Viszkoziméteres mérések alkalmazási lehetőségei a talajmechanikai vizsgálatokban

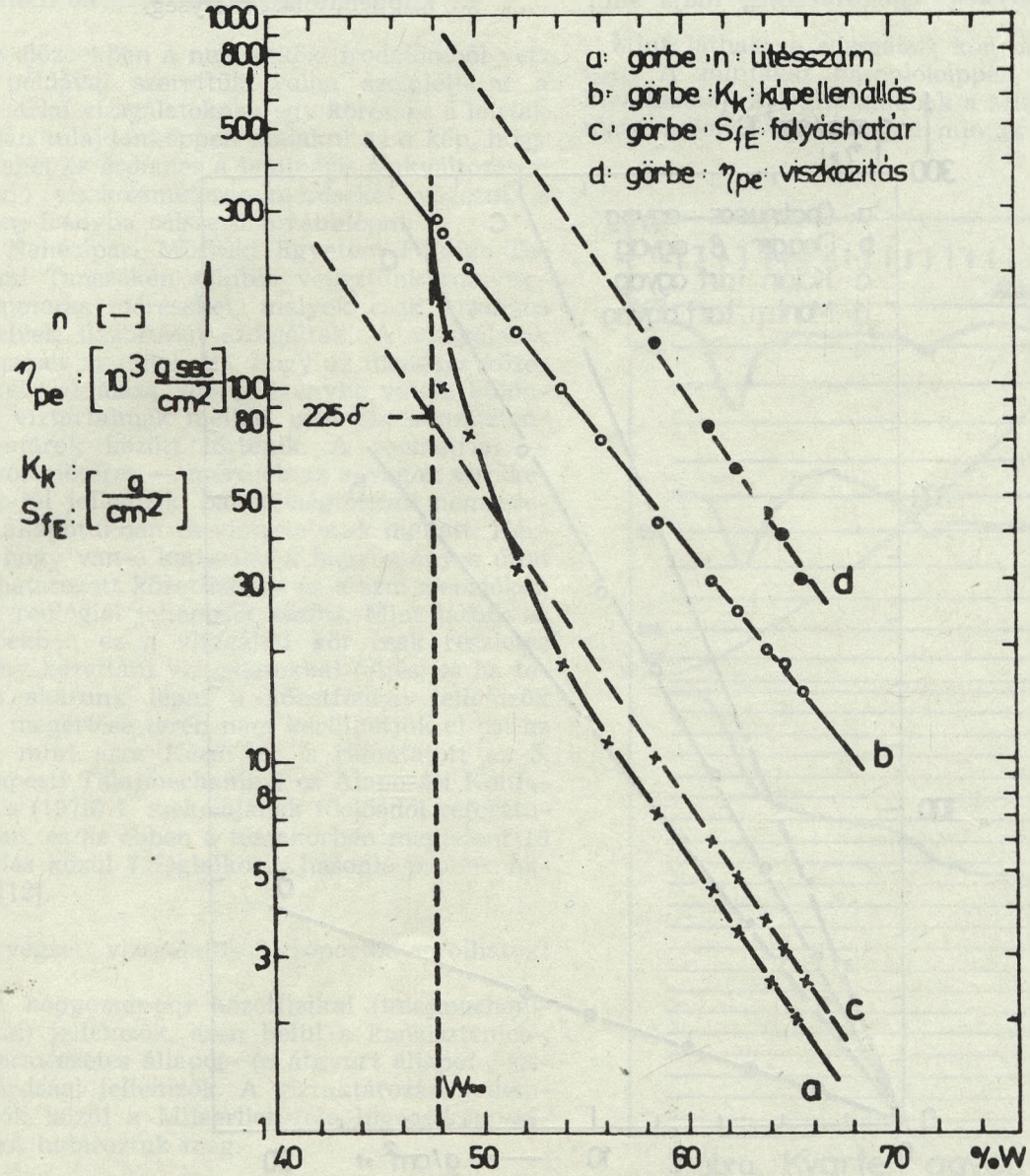
SZABÓ IMRE—
VIRÁGH GYULÁNÉ

A kapillláris viszkoziméterek alapelveit *Hagen—Poiseuille* állapították meg, s a legalaposabban kidolgozott készüléktípusok. A hidrodinamikai viszonyok teljesen tisztázottak, itt lehet a kísérleti körülményeket legpontosabban körülírni és meghatározni [1], mindezek ellenére laza, üledékes kőzetek szuszpenzióinak vizsgálatára nem váltak be [2]. Viszkoziméteres méréseknél a leggyakrabban alkalmazott készüléktípusok a *rotációs viszkoziméter*ek. Működési elvük szerint két típust különböztethetünk meg:

a) *Couette típusú:* külső henger forgatva

b) *Searle típusú:* belső henger forgatva.

Talajmechanikai gyakorlatban mindkettőt egyaránt alkalmazzák, egyébként gyakorlati okoknál fogva újabban egyre inkább a Searle



1. ábra Dogger-β-agyag (LANGER nyomán)

típusú készülékek terjednek. Számunkra elsődleges felhasználási területe: az általános Bingham testként viselkedő anyagok vizsgálata. Magyarországon elsőként *Szilvágyi I.* [2] foglalkozott agyagok ilyen típusú vizsgálatával. Kísérleteit Rheotest-készülékkel végezte, s lényeges eredményként adódott, hogy a reológiai folyáshatás ($\triangle \tau$) és a plasztikus index (I_p) között kapcsolat van.

A téglaanyagok képlékenységének jobb jellemzése céljából kezdett foglalkozni 1971-ben viszkoziméteres mérésekkel *Balláné, Csáki I.* [3], s 1977-ben megjelent [4] tanulmányában közölt eredmények alátámasztják az általunk kapott eredményeket.

A talajszuszpenziókon végzett rotaviszkoziméteres mérések közül kiemelkedők a Lengyelországban, elsősorban Wroclawban végzett kutatások [5—6]. *Parzonka* végezte a legátfogóbb munkát, több készüléktípust — Couette-, Epprecht-, Fann-viszkoziméterek — hasonlította össze, valamint csőben történő áramlást vizsgált, abból a célból, hogy a homogén, nem tixotróp keverékek jellemzőit meg tudja adni ideális Bingham- testként viselkedő anyagokra [8].

Több tanulmányában foglalkozik *M. Langer* [9—11] rotaviszkoziméteres mérésekkel (Viscotester VTL 23.), amelynél a belső hengert forgatták. Külön értékei a vizsgálatnak, hogy viszonylag kis víztartalmak tartományában (40—70% között) végezte a méréseit. Ennek érdekében a viszkoziméter hengereinek a falai speciális kialakítást kaptak, de erről többet a tanulmány nem árul el. Részletes vizsgálatai alapján összefüggést keresett és talált a talajmechanikai és reológiai jellemzők között. Vizsgálatai közül kettőnek az eredményeit láthatjuk az 1. és 2. ábrán. Az általa alkalmazott jelölések:

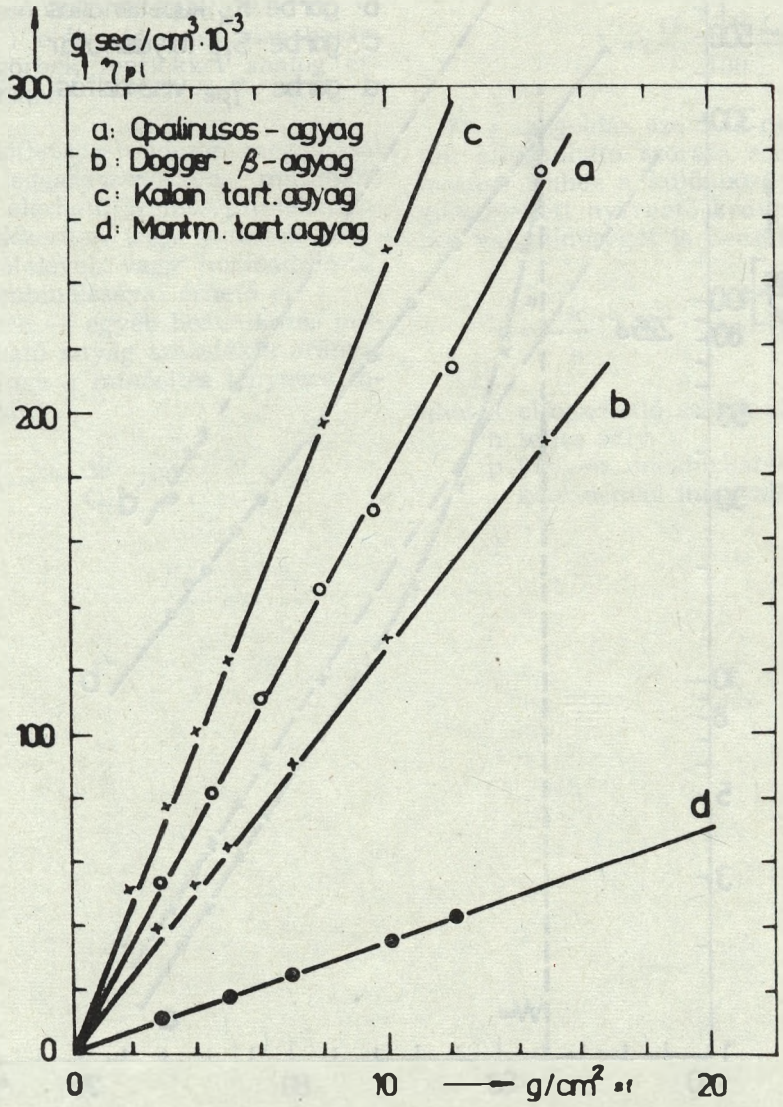
n: ütésszám a Casagrande csészében

K_k: penetrációs vizsgálatokból nyert, kúppal szembeni talajellenállás

$$K_k = 0{,}955 \frac{G}{h^2} \; [g/cm^2]$$

ahol: G: az eső kúp súlya

h: kúpbehatolási mélység



2. ábra Összefüggés a viszkozitás és a kohézió között (LANGER ny.)

η_{pl}: viszkozitás [dins/cm^2]
S_{fE}: reológiai folyáshatár a kísérlet végén [din/cm^2]
C_o: kohézió [din/cm^2]

A [10] tanulmányban *Langer* a reológiai vizsgálatait már nemcsak kísérleti, hanem gyakorlati jelleggel végzi, amikor méréseit tergerparti védőgátak anyagának kiválasztására, minősítésére használja fel, és a reológiai és konzisztencia jellemzőket kapcsolatba hozza az agyagok vízzel szembeni viselkedését leíró jellemzőkkel: vízfelvevő-képesség, víz alatti szétesés, valamint az általa bevezetett vízfeldolgozó-képességgel (v), melynek az értelmezése:

$$v = \frac{w_1 - w_2}{\lg c_2 - \lg c_1}$$

ahol w_1, w_2, ill. c_1, c_2 összetartozó víztartalom, ill. kohézió értékpárok. Meg kell jegyezni, hogy vizsgálatait minden esetben részletes ásvány-kőzettani elemzés egészíti ki.

Az előzőekben a nemzetközi irodalomból vett pár példával szerettük volna szemléltetni a reometriai vizsgálatoknak egy körét, és a leírtak alapján tulajdonképpen kialakul az a kép, hogy hol lehet és érdemes a lamináris alakváltozáson alapuló viszkoziméteres méréseket végezni, s milyen irányba célszerű továbblépni.

A Nehézipari Műszaki Egyetem Földtan-Teleptani Tanszékén szintén végeztünk rotaviszkoziméteres méréseket, melyek csak bizonyos alapelvek tisztázását szolgálták. A vizsgálatok elvégzését az indokolta, hogy az üledékes kőzetek felhasználása, illetve igénybe vétele különböző víztartalmak mellett igen tág konzisztencia-határok között történik. A reometriai — viszkoziméteres — mérések az agyagok viselkedését jól jellemzik, bár kétségtelenül nem eredeti állapotukban és víztartalmuk mellett. Kérdés, hogy van-e kapcsolat a hagyományos úton meghatározott kőzetfizikai- és a szuszpenziókon mért reológiai jellemzők között. Mint láttuk az előzőekben ez a vizsgálati kör csak részletes ásvány-kőzettani vizsgálatokkal teljes, és ha tovább akarunk lépni a kőzetfizikai jellemzők jobb megértése terén nem kerülhetjük el ezt az utat, mint arra *Kézdi Á.* is rámutatott az 5. Budapesti Talajmechanikai és Alapozási Konferencia (1976) 1. szekciójának főelőadói referátumában, és az ebben a témakörben megjelent 19 előadás közül 7 foglalkozik hasonló problémákkal [12].

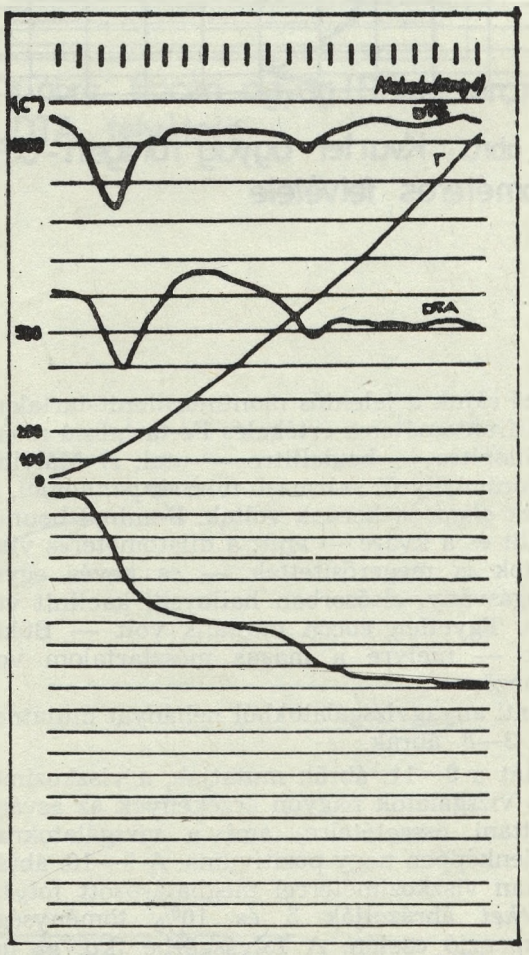
A végzett vizsgálatok 3 csoportba sorolhatók:

1. A *hagyományos* kőzetfizikai (talajmechanikai) jellemzők, ezen belül a konzisztenica-, természetes állapot- és átgyúrt állapot-, szilárdsági jellemzők. A vízraktározási jellemzők közül a Mitserlich-féle higroszkóposságot határoztuk meg.

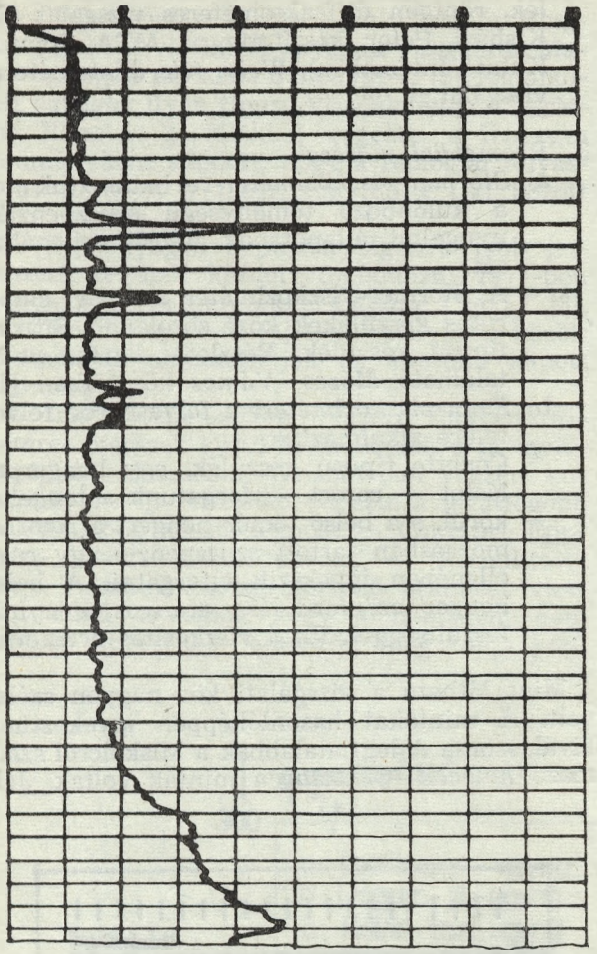
2. *Ásvány-kőzettani összetétel:* szervesanyagtartalom, mésztartalom, derivatográf-felvételek, röntgen diffraktométeres vizsgálat (dr. Kisházi Péter készítette az MTA Soproni Kutató Intézetben), *Weiss-féle* dilatométeres vizsgálat.

3. *Reometriai mérések*
   a) *Stormer-viszkoziméter*-rel határoztuk meg a különböző töménységű szuszpenziók nyugalmi állapotának nyírási ellenállását.
   A Stormer-viszkoziméter az ipari empírikus készülékek közé sorolandó, Searle-típusú készülék. Részletes leírása megtalálható *Mózes—Vámos* könyvében [1].
   b) *Fann-viszkozimétert* a folyásgörbe felvételére alkalmaztuk.
   Couette típusú készülék, egy hengerpalástot — rotort — forgatunk a tengelye körül, s a belső tömör hengert a rotorral mozgásban tartott szuszpenzió egy rugó ellenében igyekszik elforgatni. A belső henger szögfordulása arányos a nyírófeszültséggel, ill, a viszkozitás értékével.

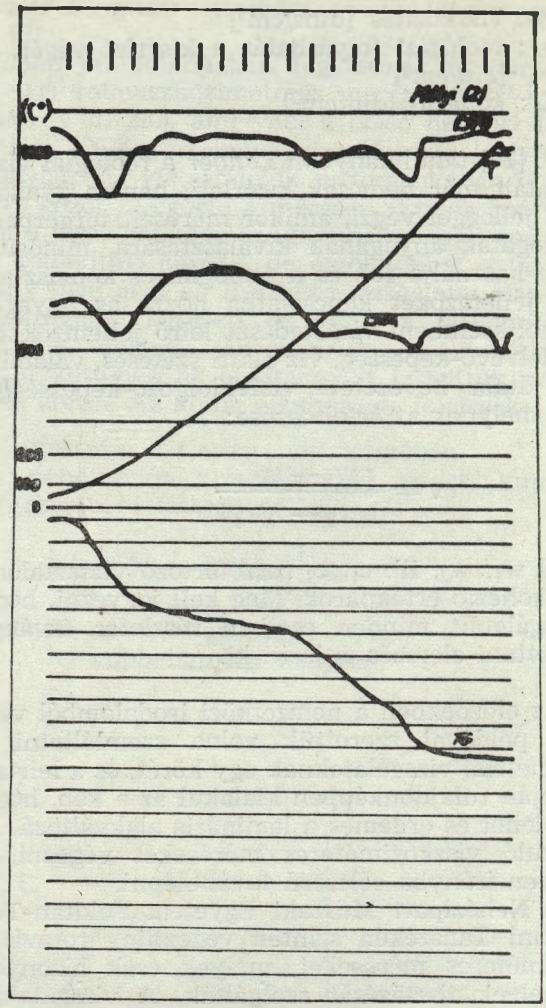
Mint látható a vizsgálati kör nagyon széles volt. A mintákat hasonlóképpen igyekeztünk kiválasztani. A legfiatalabbak a Miskolcról származó *holocén—pleisztocén* minták voltak. Jel-



3. ábra. Kvarter agyag DTA felvétele



4. ábra. Kvarter agyag röntgen-diffraktométeres felvétele



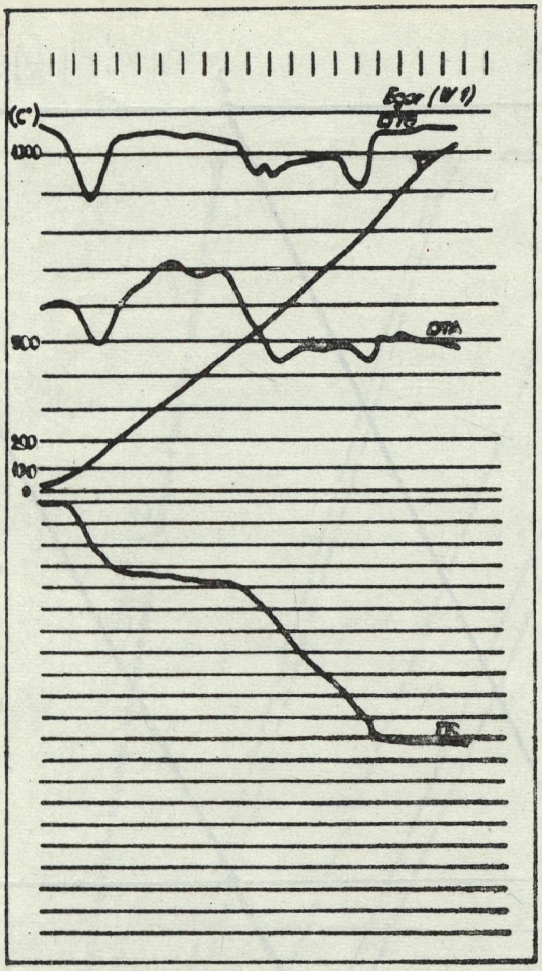
5. ábra. Pannoniai iszapos agyag DTA felvétele

lemző rájuk a jelentős montmorillonit-tartalom. A diffraktométeres értékelés Fe-tartalmú montmorillonitra — beidellitre — utal. A Mályiból és Görömbölyről származó minták *pannoniai*, az egriek *oligocén* korúak voltak. Dominál bennük az illit és a kvarc — amit a dilatométeres vizsgálatok is megerősítettek — és kevés egyéb agyagásvány, elsősorban halloysit, kaolinit van jelen. Egyetlen *eocén* mintánk volt — Bükkzsérc — melyre a magas mésztartalom volt jellemző.

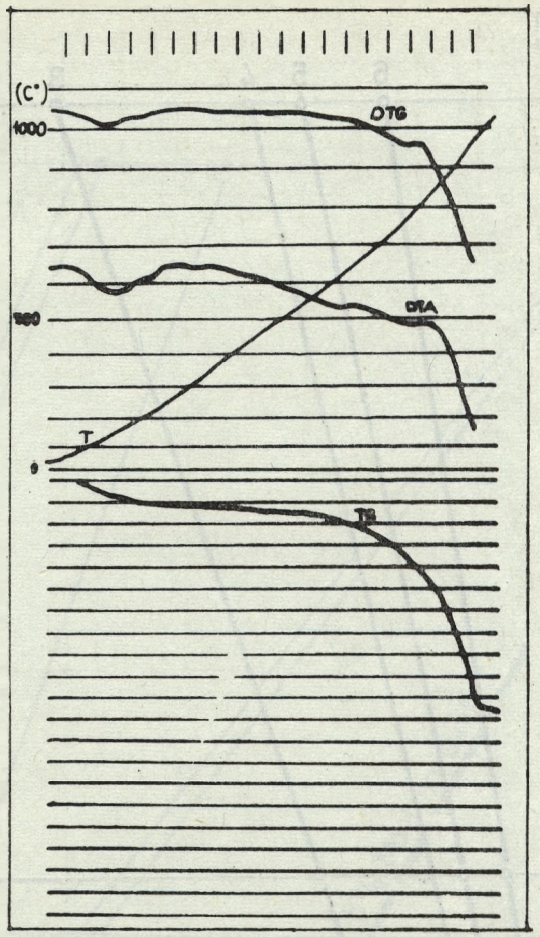
A fenti anyagvizsgálatokból néhányat mutatnak be a 3—8. ábrák.

Mint a 9—11. ábrák mutatják, a viszkoziméteres vizsgálatok nagyon érzékenyek az ásvány kőzettani összetételre, ami a vizsgálatoknak mindenképpen nagy pozitívuma. A 9—10. ábrák a Fann viszkoziméterrel meghatározott *folyásgörbéket* ábrázolják 5 és 10% töménységű szuszpenzió esetén. A folyásgörbe tkp. az ún. maradó, vagy permanens D_p deformáció és a t igénybevételi idő közötti függvénykapcsolatot ábrázoló görbe (12. ábra), amely adott τ nyírófeszültség mellett a szóban forgó rendszerre az adott körülmények között jellemző menetű [1]. Különböző τ értékek mellett elvégezve a kísérletet, kapjuk az ún. folyási diagramot. A folyások jellegét szokás tanulmányozni a nyírási sebesség és a nyírófeszültség közötti összefüggés megállapításával is, s ma már az irodalomban általánosan elfogadott ezen görbéket is folyásgörbéknek nevezni. A mi esetünkben is ezen utóbbiakról van szó. A természetes anyagok mellett felvettük a tiszta montmorillonit-, illit- és kvarcszuszpenziók, valamint egy mesterséges keverékanyag (50% kvarc, 37,5% illit, 12,5% montmorillonit) folyásgörbéjét.

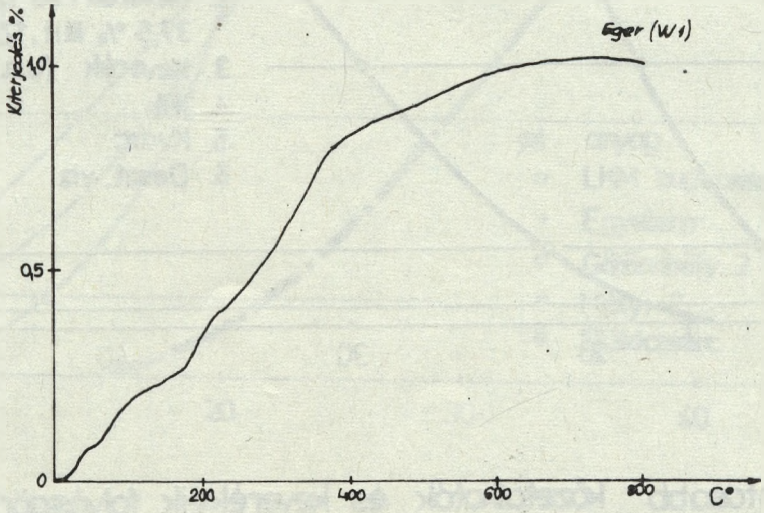
Mint látjuk a szélső értékeket a tiszta montmorillonit, ill. illit ás kvarc görbéi adják, s a természetes anyagok és a keverék ásványos összetételüknek megfelelően helyezkednek el a sorban. Nagyobb koncentráció (10%) esetén ezek az anyagi minőségtől függő jellemzők kifejezettebben jelentkeznek. Sajnos még nagyobb koncentrációt a rendelkezésünkre álló viszkoziméter nem engedett meg.



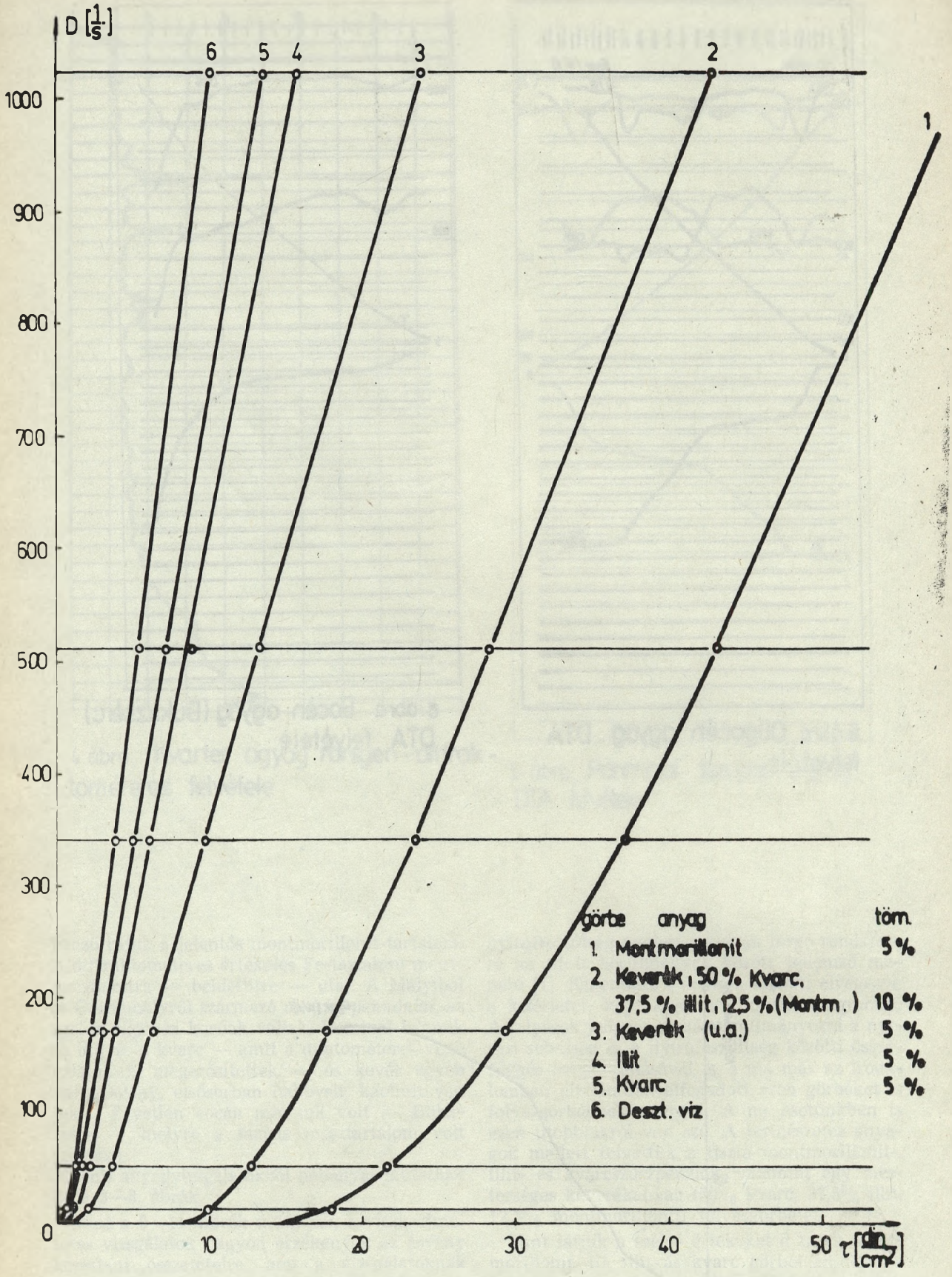
6. ábra. Oligocén agyag DTA felvetéle



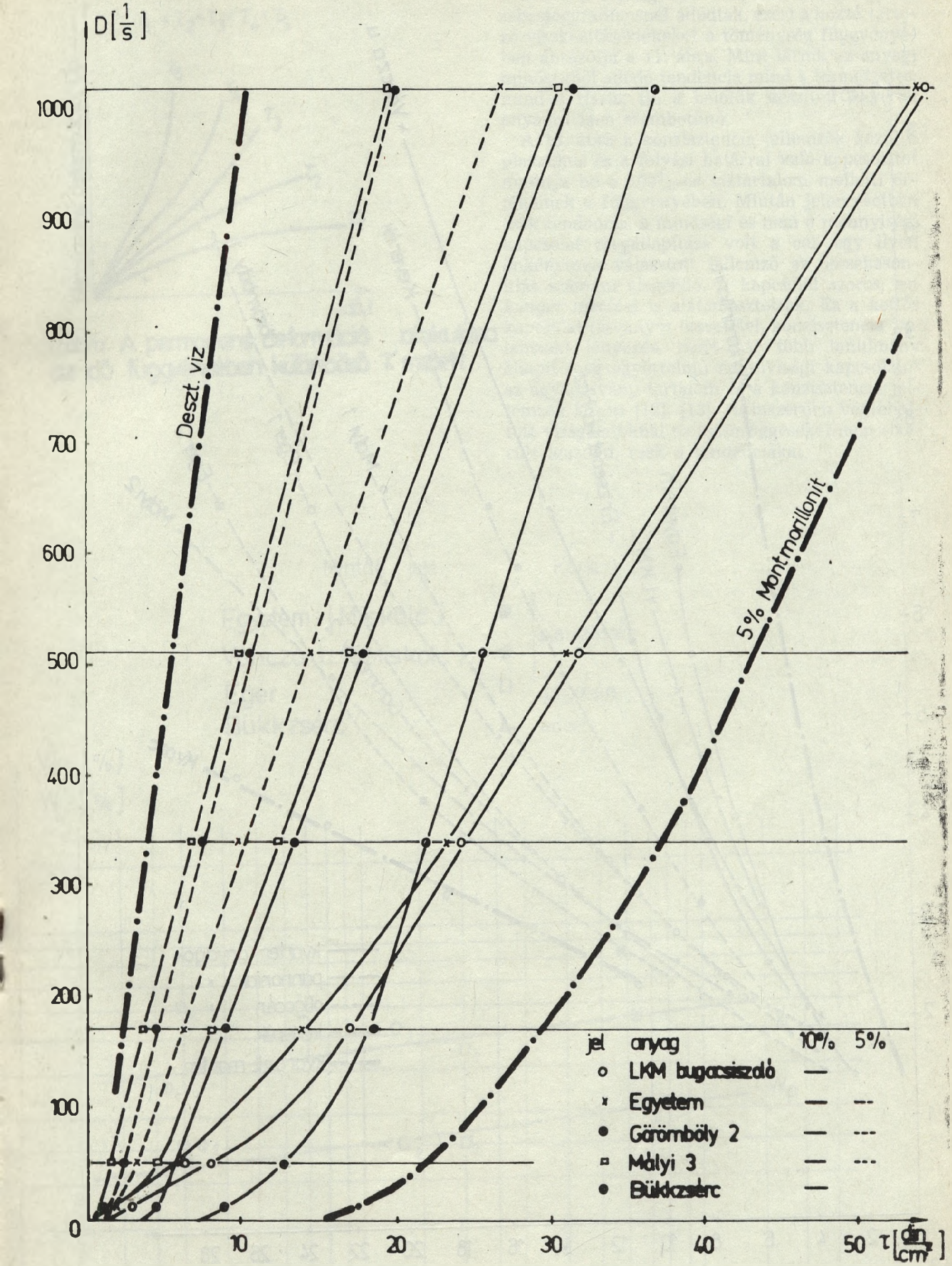
8. ábra. Eocén agyag (Bükkzsérc) DTA felvétele.



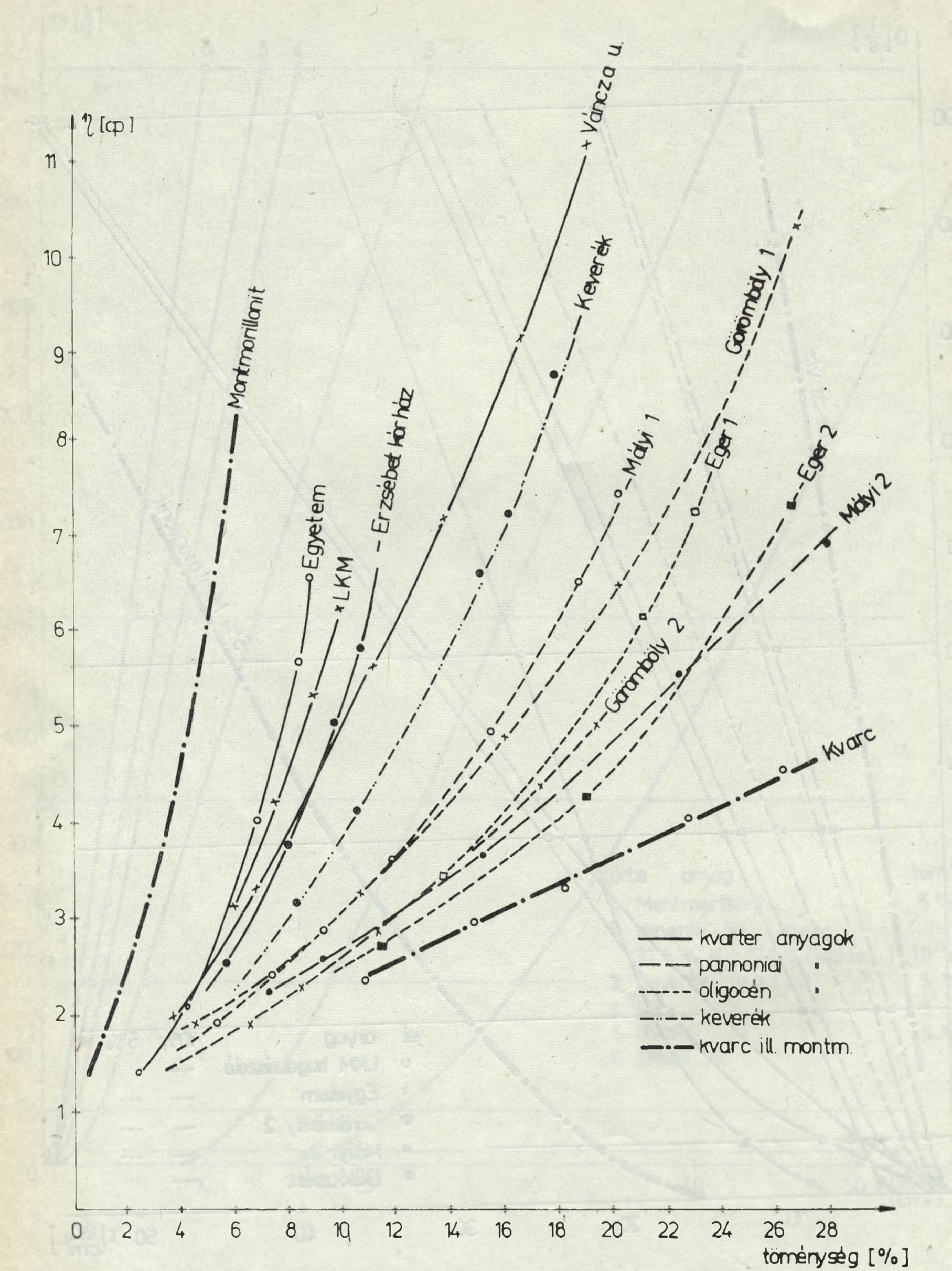
7. ábra. Oligocén agyag dilatogrammja.



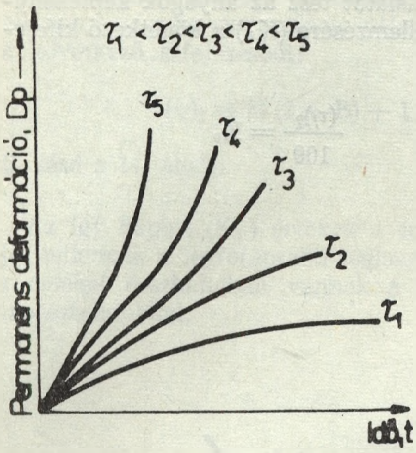
9. ábra. A legfontosabb kőzetalkotók és keverékeik folyásgörbéi



10. ábra. Különböző kerú agyagok folyásgörbéi



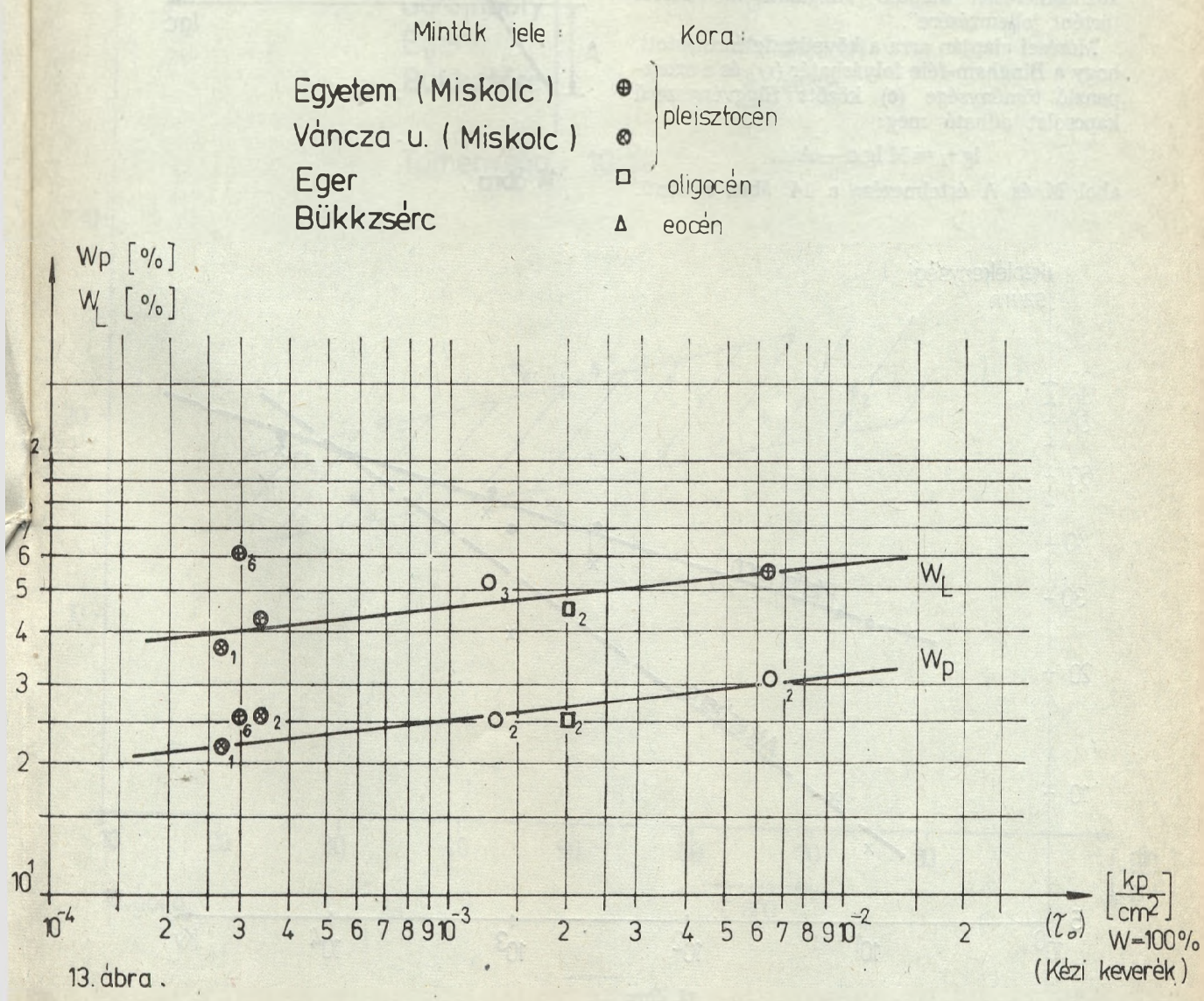
11. ábra Különböző töménységű szuszpenziók viszkozitása



12. ábra. A permanens deformáció alakulása az idő függvényében különböző τ mellett

Mivel a legnagyobb eltérések a legnagyobb sebességgradiensnél adódtak, ezért a hozzá tartozó viszkozitásértékeket a töménység függvényében ábrázolja a 11. ábra. Mint látjuk az anyagi minőségből adódó tendencia mind a természetes, mind a tiszta, ill. a belőlük készített keverék anyagra igen szembetűnő.

A 13. ábra a konzisztencia jellemzők közül a plasztikus és a folyási határral való kapcsolatot mutatja be a 100%-os víztartalom melletti értékeinek a függvényében. Miután jelen esetben csak tendencia, a minőségi és nem a mennyiségi kapcsolat megállapítása volt a cél, egy ilyen önkényesen választott jellemző az összehasonlítás számára elegendő. A kapcsolat szoros, ezt *Langer* mérései is alátámasztották. Ez a kettős kapcsolat (ásványos összetétel, konzisztencia jellemzők) lényeges, mert bár több tanulmány állapít meg egyértelmű mennyiségi kapcsolatot az agyagásvány-tartalom és a konzisztencia jellemzők között [12], [13], rutinszerűen végrehajtott vizsgálatoknál az összefüggéseket nem sikerült igazolni, csak a tendenciákat.



13. ábra.

Előzőekben már említettük *Balláné, Csáki I.* vizsgálatait [3—4], amelyet téglaagyagokon végzett. A kerámiai iparban a képlékenységet meghatározó módszerek általában vagy a deformálhatóság, vagy konzisztencia határok megállapításán alapulnak, s az utóbbiak közül mind a külföldi, mind a hazai durva-kerámiaiparban leggyakrabban alkalmazott az Atterberg,- illetve a Pfefferkorn-féle képlékenységi szám. Az első nem más, mint a talajmechanikában használt plasztikus index, az utóbbi pedig az a százalékos víztartalom, amely mellett az adott méretű agyagmassza henger meghatározott erő hatására eredeti magasságának 1/0,307-ére nyomódik össze [14]. *Csáki I.* vizsgálatait Rheotest II. típusú viszkoziméterrel végezte, mely lényegesen nagyobb töménységű (súly%-ban: 100 g szuszpenzióban levő szárazanyag súlya) szuszpenziók vizsgálatát teszi lehetővé, max. 50%-ig. Vizsgálataihoz Magyarország legfontosabb téglaagyagtípusait használta fel. Különböző, legalább 4-féle koncentrációjú szuszpenzió folyásgörbéjét vette fel. A vizsgálatokat kiegészítette még egyéb, a kerámiaiparban használt rutinmérésekkel. Célja az volt, hogy objektívebb módszert találjon a „téglaagyagok képlékenységének viszkozitásmérésen alapuló vizsgálati módszerrel történt jellemzésére".

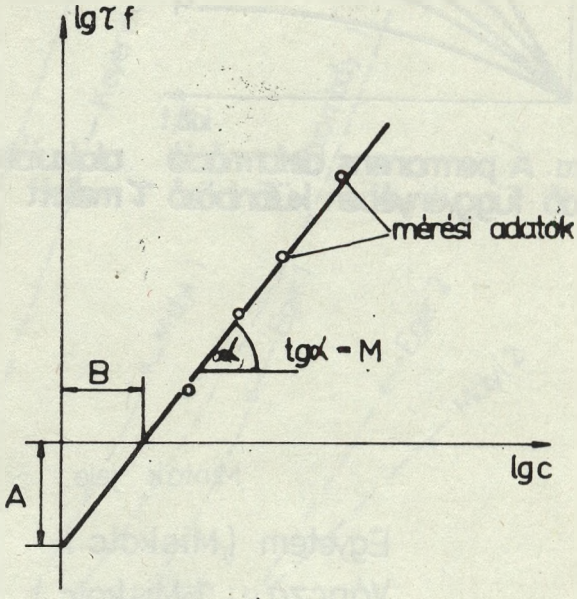
Mérései alapján arra a következtetésre jutott, hogy a Bingham-féle folyáshatár (τ_f) és a szuszpenzió töménysége (c) között függvényszerű kapcsolat adható meg:

$$\lg \tau_f = M \lg c - A$$

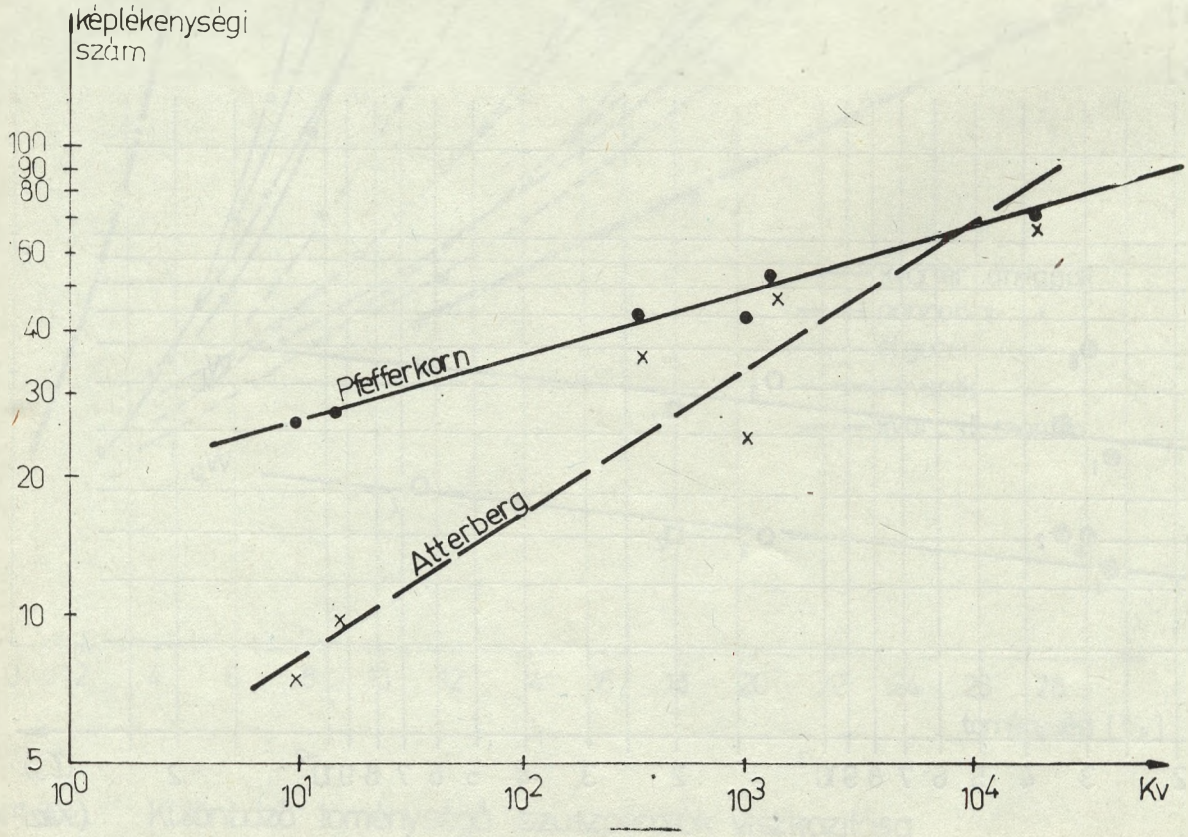
ahol M és A értelmezése a 14. ábra szerinti.

Végül javaslatot tesz az anyagok képlékenységének a jellemzésére (K_v) a következő kifejezés alapján:

$$\frac{(\tau_f)_2}{100} = K_v$$



14. ábra.



15. ábra

A $(\tau_f)_2$ értékét a 100% koncentrációjú (fiktív!) állapotra végzett extrapoláció útján kaphatjuk, a következő kifejezésből:

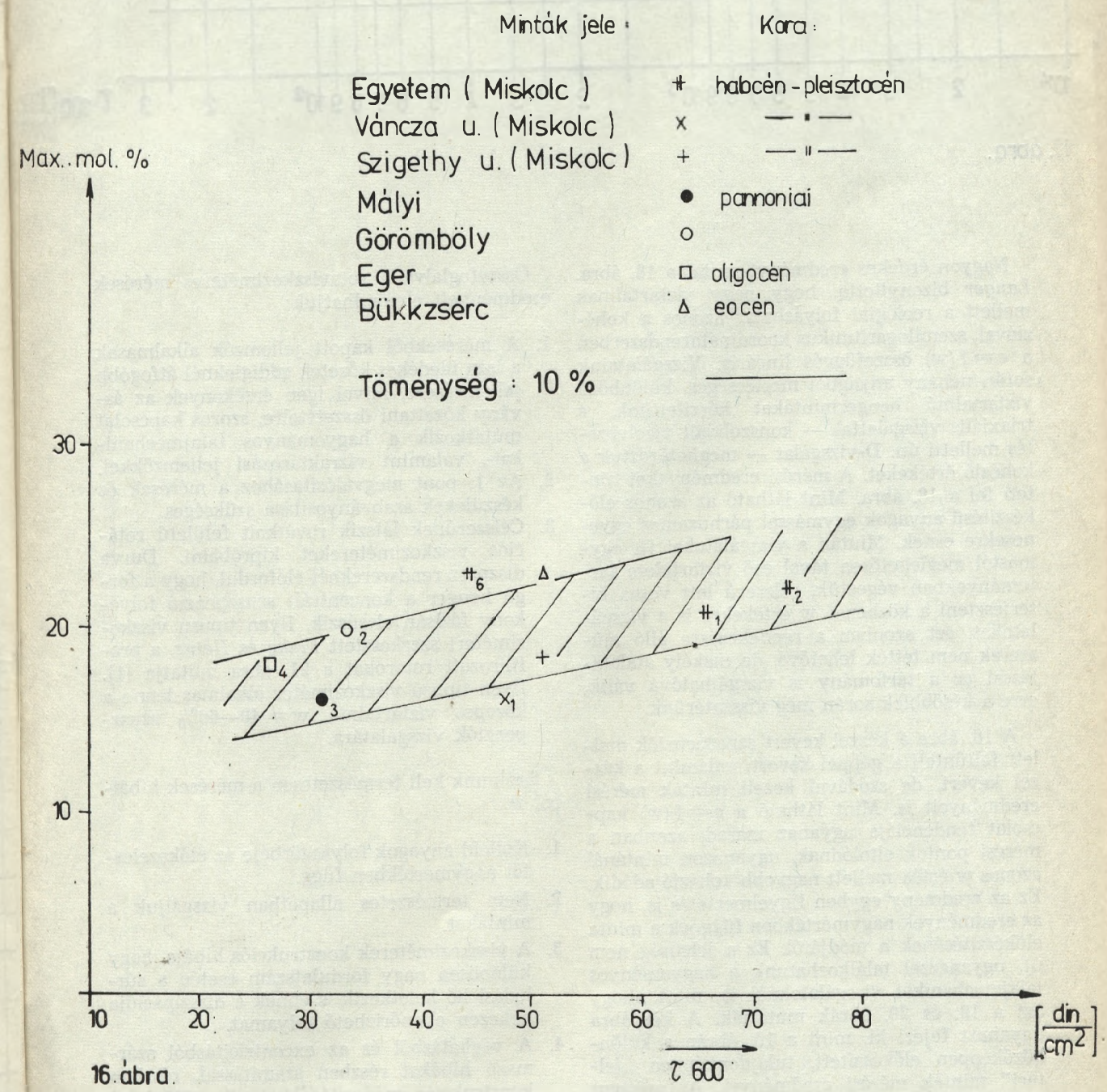
$$(\tau_f)_2 = M\,(2 - B) + 1$$

B: lásd a 14. ábrán.

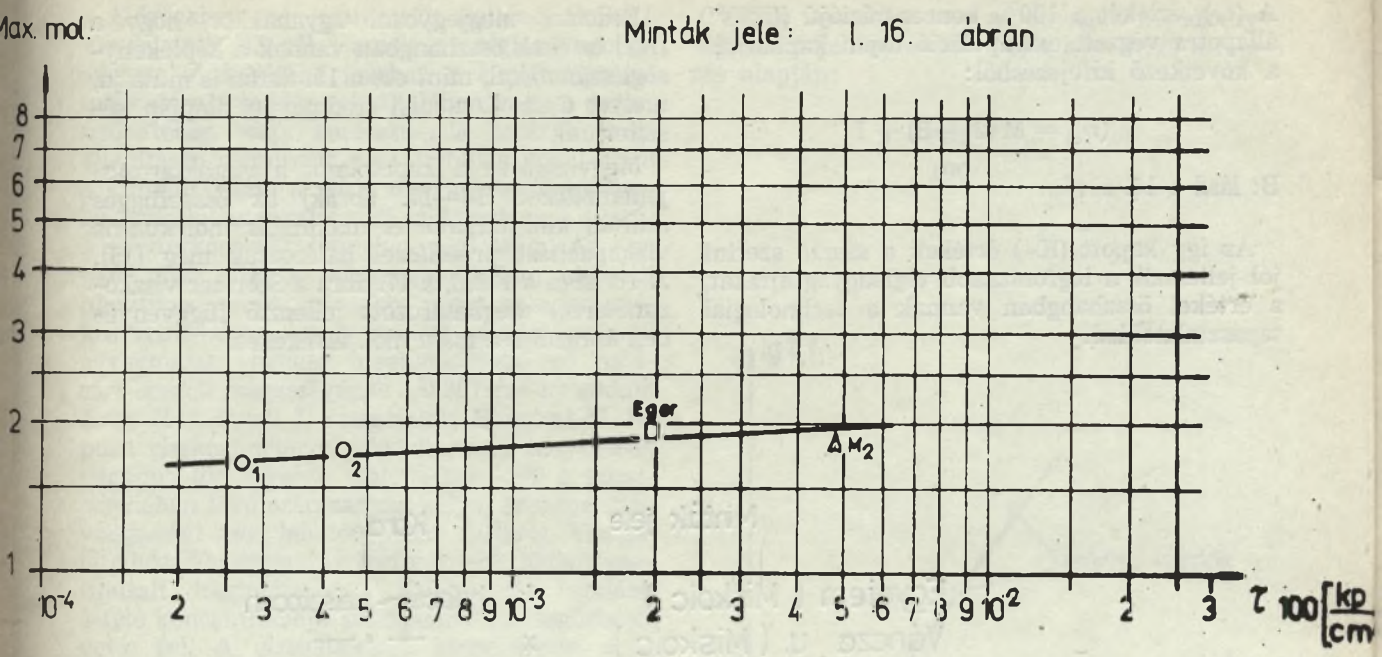
Az így kapott (K_v) értékek a szerző szerint jól jellemzik a legfontosabb téglaagyagfajtákat, s értékei összhangban vannak a technológiai tapasztalatokkal.

Érdemes megjegyezni ugyanakkor, hogy a (K_v) értékek összhangban vannak a képlékenységi számokkal, mint ezt a 15. ábrán is mutatja, melyet *Csáki I.* mérési eredményei alapján készítettünk.

Megvizsgálva a kapcsolatot a vízraktározási jellemzőkkel (16—17. ábrák) az összefüggés szintén kimutatható. A maximális molekuláris vízkapacitást préseléssel határoztuk meg [15]. A 16. ábra a Fann, a 17. ábra a Stormer viszkoziméterrel meghatározott jellemző függvényében ábrázolja a max. mol. értékeket.



16. ábra.



17. ábra.

Nagyon érdekes eredményt mutat a 18. ábra. *Langer* bizonyította, hogy nagy víztartalmak mellett a reológiai folyáshatár azonos a kohézióval, szemilogaritmikus koordinátarendszerben a $c = f(w)$ összefüggés lineáris. Vizsgálataink során néhány anyagból mesterséges, különböző víztartalmú hengermintákat készítettünk, s triaxiális vizsgálattal — konszolidált vízelvezetés melletti ún. D-vizsgálat — meghatároztuk a kohézió értékeket. A mérési eredményeket tünteti fel a 18. ábra. Mint látható az azonos előkészítésű anyagok egymással párhuzamos egyenesekre esnek. Miután a vizsgálatokat itt egymástól meglehetősen távol eső víztartalom tartományokban végeztük, célszerű lett volna kiterjeszteni a közbenső w értékekre is a vizsgálatokat, ezt azonban a rendekezésre álló műszerek nem tették lehetővé, de csekély átalakítással ez a tartomány is vizsgálhatóvá válik, erre a későbbiek során még visszatérünk.

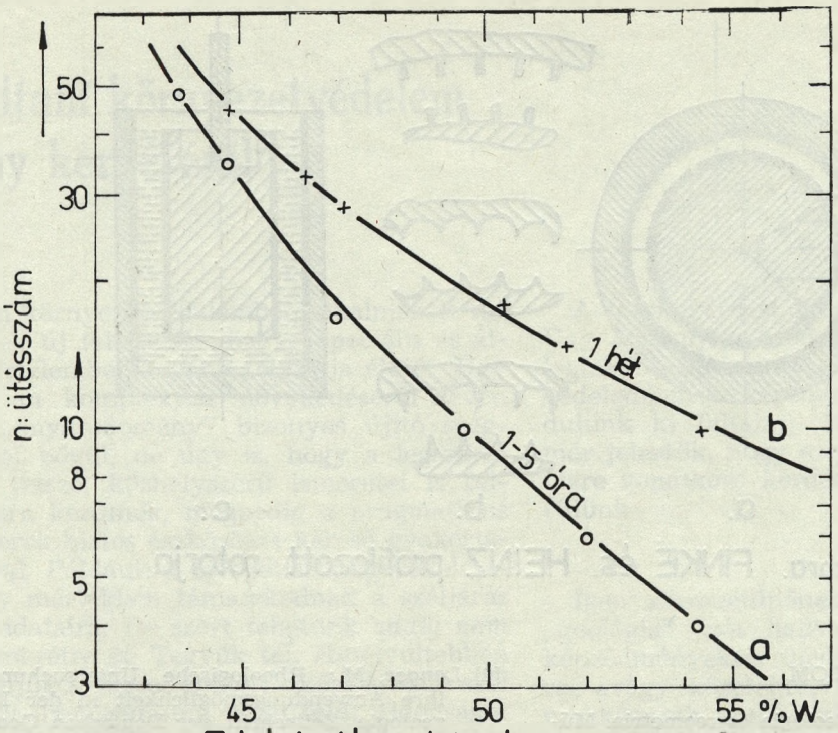
A 18. ábra a kézzel kevert szuszpenziók mellett feltünteti a géppel kevert, valamint a kézzel kevert, de szódával kezelt minták mérési eredményeit is. Mint látható a $c = f(w)$ kapcsolat tendenciája ugyanaz marad, azonban a mérési pontok eltolódnak, ugyanazon mintánál azonos w érték mellett nagyobb kohézió adódik. Ez az eredmény egyben figyelmeztetés is, hogy az eredmények nagymértékben függnek a minta előkészítésének a módjától. Ez a jelenség nem új, ugyanezzel találkozhatunk a hagyományos talajmechanikai vizsgálatoknál is, mint ahogy azt a 19. és 20. ábrák mutatják. A két ábra ugyanazt fejezi ki, mint a 18. ábrán a különbözőképpen előkészített, tulajdonképpen „feltárt" minták mérési eredményei. Az anyagot minél jobban „feltárjuk", annál magasabb folyási határt kapunk.

Összefoglalva a rotaviszkoziméteres mérések eredményeit elmondhatjuk:

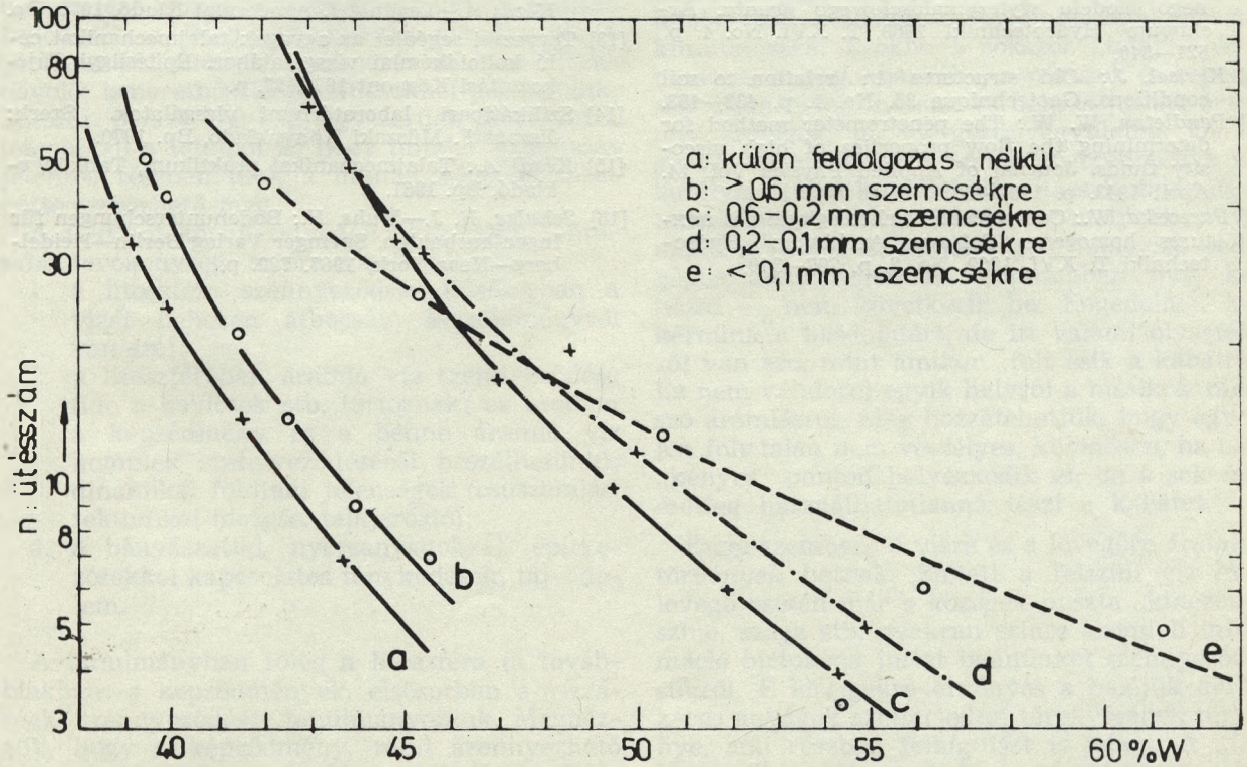
1. A mérésekből kapott jellemzők alkalmasak a laza üledékes kőzetek eddigieknél átfogóbb jellemzésére, mivel igen érzékenyek az ásvány kőzettani összetételre, szoros kapcsolat mutatkozik a hagyományos talajmechanikai-, valamint vízraktározási jellemzőkkel.
2. Az 1. pont megvalósításához a mérések és készülékek szabványosítása szükséges.
3. Célszerűnek látszik rovátkolt felületű rotációs viszkozimétereket kipróbálni. Durva diszperz rendszereknél előfordul, hogy a forgó henger a koncentrált szuszpenzió folyékony fázisán elcsúszik. Ilyen típusú viszkozimétert szerkesztett *Finke* és *Heinz*, a profilirozott rotorokat a 21. ábra mutatja [1]. Ilyen típusú viszkoziméter alkalmas lenne a közepes víztartalmú $w = 40—60\%$ szuszpenziók vizsgálatára.

Szólnunk kell természetesen a mérések hibáiról is.

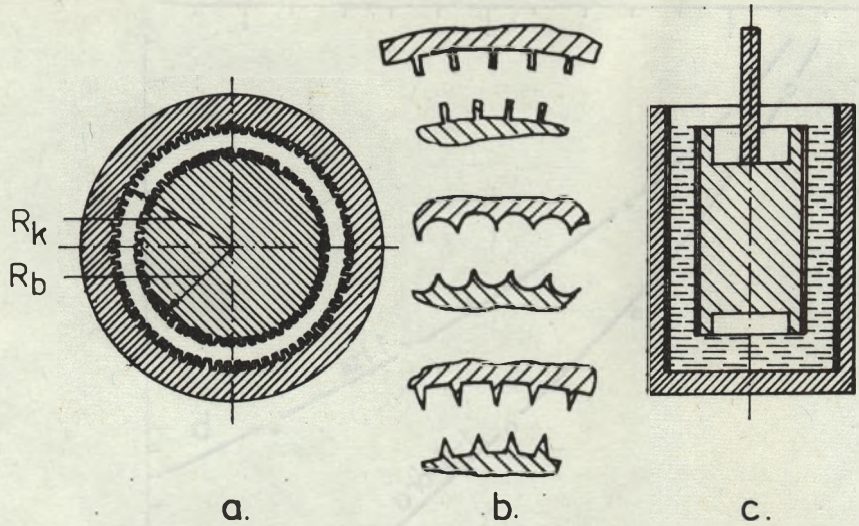
1. Kolloid anyagok folyásgörbéje az előkezeléstől nagymértékben függ.
2. Nem természetes állapotban vizsgáljuk a mintákat.
3. A viszkoziméterek konstrukciós hibája, hogy különösen nagy fordulatszám esetén a súrlódási hő keletkezik, s ennek a disszipációja nehezen ellenőrizhető folyamat.
4. A véghatásból és az excentricitásból származó hibákat részben számítással, részben konstrukciós módosításokkal, ill. különböző rotorbemerülési mélységek melletti mérésekkel korrigálni lehet.



19. ábra. Folyáshatár változása különböző áztatása időtartam esetén (0,6 0,2 mm-es mechanikus feldarabolásra)(LANGER ny.)



20. ábra. A folyáshatár meghatározás bizonytalansága a minta különböző előkészítése esetén. (LANGER nyomán.)



21. ábra. FINKE és HEINZ profilozott rotorja

IRODALOM

[1] *Mózes Gy.—Vámos E.:* Reológia és reometria. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1968. 540. p.

[2] *Szilvágyi I.:* Kísérletek agyagok reológiai tulajdonságainak jellemzésére. Földtani Kutatás 1966. IX. évf. 4. sz. p. 17—24.

[3] *Csáki I.:* Téglaagyagok képlékenységének a vizsgálata. Építőanyag. XXIII. évf. 1971. 12. sz. p. 475—480.

[4] *Balláné, Csáki I.:* Téglaagyagok reológiai vizsgálata az agyagok plaszticitásának a jellemzésére. Építőanyag XXIX. évf. 1977. 6. sz. p. 270—273.

[5] *Dmitruk, S.—Suchnicka, H.:* Koncepcja reologizcnego modelu wytrzymalosciowego gruntu. Archiwum Hydrotechniki 1969. T. XVI. No. 4. p. 521—540.

[6] *Kerisel, J.:* Old structures in relation to soil conditions. Geotechnique 25. No. 1. p. 433—483.

[7] *Pendleton, W. W.:* The penetrometer method for determining the flow properties of high viscosity fluids. Journal of Applied Physics Vol. 14. April 1943. p. 170—180.

[8] *Parzonka, W.:* Comportement rhéologique des mixtures homogenes Sol-eau. Archiwum Hydrotechniki T. XVI. 1969. No. 2. p. 297—340.

[9] *Langer, M.:* Rheologische Untersuchungen und ihre Anwendungsmöglichkeit in der Ingenieurgeologie. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft Band 114. 1 Teil, Hannover 1962. p. 145—151.

[10] *Langer, M.:* Mineralogische und rheologische Untersuchungen an tonigem Deichbaumaterial. Zeitschrift der Deutschen Geol. Ges. Band 115. 2. u. 3. Teil, Hannover 1966. p. 551—565.

[11] *Langer, M.:* Rheologie der Gesteine. Zeitschrift der Deutschen Geol. Ges. Band. 119. Hannover 1967. p. 313—425.

[12] Proc. of the Fifth Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Szerk.: *Kézdi Á.—Lazányi I.* Akadémiai Kiadó, 1976. Bp.

[13] Tervezési segédlet az agyagok talajmechanikai célú kolloidkémiai vizsgálatához. Építésügyi Tájékoztatási Központ 1970. 27. p.

[14] Szilikátipari laboratóriumi vizsgálatok. Szerk: *Tamás F.* Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1970.

[15] *Kézdi Á.:* Talajmechanikai praktikum, Tankönyvkiadó, Bp. 1961.

[16] *Schulze, H. J.—Muhs, H.:* Bodenunterschungen für Ingenieurbauten. Springer Verlag Berlin—Heidelberg—New York, 1967. 722. p.