

A gyöngyöSOROSZI andezit reológiai tulajdonságai

Rheological properties of the andesite from GyöngyöSOROSZI

Ván Péter^{1,2,3}, Lökös Sándor^{4,5}, Polyák Zoltán⁴, Kovács László⁶

¹MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske és Magfizikai Intézet, Elméleti Fizika Osztály, Budapest;

²BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Budapest;

³Montavid Termodinamikai Kutatócsoport, Budapest;

⁴Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest;

⁵Eszterházy Károly Egyetem, Gyöngyös;

⁶Kömmérő Kft., Pécs.

E: van.peter@wigner.mta.hu

Kulcsszavak: andezit, reológia, statikus Young modulus, Young dinamikus modulus, Einstein Teleszkóp

Keywords: andesite, rheology, static and dynamic elastic properties, Einstein Telescope

ÖSSZEFOGLALÁS: Andezit minták egytengelyű ciklikus terheléses laboratóriumi vizsgálatával kapott mérési eredményeket értékeltük ki a reológiai Kluitenberg-Verhás-test alapján. A mintákban relaxációt és kúszás is megfigyelhető. A kapott eredmények összhangban vannak a hullámterjedési sebességből számolt dinamikus rugalmassági adatokkal.

1. Bevezetés

A földalatti telepítésű harmadik generációs gravitációshullám detektorok esetén fontos az alacsony frekvenciás, 0,1-10Hz-es zajok csillapítása. Ennek megméréséhez a telepítési helyszínek kőzeteinek reológiai tulajdonságait kell jól ismerni. Magyarországon a Mátrában található gyöngyöSOROSZI mélyművelésű bányában végzett vizsgálatokban kiváló zajcsillapítási paramétereket mutattak ki (ET Science Team, 2011), ezért létrejött a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium a helyszín felmérésére. Ebben a munkában a mátrai szürke andezit kőzetmechanikai-reológiai vizsgálatainak eredményeit ismertetjük.

2. A mátrai szürke andezit kőzetmechanikai tulajdonságai

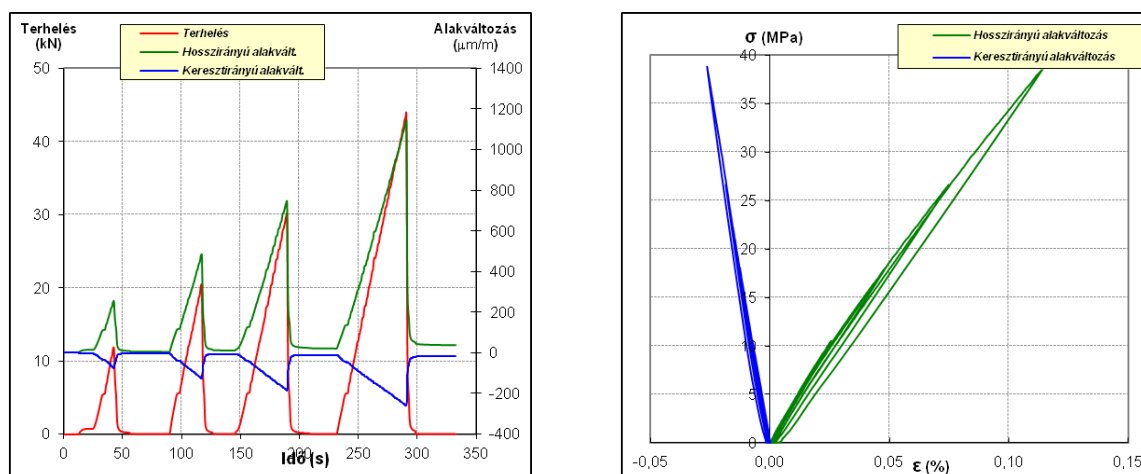
A Mátra hegység tömegét jellemzően többféle korú és típusú andezites vulkanizmus hozta létre, de ezek közül is kiemelkedik a középső miocén bádeni emeletében, hozzávetőleg 14,5 millió éve kialakult, ún. középső rétegvulkáni sorozat. Ezt követően még több ciklusban, egészen a felső-miocénig keletkeztek változó összetételű és anyagi minőségű andezitek. A vizsgált gyöngyöSOROSZI – mátraszentimrei terület fő tömegét a tortonai (felső-miocén) korú vulkánossághoz kapcsolódó, differenciált andezitláva (felső andezites sorozat) alkotja. Ez a jellemzően piroxén-andezit képződmény mészkalkáli rétegvulkánnak tekinthető. Az említett középső- és felső-miocén vulkanizmus-ciklusokhoz kapcsolódó hidrotermális oldatok GyöngyöSOROSZI és Mátraszentimre térségében mezotermális jellegű, az ólom-cink-réz teleptípusba besorolható polimetallikus ércesedést hoztak létre (Siklóssy, 1977). Az újabb kutatások szerint a területen számos mélyégi intruzív benyomulás is található (Földessy, 2016) ami tovább fokozza a terület földtani változékonyságát. A laboratóriumi vizsgálatok céljára egy, a földalatti labor térségének robbantott készletéből származó

kőzettömb állt rendelkezésünkre. Nem tisztázott pontosan, hogy ez a tömb melyik rétegszintből származik. Az 1.a ábrán látható kőzettömb is változó összetételűnek bizonyult: az abból kifűrt összesen 7 db minta nagyobb része középszürke, finomszemű, irányítatlan piroxén-andezit, de a tömb változékonyságából adódóan egyes mintákban kvarccal cementálódott breccsa is megfigyelhető.



1.ábra a: A föld alatti laboratórium térségéből mintázott andezit kőzettömb a minták kifűrése után; **b:** A kiértékeléshez használt 01/03 sz. szabványos minta a mérőbéllyegekkel.

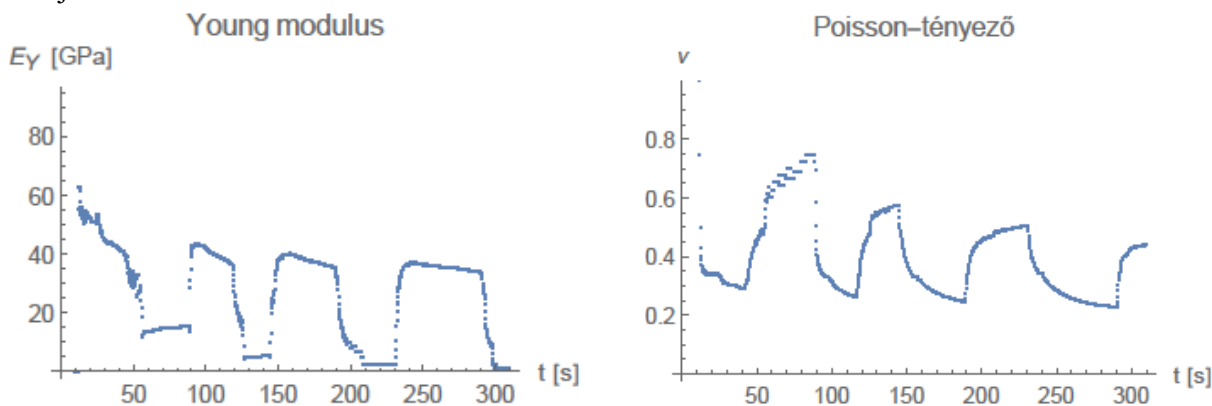
A vonatkozó közetmechanikai szabványok szerint jobbra csak az előbbieket voltak tesztelhetők; az utóbbiak már a mintaelőkészítés során hajlamosak voltak a szétesésre. Valamennyi mintán alárendelten megfigyelhetők voltak mállási jelenségek is. A közeli gyöngyössolymosi külszíni kőbányából származó mintatesteken nagy számban elvégzett egytengelyű nyomószilárdsági vizsgálatok szerint a finom szövetű andezitek átlagos UCS-e (uniaxial or unconfined compressive strength) meghaladta a 110 MPa-t (Czinder & Török 2015). Ezzel összevetve a mátraszentimrei tömbből kialakított minták gyengébbnek mutatkoznak, mivel egyetlen, már eltört minta UCS értéke sem érte el a 90 MPa-t sem. Ez a már említett mállottság, illetve az anyagi inhomogenitás mellett abból is adódhat, hogy a térségből kivett kőzettömböt a földalatti robbantások roncsoló hatásai erősebben igénybe vették.



2.ábra a: A ciklikus terhelési feszültség az axiális (jobbra) és laterális deformáció (balra) függvényében. **b:** A terhelés, a hosszirányú és a keresztirányú alakváltozás az idő függvényében.

3. A kőzetminták reológiai tulajdonságainak mérése

A többciklusos hiszterézis-mérést egy Hidraulikus 150kN eszközzel, HBM C6A (1MN) erőmérő cellával és HBM Spider 8 & CatmanEasy-vel végeztük a Kőmérő Kft. kőzetmechanikai laboratóriumában. Az általunk górcső alá vett minta átmérője 37,99 mm, hossza 78,33 mm és tömege 0,2213 g. A felterhelési sebesség minden ciklusban 0,7 kN/s volt. A 2.a ábra mutatja a mért adatokat az idő függvényében, illetve a 2.b ábra a feszültséget az axiális, illetve a laterális deformáció függvényében. Jól megfigyelhető a reológiai hiszterézis és a maradó alakváltozás is. A ciklusok közötti kúszás nem fejeződik be a következő ciklus kezdetéig, de az ábrán látható, illetve ezeknek a szakaszoknak a részletesebb vizsgálata is azt mutatja, hogy lesz maradó deformáció a kúszás befejeződése után is.



**3. ábra a: A laterális és az axiális deformáció hányadosa az idő függvényében.
b: A feszültség és az axiális deformáció hányadosa az idő függvényében.**

A laterális az axiális deformáció hányadosát, illetve a feszültség és az axiális deformáció hányadosát az idő függvényében ábrázolva látható, hogy a Poisson-tényező és a Young-modulus még a felterhelési szakaszokon sem tekinthető állandónak, vagyis a szokásos átlagmeredekséggel történő kiértékelés helyett az időfüggést is tekintetbe vevő reológiai kiértékelés megbízhatóbb adatokat adhat.

4. Kluitenberg-Verhás test és statikus-dinamikus rugalmasság

A kőzetmechanikában régóta ismert a hullámterjedési sebességekből mért dinamikus rugalmassági jellemzők és a laboratóriumi és in situ feszültség-deformáció mérésekből kapott rugalmassági jellemzők eltérése (Savich 1984; Mockovciakova és Pandula 2003; Najibi et al 2015; van Heerden 1987; Gercek 2007). Ennek egyszerű magyarázatát adja a termodinamikailag alapvető Kluitenberg-Verhás-test (KV-test), amely alacsony és magas frekvenciákon eltérő hullámterjedési sebességeket jósol (Asszonyi et al 2015, Barnaföldi et al 2016; Barnaföldi et al 2017). A KV-test izotróp esetben a feszültség-deformáció között a deviatorikus és a gömbi részre a következő differenciálegyenletet jelenti:

$$\tau_d \dot{\sigma}_d + \sigma_d = E_{2d} \ddot{\varepsilon}_d + E_{1d} \dot{\varepsilon}_d + E_{0d} \varepsilon_d \quad (1)$$

$$\tau_s \dot{\sigma}_s + \sigma_s = E_{2s} \ddot{\varepsilon}_s + E_{1s} \dot{\varepsilon}_s + E_{0s} \varepsilon_s \quad (2)$$

Itt d és s index jelöli a σ feszültség és az ε deformáció deviatorikus és gömbi részeit, azaz hengeres szabványos minta egytengelyű terhelése esetén, σ , ε_a , ε_1 mért feszültség, axiális és

laterális deformációval, $\sigma_s = \sigma/3$, $\sigma_d = 2\sigma/3$, $\varepsilon_s = (\varepsilon_a + 2\varepsilon_l)/3$ és $\varepsilon_d = 2(\varepsilon_a - \varepsilon_l)/3$. (1) és (2) egyenletekben $E_{0d} = 2G$ és $E_{0s} = 3K$ a statikus nyírási Lamé-állandó és a térfogati Lamé-állandók. A fenti Kluitenberg-Verhás-egyenletek a standard Poynting-Thomson-test egyenleteire egyszerűsödnek, ha az E_{2d} és E_{2s} tehetetlenségi paraméterek nem játszanak szerepet. Ebben az esetben a dinamikus nyírási és térfogati Lamé-állandók kiszámításához az egyenletek alábbi átrendezése ad segítséget:

$$E = \frac{9KG}{3K + G} = \frac{3E_{0s}E_{0d}}{2E_{0s} + E_{0d}}, \quad \nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} = \frac{E_{0s} - E_{0d}}{2E_{0s} - E_{0d}} \quad (3)$$

$$\tau_d \dot{\sigma}_d + \sigma_d - E_{1d} \dot{\varepsilon}_d - E_{0d} \varepsilon_d = \tau_d \frac{d}{dt} (\sigma_d - b_d E_{0d} \dot{\varepsilon}_d) + \sigma_d - E_{0d} \varepsilon_d = 0 \quad (4)$$

$$\tau_s \dot{\sigma}_s + \sigma_s - E_{1s} \dot{\varepsilon}_s - E_{0s} \varepsilon_s = \tau_s \frac{d}{dt} (\sigma_s - b_s E_{0s} \varepsilon_s) + \sigma_s - E_{0s} \varepsilon_s = 0 \quad (5)$$

ahol $b_d = E_{1d}/(\tau_d E_{0d})$ és $b_s = E_{1s}/(\tau_s E_{0s})$ dinamikus és statikus Lamé-állandók aránya. A továbbiakban még használni fogjuk a Young-modulus és a Poisson-tényező kiszámítására az összefüggéseket, mind a dinamikus, mind a statikus esetben.

5. A reológiai paraméterek meghatározása

Az előzőekben ismertetett 01-03-as mintán a dinamikus Young modulus a hullámterjedési sebesség standard mérése alapján $E_{dyn} = 41,35$ GPa-nak adódott és a Poisson-tényezőt $\nu = 0,25$ -nek feltételezve $2G_{dyn} = 33,3$ GPa-nak adódik. Ugyanezen kőzetből vett másik mintán (01-01-es) a P- és S-hullámok külön méréseivel $E_{dyn} = (38,6 \pm 1,1)$ GPa, illetve $\nu = 0,18 \pm 0,01$ értékeket kapjuk.

| Hagyományos | 2G [GPa] | 3K [GPa] | E [GPa] | ν |
|---------------|----------|----------|---------|-------|
| 3. ciklus fel | 28,2 | 64,3 | 34,7 | 0,23 |
| 4. ciklus fel | 27,3 | 56,6 | 33 | 0,2 |

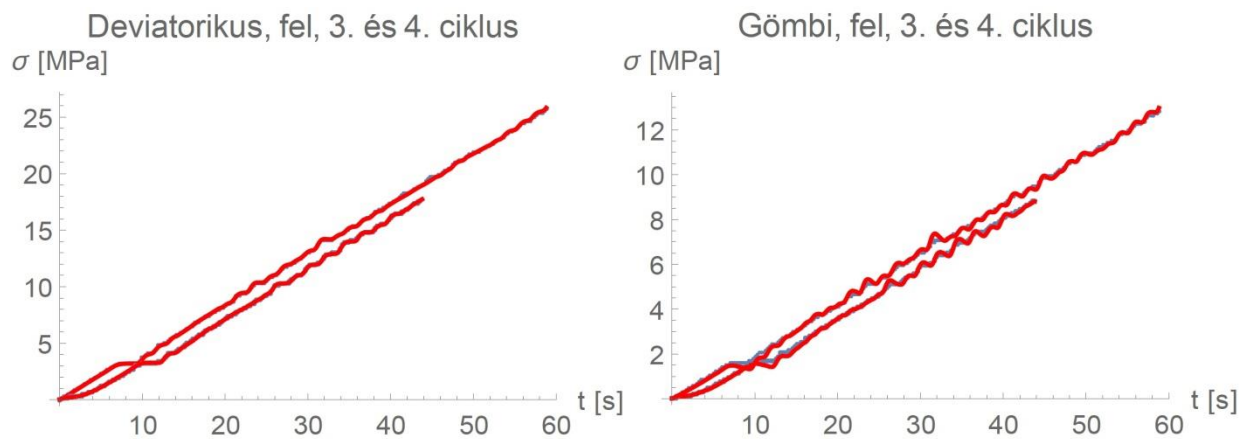
1. Táblázat: Az axiális-laterális deformációk közvetlen felhasználásával, a reológiai hatások nélkül a 2. ábra görbéire történő illesztéssel kapott paraméterek.

Az reológiai adatkiértékelést a 3. és 4. terhelési ciklusok felterhelési szakaszára végeztük le. Az axiális és laterális deformációkból közvetlenül kapott Young-modulus és Poisson-tényező értékeit az 2. táblázatban adjuk meg.

| Reológiai | 2G [GPa] | 3K [GPa] | E [GPa] | ν |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|-------|
| 3.c. felterhelés statikus | 23,9 | 49 | 28,9 | 0,20 |
| dinamikus | $1,44 \cdot 23,9 = 33,6$ | $3,13 \cdot 49 = 152,4$ | 45,4 | 0,35 |
| 4.c. felterhelés statikus | 23 | 50,9 | 28,0 | 0,22 |
| dinamikus | $1,4 \cdot 23 = 32,2$ | $2,8 \cdot 50,9 = 142,5$ | 43,4 | 0,35 |

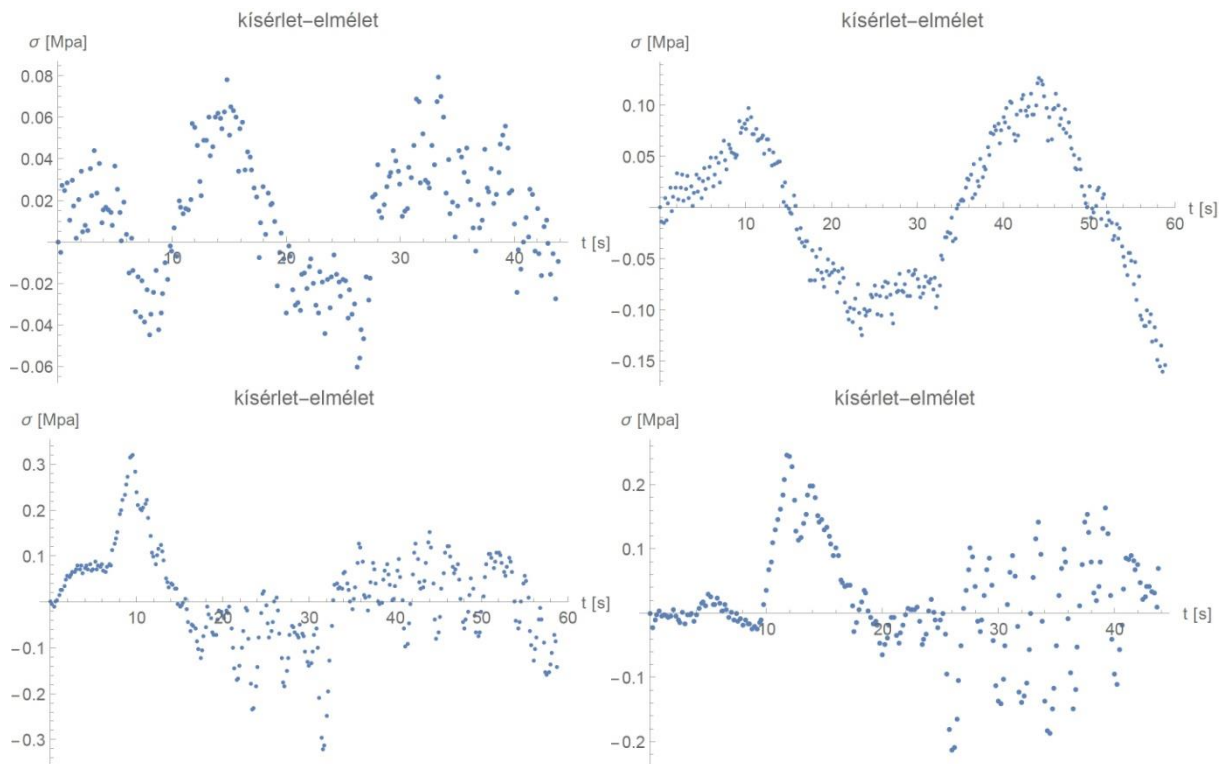
2. Táblázat: A reológiai adatillesztés során a 3. és 4. ciklus felterhelési szakaszán kapott statikus és dinamikus rugalmassági állandók értékei.

Ugyanez a táblázat tartalmazza a reológiai adatkiértékelés eredményeit. Itt a Mathematica 11.0 beépített algoritmusait és Python 2.7 nyelven írt, az LMfit csomagot használó kóddal végeztük az illesztéseket. A mért deformáció ismeretében a fenti (1)-(2) differenciálegyenletben szereplő paraméterekkel kiszámolt feszültségeket illesztettük a mért feszültségértékekhez a deviatorikus és gömbi értékekre külön. Mindkét módszer igazolta, hogy a a tehetetlenségi tag egyik ciklusban sem játszik szerepet, az illesztések érzéketlen az értékére. A dinamikus Lamé-állandókat tartalmazó sorokban leolvashatók a deviatorikus és gömbi b paraméterértékek is.



4. ábra A deviatorikus (balra) és a gömbi (jobbra) feszültség mért (kék) és a 2 táblázatban megadott értékekkel illesztett értékei (piros).

A 4. ábrán a mért és a differenciálegyenlet alapján illesztett feszültség-idő függvényeket mutatjuk a deviatorikus és a gömbi feszültségekre a 3. és 4. ciklus felterhelési szakaszára. A mért és illesztett feszültségek eltérését az 5. ábrán megadott grafikonok jellemzik a négy esetben. Látható, hogy a az eltérés sehol nem haladja meg 0,3 MPa.



5. ábra A mért és illesztett feszültségek különbsége a mérési pontokban a 3. és 4. ciklus deviatorikus feszültségére (felső bal és jobboldali grafikonok), illetve a 3. és 4. ciklus gömbi feszültségére (alsó jobb és baloldali grafikonok).

A kapott értékek konzisztensek, igazolják a dinamikus és statikus rugalmassági adatok eltérését. A 3. és 4. ciklusban a reológiai kapott statikus Young-modulusok értékei jól egyeznek. Az axiális-laterális adatokból közvetlenül leolvasott érték sebességfüggő, ezért várhatóan lassabb mérések esetén csökken. A 3. és 4. ciklusban kapott dinamikus Young-modulus értékek között van a hullámterjedési sebességből kapott érték. Itt pontosabb egyezést várhatunk a reológiai adatkiértékelés során eddig elhanyagolt maradó deformáció, azaz a károsodási és képlékenyedési hatások, illetve a hőmérsékletfüggés pontos figyelembevételével.

6. Összefoglalás:

Az eddigi mérések alapján azt mondhatjuk, hogy a rideg kőzetnek tekintett andezit esetén a reológiai viselkedés megmérhető laboratórium körülmények között már 0.7 kN/s felterhelési sebességek esetén is. A kapott adatok konzisztensen magyarázhatják a hullámterjedési sebességekből kapott dinamikus és a statikus rugalmassági állandók között tapasztalt eltéréseket. A mérések alapján a karakterisztikus relaxációs idők, ahol a reológiai hatások jelentkeznek, az 5-100 másodperces tartományba esnek. Ezek kisebbek, mint a hagyományos, több órás reológiai kísérletekben tapasztalt értékek, illetve kissé átfed az Einstein-teleszkóp működése szempontjából fontos 0,1-10 Hz-es frekvenciatartomány alapján érvényes 0,1–10 s-os karakterisztikus időskálával. Megjegyezzük, hogy egytengelyű terhelések esetén a deviatorikus-gömbi Kluitenberg-Verhás-teszt csatolódnak és az eredő reológiai modellben időben hatodrendű differenciálegyenletet kapunk, amely még több jellemző relaxációs időt is megenged (Asszonyi et al 2015). Ezért a reológiai hatások nagyon különféle terhelési sebesség és frekvenciatartományokban jelentkezhetnek, még a mérés explicit figyelembe vétel nélkül is.

Köszönetnyilvánítás:

A munkát az Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Hivatal - NKFIH 116197(116375), NKFIH 124366(124366) és NKFIH 123815 pályázatai támogatták.

Irodalom:

ET Science Team (2011): Einstein gravitational wave telescope, conceptual design study *Technical Report* ET-0106C-10 (www.et-gw.eu/etdsdocument)

Czinder B., Török Á. (2015): Mátrából származó andezit kőanyagok közetfizikai és halmazszilárdsági vizsgálata. *Mérnökgeológia-Közetmechanika 2015* (Szerk: Török Á., Görög P. & Vásárhelyi B.), pp: 227 – 232.

Földessy J. (2016): Újjáélesztési kísérletek a mátrai érckutatásokban. *Geoda*, XXVI. évf. 2. szám, 2016, pp: 35 – 40.

Siklóssy S. (1977): Gyöngyösoroszi és környékének szerkezeti értékelése. *Földtani Közöny, Bull. of the Hungarian Geol. Soc.* 197. pp: 348 – 357.

Savich, A.I. (1984): Generalized relations between static and dynamic indices of rock deformability. *Hydrotechnical Construction*, 18(8):394 – 400.

Mockovciaková, A. and Pandula, B. (2003): Study of the relation between the static and dynamic moduli of rocks. *Metalurgija*, 42(1):37 – 39.

Najibi, A.R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., and Asef, M.R. (2015): Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126:78 – 82.

van Heerden, W.L. (1987). General relations between static and dynamic moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomech. Abs.*, 24(6):381 – 385.

Gercek, H. (2007): Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1), – 13.

Asszonyi Cs., Fülöp T. and Ván P. (2015): Distinguished rheological models for solids in the framework of a thermodynamical internal variable theory. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 27:971 – 986, (arXiv:1407.0882).

Barnaföldi G.G. és tsi. (2016): A Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium első mérései és mérési programja. *Magyar Geofizika*, 57(4):152 – 169.

Barnaföldi G.G. és tsi. (2017), First report of long term measurements of the MGGL laboratory in the Mátra mountain range. *Classical and Quantum Gravity*, 34:114001(22), (arXiv: 1610.07630).