

## Felső-pannon konszolidálatlan homokkövek kőzetzfizikai, kőzetmechanikai vizsgálata

### Petrophysical and geomechanical analysis of Upper Pannonian unconsolidated sandstones

Horváth Judit

SZTE-TTIK-FŐT, GEOCHEM Kft. horvath.judit@geochem-ltd.eu

Koroncz Péter

SZTE-TTIK-FŐT, GEOCHEM Kft. koroncz.peter@geochem-ltd.eu

Fedor Ferenc

GEOCHEM Kft. fedor.ferenc@geochem-ltd.eu

Hlatki Miklós

GW Technológiai Tanácsadó Kft., mhatki@t-online.hu

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A felső-pannon korú, konszolidálatlan homokkő rétegekbe történő termásvíz visszasajtolás tervezése során elengedhetetlen a képződmények kőzetmechanikai, kőzetzfizikai és kőzetszöveti paramétereinek, valamint a közöttük lévő összefüggéseknek az ismerete. A szerzők a Debrecen közelében mélyült Bánk-2 fúrásból vett magminták szisztematikus kőzetzfizikai, kőzetmechanikai vizsgálata alapján próbálnak választ találni arra, hogy egy hasonló jellegű képződményben a besajtolásra technológiailag leginkább alkalmas kőzetösszlet milyen módon, mely paraméterek figyelembe vételével jelölhető ki nagy biztonsággal. A cikk ennek a munkának egy kezdeti lépése, mely során a szemcseméret elemzések, a porozitás értékek, az akusztikus hullámterjedésből számított dinamikus kőzetmechanikai paraméterek lettek áttekintve, összevetve.

*Kulcsszavak:* termásvíz visszasajtolás, szemcseméret analízis, porozitás, szilárdsági paraméterek

**ABSTRACT:** In the case of planning reinjection of cooled thermal water into Upper Pannonian unconsolidated sandstone layers, it is crucial to know the rock mechanical, petrophysical and rock texture parameters of the formations, as well as the relationship between them. The authors tried to determine – with systematic petrophysical and rock mechanical investigation of the core samples taken from Bánk-2 well deepening near Debrecen – that in case of such a formation, how and according to which parameters is it possible to designate the technologically most suitable layers for injection. The article is an initial step toward the work that is about the review and comparison of particle size analyses, porosity values and rock mechanical parameters calculated from acoustic wave propagation.

*Key words:* thermal water reinjection, grain size distribution, porosity, elastic parameters

#### 1. BEVEZETÉS

Geotermikus projekteket csak fenntartható módon, a vízbázisvédelem szempontjainak is megfelelően (2000/60/EK víz keretirányelv és az energetikai célú termásvíztermelésnél a vízvisszasajtolást előíró 1995. évi LVII. törvény, az un. Vízgazdálkodási tv., továbbá a 147/2010. Korm. rendelet) kellene kivitelezni. Ezen projektek egyik lényegi eleme a geotermikus energiahasznosítás során kinyert és lehűlt termásvíz visszasajtolása. Ez azonban a Magyarországon leginkább érintett kis cementáló anyag tartalmú, kis szilárdságú, rosszul osztályozott szemcseméretű, viszonylag nagy agyagtartalmú, heterogén kifejlődésű felső-pannon homokkövekbe azok kőzetzfizikai és kőzetmechanikai jellemzői miatt komoly technológiai kihívás, mely jelenleg nem megoldott.

A Mecsekérc Zrt., mint projektgazda, a GW Technológiai Tanácsadó Kft, a GEOCHEM Kft., a Kőmérő Kft, valamint a Szegedi Tudományegyetem Földtani és Őslénytani Tanszékének bevonásával 2012-ben „A fenntartható geotermikus energiahasznosítás kútkiképzési technológiájának kifejlesztése - I.” címmel (GOP-1.1.1-11-2012-0033) projektet indított e probléma megoldására. Ennek egyik eleme egy tudományos igényességgel összeállított, ipari gyakorlat számára alkalmazható

geomechanikai, valamint kőzetmechanikai vonatkozású kőzetfizikai mérésorozat elvégzése, mely megfelelő bemenő adatokat biztosíthat a kútkiképzés technológiai ajánlásainak kidolgozásához.

A szöveti és kőzetfizikai tulajdonságok, valamint a kőzetek geomechanikai minősítése közötti kapcsolat kutatása nem új keletű (Ulusay et al., 1994). A tapasztalatok szerint az átlagos szemcseméret csökkenésével csökken az effektív porozitás értéke, és nő a kőzet szilárdsága (Brace, 1961), (Fahy & Guccione, 1979), bár a kapcsolat nem minden esetben szignifikáns (Shakoor & Bonelly, 1991).

A felső-pannon homokkövekre jellemző a besajtolásra alkalmas rétegek átteresztőképességének nagymértékű heterogenitása. A hatékony besajtolás érdekében szükséges a lyukgeofizikai mérések alapján a lehető legnagyobb körültekintéssel lehatárolni az áramlási egységeket. Ehhez azonban elsődleges a lyukgeofizikai szelvény megfelelő kalibrálása, mely során számításba kell venni az átteresztőképességet befolyásoló szedimentológiai, és kőzetfizikai jellemzőket, ill. numerikus kapcsolatot kell keresni közöttük. Jelen cikk anyaga ennek a munkának egy része, mely során a szemcseméret eloszlásból és makroszkopikus leírásból kapott szöveti és szerkezeti paraméterek és az ugyanazon szakaszokon kialakított mintatesteken elvégzett akusztikus mérésekből származó kőzetmechanikai paraméterek összevetése volt a cél.

## 2. VIZSGÁLT KÉPZŐDMÉNY BEMUTATÁSA

A projekt során vizsgált Bánk-2 fúrás 1400 m-ig mélyült, a fúrás során 500-800 m, és 1190-1270 m között, több szakaszban történt magvétel.

**1. táblázat** Magvételi szakaszok a Bánk-2 fúrásban (*Coring intervals from the borehole Bánk-2*)

Magvételi szakaszok - Bánk-2		Jellemzés	Képződési környezet
-tól	-ig		
501,0	513,0	Finomszemű, agyagos és aleuritós képződmények dominanciája. Szenesedett növényi törmelékes, leveles elválású, tarkaagyag rétegekkel.	Alluviális síkság, ártéri képződmények
618,5	622,0		
815,0	819,5	Uralkodóan apróhomok, finomhomok, durva aleurit. Az apróhomokos rétegek helyenként agyag intraklasztokat tartalmaznak.	Alluviális síkság, folyóvízi képződmények
820,0	823,5		
826,0	830,0		
1198,0	1207,0	Agyag, aleurit, finom- és apróhomok rétegek váltakozása, mely a szállítási energia ingadozására utal. Az apróhomokok többsége szerkezet nélküli, az agyagos összletek között megjelennek kagylók is.	Delta front képződmények
1236,2	1240,2		
1248,5	1254,0		
1259,5	1264,0		
1264,5	1266,5		

A magvételi szakaszokat és a makroszkópos leírás eredményeit az 1. táblázat tartalmazza. A fúrás felső szakaszában az agyagos, aleuritós képződmények dominálnak. A szenesedett növényi törmelékek, függőleges helyzetű növényi szárak, valamint a leveles elválású rétegek anoxikus környezet tartós kialakulására utalnak. A rétegsorba települő tarkaagyag megjelenése és a száradási repedések a vízborítás időszakos megszűnésének az indikátorai.

A leírtak alapján mocsári környezet valószínűsíthető. A második magvételi intervallum (815-830 m) egy uralkodóan finom és aprószemű homokokat tartalmazó folyóvízi összletet tárt fel. A legalsó, 1198-1266,5 m közötti szakaszból többnyire szerkezet nélküli apróhomokkövek, valamint homokhullámokat tartalmazó agyagos aleurit rétegek jelennek meg. A makroszkópos magleírás és a karotázsszelvények elektrofácies elemzése alapján ezek a képződmények deltafront környezetben rakódtak le.



**1. ábra:** A Bánk-2 fúrás 1264,5 - 1266,5 m közötti szakasza  
(Core sample from 1265.5m to 1266.5 m interval Borehole: Bánk-2)

Az 1. ábrán a magfúrás legelső szakasz látható, amely apróhomokkal indul és felfelé folyamatosan finomhomokba, majd finomhomokkőbe megy át. Az előforduló szerkezeti jegyek, sík párhuzamos és kiékelődő sorozathatárok közötti ferde rétegződés áramló közegre utal. A szemcseméret finomodás és durvulása, a finomabb rétegekben a homokhullámok megjelenése a közeg energiájának oszcillációjáról tanúskodik.

### 3. MINTÁK KIALAKÍTÁSA

A projekt szempontjából a homokos rétegek voltak a legfontosabbak, ezért a mintatestek kialakításra a 815-830 m és az 1190-1270 m közötti homokkő szakaszok lettek kijelölve. A mintatestek kialakítását nehezítette a képződmények laza szerkezete. Mivel a teljes fúrásra szisztematikus mintavételt nem sikerült a mintatestek szintjén kialakítani, ezért az itt bemutatott eredmények csak a fúrás egy szakaszát jellemzik, a fúrás egészére nem tekinthetőek reprezentatívnak.

Az akusztikus P- és S hullám mérések 1,5" átmérőjű, 2-3" hosszúságú, palást, illetve tengelyirányban kialakított mintatesteken történtek szobahőmérsékleten előbbieknél 30 bar-os, utóbbiaknál 50 bar-os köpenynyomás alkalmazásával, pórusnyomás nélkül légszáraz és száraz mintákon, illetve ugyanekkora effektív nyomással min. 13,7 bar (200 psi) pórusnyomás alkalmazása mellett (víztelített magok esetén). Az igen kis mértékű terhelés oka a légszáraz és száraz minták esetén a minták gyors tönkremenetele (nagyobb effektív nyomáson a mintatestek a mintatartóban szétestek) volt.

A mintatestek kialakítása, végpololása után visszamaradt törmelékéből átlagmintavétel, majd desztilláltvízes áztatást követően mechanikus úton (kézzel, ultrahangos kezeléssel), diszpergálószer alkalmazása nélküli dezaggregálás történt. Mivel makroszkóposan a mintákról megállapítható volt, hogy a 2 mm-nél kisebb szemcseméret tartományba tartozott a minták egésze, ezért a minta előzetes szitálásától el lehetett tekinteni. Közvetlenül a mérés előtt a homogenizálást követően a méréshez szükséges nagyon kis mintamennyiség kivétele üvegbot segítségével történt a mintahalmazból. Ajánlás szerint (Mingard et al. 2009) ehhez fogpaszta sűrűség kialakítására célszerű törekedni. A fúrásból vett magmintából 111 mintatest lett kialakítva. Ezeket légszáraz állapotban, valamint az ezekből kiválasztott 68 minta esetén tömegállandóságig szárított állapotban effektív porozitás mérés történt. A törmelékanyagon végzett szemcseméret analízisből az értelmezéshez 84 mérés eredménye állt rendelkezésre.

A légszáraz minták egy része át lett adva uniaxiális, triaxiális és húzószilárdság mérésekre a Kőmérő Kft. kőzetmechanikai laboratóriumába. Ahhoz, hogy lehetőség legyen az eredményeket valamilyen szinten összevetni, a légszáraz állapotban végzett mérések (He-piknometria, gázos permeabilitás, akusztikus hullámterjedés mérése) az összes mintán rendelkezésre állnak. A légszáraz állapotban végzett mérések mellett majd minden a GEOCHEM Kft.-nél maradt minta esetén ugyanezen mérések el voltak végezve tömegállandóságig szárított és az adott formációvíznek megfelelő összetételű vízzel telített mintákon is.

4. MÓDSZEREK

4.1 Szemcseméret analízis

A mérés Cilas 1180-as lézerdiffrakciós elven működő berendezéssel történt. A módszer alapja, hogy a részecskék morfológiai és optikai tulajdonságai meghatározzák a diffraktált hullám interferenciaképét. Térfogatekvivalens gömb alakú szemcséket feltételezve a detektált mintázatból következtetni lehet a szemcseméretre. A kettő közötti kapcsolatot az ún. Fraunhofer egyenlet adja. A mérés 100 osztályban történik 0,04-2500 µm-es intervallumban, az eredmények kumulatív térfogat-százalékban adóttak. A szemcsék a mérés előtt előkészítő jelleggel 240 s-ig, valamint a mérés alatt ultrahanggal kezeltek. Mivel nagyon kis anyagmennyiségek egyidejű méréséről van szó, mintahalmazonként minimum 3 kis minta mérése és elemzése történt. Csillámtartalmú üledékek esetén a szemcseméret eloszlás mérés eredménye torzulhat és ezt az értelmezés során figyelembe kell venni.

Amennyiben a kapott eredmények túlságosan szórtak (d<sub>10</sub>, d<sub>50</sub>, d<sub>90</sub> összehasonlítása a CILAS műszer programja segítségével), további két elemzésre került sor. A többszöri szóródás torzító hatásának elkerülése érdekében az optikai sűrűség felső határa 35% volt. Minden egyes mérést háttérmérés előzött meg.

A mintákhoz tartozó mérések átlagolása a GEOCHEM Kft. által fejlesztett PSDI program segítségével történt. A későbbiekben az átlagok kerültek feldolgozásra. A fent említett szoftver az értelmezésre is alkalmas. Az üledékek osztályozásánál Shepard-, Folk- és Winkler-féle rendszerek alkalmazására van lehetőség (Shepard, 1954; Folk, 1954; Winkler, 1954). A felhalmozódás genetikájáról, az üledékszállítás módjáról, az egyes frakciók osztályozottságáról pedig a Passega-féle CM, FM, LM és AM diagram (Passega, 1957., 1964.) ad tájékoztatást. A medián (M) értékének függvényében ábrázolja a d<sub>99</sub>-hez tartozó szemcseátmérőt (C-érték), a 125 µm-nél (F), 31 µm-nél (L) és 4 µm-nél (A) kisebb szemcseátmérő kumulatív százalékát.

4.2 Akusztikus mérések a dinamikus rugalmassági paraméterek meghatározására

Az akusztikus hullámok terjedési sebességének meghatározása az impulzus átviteli módszeren alapuló (TOKSÖZ, 1979), VINCI Technologies AVS-700 típusú műszerrel történt. A kőzetminták egy nagynyomású triaxiális befogadóban (Hassler-cella) vannak elhelyezve, így 0-700 bar-os radiális-, axiális- és pórusnyomás tartományban lehet vizsgálni a kompressziós és nyíróhullám átfutásához szükséges időket. A mintatest hosszának ismeretében a terjedési sebességek számolhatóak. A P- és S-hullám terjedési időkből – a szakirodalomban közölt képletekkel – meghatározhatóak a kőzetre vonatkozó dinamikus rugalmassági paraméterek (2. táblázat). A rugalmassági paraméterek számolásához szükséges közetsűrűség értékek a mintákon végzett He-piknometriás mérésekből származnak.

2. táblázat Dinamikus rugalmassági paraméterek számításához alkalmazott képletek (Formulas used for calculation of dynamic elastic parameters)

Rugalmassági paraméter	Számítási mód
Sebességek	$V_{P,S1,S2} = \frac{L}{t_{\text{terjedés}} - C_{\text{korr}}}$
Poisson-tényező	$\nu = \frac{1/2 - (V_S/V_P)^2}{1 - (V_S/V_P)^2}$
Young-modulus I. (Poisson-tényező)	$E_I = \rho \frac{V_P^2(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$
Young-modulus II. (sebesség)	$E_{II} = \rho \left( \frac{V_{S1} + V_{S2}}{2} \right)^2 \cdot \left( \frac{3V_P^2 - (V_{S1} + V_{S2})^2}{V_P^2 - \left( \frac{V_{S1} + V_{S2}}{2} \right)^2} \right)$
Térfogati-tényező	$K = \rho \left[ V_P^2 - \frac{4}{3} \left( \frac{V_{S1} + V_{S2}}{2} \right)^2 \right]$

Ahol:

- V<sub>p</sub> P-hullám terjedési sebessége [m/s]
- V<sub>S1</sub>, V<sub>S2</sub> S-hullám terjedési sebessége [m/s]

$\rho$	Kőzetváz sűrűsége [g/cc]
$\nu$	Poisson-tényező [dimenzió nélküli szám]
E	Dinamikus Young-modulus [Pa]
K	Dinamikus térfogati tényező [Pa]
$\mu$	Dinamikus Nyírási-modulus [Pa]

A dinamikus modulusok meghatározásához a kompressziós és nyíróhullámok átfutási idejének detektálása szükséges. Ezeknek és a vizsgált mintatest hosszának ismeretében a P- és S-hullámok terjedési sebessége „elvileg” (kisebb-nagyobb bizonytalansággal) meghatározható. A zaj/jel arány csökkentése érdekében 128-szoros vertikális átlagolás volt beállítva az oszcilloszkópon, ami a triggerelt hullámképek időbeli futóátlagolását eredményezte.

Az átfutási idők detektálása a GEOCHEM Kft. által fejlesztett, STA/LTA és Akaike információkritériumon (Akaike, 1973) alapuló AIC program segítségével történt. A program egy félautomata jelfeldolgozást tesz lehetővé, így csökkenthetőek az emberi tényezőtől adódó bizonytalanságok, továbbá a szükséges bemenő paraméterek megadásával és a terjedési sebességekből a program automatikusan elvégzi a dinamikus paraméterek számítását.

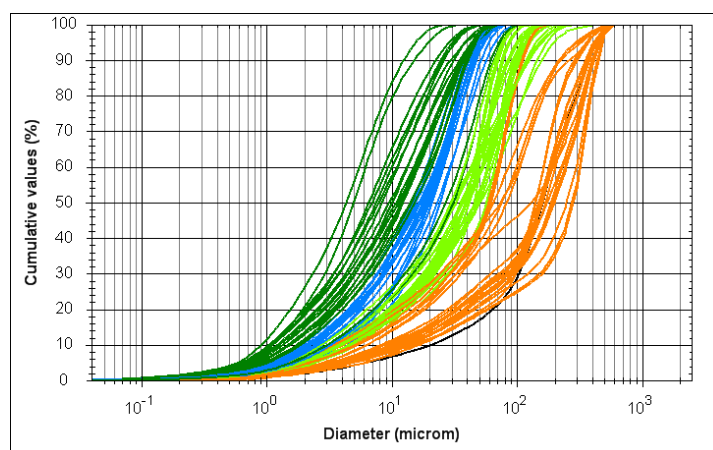
### 4.3 He-piknometriás mérések

Mind a tömegállandóságig szárított törmelékes minták, mind a kialakított mintatestek légszáraz és tömegállandóságig szárított állapotban He-piknometriás mérésre kerültek. A módszer lényege, hogy ismert térfogatú kalibrált mintatartó és ismert referenciatérfogat esetén a Boyle-Mariotte törvény alapján a mintatartóba tett minta mátrix (valódi) térfogata meghatározható. Ha a minta tömege ismert, akkor a közetsűrűség is jó közelítéssel meghatározható (a zárt pórusok pórustartalma és az tapadóvíz-telítettség torzítja az eredményt). Amennyiben a mintatest geometriai térfogata is ismert, akkor a minta effektív porozitása, valamint fajlagos térfogata is számítható.

## 5. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

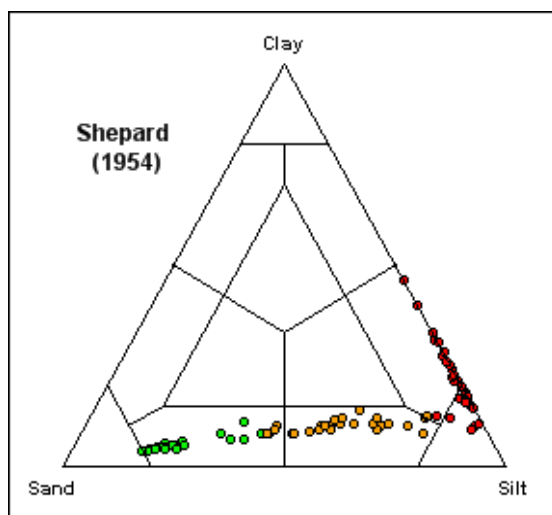
### 5.1 Szemcseméret vizsgálati eredmények:

A Bánk-2 fűrásból összesen 84 szemcseméret analízis történt, melyeknek eredményét a 2. ábra mutatja. Mint azt a bemutatott ábrák is jól szemléltetik, a minták többsége rosszul osztályozott, aszimmetrikus eloszlású, gyakran mellékmódus is megjelenik. Az aleuritok görbéi jól elkülöníthetőek. Az aleuritós homokok, homokos aleuritok és agyagos aleuritok átfedéseket mutatnak egymással.



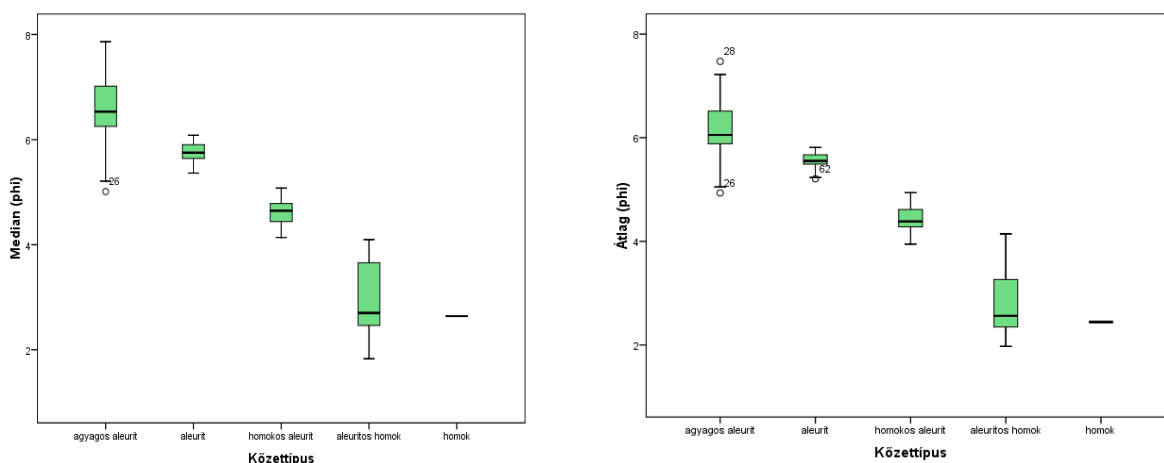
**2. ábra** Szemcseméret eloszlás - kumulatív görbe. A színek a Shepard-osztályokhoz alkalmazkodnak: homok – fekete, aleuritós homok – narancssárga, homokos aleurit – világos zöld, aleurit – kék, agyagos aleurit – sötét zöld (*Cumulative curve of grain size distribution. Colors based on Shepard's classification*)

A minták osztályozása a Shepard-féle háromszögdiagram (SHEPARD, 1954.) alapján történt a PSDI program segítségével (3. ábra). Ez alapján 1 db homok, 27 db aleuritós homok, 21 db homokos aleurit, 16 db aleurit és 19 db agyagos aleurit különíthető el.



**3. ábra** Shepard-diagram. A színek a Folk-féle osztályozást mutatja: Agyag és aleurit - piros, Homokos agyagos aleurit - narancssárga, Agyagos aleuritos homok - zöld  
(The Shepard ternary diagram. Colors based on Folk's classification)

Az 4. ábrán látható box-plotok alapján elmondható, hogy a homokos aleurit és aleuritos homok elkülönül egymástól, az agyagos aleurit és aleurit, azonban nagy hasonlóságot mutat. A homok kategóriába eső egyetlen minta átlag és medián értékeit tekintve az aleuritos homokkal mutat egyezést.

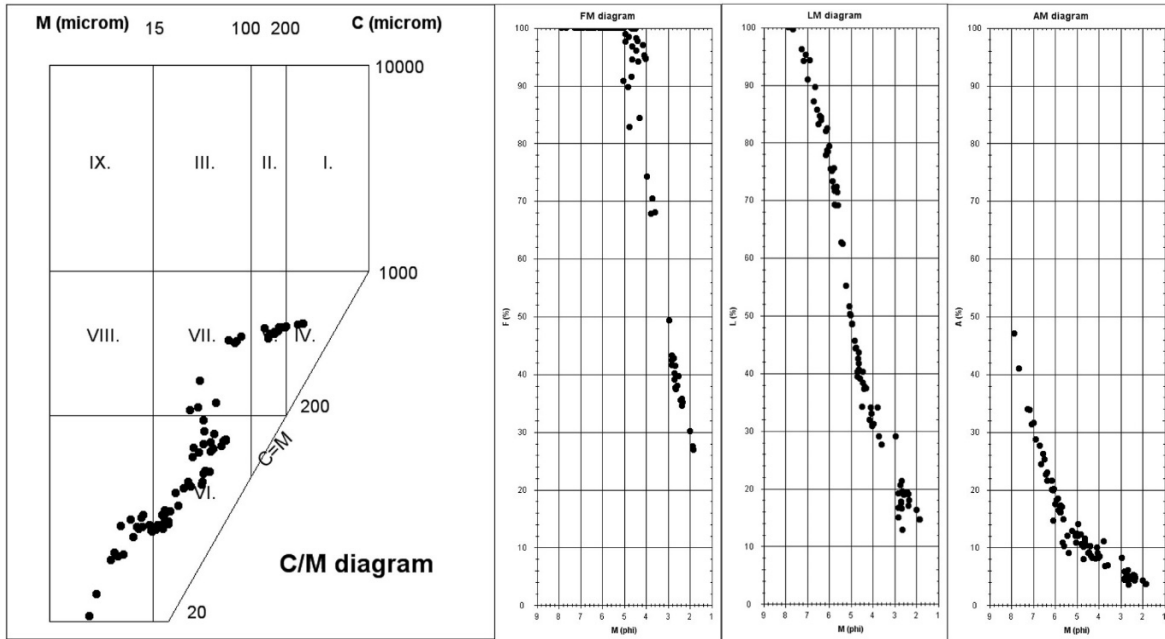


**4. ábra** A medián (bal oldal) és átlag (jobb oldal) értékei phi skálán üledéktípusonként (Medians (left) and means (right) on phi-scale by lithology types)

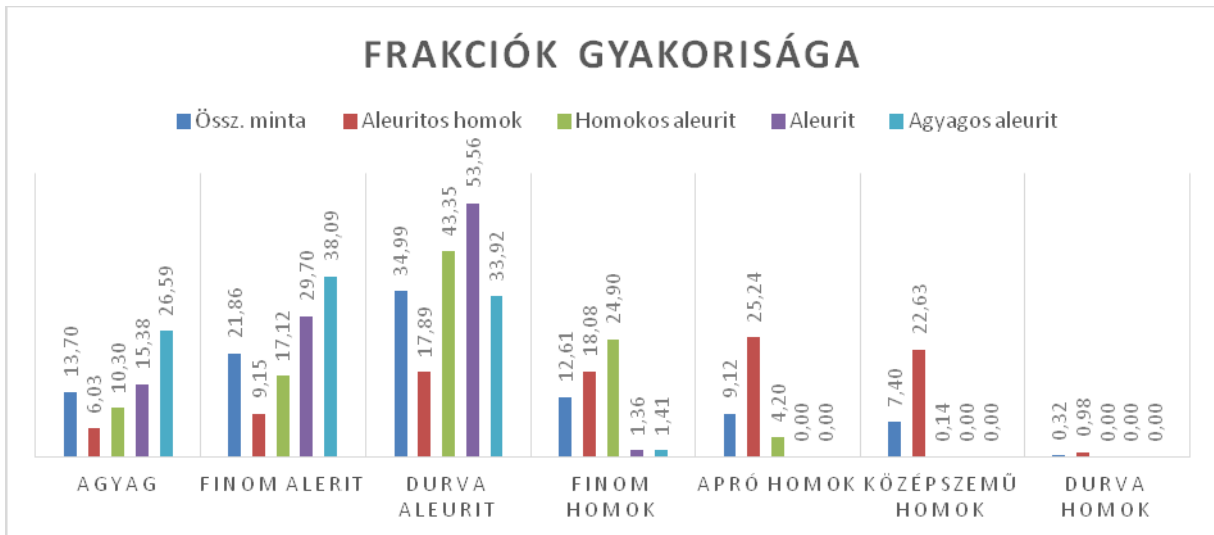
A szemcseméret jellemzésére az eloszlás két statisztikai paramétere került meghatározásra: az 50 kumulatív %-hoz (medián) tartozó átmérő és az átlag. Ezek phi mértékegységben kerültek kifejezésre, amely a mm-ben megadott szemcseméret negatív, kettes alapú logaritmus. A medián és átlag értékek eloszlása igen hasonló képet mutat, a közöttük  $r^2=0,99$  korrelációs együttható adódik. Emiatt a későbbiek során a medián értékek használata volt egyszerűbb.

A 5. ábra az üledékek felhalmozódási környezetéről, annak energiaviszonyairól ad tájékoztatást. A CM diagram a legdurvább frakció szállítódásának körülményeit jelzi. Az AM, FM és LM diagramokon az ábrázolt trend meredeksége a különböző frakciók osztályozottságára utal, minél meredekebb, annál osztályozottabb az adott finomfrakció a mintahalmaz egészére nézve. A CM diagramon a minták egy S alakú görbét rajzolnak ki a homogén- és osztályozott szuszpenzió tartományában. Ezt az AM diagram felfelé konvex jellege és az LM diagram görbe lefutása is alátámasztja. Itt gyengébb turbulencia jellemezheti a közeget. A minták egy része azonban a pelágikus szuszpenzió tartományába esik, amely nyugodtvízi, áramlásoktól mentes üledék lerakódásra jellemző.





5. ábra Passega félé CM, FM, LM és AM diagramok(PASSEGA, 1957., 1964.) (CM,FM,LM,AM diagram of Passega)



6. ábra Az egyes szemcseméret frakciók átlagos aránya az összes mintában és üledéktípusonként (Proportion of fractions in the samples and different lithologies)

Leggyakoribb frakciók a durva és a finom aleurit (6. ábra). A homok frakcióból legjellemzőbb a finom homok jelenléte, míg apró és közepes szemű homok csak bizonyos osztályokban fordul elő, a durva homok mennyisége elenyésző. Az agyag és a finomhomok aránya közel azonos. Az elemzésre került minták mindegyike inkább finomszemcsés üledék.

A szemcseméret-eloszlás, a porozitás és az akusztikus hullámterjedésből számolt kőzetmechanikai paraméterek kapcsolata

Bár még csak előzetes információk állnak rendelkezésre, a gázos permeabilitás és porozitás értékek alapján kulcsfontosságúnak tűnik az aleurit, a homokos aleurit és az aleuritit homok elkülönítése a lyukgeofizikai szelvényeken a besajtolásra kijelölendő rétegek lehatárolásakor főként azért, mert a rétegsor nagyon heterogénnek tekinthető, azaz az aleurit-tartalom kisebb-nagyobb mértékben minden esetben meg fog jelenni. Az 4. ábrán jól látható volt, hogy a szemcseméret analízis alapján ezek a kőzetkategóriák jól lehatárolhatóak. Kérdés, hogy a laboratóriumi akusztikus mérések, melyek a lyukgeofizikai akusztikus mérésekkel fizikailag azonos módon történnek, tükrözik-e ezt a hatást?

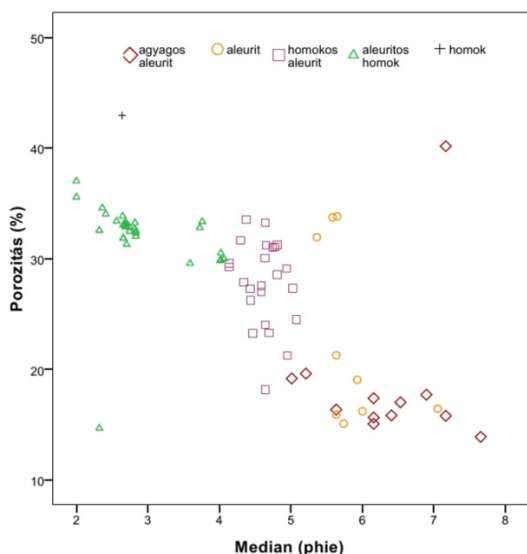
A szemcseméret eloszlás, a kőzet szöveti jellege és a kőzetmechanikai paraméterek közötti kapcsolatok az alábbi módon jellemezhetőek. Az 3. táblázat a légnedves, a szárított állapotban mért porozitás, a szemcseméret eloszlás mediánjának egymáshoz és az egyes frakciók arányához való kapcsolatát mutatja be. Az átlagos szemcseméret finomodása és a porozitás érték csökkenése (8. ábra) tapasztalható az agyag és a finom aleurit frakció mennyiségének növekedésével. Erre vezethető vissza a porozitás és a szemcseméret közötti inverz kapcsolat is (7. ábra).

Az 3. táblázat eredményei azt mutatják, hogy az agyag- porozitás közötti kapcsolat gyengült a szárítást követően. Ennek oka lehet az ebben a mérettartományban megjelenő duzzadó agyagásványok elvesztették víztartalmuk jelentős részét.

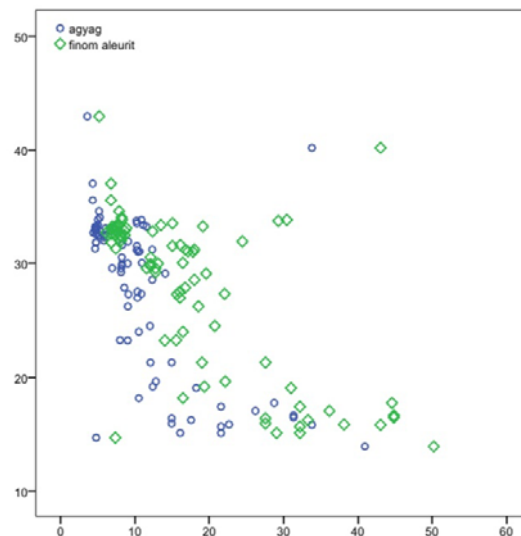
Habár az apró homok mennyisége és a szemcseméret eloszlás mediánja között erős a kapcsolat, a porozitással nem mutatható ki ilyen mértékű összefüggés. Ennek oka lehet, hogy ennek a frakciónak az arányában üledéktípusonként nincs olyan nagy különbség, mint az agyag és finom aleurit esetében (6. ábra).

**3. táblázat** A légszáraz (L) és szárított (Sz) állapotban mért porozitás, a medián (Md), a medián és az egyes frakciók gyakoriságának kapcsolata (*The correlation of the median (Md), the proportion of fractions and the porosity of air-dry (L) and dried (Sz) samples*)

N=76	Agyag	Finom aleurit	Durva aleurit	Finom homok	Apró homok	Középszemű homok	Durva homok	Md (phi)
Porozitás (L)	-0,767	-0,765	-0,445	0,394	0,610	0,496	0,467	-0,757
Porozitás (Sz)	-0,738	-0,772	-0,536	0,397	0,607	0,447	0,411	-0,733
Md (phi)	0,908	0,962	0,580	-0,418	-0,821	-0,800	-0,765	1,000



**7. ábra** A medián és a porozitás kapcsolata (*Relationship between median and porosity*)



**8. ábra** A porozitás (y-tengely) és az egyes frakciók arányának(x-tengely) kapcsolata (*Relationship between porosity (y-axis) and proportion fractions (x-axis)*)

Mivel a kőzet porozitása és a szemcseméret között inverz összefüggés van, ezért a medián és a hullámterjedési sebességek között is hasonló összefüggés várható (9. ábra). Az eredmények alapján a VP és VS, valamint a Young-modulus kapcsolata sokkal erősebb az agyag és a finom aleurit frakció arányával, mint a szemcseméret eloszlás mediánjával (9. ábra), a VP/VS arány és a Poisson-tényezővel a kapcsolat pedig igen gyenge (4. táblázat).

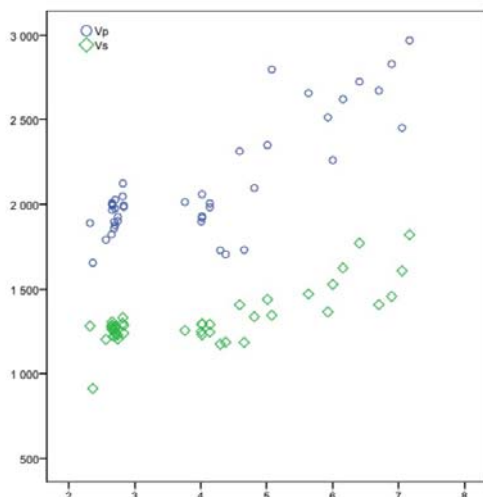
Elmondható, hogy az egyes frakciók arányának változása a vizsgált minták esetében inkább jelzi a rugalmassági paraméterek változását, azaz geomechanikai minősítés során nem csak az átlagos szemcseméretet, de az egyes frakciók arányát is érdemes figyelembe venni. A beágyazottság



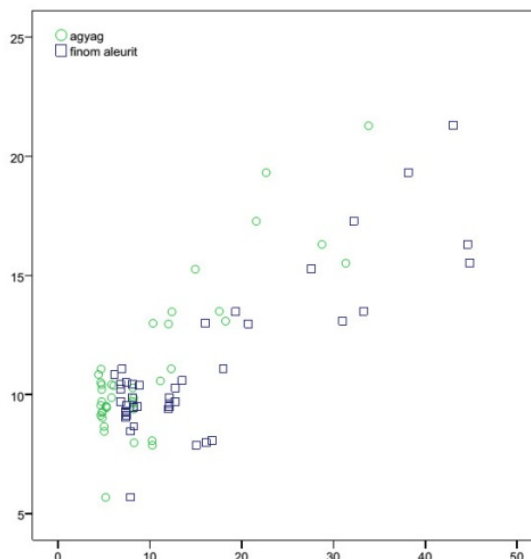
mértékének, a cementáltság fokának és minőségének, az ásványos összetételnek is befolyásoló szerepe van a szilárdsági és rugalmassági paraméterekre. melyet a későbbiekben vizsgálni szükséges.

**4. táblázat** Az AVS 700-as műszerrel mért és számított paraméterek kapcsolata a mediánnal  
(*Relationship between different parameters*)

	VP	VS	VP/VS	Poisson-tényező	Young-modulus
<b>Md (phi)</b>	<b>0,794</b>	<b>0,746</b>	0,409	0,428	<b>0,807</b>
<b>Agyag</b>	<b>0,811</b>	<b>0,799</b>	0,370	0,416	<b>0,861</b>
<b>Finom aleurit</b>	<b>0,820</b>	<b>0,786</b>	0,406	0,436	<b>0,851</b>



**9. ábra** A medián (phi) értéke (x-tengely) és a hullámok terjedési sebessége (y-tengely)(*Median phi scale (x-axis) and the velocity of waves (y-axis)*)



**10. ábra** A Young-modulus értékének alakulása (GPa, y-tengely) és az egyes frakciók aránya (% x-tengely) közötti kapcsolat (*Relationship between Young's modulus (GPa, y-axis) and proportion of fractions (% x-axis)*)

### 5.2 Légszáraz és szárított mérési eredmények összevetése:

A légszáraz mérések esetén a tapasztalat azt mutatja, hogy a víztelítettség mértéke mintánként jelentősen különbözik, időben változik, azaz mindenképp célszerű vizsgálni a légszáraz, száraz és víztelített állapotban mért paraméterek közötti összefüggéseket.

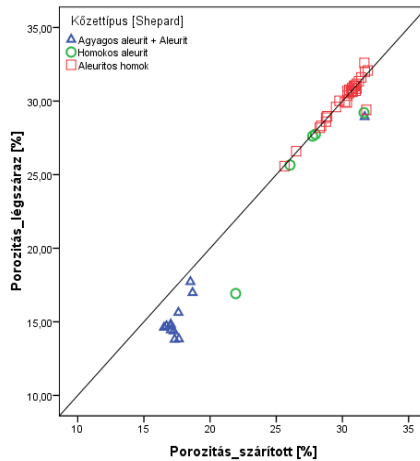
Ennek első lépéseként 49 db minta esetén a szárítás, kőzetfizikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának jellemzése történt meg. A 5. táblázat a légszáraz és szárított állapotú mérések esetében szemlélteti az egyes paraméterek közötti összefüggéseket.

A porozitás légszáraz és szárított állapotú eredményei (11. ábra) közötti korreláció nagyon szoros kapcsolatot jelez ( $r^2=0,989$ ), a szárítás hatására bekövetkező porozitás változás elenyésző a teljes mintahalmazon belül. Ellenben finomabb frakcióba tartozó minták esetében a porozitás növekedése következett be a szárítás hatására. Homokok esetében ez a trend nem figyelhető meg.

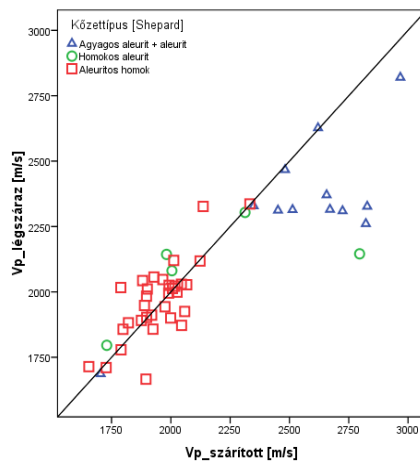
Homokkövekben a  $V_p$  szórása mérés technológiából adódó bizonytalanságokra vezethető vissza. A finomszemű üledékekben szárítás hatására a terjedési sebességek növekedését lehetett tapasztalni (12. ábra).

**5. táblázat** Különböző állapotú mérések kapcsolatai ( $\phi$  – porozitás, dens – fajlagos sűrűség)  
(Correlations for different type of measurement)

N = 49		$\phi$	Dens	Vp	Vs	Poisson	Young-mod	Bulk-mod	Sher-mod
$\phi$	légszáraz	1	-0,987	-0,792	-0,686	-0,353	-0,626	-0,659	-0,552
	szárított	1	-0,744	<b>-0,916</b>	<b>-0,798</b>	<b>-0,594</b>	<b>-0,896</b>	<b>-0,853</b>	<b>-0,818</b>
Dens	légszáraz		1	0,801	0,696	0,356	0,624	0,658	0,549
	szárított		1	0,692	0,689	0,347	0,736	0,604	0,708



**11. ábra** Szárítás hatása a porozitásra (Drying resulted porosity change)

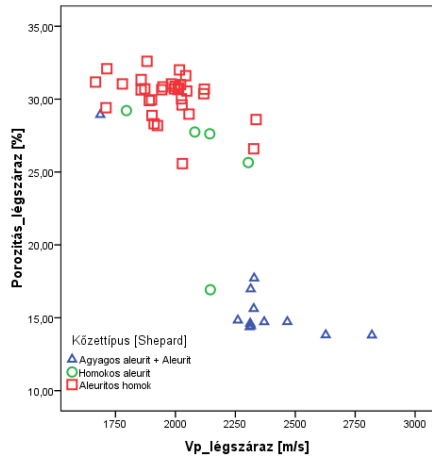


**12. ábra** Szárítás hatása a hullámterjedési sebességekre (Changing in compressional wave velocity resulting from drying)

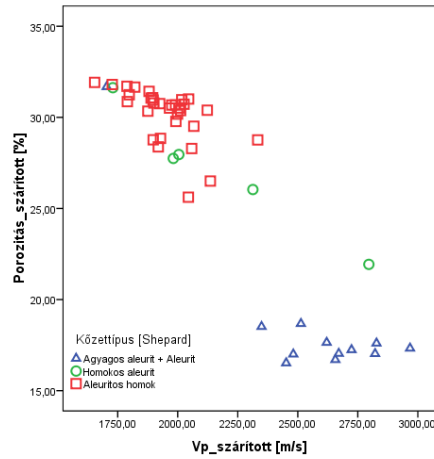
Méréstechnikailag a nyíróhullám (S1, S2) detektálása jelenti a nehezebb feladatot, így az eredmények bizonytalansága nagyobb ott, ahol egy adott paraméter számítása a nyíróhullám terjedési sebességekkel számol. A légszáraz és száraz állapotú méréseknél nem lehet trendszerű kapcsolatot megállapítani, az eredmények nagy szórása miatt.

Homokkővek esetében a  $\phi$ -Vp kapcsolat szorossága a szárítás hatására növekedett (13. ábra, 14. ábra), a korrelációs koefficiens értéke -0,792-ről -0,916-ra módosult (5. táblázat), ami arra enged következtetni, hogy az akusztikus vizsgálat esetében indokolt a mintatestek szárítása. A finomszemű frakcióban a porozitás szűk intervallumában a Vp értékek nagy szórása jellemző.

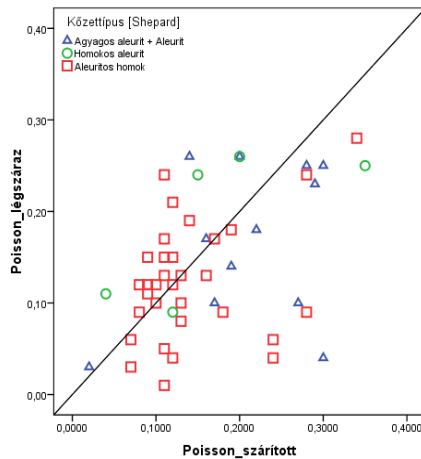
A származtatott dinamikus rugalmassági paraméterek közül a Poisson-tényező érzékeny legnagyobb mértékben a Vp/Vs arány megváltozására. Laboratóriumi körülmények között a kis mintahossz és a detektálásból eredő bizonytalanságok miatt a Vp/Vs arány meghatározása a leginkább bizonytalanságokkal terhelt. Kőzettípusonként nagyon nagy átfedések tapasztalhatóak a Poisson-tényező értékei között (12. ábra). (Más közzefizikai paraméterek –porozitás, permeabilitás– jól definiálhatóak a kőzettípusok szerinti várható értékek)



13. ábra Porozitás és  $V_p$  kapcsolata a légszáraz minták esetében (*Porosity vs compressional wave velocity in air-dry samples*)



14. ábra Porozitás és  $V_p$  kapcsolata a szárított minták esetében (*Porosity vs compressional wave velocity in dried samples*)



15. ábra A Poisson-tényező kapcsolata légszáraz és szárított mintákban (*Poisson's ratio in air-dry vs dried samples*)

A Shepard-féle osztályozás alapján kialakított litológiai csoportokon belül a Young-modulus értékek a szárított minták esetében a (12. ábra) ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy míg az aleurolit jól elkülönül, addig a homokos aleurolit-aleurolitos homok a Young-modulus alapján nem különíthető el, azaz úgy tűnik, önmagában az akusztikus lyukgeofizikai mérések még kalibrálást követően sem lesznek alkalmasak a homokos aleurolit és aleurolitos homok elkülönítésére.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

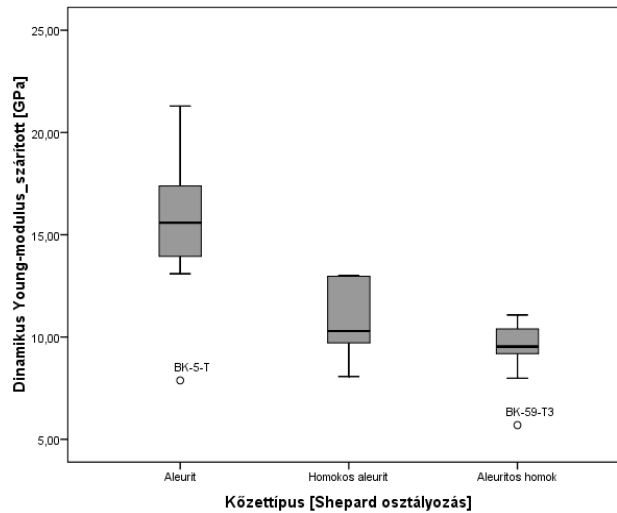
Az eddigi vizsgálatok eredményeképpen elmondható, hogy a dinamikus rugalmassági paraméterek inverz kapcsolatot mutatnak a porozitás és a szemcseméret eloszlás medián értékeivel.

A Poisson-tényező esetében ez a kapcsolat nem mutatható ki. Ennek oka, hogy mérés technológiailag a legnagyobb bizonytalansága a  $V_p/V_s$  arány pontos meghatározásának van, amire a Poisson-tényező nagyon érzékeny. A jövőbeli célkitűzéseink között szerepel a  $V_p/V_s$  arány meghatározásának pontosítása.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a minta előkészítése jelentős mértékben befolyásolja a vizsgálati eredményeket. Jóllehet az in-situ környezetben és a laboratóriumi környezetben történő mérések más-más víztelítettségi viszonyok mellett zajlanak, elsődlegesen a víztelítettség mértékének hatását célszerű kiküszöbölni, különösen a finomszemű üledékek vizsgálata során.

A vízbesajtolás tervezése szempontjából kulcsfontosságúnak tűnik az aleuritartalom (homokos aleurit – aleuritós homok) mértékének becslése, mely akusztikus mérésekkel csak részben megoldható.

A jövőben el kell végezni a közzetszöveti és szerkezeti paraméterek (ásványos összetétel, szemcse beágyazottság, cementáltság vizsgálatok) részletesebb vizsgálatát, valamint a különböző telítettségi viszonyok mellett végzett permeabilitás-porozitás-akusztikus hullámterjedés-ellenállás vizsgálatok összevetését. Cél, hogy az eredmények elősegítsék a besajtolásra alkalmas rétegek lehatárolását leginkább elősegítő lyukgeofizikai módszerek együttesének kijelölését, kalibrálását.



16. ábra Dinamikus Young-modulus értékek közzet típusonkénti megoszlása (*Dynamic Young's modulus in different lithologies*)

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az adatgazda Mecsekérc Zrt.-nek az adatok rendelkezésre bocsájtásáért, Csicsák Józsefnek és Szulimán Szilviának, a Mecsekérc Zrt. adott projekttel kapcsolatos támogató tevékenységéért, valamint Nagy Alexandrának a GEOCHEM Kft. akusztikus és szemcseméret eloszlás mérését és értelmezését segítő programjainak fejlesztéséért.

## IRODALOM JEGYZÉK:

- Akaike, H. 1973: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, *Second International Symposium on Information Theory*, Budapest, 267-281.
- Brace, W. F. 1961: Dependence of fracture strength of rocks on grain size, *4. symposium on rock mech.*, 99-103.
- Fahy, M. P., Guccione, M. J. 1979: Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data, *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, **16**, 467-485
- Mingard, K., Morell, R., Jackson, P., Lawson, S., Patel, S., Buxton, R. 2009: *Measurement Good Practice Guide No. 111: Good practice guide for improving the consistency of particle size measurement*, National Physical Laboratory
- Passega, R. 1957: Texture as a characteristic of clastic deposition. *AAPG Bull*, 41, 1952—1984
- Passega, R. 1964: Grain size representation by CM patterns as a geological tool. — *J. Sed. Petrol.* 34, 830—847
- Shakoor, A., Bonelli, R. E. 1991: Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties and mechanical properties of selected sandstone, *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, 28, 55-71
- Shepard, F. P. 1954: Nomenclature based on sand-silt-clay ratios., *J. Sed. Petrol.*, 24, 151-158
- Ulusay, R., Türeli, K., Ider, M. H. 1994: Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques, *Engng Geology* **37**, 135-157