterfogatát, a viztartalmát és a vízáteresztőképességi tényezőjét is.

Az izotróp közegek rugalmassági állandói között sok összefüggés ismeretes [1], így nem szükséges mindegyiket meghatározni, hanem csak azokat, amelyekből a többi a legpontosabban számítható ki.

Laboratóriumi és in situ módszereket a Young-, a nyirási- és a kompresszió-modulus, valamint a Poisson-hányados meghatározására dolgoztak ki. A térfogatsűrűség laboratóriumban térfogat- és tömegmérésből, in situ pedig sűrűség (gamma-gamma)-szelvényből nyerhető. A hézagtényező (porozitás) és az átteresztőképességi tényező (permeabilitás) is megmérhető az említett két körülmény között.

2. Furómagok dinamikus rugalmassági állandóinak meghatározása

Az állandók meghatározása a mérési adatokból olyan képletekkel történik, melyekben a térfogatsűrűség is szerepel. A furómagok csak akkor lehetnek a formációjukra jellemzők, ha úgy konzerválják, szállítják és úgy készítik elő a vizsgálatokra, hogy az in-situ állapotukat lehetőleg megtarthassák. Két kutatóhelyen egymástól függetlenül mért furómag-térfogatsűrűségek összehasonlítása az 1. ábrán látható. A mintákat a Nagyegyháza-63. sz. furásból vették és rosszul konzerválták, az egymásnak megfelelő értékek ezért térnek el lényegesen egymástól. Jól konzervált furómagok esetére, melyek a Mátyás-132. sz. furásból származnak, az összehasonlítást a 2. ábra mutatja. A két kutatóhelyen a térfogatsűrűségeket és a többi paramétert is kettő osztott furómagok makroszkopikusan egyformának látszóik egyik, illetve másik felén határozták meg. A két ábra összehasonlításából látható, hogy laboratóriumban egyszerűen és pontosan mérhető térfogatsűrűségek megbízhatóságára is nagy gondot kell fordítani. A rosszul konzervált mintáknál az eltéréseket a furómagok nedvességtartalmának csökkenése okozta, ugyanis kevés kivétellel ott kaptak nagyobb értékeket, ahol a mérések korábban történtek.

A dinamikus Young-modulus meghatározására készült berendezés egy alacsonyfrekvenciás generátorból, egy feszültségmérőből, egy oszcilloszkópból, valamint a kőzetmérő tartóból áll. A furómagok két véglapját párhuzamosan fűrészelve, majd m tömegét, l hosszúságát és d átmérőjét megmérve, azok a tartóba kerülnek úgy, hogy középen három csavar rögzíti a palástnak szorítva egymástól 120° -ra. A minta alsó lapjához illeszkedik a generátor által rezgésbe hozott piezoelektromos, kerámia korong, a felső lapjához pedig a minta dilatációs rezgés-amplitudóját érzékelő detektor. Az utóbbihoz csatlakozik a voltmérő, amelynek kitérése a minta dilatációs rezgési amplitudójával arányos, továbbá az oszcilloszkóp, amelyen a rezgési folyamat látható.

A generátor frekvenciáját változtatva a voltmérő a furómag (f_1) dilatációs rezonancia-frekvenciájánál mutat maximális kitérést.

Az N-63. és N-68. sz. furásból származó néhány furómag rezonancia görbéje és a (-3dB) csillapításhoz tartozó sávszélességek a 3. ábrán láthatók. A furómagok felsorolt adataiból a dinamikus Young-modulus a következő módon határozható meg [2] :

$$\rho_d = \frac{4m}{\sqrt{d^2 l}} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1), \text{ a kőzet térfogatsűrűsége}$$

$$V_d = 2lf_1 \quad (\text{m/s}) \quad (2), \text{ a dilatációs hullám sebessége}$$

$$E_d = V_d^2 \cdot \rho_d \quad (\text{N/m}^2) \quad (3), \text{ a dinamikus Young-modulus,}$$

tehát

$$E_d = 5,093 \cdot m \cdot l \cdot d^{-2} \cdot f_1^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (4)$$

A dinamikus Poisson-hányados meghatározására szeizmoszkóp készült, amely impulzusgenerátorból, feszültségmérőből, időmérő oszcilloszkópból és a rezgéssebességmérő mintabefogóból áll. Az impulzusgenerátor a furómag egyik véglapjához illesztett piezoelektromos kerámia korong útján mechanikai kompressziós impulzusokat kelt a minta hozzá illesztett védőlapján. Az impulzusok az l hosszúságu mintán t idő alatt haladnak át. Az impulzus beérkezése a minta másik véglapján egy hasonló piezokerámia korongban elektromos feszültségimpulzust kelt. A mechanikai impulzus indulása és beérkezése között eltelt t idő az időmérő oszcilloszkópon olvasható le. A csővoltmérő az impulzus generátor és az oszcilloszkóp működésének ellenőrzésére szolgál. Az eszköz mérési pontosságát és hitelesítését etalon-anyagokon, alumínium, sárgaréz, acél és plexirudakon lehet ellenőrizni.

A kompressziós hullám sebessége

$$v_p = \frac{l}{t} \quad (\text{m/s}) \quad (5)$$

A dinamikus Poisson-hányados pedig:

$$\sigma_d = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1-e}{2e} + \left[\left(\frac{1-e}{2e} \right)^2 - 4 \frac{1-e}{2e} \right]^{1/2} \right\} \quad (6)$$

egyenletből számítható, ahol

$$e = \frac{v_p^2 \cdot \sigma_d}{E_d} \quad (7)$$

azaz

$$\sigma_d = f_1^2 t^2 - 0,25 + \left[f_1^4 t^4 - 2,5 \cdot f_1^2 \cdot t^2 + 0,5625 \right]^{1/2} \quad (8)$$

A furómagok rheológiai tulajdonságaira jellemző az η_j veszteségi tényező, illetve reciproka, a Q jósági tényező, mely a dilatációs rezonancia-frekvencia mérésével együtt meghatározható. Ugyanis

$$\eta_j = \frac{1}{Q} = \frac{\Delta f}{f_1} = \operatorname{tg} \delta \quad (9)$$

ahol Δf az f_1 frekvencia (-3dB) csillapításának megfelelő sáv szélesség (3. ábra). A δ veszteségi szög a dilatációs feszültség és a deformáció közötti fáziskülönbséget jelenti konstans rezgési állapot esetén.

A dinamikus Young-modulus és Poisson-hányados ismeretében a dinamikus nyirási modulus, melyet Lamé-, illetve merevségi állandónak is neveznek, az alábbi képletből számítható:

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \nu_d)} \quad (\text{N/m}^2) \quad (10)$$

A kompressziós hullám sebességéből a nyirási modulus:

$$G_d = V_p^2 \cdot \rho_d \frac{1 - 2\nu_d}{2(1 - \nu_d)} \quad (\text{N/m}^2) \quad (11)$$

3. A statikus és a dinamikus közetmechanikai állandók kapcsolata

A szakirodalomban található olyan regressziós egyenletek, amelyek a statikus és a dinamikus mérési adatokból számított közetrugalmassági állandók között fejeznek ki tapasztalati összefüggéseket [3; 4]. Találhatóak a furómagokon laboratóriumban és a furólyukban in situ mérésekből kapott dinamikus rugalmassági állandók egymás közötti kapcsolatáról szóló közlemények is [5].

A statikus és a dinamikus modulusok közötti összefüggések vizsgálata során felvetődött az a gondolat, hogy az összefüggések egyik változója a dilatációs rezgések f_1 rezonancia frekvenciája lehet.

A dinamikus Young-modulus és a rezonancia frekvencia között például feltehető az alábbi összefüggés:

$$E_d = E'_s \left[1 + \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^{3/2} \right] \quad (12)$$

ahol f_0 egy "karakterisztikus frekvencia" [6]. Az f_1/f_0 hányados a tehetetlenségi és a viszkózus erők hányadosának felel meg és a rezgő mozgás Reynolds-számának fogható fel. E'_s az $f_1=0$ frekvenciához tartozó Young-modulus, amely megfelel annak az E_s statikus modulusnak, amely az f_1 dilatációs rezonanciás rezgés amplitudójával megegyező statikus deformációhoz tartozik. Ez a felfogás azért ésszerű, mert a kőzet rezgési deformációja a dilatációs frekvencia zérus felé csökkenésével dinamikusból egy statikus határérték felé közeledik.

Az E_d , f_1 és f_0 ismeretében (12) alapján E'_s "statikus Young-modulus" kiszámítható. Ez az összefüggés azonban E'_s meghatározására csak f_0 értékének birtokában használható.

Az Mát-132. sz. furásból származó furómagok egyik felének dinamikus, a másik felének pedig statikus módszerrel meghatározott Young-modulusai E_d/E_s hányadosát az f_1 rezonancia frekvencia függvényében a 4/a. ábra mutatja. Laza homoknak minősített furómagokra $f_0 = 475$ Hz, márgákra és tömör homokkövekre $f_0 = 2157$ Hz karakterisztikus frekvenciát választva az egyik kutatóhelyen dinamikus mérési adatokból számított E'_s "sztatikus Young-modulus"-ok közelítőleg megegyeznek a másik kutatóhelyen sztatikussal kapott E_s sztatikussal kapott E_s Young-modulusokkal, amint a 4/b. és 4/c. ábrákon látható.

A (12) egyenletből kitűnik, hogy a furómagok szokásos méreteinél, kötöttebb kőzetek esetében, ahol több kHz az f_1 dilatációs rezonancia-frekvencia, f_0 értékének pontossága E'_s értékét nem nagyon befolyásolja. Az f_0 -ra közelítő pontossággal felvett adattal számítva a dinamikus uton kapott E'_s jól megegyezik az E_s statikus Young-modulussal.

Az f_0 karakterisztikus frekvenciák közelítő értéktartományai a vizsgált eocén összletben a következők lehetnek:

Kőzet	f_0 (Hz)
Laza homokok	450-600
Homokok	1100-1300
Homokkövek, márgák	2100-2300

A dinamikus nyirási modulus a (11) egyenletből a térfogatsűrűség, a kompressziós hullámsebesség és a dinamikus Poisson-hányados ismeretében kiszámítható. A dinamikus és a statikus Young-modulusok között a (12) összefüggéshez hasonló kapcsolatot a dinamikus és a statikus nyirási modulusok között is feltételezhető, azaz

$$G_d = G'_s \left[1 + \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^{3/2} \right] \quad (13)$$

ahol G'_s a dinamikus mérésekből kapott dinamikus nyirási modulusból a karakterisztikus frekvenciára redukált "statikus nyirási modulus".

A (13) összefüggés érvényességének vizsgálatára a másik kutatóhelyen meghatározott σ_c egytengelyű nyomószilárdság értékek nyújtották az alább leírt lehetőséget úgy, hogy végül egy olyan egyenlet is adódott, amellyel a dinamikus mérési adatokból az egytengelyű nyomószilárdság értéke kiszámítható, illetve egy becslési érték megadható.

A Huber-Miseses-Hencky-féle törési elmélet szerint a "megengedhető tapasztalati fajlagos tiszta alakváltozási munka" λ_o határértékénél következik be az anyag tönkremenetele [7]. Ez a határérték a mechanikai állandókkal az alábbi módon fejezhető ki.

$$\lambda_o = \frac{1+\nu_s}{\nu_s} \frac{2\sigma_o^2}{6E_s} = \frac{\sigma_o^2}{6G_s} \quad (14)$$

ahol $\nu_s = 1/\sigma_s$ a Poisson-hányados reciproka (Poisson-szám). Ismeretes, hogy a (10)-hez hasonló egyenlet a megfelelő statikus mennyiségek között is érvényes. A (10) és (14) egyenletbe a $\sigma_o = \sigma_c$ megmért egytengelyű nyomószilárdságot, az E_s statikus uton megmért Young-modulust és σ_s statikus Poisson-hányadost behelyettesítve λ_o a σ_c mért értékek függvényében kiszámítható. Az Má-132. sz. furásból vett furómagok értékei az 5. ábrán láthatók.

A kiegyenlítő egyenes egyenlete:

$$\lambda_o = 3,2 \cdot 10^{-4} \sigma_c^{0,7} \quad (15)$$

A (14) és (15) egyenletek jobb oldalát egyenlővé téve az egytengelyű nyomószilárdság és a statikus nyirási modulus között a következő összefüggés kapható:

$$\sigma_c = 4,43 \cdot 10^{-3} \left(\frac{E_s}{1+\sigma_s} \right)^{0,76} = 7,6 \cdot 10^{-3} G_s^{0,76} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (16)$$

A (16) egyenletnek a Má-132. sz. furásból vett furómagok statikusan mért σ_c és számított G_s értékei a 6. ábrán látható módon tesznek eleget. A Má-133. sz. furásból vett furómagok G_s statikus nyirási modulusából (16)-tal számított és a mért σ_c egytengelyű nyomószilárdsága kapcsolatát a

7. ábra mutatja. A 6. és a 7. ábrából látható, hogy a (16) egyenlet σ_c és G_s között elég szoros kapcsolatot fejez ki.

Tételezzük fel, hogy a (13) egyenlethől kiszámítható G'_s nyirási modulus esetén is érvényes a dinamikus módszerrel kapott E'_s "statikus Young-modulusra" vonatkozó megállapítás, vagyis jó közelítéssel megegyezik a statikus nyirási modulussal, azaz $G'_s = G_s$. Ezzel mód nyílik azt megvizsgálni, hogy a mért σ_c nyomószilárdságok és a hozzájuk tartozó G'_s nyirási modulusok között is fennáll-e a (16) egyenlet szerinti összefüggés.

Az Má-132. és az Má-133. sz. furásból vett furómagok G'_s és σ_c értékeit egymásnak megfelelően felhordva a 8. ábra mutatja. A regressziós egyenlet:

$$\sigma_c = 5,1 \cdot 10^{-3} G_s^{0,68} \quad (\text{N/m}^2) \quad (17)$$

A (16) és (17) egyenleteket összehasonlítva látható, hogy köztük elég nagy a hasonlóság annak ellenére, hogy a σ_c értékeket az egyik kutató helyen a furómagok egyik feléből kivágott kis darab mintákon határozták meg, a G'_s értékeket pedig a másik kutató helyen a furómagok másik fele teljes tömegének dilatációs és kompressziós rezgései méréséből kapták. A furómagok térfogatsűrűsége, a kompressziós hullámok sebessége és a dinamikus nyirási modulusok ismeretében a K_d dinamikus kompressziós modulusok is kiszámíthatók, ugyanis

$$K_d = \frac{\rho d}{t_p} - \frac{4}{3} G_d \quad (\text{N/m}^2) \quad (18)$$

ahol t_p a kompressziós hullámok egységnyi hosszúságu távolságra eső futási idejét jelenti.

Összefoglalva: Furómagok dinamikus rugalmassági állandói a teljes térfo-
gatukra vonatkozóan egyszerűen, gyorsan és pontosan meghatározhatók.

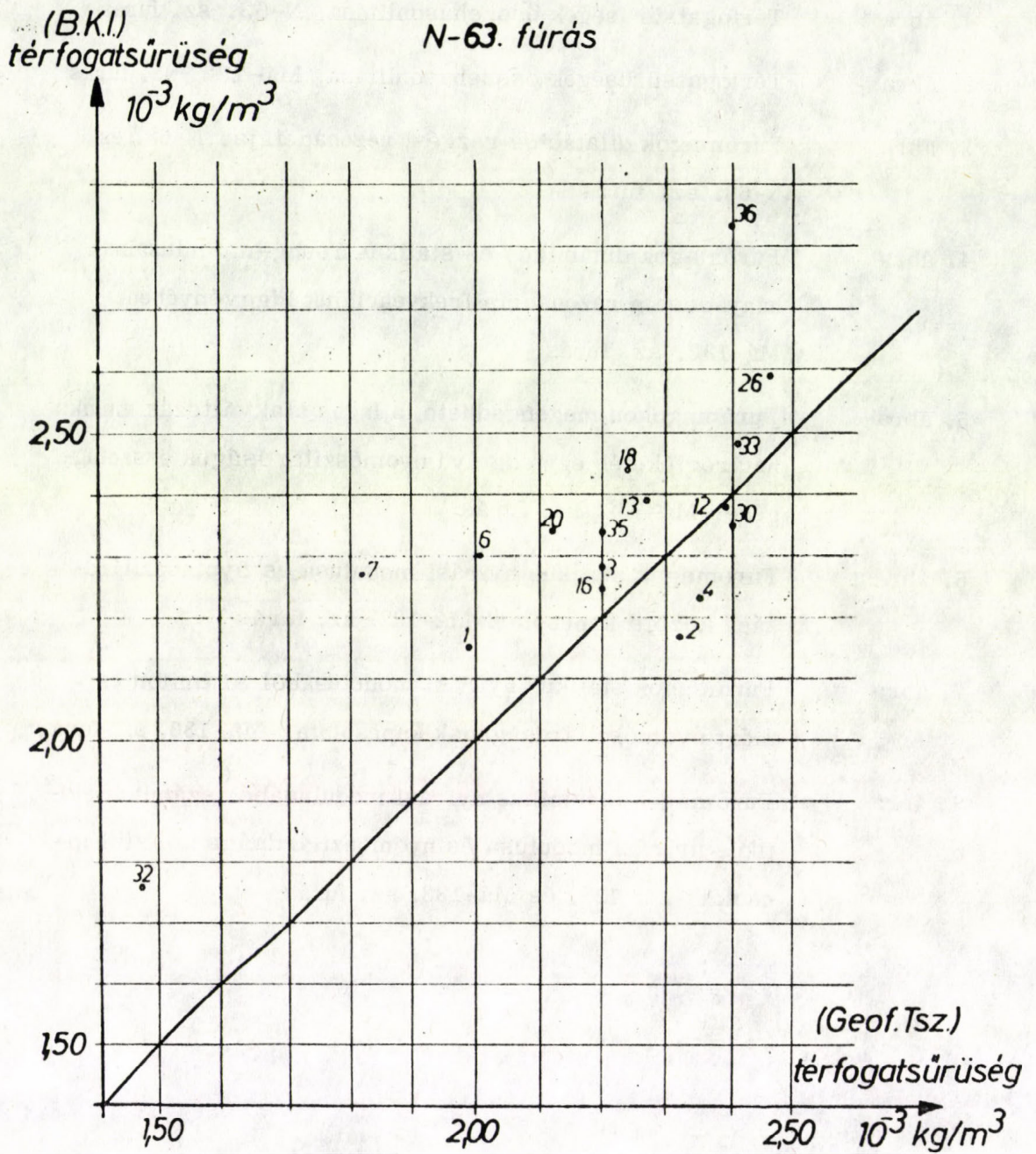
A dinamikus és a statikus állandók között egy kőzetprovinciára függvény szerű
kapcsolatok állíthatók fel. A dinamikus és a statikus állandók különbsége a
minták rheológiai tulajdonságára jellemző. A dinamikus adatokból a nyomó-
szilárdság is számítható, vagy közelítő értéke becsülhető.

Irodalom

1. Schreiber, E. et al.: Elastic constants and their measurement. Mc-Graw-Hill Book Co. New-York, 1973.
2. Heiland, C. A.: Geophysical Exprolation. Prentice-Hall, Inc. New-York, 1946. p. 463.
3. Oyo-Technical Note, TN-14, Oyo Co., Tokyo, 1976. Nov.
4. Jesch A.: Kőolaj- és Földgáz (BKL) 1976. 6. sz.
5. Myung, J.I. and Helander, D.P.: Correlation of elastic moduli dynamically measured by in-situ and laboratory techniques. SPWLA Reprint Vol. Acoustic Logging, March, 1978. SPWLA, Inc, Houston. p. F-1-25.
6. Geerstma, J.: Velocity log interpretation: The effect of rock bulk compressibility. u.o. p. B-237.
7. Palotás L.: Mérnöki Kézikönyv I. 2. kiadás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1956. 516. old.

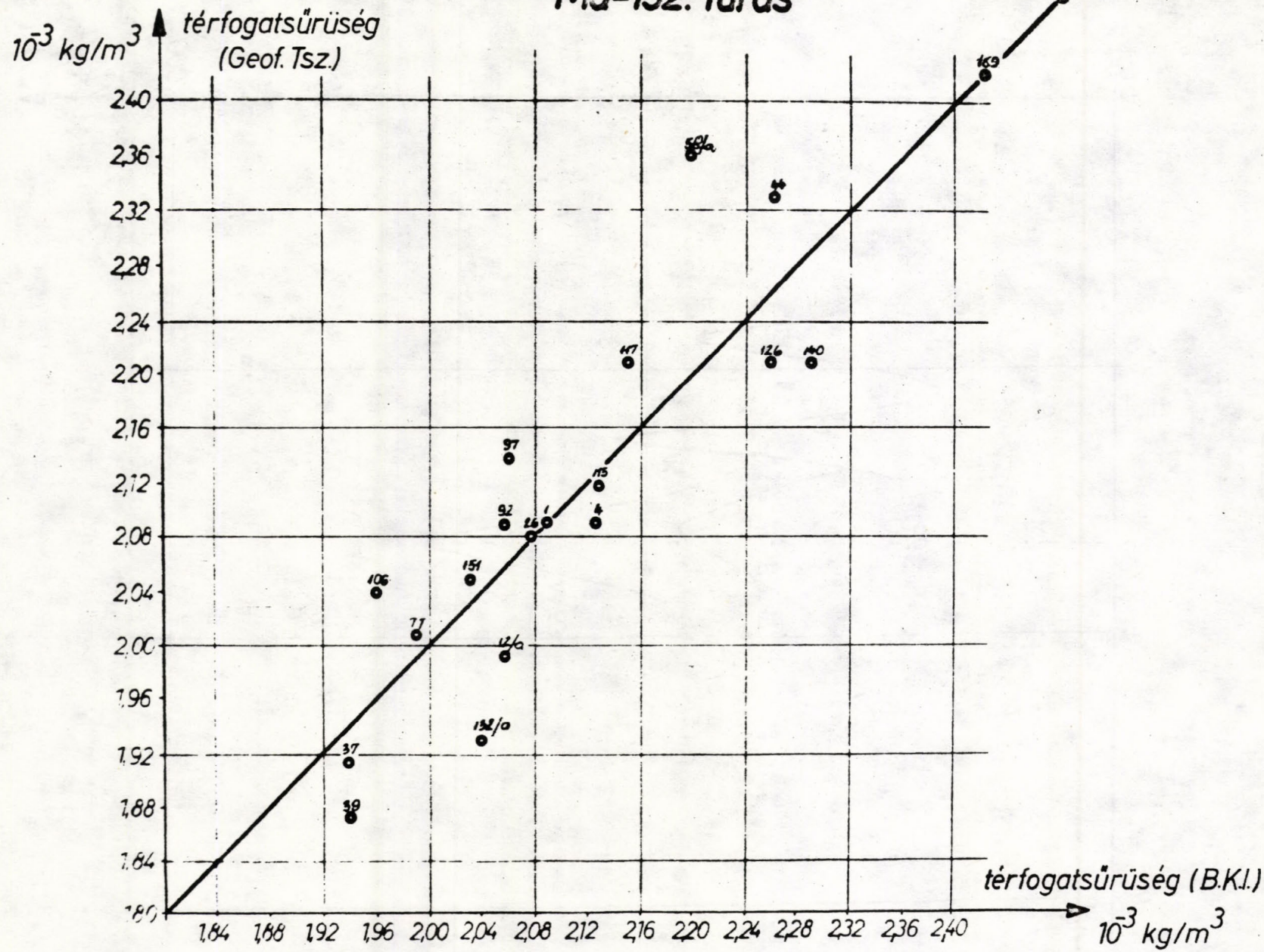
Ábrajegyzék

1. ábra Térfogatsűrűségek összehasonlítása, N-63. sz. furás
2. ábra Térfogatsűrűségek összehasonlítása, Má-132. sz. furás
3. ábra Furómagok dilatációs rezgési rezonanciája. N-63. és N-68. sz. furás
4. ábra Furómagok dinamikus és statikus Young-modulusainak hányadosa a rezonancia frekvenciájuk függvényében. Má-132. sz. furás
5. ábra Furómagokon megengedhető fajlagos alakváltozási munka határértéke és egytengelyű nyomószilárdságuk összefüggése. Má-132. sz. furás
6. ábra Furómagok statikus nyirási modulusa és nyomószilárdsága közötti kapcsolat. Má-132. sz. furás
7. ábra Furómagok statikus nyirási modulusából számított és mért nyomószilárdságának kapcsolata. Má-133. sz. furás
8. ábra Furómagok dinamikus nyirási modulusából számított statikus nyirási modulusa és nyomószilárdsága közötti kapcsolat. Má-132. és Má-133. sz. furás

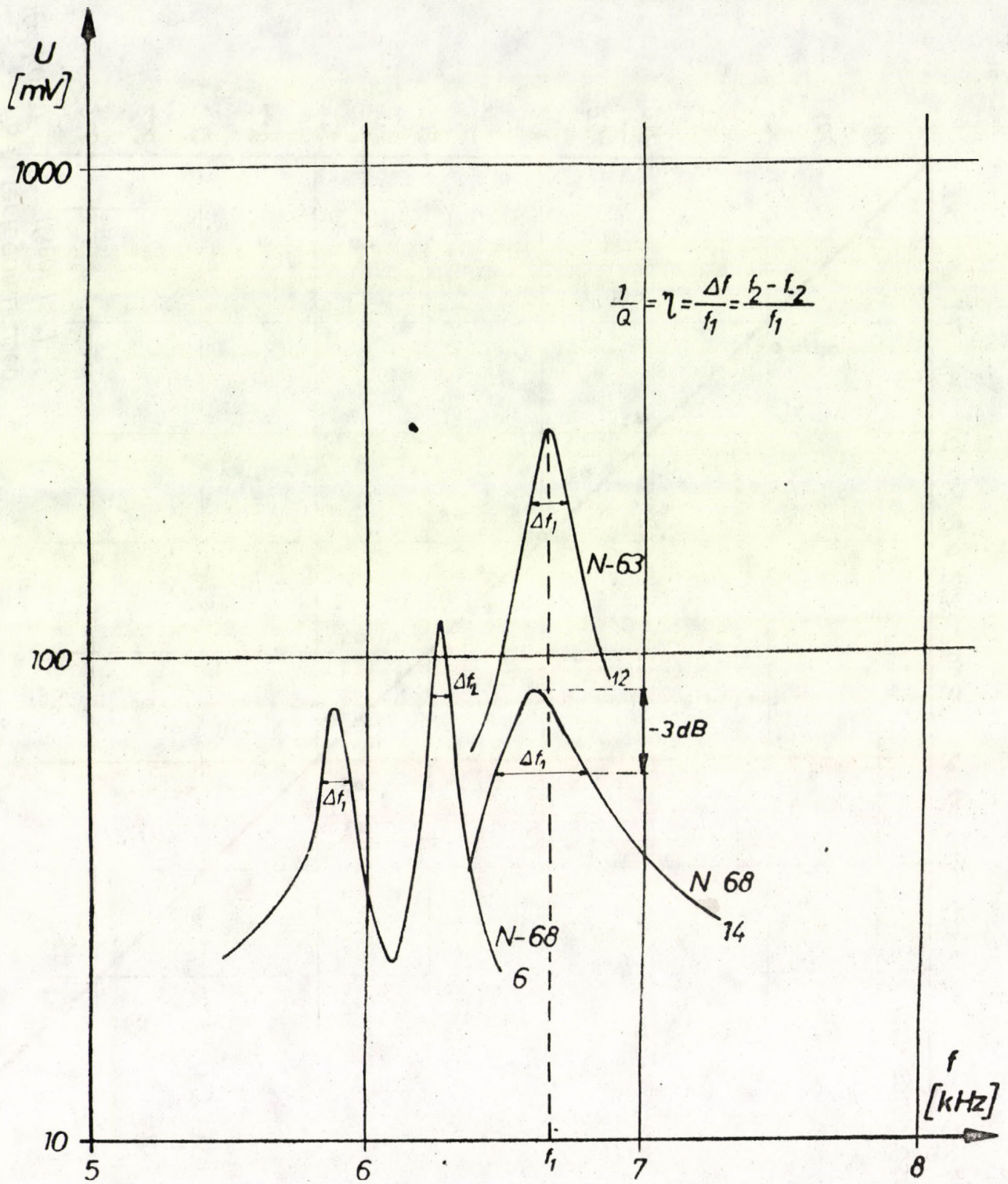


1. ábra

Má-132. fúrás

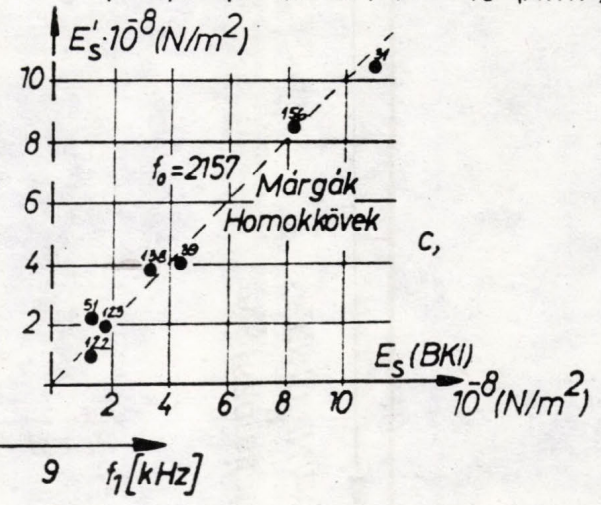
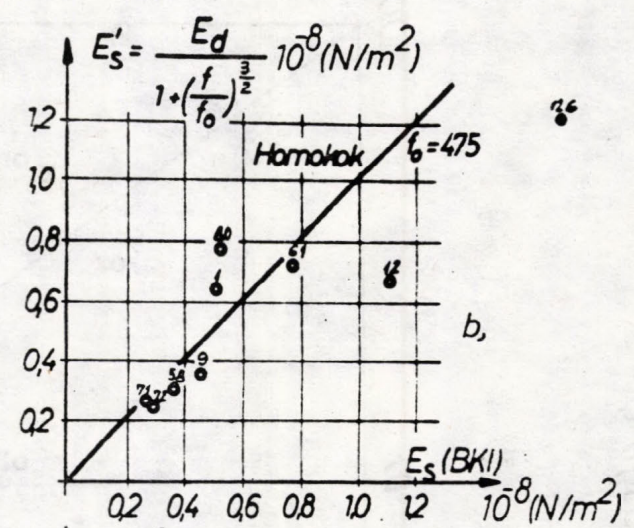
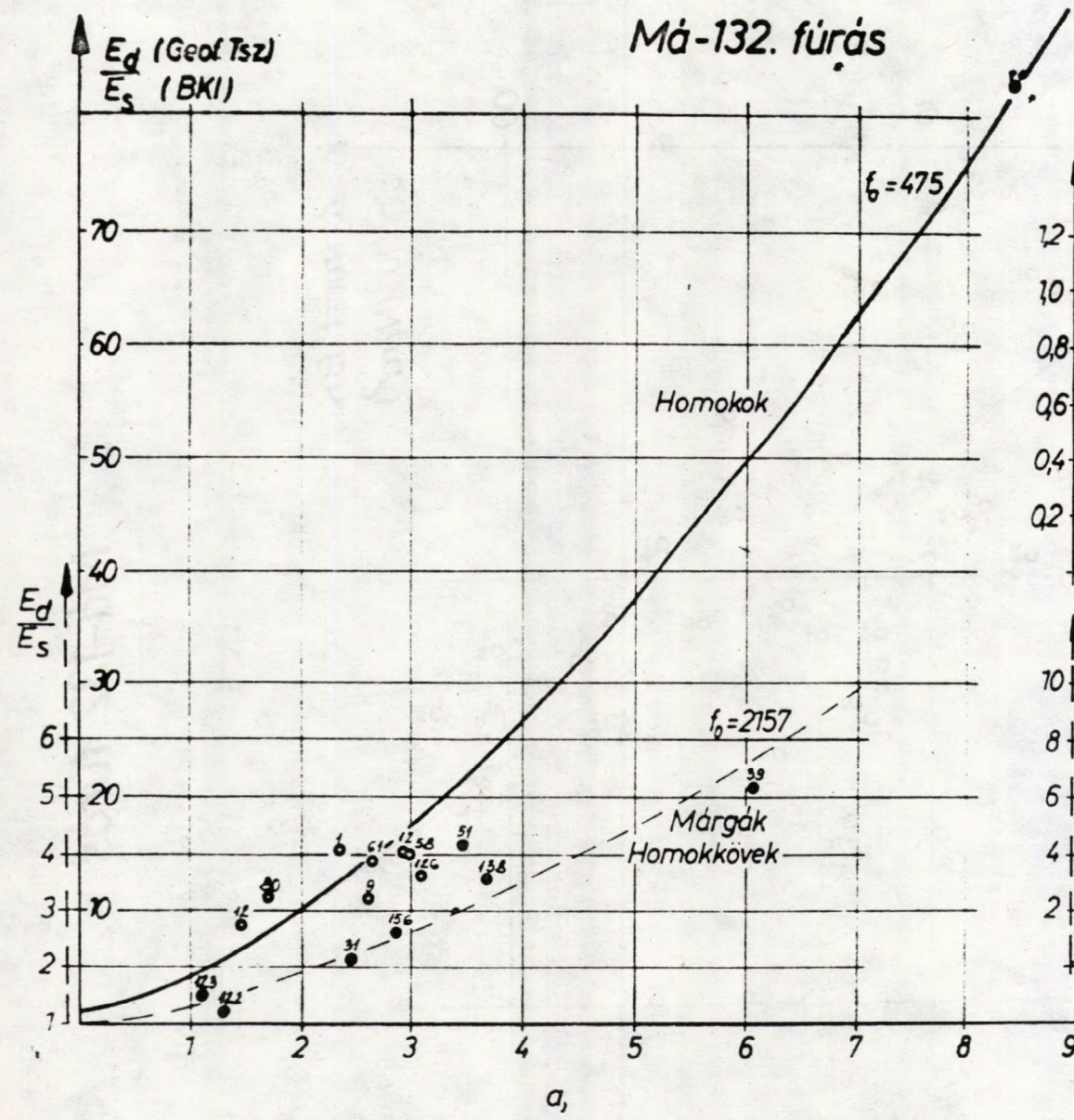


2. ábra



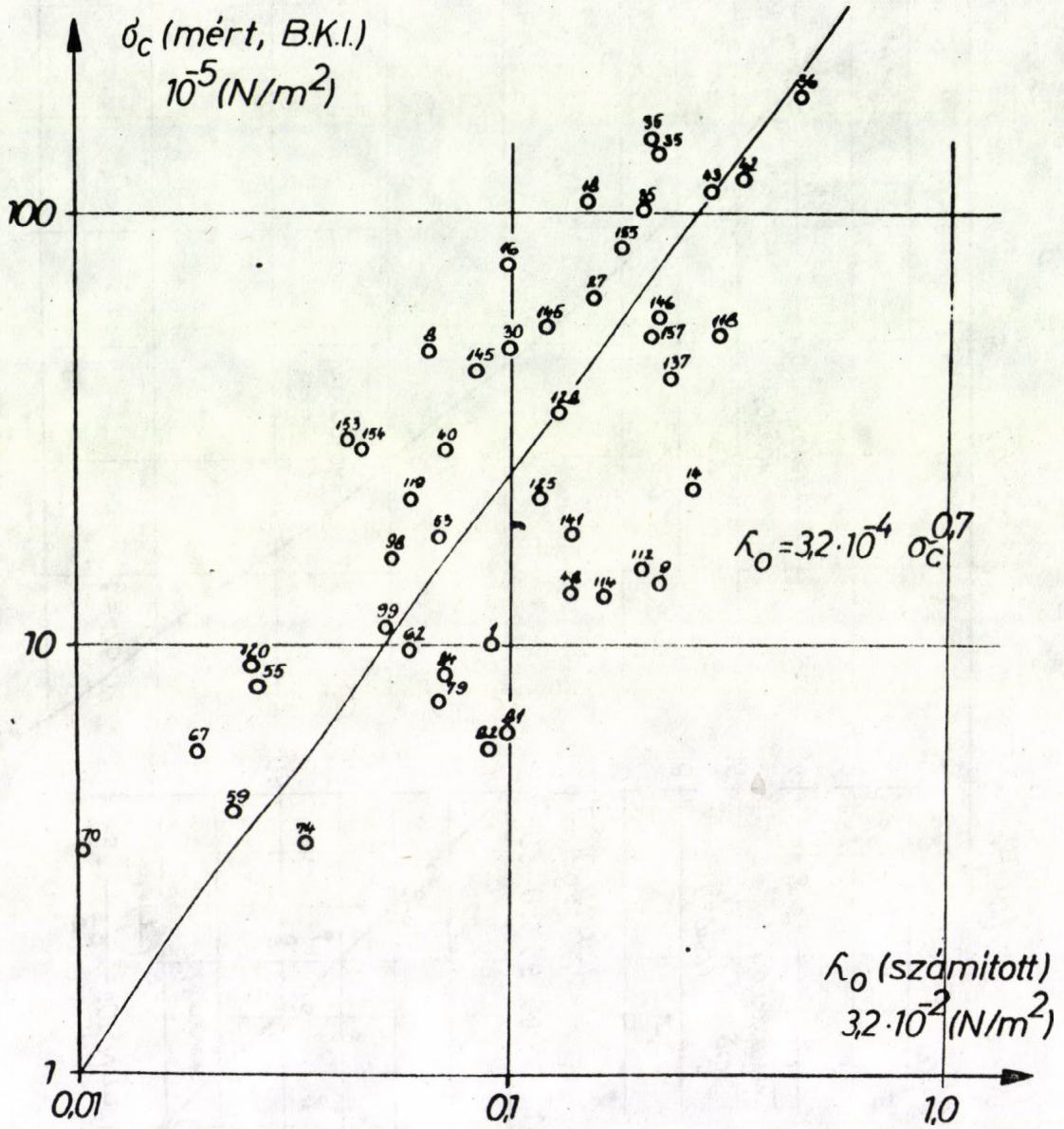
3. ábra

Má-132. fúrás



4. ábra

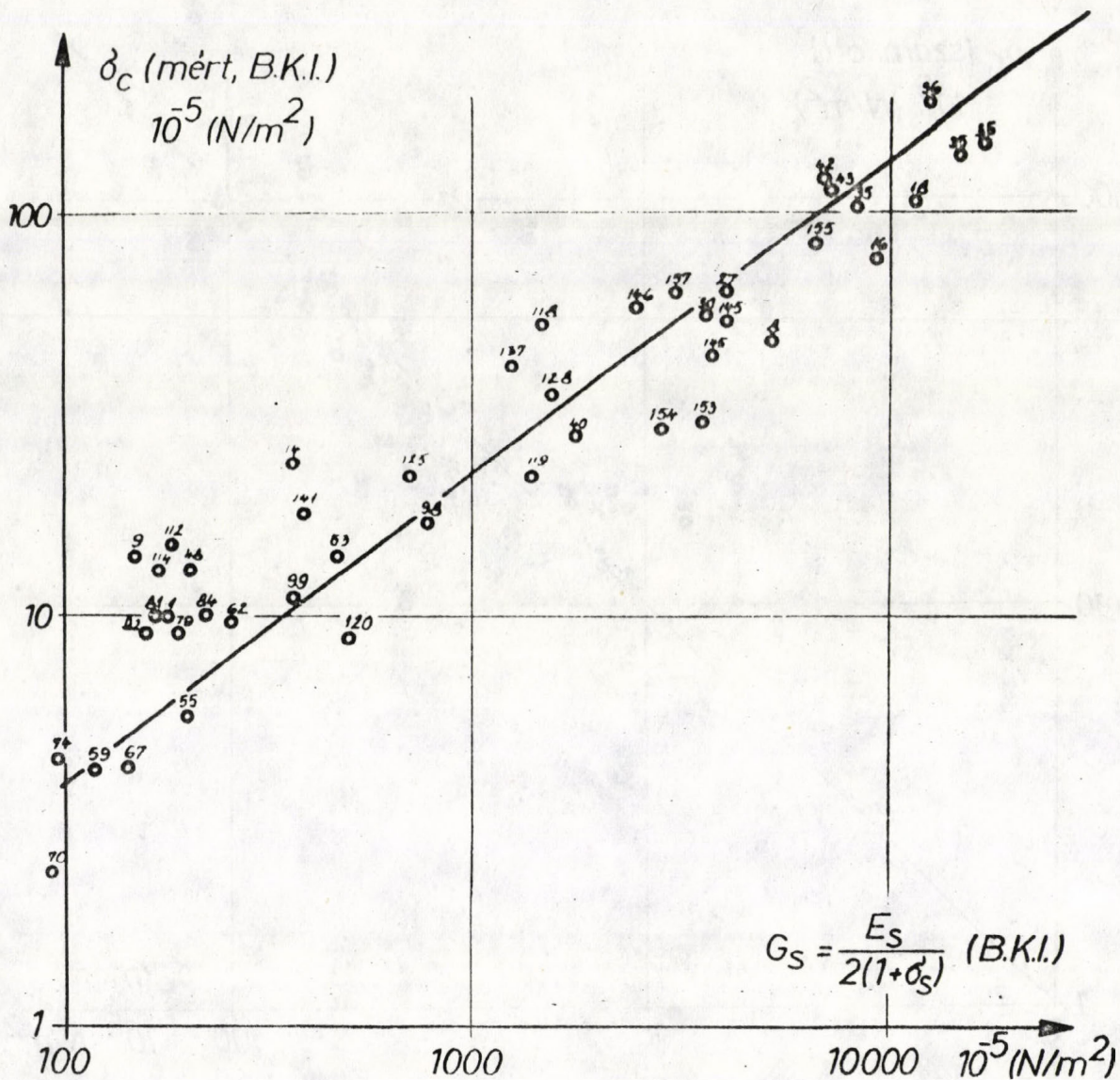
Má-132. fűrés



5. ábra

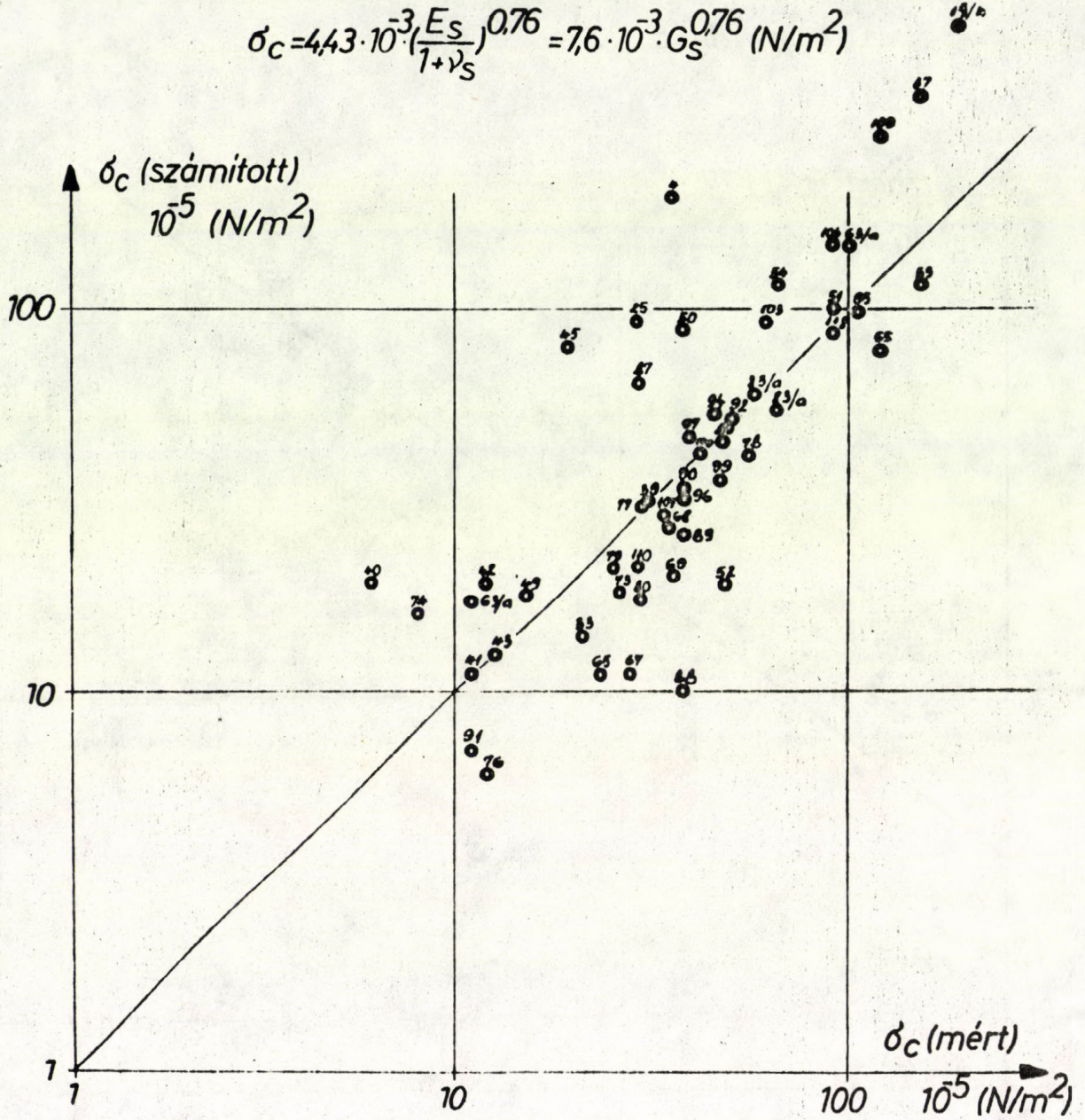
Má-132. fúrás

$$\sigma_c = 5,1 \cdot 10^{-3} \cdot G_s^{0,76}$$

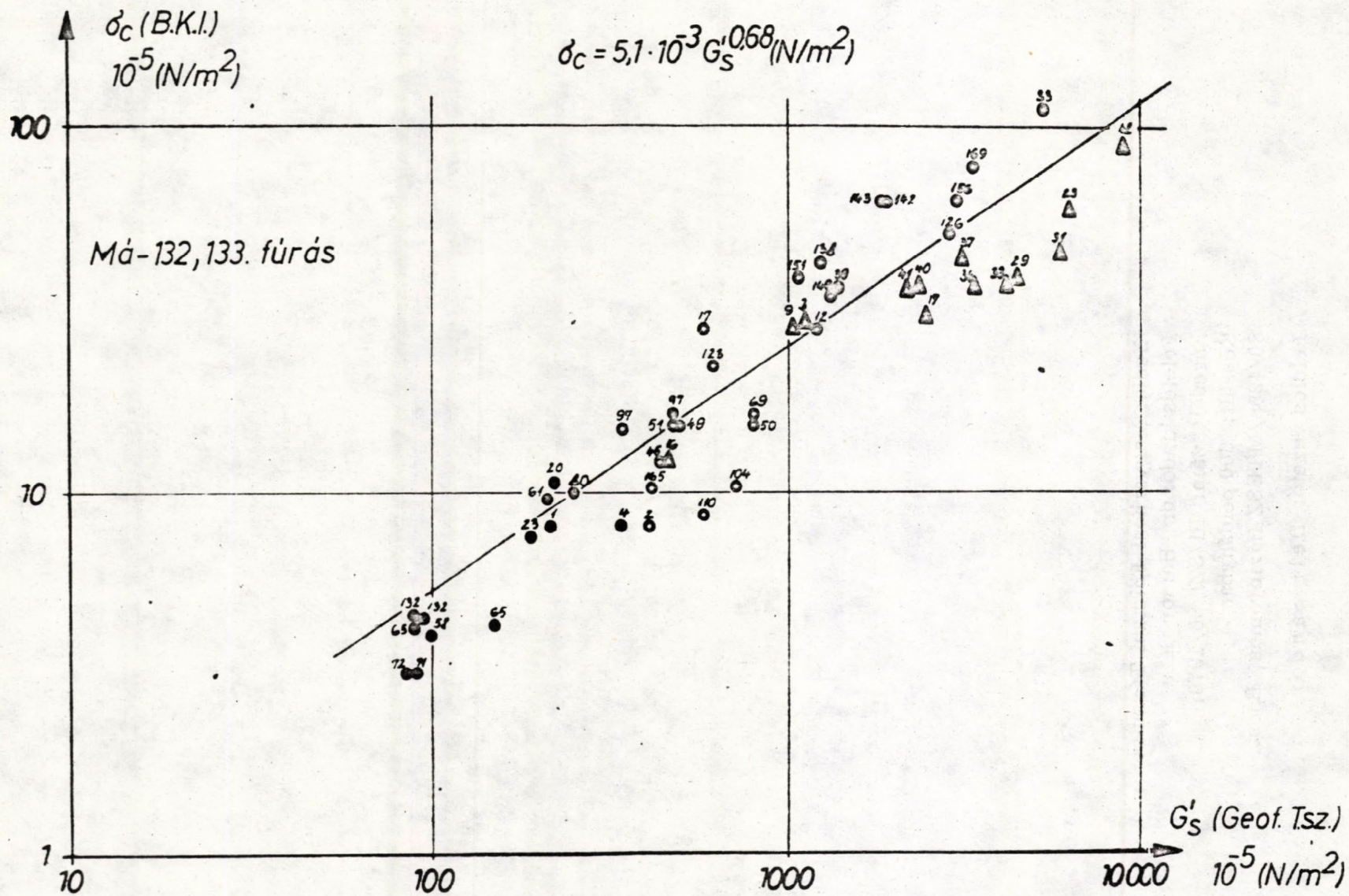


Má-133. fúrás

$$\sigma_c = 4,43 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{E_s}{1 + \nu_s} \right)^{0,76} = 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot G_s^{0,76} \text{ (N/m}^2\text{)}$$



7. ábra



8. ábrá

Kiadja: Magyarhoni Földtani Társulat
Felelős kiadó: dr. Hámor Géza
Engedélyszám: III/SZI/86/1976.
Készült: 600 példányban
80/4258/MTESZ Házinyomda, Bpest.
Felelős vezető: Deli Sándor