



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

## **Kőzetek fagyasztás hatására bekövetkező mechanikai változásainak vizsgálata**

Készítő: Dézsi Kristóf  
BSc építőmérnök hallgató

Konzulens tanárok: Dr. Rozgonyi-Boissinot Nikoletta  
adjunktus  
Dr. Vásárhelyi Balázs  
egyetemi docens

Budapest, 2018

## Tartalomjegyzék

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | A feladat bemutatása .....                            | 4  |
| 2.     | Vizsgált közetanyag leírása .....                     | 5  |
| 3.     | Mérési módszerek ismertetése .....                    | 7  |
| 3.1.   | Roncsolásmentes vizsgálatok .....                     | 8  |
| 3.2.   | Roncsolásos vizsgálatok .....                         | 10 |
| 3.2.1. | Egyirányú nyomószilárdság .....                       | 11 |
| 3.2.2. | Közvetett húzószilárdság.....                         | 14 |
| 4.1.   | Roncsolás mentes vizsgálatok eredményei.....          | 16 |
| 4.2.   | Roncsolásos vizsgálatok eredményei .....              | 18 |
| 4.2.1. | Egytengelyű nyomószilárdság vizsgálat eredményei..... | 18 |
| 4.2.2. | Közvetett húzószilárdság vizsgálat eredményei.....    | 19 |
| 5.     | Eredmények kiértékelése.....                          | 20 |
| 5.1.   | Testsűrűség változása .....                           | 20 |
| 5.2.   | Ultrahang terjedési sebesség változása.....           | 21 |
| 5.3.   | Szilárdsági vizsgálatok kiértékelése .....            | 22 |
| 5.4.   | Tönkrementeli képek .....                             | 27 |
| 6.     | Következtetések, összefoglaló diagramok .....         | 29 |
| 7.     | Irodalomjegyzék.....                                  | 30 |

# **Kőzetek fagyasztás hatására bekövetkező mechanikai változásainak vizsgálata**

A kőzetek mechanikai viselkedését, fizikai paramétereit, tervezéskor és kivitelezésnél figyelembe vehető anyagmodelljét jelentős mértékben befolyásolja annak pillanatnyi petrofizikai állapota. Bizonyított, hogy légszáraz állapotban a kőzetek szilárdsága jóval nagyobb, mint vízzel telített esetben. A mechanikai paramétereket jelentős mértékben befolyásolja a kőzet szerkezete is: a porozitás növekedésével annak szilárdsága csökken.

A TDK kutatás célja, hogy megvizsgáljuk, ezen hatásokon kívül a pórusokban kialakuló jéglencsék hatását a kőzettömb (ép kőzet) szilárdságára, tervezés során figyelembe vehető mechanikai paramétereire. A vizsgálatok során összehasonlítottuk a légszáraz és vízzel telített, valamint telített és telítés után lefagyasztott ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) próbatestek fizikai tulajdonságait.

A méréseket nagy porozitású durva mészkő próbatesteken végeztük el. Törekedve minél nagyobb próbatest-szám kialakítására, egyirányú nyomó és közvetett húzószilárdsági vizsgálatokat végeztünk. A mérések előtt mind a próbatest sűrűsége, mind abban az ultrahang-terjedési sebesség megmérésre került.

A kapott eredmények, mechanikai viselkedés és kőzetmechanikai paraméterek ismeretében lehetőség nyílik fagyasztásos munkatér-határolás, alagútépítés modellezésénél a pontosabb tervezésre.

**Kulcsszavak:** fagyasztás, nyomószilárdság, porozitás, durva mészkő

## **Mechanical changes of rocks by freezing**

The mechanical behavior, the physical parameters of the rocks and the material model that can be taken into consideration during designing and executing of underground facilities are significantly influenced by the petrophysical state of the rock. It is proved that the strength values of rock in air-dried condition are much higher than values in water saturated condition. The mechanical parameters are also significantly influenced by the texture of the rock: the strength ratio decreases with increasing porosity.

The aim of this study, along with estimation of the effect of water saturation and texture of the rock, is examining the effect of ice lenses built in the pores on the strength of intact rock and values of applied mechanical parameters during designing. The physical properties of air-dried and water saturated rock samples and water saturated and frozen (-20 °C) specimens were compared.

The measurements were carried out on high porosity Miocene limestone specimens. Uniaxial compression tests and indirect tensile test were performed. Density and ultrasonic pulse velocity of each specimen were measured continuously.

Knowing the results, mechanical behavior and rock mechanics parameters the tunnel construction designing and the ground freezing works can be more precise.

**Keywords:** uniaxial strength, freezing, high porosity, limestone

## 1. A feladat bemutatása

A közettetek mechanikai viselkedését, anyagi állandóit, tervezéskor figyelembe vehető paramétereit jelentős mértékben meghatározza a közettömb tulajdonságai. Jól ismert tény, hogy a közettömb mechanikai paramétereire befolyással van annak porozitása, ill. a pórusokban lévő víz mennyisége is. Jelen feladat keretében az volt a célunk, hogy megvizsgáljuk, ezen hatásokon kívül a pórusokban kialakuló jégencséknek milyen hatásuk lehet a közettömb szilárdságára, mechanikai paramétereire.

A vizsgálatok során összehasonlítottuk a légszáraz, vízzel telített, valamint telített és lefagyasztott (-25°C) próbatestek fizikai tulajdonságait. A kapott eredmények, mechanikai viselkedés és kőzetmechanikai paraméterek ismeretében lehetőség nyílik fagyasztásos munkatér-határolás, alagútépítés modellezésénél a pontosabb tervezésre. A fagyasztásos munkatér határoló eljárást alkalmazták az M4-es metró építésénél a Fővám tér környékén, a pesti oldalon (Wallis, 2009). A kapott eredmények alapján megállapíthatóvá vált, hogy a fagyasztásos eljárással nem csak a vízbetörést lehet megelőzni, hanem a kőzetkörnyezet mechanikai paramétere is megváltoznak.



*Talajfagyasztás az M4-es metró építése során. (fénykép: Wallis, 2009)*

## 2. Vizsgált kőzetanyag leírása

A kutatásban vizsgált kőzetanyag Sósokútról származó durva mészkő, amely a Miocén korban keletkezett sárgásfehér színű, kis szilárdságú kőzet (Schafarzik 1964). Keletkezési körülményeit tekintve vegyi, biogén üledékes kőzet, vízi környezetben képződött, és képződése „nedves” reakció eredménye. Uralkodó kőzetalkotó ásványa a kalcium karbonát (90%), amely nagyrészt kalcit, de aragonit is előfordulhat benne. Híg sósavval reakcióba lép (Török 2007). Osztályozásuk a keletkezési környezetük és a tulajdonságaik alapján lehetséges. A vizsgált kőzetem a durva mészkő. Tengeri eredetű kőzet így nagy részben ősmaradványok csigák kagylók találhatóak benne (1. ábra). Néhány változata hasonlít a homokkőre de a kis kerek szemcséket ooidokat kalcit alkotja (Schafarzik 1964).



1. ábra: Durva mészkő szöveti képe

A kőzet porozitása nagy (Pápay, Török, 2006), a kisebb-nagyobb pórusok szabad szemmel is láthatóak (1. ábra). Ebből következőleg a durva mészkő vízfelvevő képessége nagy, akár a 34V/V% víz felvételére is képes (Fodor, Kleb, 1986). Erősen porózus felületén a szennyeződések megtapadnak és megköti azokat, ez a nagy vízfelvevő képességével együtt a kőzet időtállóságát nagymértékben rontja (Török, Rozgonyi, 2004). Felhasználása Magyarországon nagyon széleskörű és kedvelt építőanyag, hasábkő, burkolat vagy lábazat készítésére használjuk. A középkortól kezdve díszítő- és építőköként használták Budapesten. Például: Operaház, Bazilika, Magyar Tudományos Akadémia, Citadella (Schafarzik 1964). Budapest környékén az elmúlt évszázadokban számos kőbányából bányászták az ooidos mészkövet: pl. Kőbánya, Diósd, Zsámbék, Bia, Bicske (Fodor, Kleb, 1986). Jelenleg csak a Sósokút térségében található bánya üzemel, innen származik a vizsgált kőzet is.

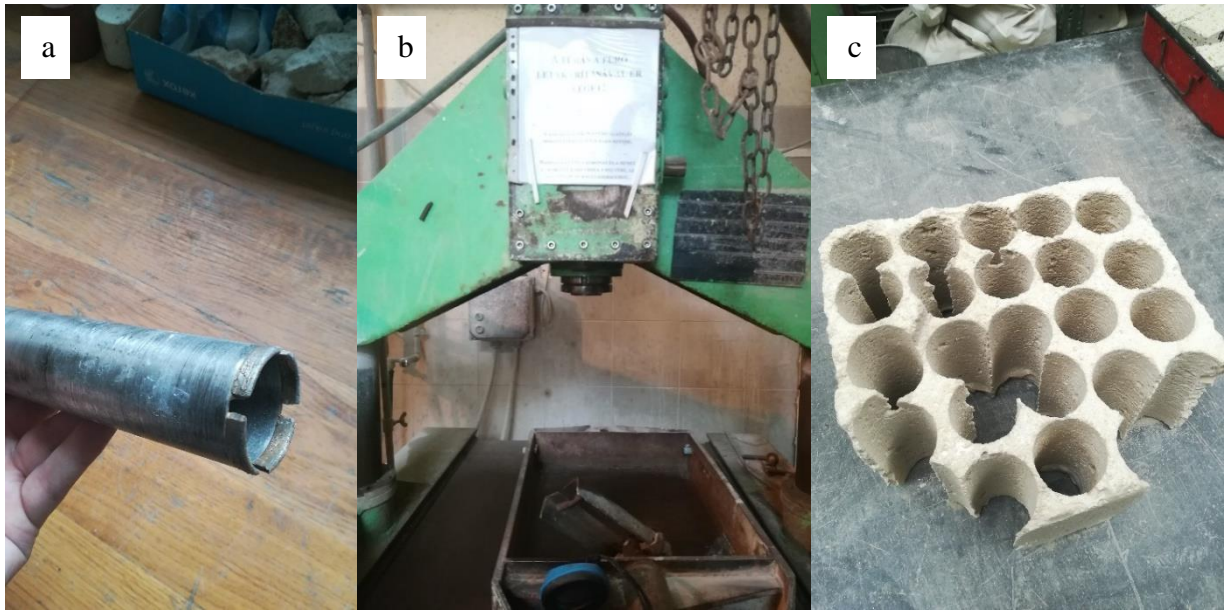
Építőmérnöki szempontból a korábbi kitermelési helyeken található földalatti üregek állékonyságának biztosítása jelent komoly feladatot napjainkban (pl. budafoki és kőbányai pincék).

| Lelőhely   | Testsűrűség<br>g/cm <sup>3</sup> | Vízfelvétel<br>v% | Nyomószilárdság  |                        |
|------------|----------------------------------|-------------------|------------------|------------------------|
|            |                                  |                   | légszáraz<br>MPa | vízzel telített<br>MPa |
| Budafok    | 1,62                             | 12,0–18,0         | 2–9              | 3–5                    |
| Nagytétény | 2,16                             | 13,5–18,7         | 48–57            | 39–45                  |
| Kőbánya    | 2,07                             | 5,5–14,8          | 8–28             | 5–19                   |
| Sóskút     | 2,05                             | 10,8–19,1         | 4–97             | 5–14                   |
| Tárnok     | 1,72                             | 11,2–22,6         | 5–19             | 3–12                   |
| Etyek      | 1,77                             | 13,4–25,1         | 5–15             | 3–8                    |
| Bicske     | 1,93                             | 2,8–21,6          | 5–81             | 3–41                   |
| Bia        | 2,15                             | 1,3–25,7          | 5–73             | 6–51                   |
| Tök        | 1,65                             | 8,8–34,6          | 3–31             | 2–11                   |
| Zsámbék    | 1,68                             | 11,3–28,6         | 1–6              | 1–3                    |
| Tapolca    | 1,78                             | 6,7–19,3          | 3–18             | 2–4                    |
| Pécs       | 1,76                             | 8,5–21,1          | 4–24             | 3–6                    |

2. ábra: Durva mészkövek jellemző közzefizikai tulajdonságai (Fodor, Kleb, 1986)

### 3. Mérési módszerek ismertetése

Egy 30x30x50cm-es miocén mészkőtömbből 40db 38mm átmérőjű fúrómagot fúrtam ki (3. ábra), melyeket ezt követően 2x1 és 1x1 magasság: átmérő arányú próbatestekre vágtam fel egy körfűrész segítségével és beszámoztam őket 1-40 ig. A 2x1 –es próbatestek magassága 75 és 78 mm között, míg az 1x1 es próbatestek magassága 30 és 35 mm között változott.

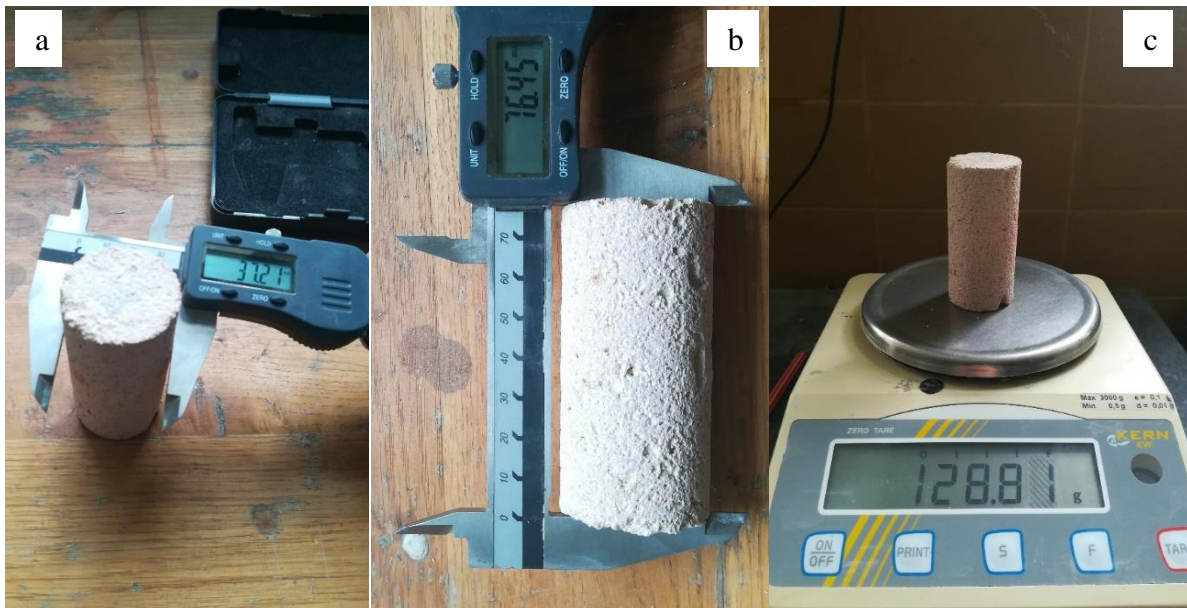


3. ábra: Próbatestek előkészítése (a, 38mm átmérőjű fúrószár;b, Fúrógép;c,Kifúrt tömb)

A nagyobb próbatestek szolgálnak az egyirányú nyomószilárdság megállapítására, a kisebbek pedig a brazil, közvetett húzószilárdság vizsgálatához szükségesek.

Minden próbatest magasságát és átmérőjét megmértem 0,01 mm pontossággal 4 különböző helyen, majd rögzítettem őket táblázatos formában és a 4 mérés átlagértékeit tekintettem a próbatest méreteinek (4.a, b ábra). A próbatestek tömegét is lemértem 0,01 g pontossággal (4.c ábra). Az általam vizsgált durva mészkő szilárdsági tulajdonságait légszáraz, vízzel telített és fagyasztott állapotban határoztam meg, annak érdekében, hogy a talajfagyasztás hatására bekövetkező szilárdságváltozás megfigyelhető legyen.





4. ábra: Próbatetek méretezése (a, Átmérő; b, Magasság; c, Tömeg meghatározása)

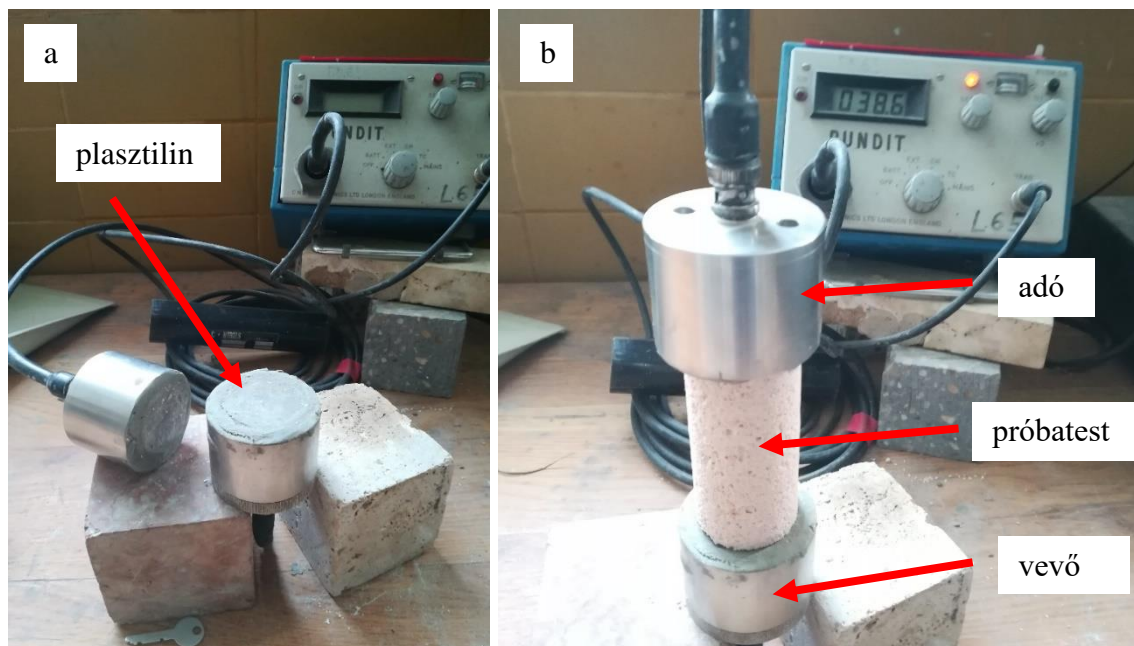
### 3.1. Roncsolásmentes vizsgálatok

A roncsolásmentes vizsgálatok fontos szerepet töltenek be a közetfizikai jellemzők megállapításánál. A közetmechanikai gyakorlatban elsőként a vizsgálandó anyagok sűrűségét, az ultrahang terjedési sebességet és a vízfelvételi tulajdonságokat vizsgálják. A testsűrűség meghatározásához (Egerer, Kertész, 1993) a próbatetek méreteiből kiszámítottam térfogatukat ( $V$ ), a tömeg ( $m$ ) és térfogat arányból pedig a testsűrűségüket ( $\rho$ ) (1):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [kg/m^3] \quad (1)$$

A próbateteket sűrűség alapján növekvő sorba rendeztem. Ezt követően 3 mintacsoportot alkottam ki úgy, hogy mind a 3 csoportban egyenlő arányban forduljon elő kis, közép és nagyobb sűrűségű próbatest. Ez a 3 csoport lett a légszáraz, a telített és a fagyasztott mintacsoport.

Az egyik leggyakrabban használt, és legkönnyebben kivitelezhető roncsolásmentes vizsgálat az ultrahanghullám közeten történő áthaladási sebességének meghatározása. A közetanyagon áthaladó ultrahang hullámok terjedési sebességét légszáraz, vízzel telített és fagyasztott állapotban is meghatároztam. A próbatetekeken áthaladó ultrahang hullámok terjedési idejét egy Pundit típusú készülékkel 0,1  $\mu$ s pontossággal az 5. ábrán látható módon mértem meg.

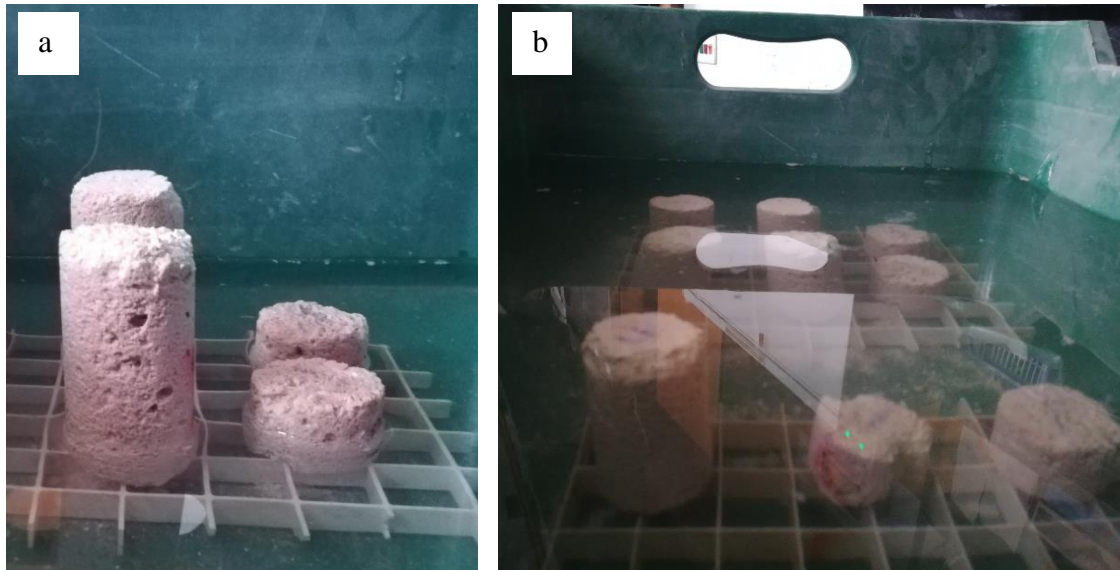


5. ábra: Ultrahanghullám terjedési sebességének mérése (a, Pundit ultrahang terjedési sebesség mérő berendezés; b, Ultrahangterjedési sebesség meghatározása)

A próbatesteket a két mérőfej (adó- és vevőfej) közé helyeztem (5.b ábra), majd leolvastam az ultrahang hullám terjedési idejét. A kőzetanyag és az adó-, ill. vevőfej közti kapcsolatot plasztilin réteg biztosította (5.a ábra). A műszer azt méri, hogy mennyi idő alatt jut el az egyik jeladóból a másikba a sugárzott ultrahanghullám. Az ultrahang terjedési sebesség kiszámításához (Egerer, Kertész, 1993) a megtett utat, ami jelen esetben a próbatest magassága ( $h$ ), elosztottam az út megtételéhez szükséges idővel ( $t_{uh}$ ), ami pedig az ultrahang terjedési idő (2). így kapom meg a próbatest ultrahang terjedési sebességét ( $v_{uh}$ ), mértékegysége km/sec.

$$v_{uh} = \frac{h}{t_{uh}} \quad [km/s] \quad (2)$$

A besorolást követően a próbatestek 1/3 része képezte a légszáraz és 1/3 része a vízzel telített és 1/3 része a fagyasztott mintacsoportot. Mind a vízzel telített és fagyasztott mintacsoport próbatestein elvégeztem a MSZ EN 14231:2003 szabvány szerinti víztelítési vizsgálatot: Egy ládába, műanyag rácsra beleállítottam a próbatesteket, majd feltöltöttem a ládát annyi vízzel, hogy a próbatestek alja 2 cm mélységű vízben álljon (6.a ábra). Erre azért volt szükség, hogy a kőzetanyagon belüli légbuborékok el tudják hagyni a mintákat. Ez után feltöltöttem a ládát addig míg teljesen ellepte a víz a próbatesteket. Ezt követően hetente mértem a próbatestek tömegváltozását (6.b ábra).



6. ábra: Víztelítés légköri nyomáson (a, Próbatestek elhelyezése a víztelítési vizsgálat kezdetén, b, Próbatestek a víztelítési vizsgálat végén)

Amikor két tömegmérés között már nem tapasztaltam változást akkor a próbatesteim víztelített állapotba kerültek (tömegük  $m_v$ ). A telítés hatására felvett vízmennyiség ( $\Delta m = m_v - m$ ) és a próbatest térfogata ( $V$ ) hányadosából a (3) képlet segítségével kiszámítottam a minták látszólagos porozitását ( $p_{\text{látszólagos}}$ ) (Egerer, Kertész, 1993).

$$p_{\text{látszólagos}} = \frac{m_v - m}{V} * 100 \quad [V/V \%] \quad (3)$$

### 3.2. Roncsolásos vizsgálatok

A próbatestek roncsolásmentes vizsgálata után mindhárom mintacsoporton a szilárdsági jellemzők meghatározásához roncsolásos vizsgálatokat is végeztem. Csoportonként 6 db egyirányú nyomószilárdság és 3 db közvetett húzószilárdság vizsgálatra került sor.

A fagyasztott mintacsoport elkészítésekor az előzetesen vízzel telített próbatesteket az MSZ EN 12371:2010 szabvány szerint -25 celsius fokon fagyasztottam meg (7. ábra). A talajfagyasztásos eljáráshoz hasonlóan, egyszeri fagyasztás hatására, fagyott állapotban határoztam meg a későbbiekben a közetfizikai tulajdonságok változását (ultrahanghullám terjedési sebesség, egyirányú nyomószilárdság, közvetett húzószilárdság).

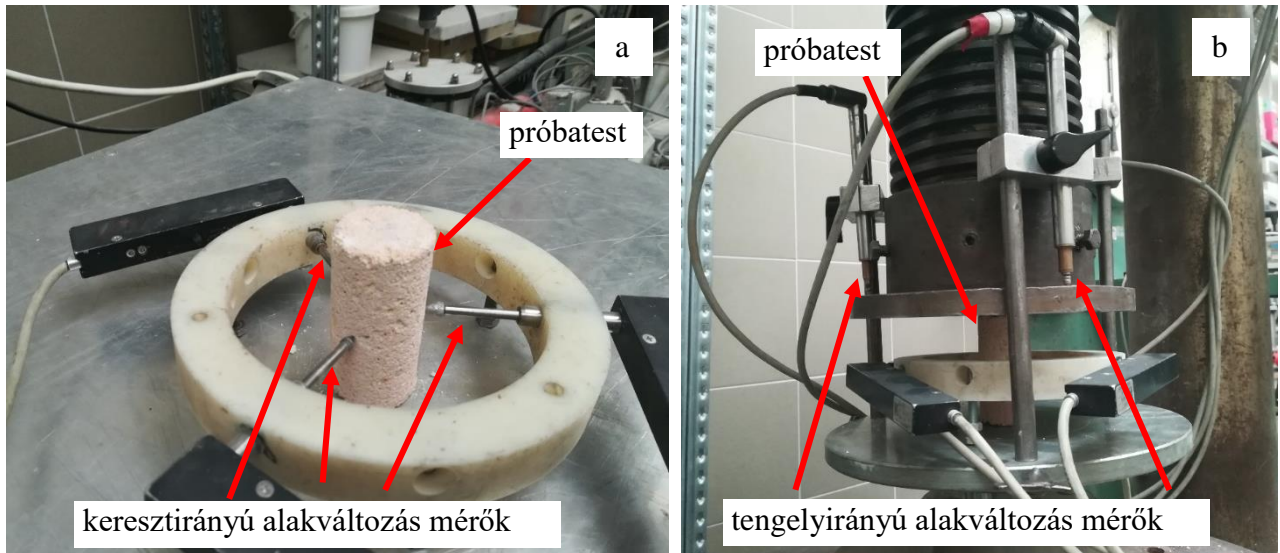


7. ábra: Próbatetek a fagyasztás után

### 3.2.1. Egyirányú nyomószilárdság

Egyirányú nyomószilárdság mérést 6 db légszáras, 6db vízzel telített és 6db fagyasztott 2x1-es magasság: átmérő arányú kb. 36 mm átmérőjű mintán végeztem el. A vizsgálat során két egymással párhuzamos nyomólap közé helyeztem be állítva a próbatestet, és fokozatosan növekvő terhelés mellett mértem a terhelő erőt, a tengelyirányú és a keresztirányú hosszváltozást.

A keresztirányú hosszváltozás méréséhez egy műanyag gyűrűbe beleraktam a próbatestet, és 3 irányból, egymással 120°-os szöget bezárva, sugár irányban elmozdulás mérőket érintettem hozzá a próbatesthez (8.a ábra). Figyeltem, hogy mindegyik mérő tű hozzáérjen a kőzet felületéhez, és ha lehet síkfelületen érjen hozzá, mert ha bármi egyenetlenségbe véletlenül beleugrik a mérés során, akkor hibás eredményt kapunk az alakváltozásról. A tengelyirányú hosszváltozást a próbatest tetejénél 3db 120°-onként elhelyezett elmozdulás mérővel határoztam meg (8. b ábra). A vizsgálat elején a méréshez adott programban kinulláztam az elmozdulásokat és az erő értékét. Ezt követően elindítottam a terhelést, a törőgép egyenletesen növelte a nyomást a próbatesten. A terhelést addig növeltem, míg a próbatestem nem volt képes több terhet felvenni, és a törés bekövetkezett. A mérés során számítógép segítségével rögzítettem a mért adatokat, (idő, terhelő erő, 3db tengelyirányú és 3db keresztirányú elmozdulás) elmentettem táblázatos formátumban az eredmény későbbi kiértékeléséhez. Kivettem a tönkrement próbatestet az elmozdulás mérők közül és a törőgép alól, majd digitálisan dokumentáltam a törés körülményeit.



8. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság mérése (a, keresztirányú alakváltozás mérők elhelyezkedése; b, mérési elrendezés a tengelyirányú alakváltozás mérőkkel)

A kiértékelés során az összenyomódás értékekből tengelyirányú ( $\epsilon_{ax}$ ) és keresztirányú alakváltozást ( $\epsilon_{lat}$ ), a törőerő és nyomott felület arányából a nyomószilárdságot ( $\sigma_c$ ) számítottam a következő módon:

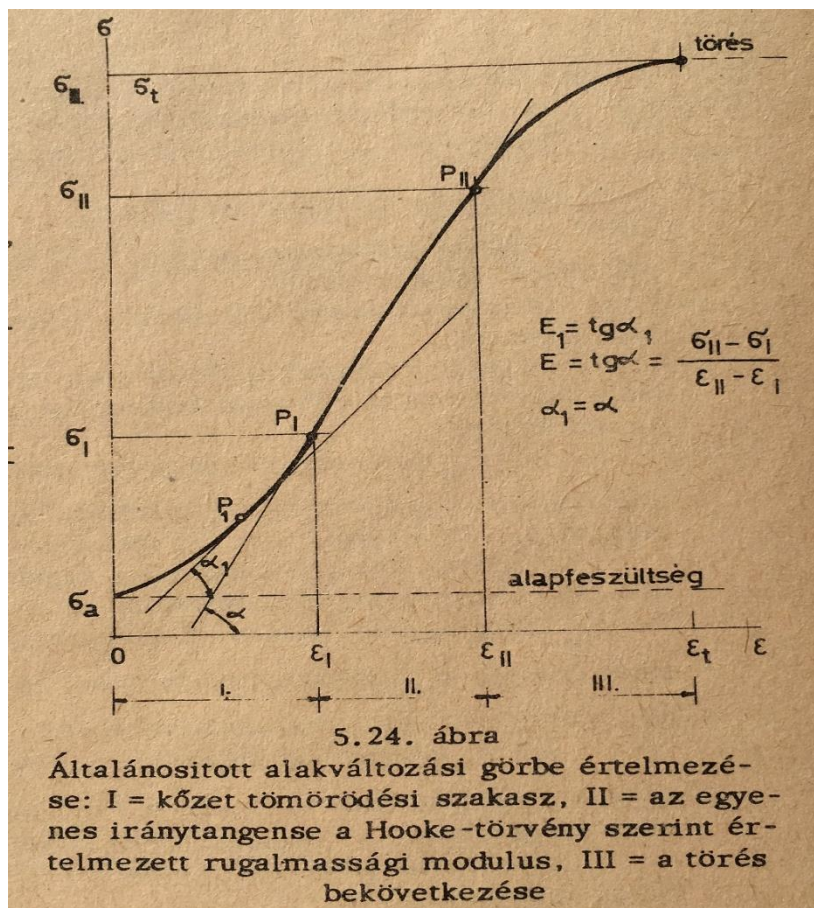
$$\epsilon_{ax} = \frac{\Delta h}{h} \quad [‰] \quad (4)$$

$$\epsilon_{lat} = \frac{\Delta d}{d} \quad [‰] \quad (5)$$

$$\sigma_c = \frac{F_{törő}}{A} \quad [MPa] \quad (6)$$

ahol  $\Delta h$  a tengelyirányú hosszváltozás,  $h$  a próbatest magassága,  $\Delta d$  a keresztirányú hosszváltozás,  $d$  a próbatest átmérője,  $F_{törő}$  a törőerő és  $A$  a nyomott felület (Egerer, Kertész, 1993).

Az egytengelyű nyomószilárdság mérése után a mért eredményekből tengelyirányú feszültség- tengelyirányú alakváltozás diagramot készítettem. A közetekre jellemző tengelyirányú feszültség- tengelyirányú alakváltozás diagram a 9. ábrán láthatóan 3 fő részből áll: az első szakasz az ún. tömörödési szakasz, amely nem lineáris, a második szakasza lineáris, az anyag rugalmasan viselkedik. A szakasz ismét nem lineáris, és a törés bekövetkezéséig tart. A kétirányú alakváltozás- tengelyirányú feszültség ábrázolásakor a lineáris szakasz mindkét diagramon (hosszirányú alakváltozás- tengelyirányú feszültség, 10. ábra, kék görbe, és keresztirányú alakváltozás- tengelyirányú feszültség 10. ábra, piros görbe) megfigyelhető. Ezek segítségével határoztam meg a rugalmassági moduluszt ( $E$ ) és a Poisson tényezőt ( $\nu$ ).



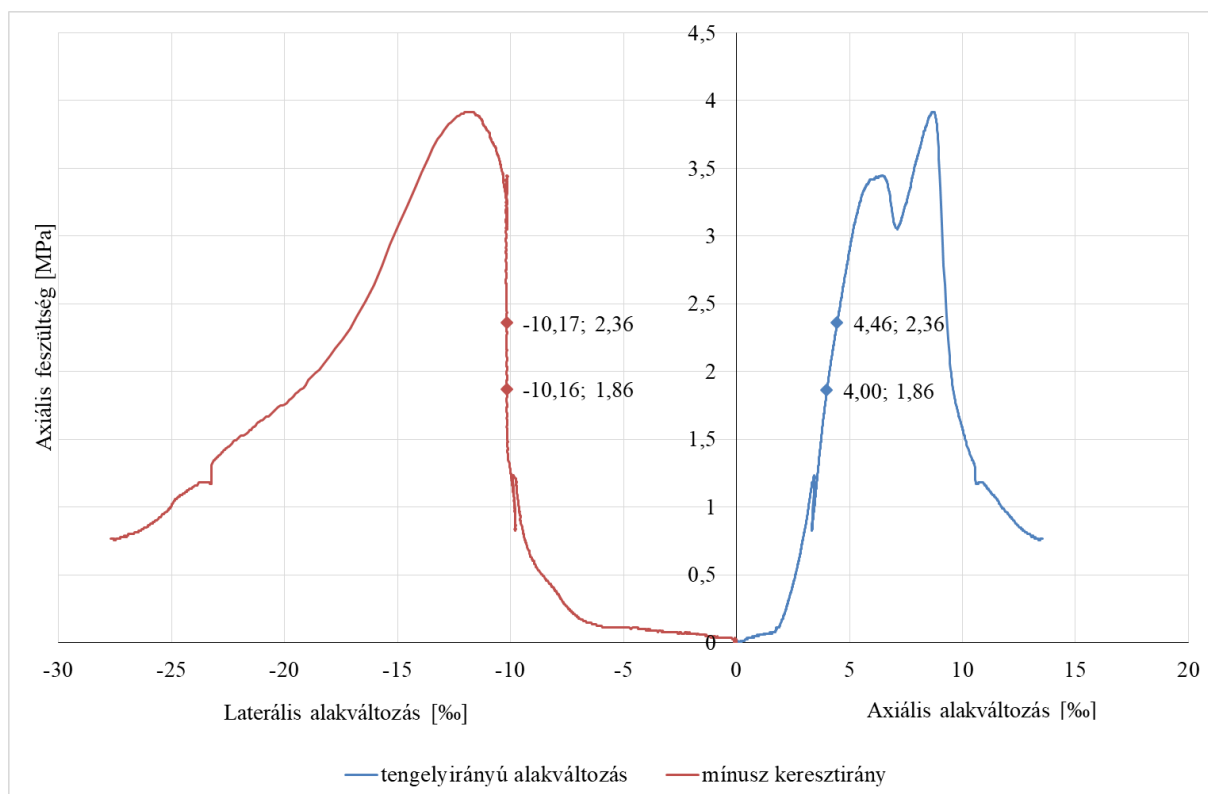
9. ábra: Általánosított tengelyirányú feszültség- tengelyirányú alakváltozás diagram (Kleb, Török 1972)

A diagramokon kijelöltem a rugalmas szakasz végpontjait (P1 és P2, 10. ábra), majd ennek az egyenesnek a meredeksége adja meg a rugalmassági modulus. A kijelölt 2 pont tengelyirányú feszültség értékének ( $\sigma_1$  és  $\sigma_2$ ) különbségét elosztva a tengelyirányú alakváltozási értékek ( $\epsilon_{ax1}$ ,  $\epsilon_{ax2}$ ) különbségével, meg tudtam határozni a rugalmassági modulus a következő módon:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_{ax2} - \epsilon_{ax1}} \quad [GPa] \quad (7)$$

A Poisson tényező meghatározása is hasonló elven történik, csak itt még szükségünk van a rugalmas szakasz két végpontjának laterális alakváltozás értékeire is. A rugalmas szakasz két végpontjának keresztirányú alakváltozás értékének ( $\epsilon_{lat1}$ ,  $\epsilon_{lat2}$ ) különbségét elosztva a tengelyirányú alakváltozási értékek ( $\epsilon_{ax1}$ ,  $\epsilon_{ax2}$ ) különbségével, meg tudtam határozni a Poisson tényezőt ( $\nu$ ) a következő módon:

$$\nu = \frac{\epsilon_{lat2} - \epsilon_{lat1}}{\epsilon_{ax2} - \epsilon_{ax1}} \quad [-] \quad (8)$$



10. ábra: Tengelyirányú alakváltozás- tengelyirányú feszültség (kék görbe), keresztirányú alakváltozás- tengelyirányú feszültség (piros görbe) a rugalmas szakasszal

### 3.2.2. Közvetett húzószilárdság

3 db légszáraz, 3 db vízzel telített és 3 db fagyasztott 1x1-es magasság: átmérő arányú, kb 36 mm átmérőjű minta közvetett húzószilárdsági vizsgálatát végeztem el. Szokták ezt a vizsgálatot még Brazil vizsgálatnak is hívni. A vizsgálat során a két egymással párhuzamos nyomólap közé fektetve helyeztem be a próbatestet, és fokozatosan növvő vonal menti terhelés mellett mértem a felvett erő nagyságát (11. ábra). A terhelést addig növeltem, míg a próbatestem nem volt képes több terhet felvenni, hisz ilyenkor érkeztünk el oda, hogy a közetanyag tönkrement. A kör alakú keresztmetszet kettéhasadt a terhelés vonalában (11. ábra).

A számítógép által mért adatokat (idő, terhelő erő) elmentettem táblázatos formátumban az eredmény későbbi kiértékeléshez. Kivettem a tönkrement próbatestet a törőgép alól, majd digitálisan dokumentáltam a tönkrement próbatestet. A közvetett húzószilárdságot ( $\sigma_t$ ) a törőerőből ( $F_{törő}$ ), a próbatest magasságából ( $h$ ) és az átmérőjéből ( $d$ ) számítottam ki (Gálos, Vásárhelyi, 2006):

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot F_{törő}}{\pi \cdot d \cdot h} \quad [MPa] \quad (8)$$



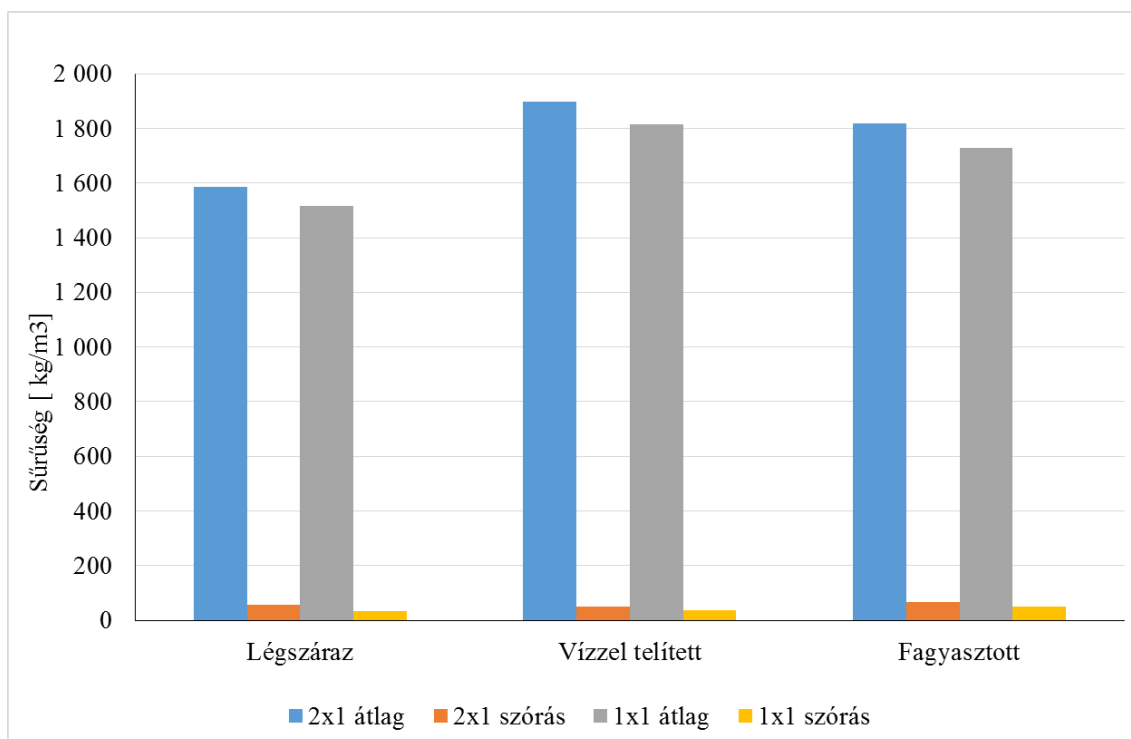
11. ábra: Közvetett húzószilárdság mérése



## 4. Mérési eredmények (táblázatok), egyes diagramok,

### 4.1. Roncsolás mentes vizsgálatok eredményei

A vizsgált kőzetanyag testsűrűségének átlaga 2x1-es próbatetek esetén légszáraz állapotban  $1586 \text{ kg/m}^3$ , szórása  $59 \text{ kg/m}^3$ , vízzel telített állapotban átlaguk  $1898 \text{ kg/m}^3$ , szórásuk  $51 \text{ kg/m}^3$ , fagyasztott állapotban az átlag  $1818 \text{ kg/m}^3$ , a szórás pedig  $66 \text{ kg/m}^3$  (1. táblázat). Az 1x1 – próbateteknél ettől eltérő eredmények figyelhetők meg: a testsűrűség átlaga légszáraz állapotban  $1517 \text{ kg/m}^3$ , szórása  $33 \text{ kg/m}^3$ , vízzel telített állapotban átlaguk  $1813 \text{ kg/m}^3$ , szórásuk  $33 \text{ kg/m}^3$ , fagyasztott állapotban az átlag  $1730 \text{ kg/m}^3$ , a szórás pedig  $50 \text{ kg/m}^3$  (2. táblázat, (12. ábra).



12. ábra: Durva mészkeő testsűrűsége légszáraz, vízzel telített és fagyasztott állapotban

Az ultrahanghullám terjedési sebességénél is különbség figyelhető meg a 2x1-es és az 1x1-es próbatetek eredményei közt. Légszáraz állapotban 2x1-es próbatesten  $2,1 \text{ km/s}$  az átlagérték,  $0,2 \text{ km/s}$  a szórás, míg 1x1-es próbatetekeken ezek az értékek  $1,9 \text{ km/s}$  és  $0,1 \text{ km/s}$ . A vízzel telített próbatetekeken a különbség kisebb a méret hatására ( $2,3$  és  $2,2 \text{ km/s}$  a két átlag, 1. és 2. táblázat). Itt látható, hogy az ultrahanghullám a vízzel telített próbatetekeken gyorsabban haladt át a légszáraz állapothoz képest. A fagyasztott próbatesten mért értékek lényegesen magasabbak, mint a többi kőzetfizikai állapotra jellemző eredmények, és a méretből adódó különbség is nagyobb: a 2x1-es próbatetek átlaga  $3,5 \text{ km/s}$ , míg az 1x1-es próbatetek átlaga

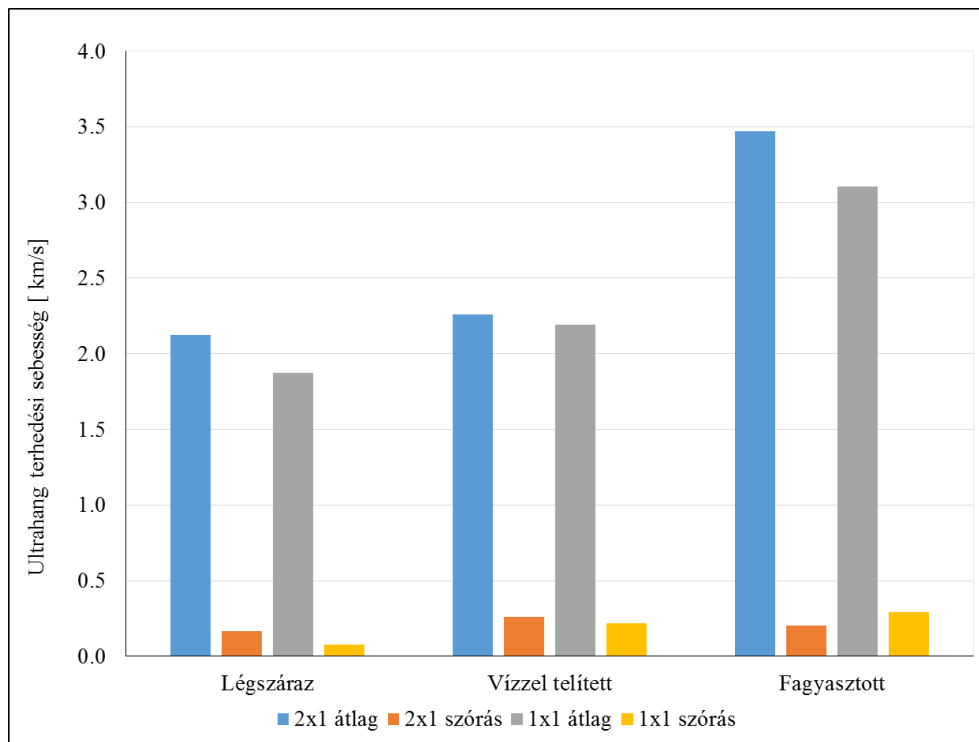
3,1km/s (13. ábra). A szórás értékében nem tapasztaltam jelentős különbséget: (0,2 és 0,3 km/s). Itt gyaníthatóan a jég, mint közeg segítette a hullámok gyorsabb terjedését. Mivel a jég szilárd halmazállapotú, sokkal jobban vezeti az ultrahang hullámokat, mint a levegő vagy a víz.

1.táblázat: 2x1 magasság: átmérő arányú durva mészkő próbatetek közetfizikai jellemzői

| 2x1    | Sűrűség [kg/m <sup>3</sup> ] |          |             | UH [km/s] |          |             | Látszólagos porozitás [V/V%] |
|--------|------------------------------|----------|-------------|-----------|----------|-------------|------------------------------|
|        | Légszáraz                    | Telített | Fagyasztott | Légszáraz | Telített | Fagyasztott |                              |
| Átlag  | 1 586                        | 1 898    | 1 818       | 2.1       | 2.3      | 3.5         | 30,9                         |
| Szórás | 59                           | 51       | 66          | 0.2       | 0.3      | 0.2         | 3,5                          |

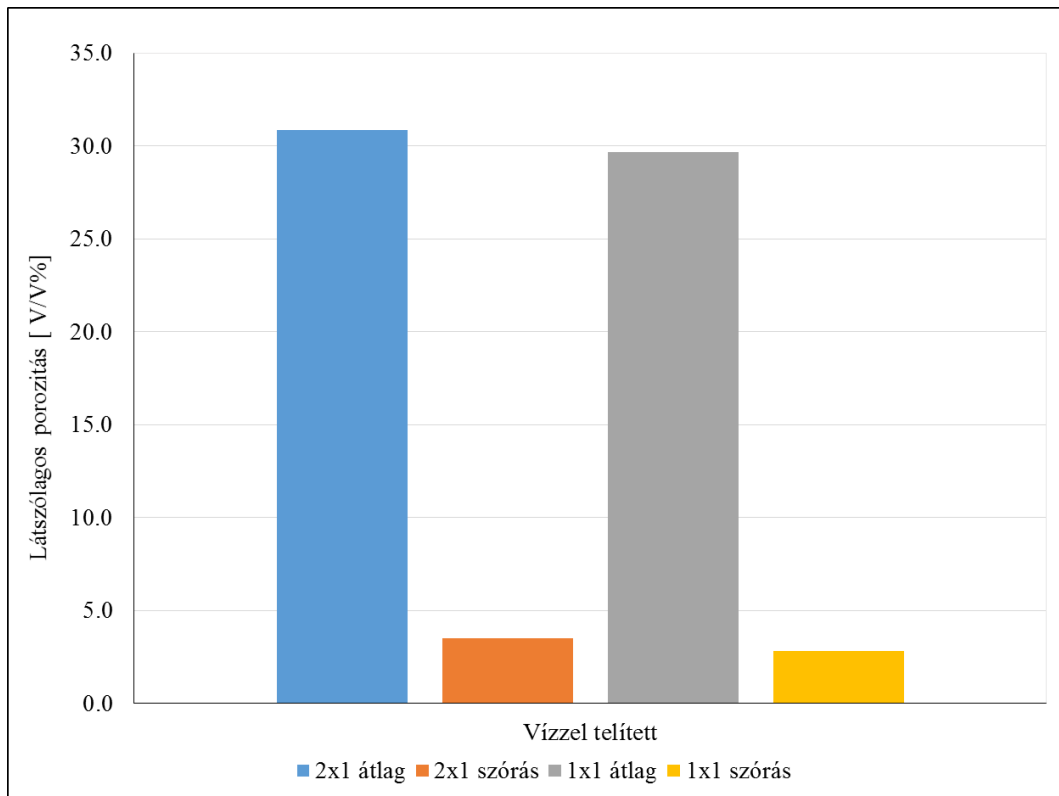
2.táblázat: 1x1 magasság: átmérő arányú durva mészkő próbatetek közetfizikai jellemzői

| 1x1    | Sűrűség [kg/m <sup>3</sup> ] |          |             | UH [km/s] |          |             | Látszólagos porozitás [V/V%] |
|--------|------------------------------|----------|-------------|-----------|----------|-------------|------------------------------|
|        | Légszáraz                    | Telített | Fagyasztott | Légszáraz | Telített | Fagyasztott |                              |
| Átlag  | 1 517                        | 1 813    | 1 730       | 1.9       | 2.2      | 3.1         | 29,7                         |
| Szórás | 33                           | 37       | 50          | 0.1       | 0.2      | 0.3         | 2,8                          |



13. ábra: Ultrahang terjedési sebesség durva mészkőben légszáraz, vízzel telített és fagyasztott állapotban

A látszólagos porozitás értékek meghatározását a telített és a fagyasztott próbatesteken végeztem el hisz ezek a próbatestek lettek telítve. A 2x1-es próbatestek látszólagos porozitásainak átlaga 30,9 V/V% lett 3,5 V/V% szórással. Míg az 1x1-es próbatesteknél ez az átlag érték 29,65 V/V% értékkel definiálható a szórás pedig 2,8V/V% (1. és 2. táblázat). Látszik, hogy nincs nagy különbség a két átlag között ez köszönhető annak, hogy egy azon közzetőmből lettek ezek a minták véve így azonos a porozitásuk (14. ábra).



14. ábra: Durva mészkő látszólagos porozitása

## 4.2. Roncsolásos vizsgálatok eredményei

### 4.2.1. Egytengelyű nyomószilárdság vizsgálat eredményei

A 2x1-es próbatesteken végeztem el a nyomószilárdsági vizsgálatot melynek igen látványos eredménye lett. A légszáraz próbatestek egytengelyű nyomószilárdsága átlagosan 3,57 MPa 0,64 MPa szórással. A vízzel telített próbatestek, mint azt már sejtettem előre, kisebb nyomószilárdsággal rendelkeztek: átlagosan 2,57 MPa, 0,32 MPa szórási értékkel. Végül a fagyasztott próbatestek értékeit megfigyelve jelentős szilárdságnövekedést figyelhetünk meg. A fagyasztás eredményeként a próbatestek átlagos nyomószilárdsága 8,5MPa lett 3,4 MPa -os szórással (3. táblázat). Tehát a telített próbatestek nyomószilárdsága átlagosan 40%-kal

csökken a légszáraz állapothoz képest, míg a fagyasztott próbatestek nyomószilárdsága pedig átlagosan a légszáraz állapot közel 2,5 szeresére nő.

Hasonló tendencia figyelhető meg a rugalmassági modulus változásában is. A légszáraz állapotban mért 1,30 GPa átlag vízzel telítve jelentősen lecsökken, 0,72 GPa-ra. Fagyasztott állapotban viszont a rugalmassági modulus a légszáraz állapothoz képest magasabb, 1,46 MPa. A poisson tényező értéke mind a három közetfizikai állapotban alacsony, a légszáraz állapotban mért 0,12-es átlag vízzel telítve és fagyasztva nullához közeli értékre (0,05 és 0,04 átlagértékre csökken (3. táblázat).

3.táblázat: A vizsgált durva mészkő szilárdsági értékei.

|        | Nyomószilárdság<br>[MPa] |          |             | Rugalmassági<br>modulus [GPa] |          |             | Poisson tényező<br>[-] |          |             | Húzószilárdság<br>[MPa] |          |             |
|--------|--------------------------|----------|-------------|-------------------------------|----------|-------------|------------------------|----------|-------------|-------------------------|----------|-------------|
|        | Légszáraz                | Telített | Fagyasztott | Légszáraz                     | Telített | Fagyasztott | Légszáraz              | Telített | Fagyasztott | Légszáraz               | Telített | Fagyasztott |
| Átlag  | 3,57                     | 2,57     | 8,50        | 1,30                          | 0,72     | 1,46        | 0,12                   | 0,05     | 0,04        | 0,72                    | 0,40     | 1,01        |
| Szórás | 0,64                     | 0,32     | 3,40        | 0,46                          | 0,34     | 1,00        | 0,09                   | 0,26     | 0,11        | 0,05                    | 0,12     | 0,54        |

#### 4.2.2. Közvetett húzószilárdság vizsgálat eredményei

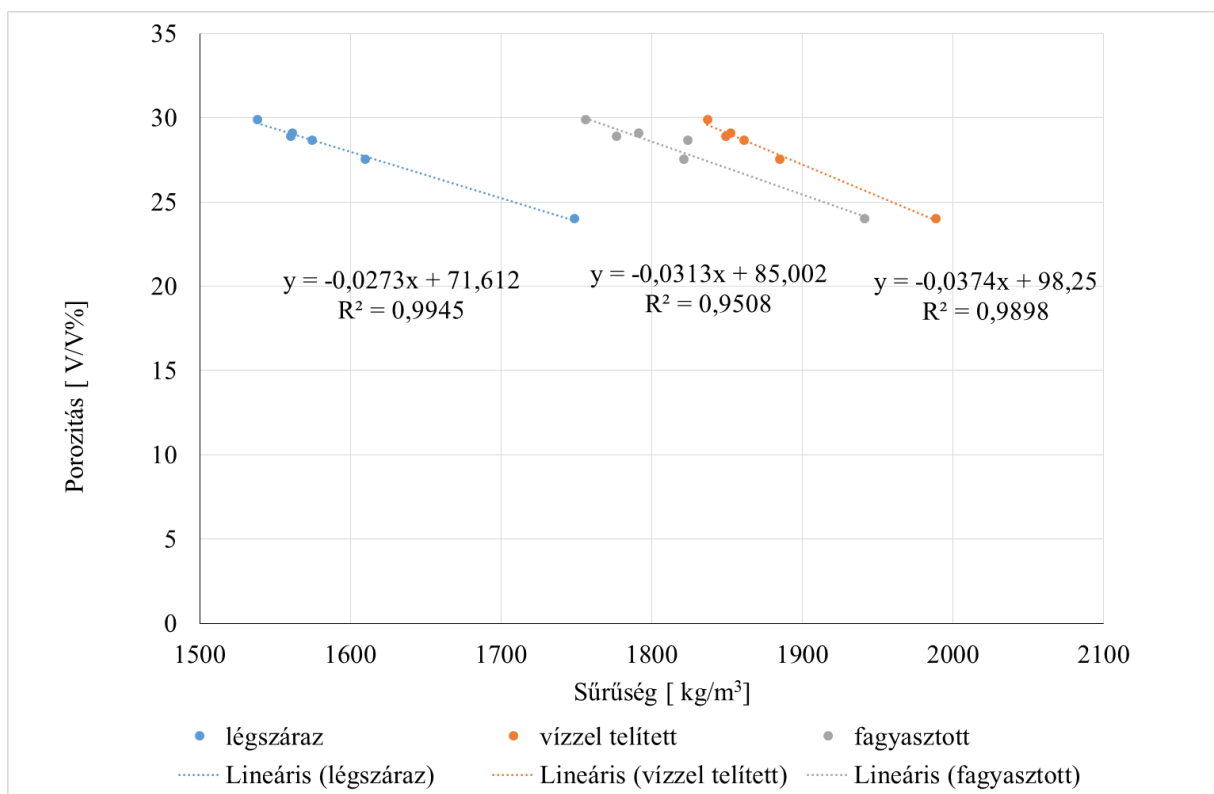
A közvetett húzószilárdsági értékek, melyeket az 1x1-es próbatestek segítségével határoztam meg a 3. táblázatban láthatók. A nyomószilárdsághoz hasonlóan jelentős változás történt a húzószilárdság értékekben vízzel telítés és fagyasztás hatására.

Légszáraz próbatestek húzószilárdsága átlagosan 0,72 MPa volt 0,05 MPa szórási értékkel. A telített próbatestek 0,4 MPa húzószilárdsággal rendelkeztek 0,12 MPa szórási érték mellett. Itt is látható, hogy a telítés következtében veszített a kőanyag a szilárdságából. Fagyasztás hatására a próbatestek húzószilárdsága 1,01 MPa-ra nőtt, de a szórás is jelentős, 0,54 MPa. Látható, hogy a fagyasztás a húzószilárdságban nem okozott akkora változást, mint a nyomószilárdságban.

## 5. Eredmények kiértékelése

### 5.1. Testsűrűség változása

Itt a vizsgálat célja az volt, hogy kiderítsem a porozitás és a sűrűség közti kapcsolatot. Az eredmény végül azt mutatja, hogy lineáris kapcsolat van a sűrűség és porozitás értékek között. Tehát minél kisebb a porozitás annál nagyobb a sűrűség és ez fordítva is akkor igaz, hogy minél nagyobb a porozitás annál kisebb a sűrűség. A 15. ábrán ábrázoltam a porozitást a testsűrűség függvényében. A kék jelű ponthalmaz a légszáraz testsűrűség és a porozitás kapcsolatát mutatja, a szürke ponthalmaz a fagyasztott, a narancssárga ponthalmaz pedig a vízzel telített testsűrűség és a porozitás kapcsolatát mutatja. Az eredményekre közetfizikai állapotonként lineáris regressziós egyenest illesztettem. Jól látható, hogy a lineáris regresszióval való közelítés mind a 3 esetben nagyon jól működik. A légszáraz állapotban a közelítés 99%-os, a vízzel telített állapotban 98%-os és fagyasztott állapotban 95%-os. A fagyasztott érték kissé nagyobb eltérése a jégkristályok elrendezkedésével magyarázható, de még így is nagyon jól közelíthető.



15. ábra: Sűrűség és porozitás kapcsolata

A 15. ábrán az is jól látható, hogy a légszáraz állapothoz képest a vízzel telített állapotban a sűrűség nő, hisz a légszáraz próbatestek pórusaiban a  $1,293 \text{ kg/m}^3$  levegőt kiszorítottuk a telítés

során és a  $1000 \text{ kg/m}^3$  víz vette át a helyét. Ennek eredményeként megnőtt a sűrűsége a próbatestnek. Közelítőleg 20% a sűrűség növekedés a vízzel telített állapot és a légszáraz állapot értékhez képest (4. táblázat). Láthatjuk, hogy a fagyasztott sűrűség a telítetthez képest csökken. Ez azzal magyarázható, hogy a jégnek kisebb a sűrűsége a víznél. A jég sűrűsége  $900 \text{ kg/m}^3$ , ez 10%-kal kisebb a víz sűrűségénél. A próbatestek testsűrűségének csökkenése 2x1-es próbatesteknél 4%, 1x1-es próbatesteknél pedig 5% volt (4. táblázat). A közetanyag porozitása 30V/V%-os átlagértéket adott, ez megközelítőleg 1/3-a a teljes térfogatnak. A 4%-os testsűrűség csökkenés megmagyarázható a jég és a víz közti testsűrűség csökkenéssel.

4.táblázat: Sűrűség és ultrahang terjedési sebesség változása vízzel telítés és fagyasztás hatására

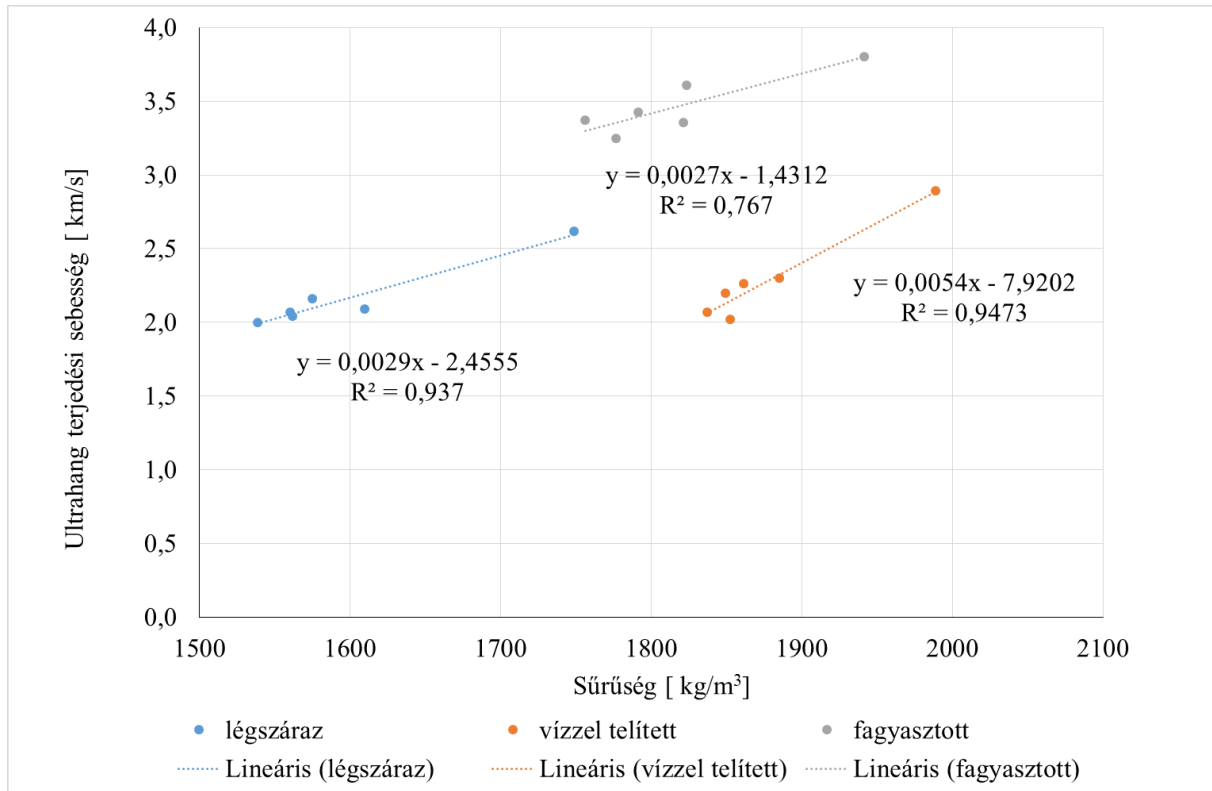
| Átlag változás | Sűrűség változás [%] |                      |                       | Ultrahang terjedési sebesség változás [%] |                      |                       |
|----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---|----------------------|-----------------------|
|                | Telített/Légszáraz   | Fagyasztott/Telített | Fagyasztott/Légszáraz | Telített/Légszáraz                        | Fagyasztott/Telített | Fagyasztott/Légszáraz |
| 2x1            | 120%                 | 96%                  | 115%                  | 110%                                      | 152%                 | 167%                  |
| 1x1            | 120%                 | 95%                  | 114%                  | 116%                                      | 141%                 | 163%                  |

## 5.2. Ultrahang terjedési sebesség változása

A 16. ábrán ábrázoltam az ultrahang terjedési sebességet a testsűrűség függvényében. A kék jelű ponthalmaz a légszáraz, a szürke ponthalmaz a fagyasztott, a narancssárga ponthalmaz pedig a vízzel telített testsűrűség és az UH terjedési sebesség kapcsolatát mutatja. Az eredményekre közetfizikai állapotonként lineáris regressziós egyenest illesztettem. Jól látható, hogy a lineáris regresszióval való közelítés csak 2 esetben lépi túl a 90%-os közelítést. A légszáraz állapotban a közelítés 94%-os, a vízzel telített állapotban 95%-os és fagyasztott állapotban pedig csak 75%.

A 16. ábrán látszódik, hogy a telített próbatesten nő a sebesség a légszárazhoz képest. Közelítőleg 10%-os a növekedés a két érték között (4. táblázat). Ez magyarázható azzal, hogy a víz jobban vezeti a hullámokat a levegőnél. Viszont a fagyasztott állapotban a vízzel telítetthez képest jelentősen megnő az UH terjedési sebesség (4. táblázat). Itt a sebesség

növekedés 52%-os. Ennek magyarázata, hogy a szilárd anyagok jobban vezetik a hullámokat, mint a folyadékok. Az 1x1-es próbatestek itt is követik a 2x1-nél megfigyelt növekedési arányokat. Viszont az kijelenthető, hogy ha egy próbatest 2x magasabb, mint a másik attól még nem fog fele akkora sebességgel áthaladni rajta a hullám (4. táblázat).



16. ábra: Sűrűség és ultrahang terjedési sebesség kapcsolata

### 5.3. Szilárdsági vizsgálatok kiértékelése

A szilárdsági vizsgálatok során arra voltam kíváncsi, hogy az egyes szilárdságok, mint például nyomó és- húzószilárdságok hogyan viszonyulnak egymáshoz a különböző közetfizikai állapotokban.

A nyomószilárdság kiértékelése során összevettem a különböző állapotokban mért átlag nyomószilárdságokat. Azt tapasztaltam, hogy a vízzel telített próbatestek nyomószilárdsága csökkent a légszáraz állapotban lévőkhöz képest. Ennek a csökkenésnek a mértéke 28%-os (5. táblázat). Ezt követően a fagyasztott állapotban lévőket hasonlítottam össze a vízzel telített nyomószilárdságokkal. Az az eredmény jött ki, hogy a fagyasztott próbatestek átlagosan 300%-al nagyobb nyomószilárdsági értéket voltak képesek felvenni, mint a vízzel telítettek. A fagyasztott és a légszáraz állapotban lévő próbatesteket összehasonlítva, a fagyasztott állapotban lévő próbatestek nyomószilárdsága magasabb, mint a légszáraz állapotban lévőké.

Itt a változás 238%-os volt, tehát átlagosan majdnem 2,5x nagyobb nyomást képesek a fagyott próbatestek felvenni, mint a légszáraz társaik.

Ezt követően a húzószilárdsági értékeket hasonlítottam össze. Itt is látszódtak azok a csökkenések és növekedések, amiket a nyomószilárdságnál figyelhettünk meg. A vízzel telített állapotban 44%-al csökkent a próbatestek húzószilárdsága a légszáraz állapothoz képest.

A fagyasztott és vízzel telített állapotok összevetésekor a fagyasztott próbatestek 253%-al nagyobb értéket vettek fel, mint a vízzel telítettek. De ami számunkra a legfontosabb az a fagyasztott és a légszáraz állapot közti változás. A két állapot közti húzószilárdság változás mindössze 140% lett (5. táblázat). Látható, hogy mind a nyomó mind a húzószilárdság nőtt a fagyasztás hatására, de az is látható, hogy a nyomószilárdsági érték az látványosan lett nagyobb míg a húzószilárdság pedig sokkal kevésbé.

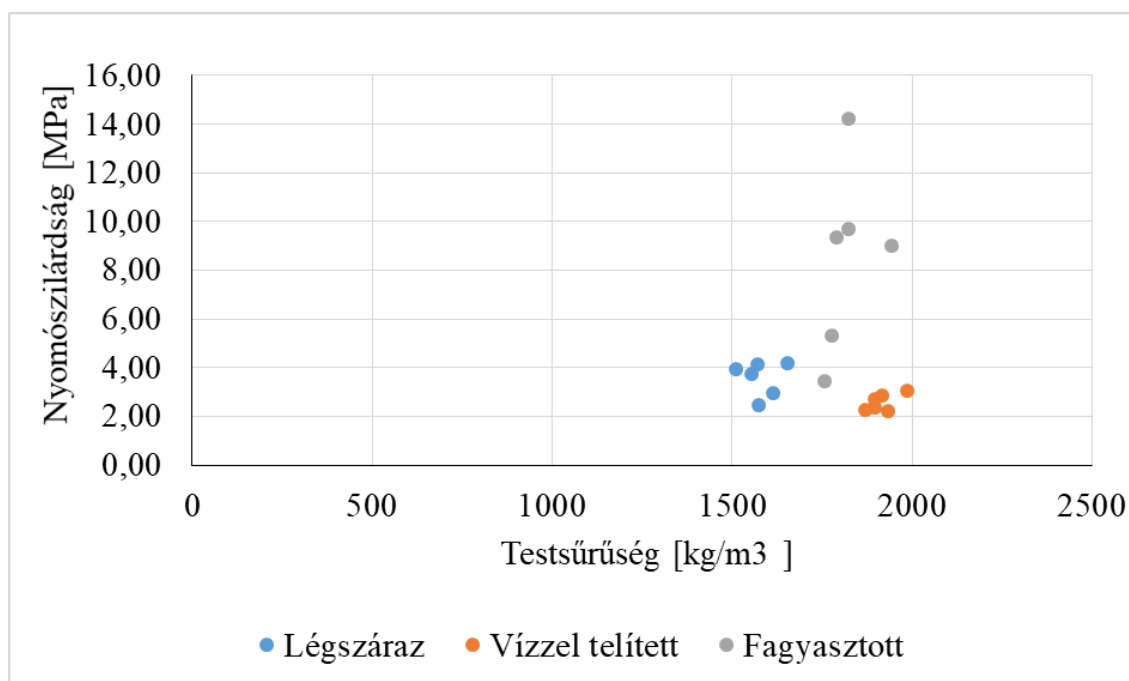
A rugalmassági modulus az a feszültség alakváltozás diagram rugalmas szakaszára állított iránytangens. Minél nagyobb a rugalmassági modulus annál meredekebb a rugalmas szakasz. A kiértékelés során a rugalmassági modulusok változását is figyeltem az egyes közetfizikai állapotokban (5. táblázat). Azt tapasztaltam, hogy a vízzel telített állapotban a rugalmassági modulus csökkent a légszáraz állapothoz képest 45%-al. Ez azt jelenti, hogy a görbe ellaposodott az eddigi meredekekhez képest. Fagyasztás hatására a rugalmassági modulus a légszáraz állapotban mért 112%-ra, a vízzel telített állapotban mért 203%-a nőtt. Ez az jelenti, hogy a fagyasztás hatására a rugalmas szakasz meredekebb lett, ridegebb lett a közet az alakváltozások mértéke csökkent.



5.táblázat: Szilárdsági paraméterek változása vízzel telítés és fagyasztás hatására

| Átlagok változása | Nyomószilárdság változás [%] |                      |                       | Rugalmassági modulus változás [%] |                      |                       | Poisson tényező változás [%] |                      |                       | Húzószilárdság változás [%] |                      |                       |
|-------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
|                   | Telített/Légszáraz           | Fagyasztott/Telített | Fagyasztott/Légszáraz | Telített/Légszáraz                | Fagyasztott/Telített | Fagyasztott/Légszáraz | Telített/Légszáraz           | Fagyasztott/Telített | Fagyasztott/légszáraz | Telített/Légszáraz          | Fagyasztott/Telített | Fagyasztott/légszáraz |
|                   | 72%                          | 331%                 | 238%                  | 55%                               | 203%                 | 112%                  | 42%                          | 80%                  | 33%                   | 56%                         | 253%                 | 140%                  |

A Poisson tényező víz és fagyasztás hatására is csökkenő tendenciát mutat, legkisebb értéket fagyasztott állapotban kaptam, de meg kell említeni, hogy a vízzel telített és a fagyasztott állapot Poisson tényezőjének átlagai megközelítőleg egyformák.

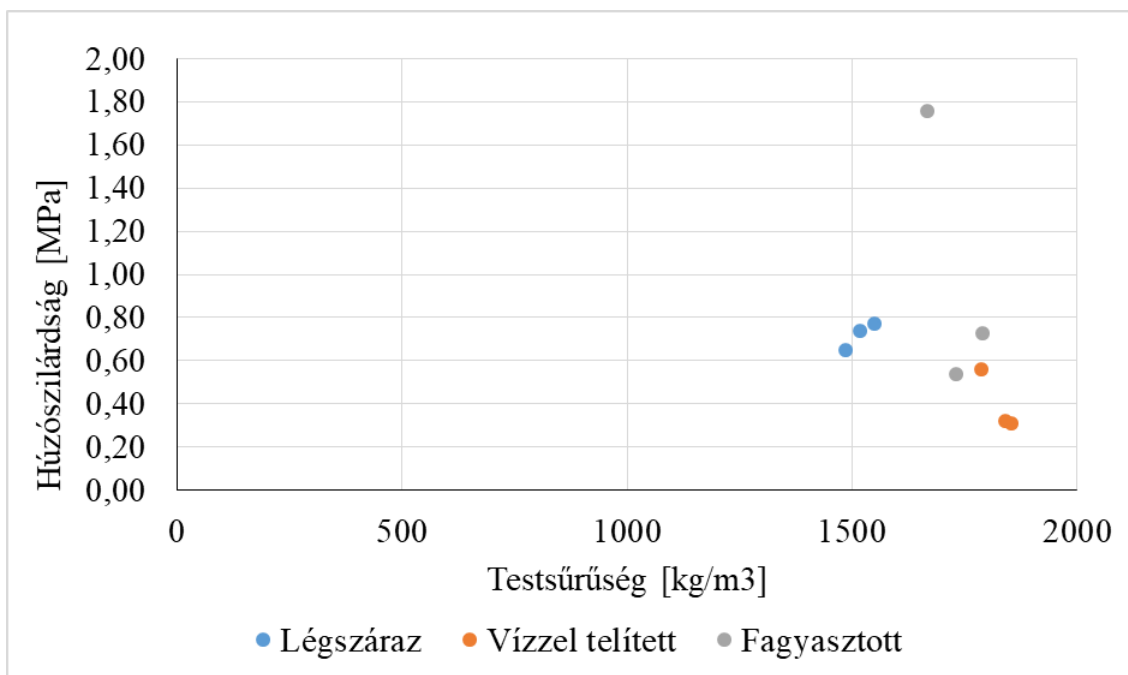


17. ábra: Testsűrűség és nyomószilárdság kapcsolata

Megvizsgáltam a testsűrűség és a nyomószilárdság kapcsolatát különböző közetfizikai állapotokban. A 17. ábra bemutatja az egyes próbatesteken mért nyomószilárdságot a közetfizikai állapotnak megfelelő testsűrűség függvényében. Megfigyeltem, hogy a légszáraz és a vízzel telített próbatestek szilárdsági értékei egymás közel vannak. Míg a fagyasztott

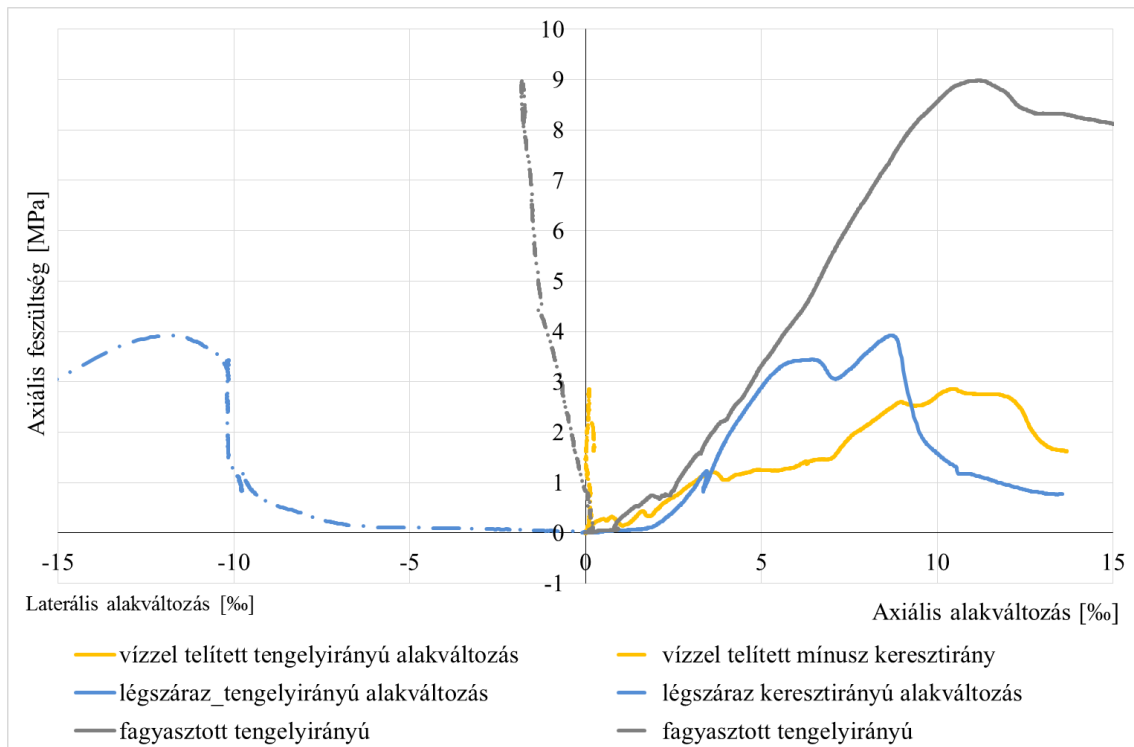
próbatestek szilárdságának minimum és maximum értéke között több mint 10MPa van. Ennek fényében fontos megjegyezni, hogy az átlag szilárdság fagyasztott állapotban csalóka. Az előbb említett több, mint 2x-es emelkedés a fagyasztott és légszáraz állapot között nem minden esetben igaz. A 17. ábra mutatja, hogy fagyasztás hatására egyes próbatestek szilárdsága alig emelkedett.

A húzószilárdság-testsűrűség vizsgálata során is a nyomószilárdságokhoz hasonló összefüggéseket figyeltem meg. A 18. ábrán megfigyelhető, hogy a húzószilárdsági értékek a vízzel telített és légszáraz állapotban közel azonosak. Míg a fagyasztott állapotban az egyik érték 1MPa-al magasabb a másik kettőnél. Itt is csak a fagyasztott állapotban magas a szórás hasonlóan a nyomószilárdság esetében.



18. ábra: Testsűrűség és húzószilárdság kapcsolata

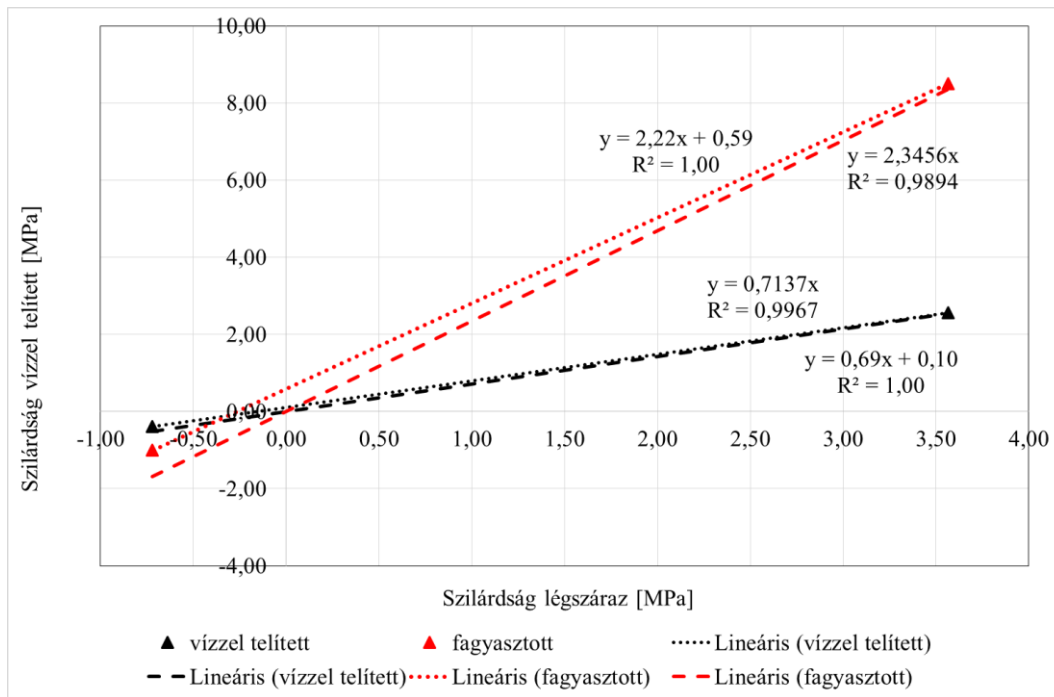
A 19. ábrán ábrázoltam egy-egy jellemző feszültség alakváltozás görbét mind a három közetfizikai állapotban. A folytonos vonalak jelölik a tengelyirányú alakváltozást – tengelyirányú feszültség kapcsolatot, a szaggatott vonal pedig a tengelyirányú feszültség-keresztirányú alakváltozás kapcsolatot. A kék színnel jelöltem a légszáraz, a szürke színnel a fagyasztott és narancssárga színnel pedig a vízzel telített görbéket.



19. ábra: Tengelyirányú feszültség és alakváltozás kapcsolata különböző közetfizikai állapotokban

A légszáraz és a fagyasztott állapotban lehet a legegyszerűbben meghatározni a rugalmas szakaszt a görbéken. Légszáraz állapotban előfordulnak repedések ahol a görbében töréspont és feszültség visszaesés látható. Fagyasztott állapotban nincsenek töréspontok kisebb a egyenetlenségek láthatóak, a törés után hosszabb a képlékeny szakasz mint a többi görbénél. A víztelítés hatására csökken a görbe meredeksége, ellaposodik. A tönkremenetel előtt sok apró töréspontot lehet felfedezni a görbén így nehéz a rugalmas szakasz pontos kiválasztása.

A 20. ábra bemutatja a fagyasztott és vízzel telített szilárdság kapcsolatát a légszáraz szilárdsággal. Pirossal jelöltem a fagyasztott szilárdság és a légszáraz szilárdság, feketével a vízzel telített szilárdság és légszáraz szilárdság kapcsolatát. A húzószilárdságokat az Y tengelytől balra, a nyomószilárdságot jobbra ábrázoltam. A húzó és nyomószilárdságot összekötő egyenesnek ideális esetben a (0,0) ponton keresztül kell áthaladnia. Az ábrán pontozott vonallal jelöltem az egymáshoz tartozó szilárdságokat összekötő egyeneseket, szaggatott vonallal pedig a két pontra origón keresztül illesztett regressziós egyenest. Vízzel telített állapotban megfigyelhető, hogy ez a két egyenes majdnem tökéletesen illeszkedik egymáshoz. Az egyiknek 0,71 a másiknak 0,69 a meredeksége. Fagyasztott állapotban ez a két egyenes eltér egymástól. A húzó-nyomószilárdságot összekötő pontozott vonal az Y tengelyt 0,59-nél metszi.

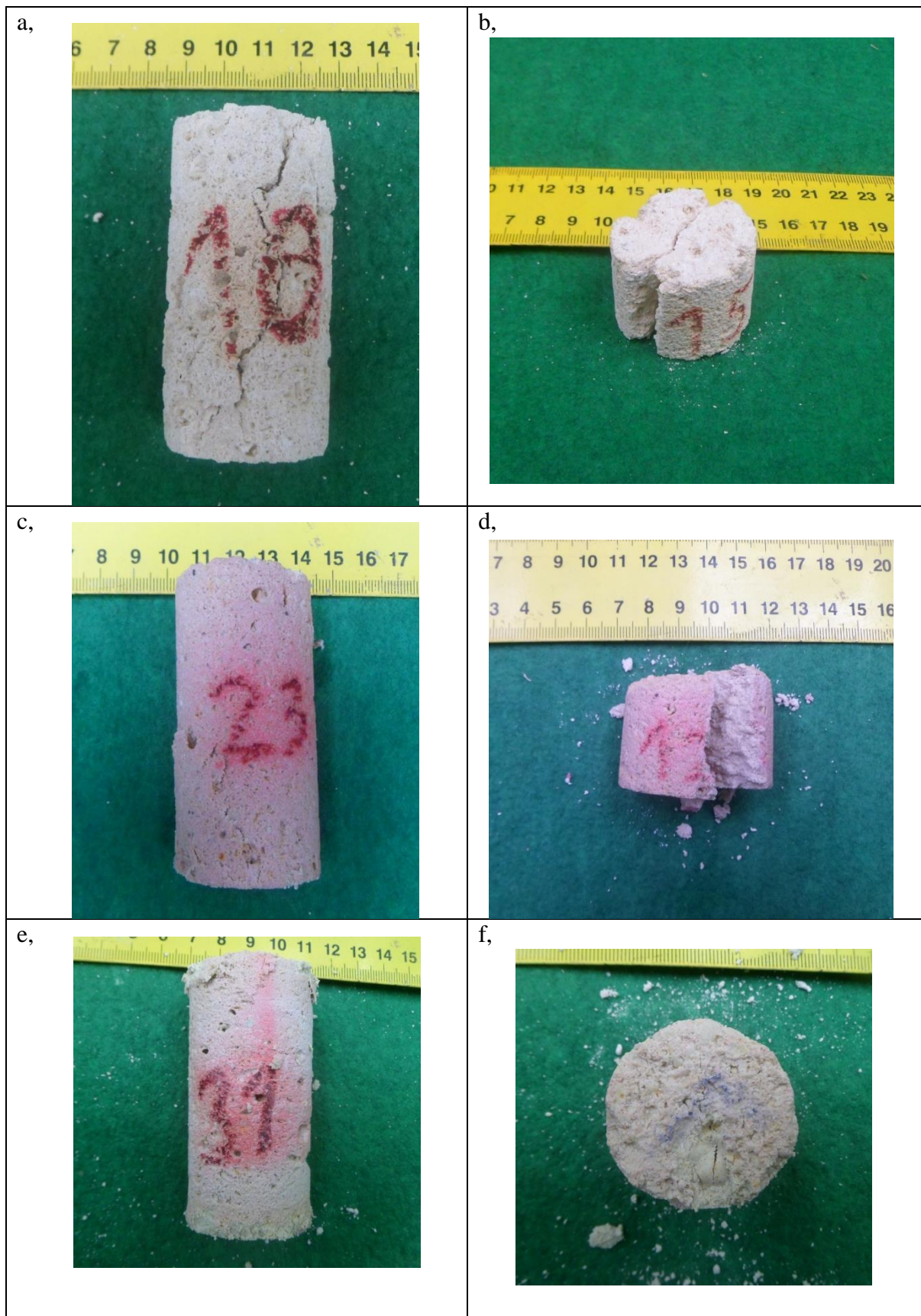


20. ábra: Fagyasztott és vízzel telített szilárdság kapcsolata a légszáraz szilárdsággal

#### 5.4. Tönkremeneteli képek

Az egytengelyű nyomószilárdság és a közvetett húzószilárdság elvégzése után minden próbatestet lefényképeztem és a törési képeket összehasonlítottam. A 20. ábra tartalmazza a három közetfizikai állapotra jellemző törésképeket. A három tönkremenetel jelentősen különbözött egymástól. A légszáraz állapotban mind a nyomószilárdság mind a húzószilárdság vizsgálat után szétestek a próbatestek. A próbatestek felületéről a törésvonal mentén kőzet darabok estek le. A 2x1-es próbatest hosszanti irányban ketté tört, az 1x1-es próbatest pedig középen ketté repedt. Vízzel telített állapotban a 2x1-es próbatesten repedéseket figyeltem meg, de ezek mentén magától nem esett szét a próbatest kézzel viszont könnyen szétszedhető volt. A próbatest felületéről kőzetanyag lepergést nem figyeltem meg. A vízzel telített állapotú 1x1-es próbatest a húzószilárdság vizsgálat után magától nem vált ketté, de a repedés mentén könnyen szétszedhető volt. Fagyasztott állapotban a nyomószilárdság vizsgálat után a próbatest két végén, a nyomólap környékén figyeltem meg lemorzsolódást, a próbatest egyben maradt és nagy repedések nem látszódtak rajta. Közvetett húzófeszültség hatására az 1x1-es próbatesten megfigyelhető volt a terhelési síkkal párhuzamos repedés, de a próbatest egyben maradt.

Ebből arra következtettem, hogy a jégkristályok összefogozódnak egymással és a kőzet szövetével így a tönkremenetel nem látványos, a repedéseket nem feltétlenül lehet szabad szemmel látni. A tönkremenetel nem egy nagy repedés terjedése, hanem sok mikrorepedés keletkezése okozza. A kőzet anyagán szabad szemmel nem látható a tönkremenetel.



21. ábra: Jellemző töréseképek (a, b légszáraz állapot; c, d vízzel telített; e, f fagyasztott állapot)

## 6. Következtetések, összefoglaló diagramok

Megállapítottam, hogy az általam vizsgált sóskúti, ooidos durva mészkő szilárdsága víztelítés hatására jelentősen csökken. Ez a csökkenés nyomószilárdság esetén kb 30%-os, húzószilárdság esetén kb 40%-os. Ezek az eredmények megfelelnek Pápay és Török (2006) által publikált különböző szövetű sóskúti, ooidos, durva mészkő nyomószilárdsági vizsgálati eredményeinek.

A fagyasztás után mért szilárdsági eredményekből megállapítottam, hogy az átlagszilárdság mind a nyomó- és mind a húzószilárdság esetében a légszáraz átlagszilárdsághoz képest jelentősen nő. Amennyiben az egyes próbatestek szilárdsági eredményeit külön-külön is megvizsgáljuk kiderül, hogy a szilárdsági eredményekben nagy szórás tapasztalható. Ez azt jelenti, hogy nem minden próbatest szilárdsága nőtt azonos mértékben. Emiatt az átlagértékekből meghatározott szilárdság növekmény nem általánosítható az egész mintacsoportra.

Megállapítottam, hogy a légszáraz, vízzel telített, fagyasztott állapotú próbatestek törésképe jelentősen eltér egymástól. Fagyasztott állapotban a jégkristályok összefogódása megakadályozza a próbatest szétesését. A tönkremenetel után sok esetben felületi repedés sem figyelhető meg, a kőzet anyaga mikrorepedés rendszer keletkezése miatt meggy tönkre.

A különböző kőzetfizikai állapotban mért szilárdságok kapcsolatát vizsgálva megállapítottam, hogy Vásárhelyi (2003) által megadott vízzel telített és légszáraz szilárdságot összehasonlító regressziós összefüggéséhez hasonlóan ( $\sigma_{tel} = 0,646 * \sigma_{sz}$ ) az általam vizsgált durva mészkőre  $\sigma_{tel} = 0,71 * \sigma_{sz}$  összefüggést kaptam.

A fagyasztott és légszáraz szilárdságot összehasonlító regressziós összefüggés  $\sigma_{fagy} = 2,35 * \sigma_{sz}$ .

## 7. Irodalomjegyzék

- Egerer F. Kertész P. 1993. Bevezetés a kőzetfizikába. Akadémiai Kiadó. Budapest.
- Fodor T. Kleb B. 1986. Magyarország mérnökgeológiai áttekintése. Magyar Állami Földtani Intézet. Budapest.
- Gálos M. Vásárhelyi B. 2006. Kőzettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban. Műegyetemi Kiadó. Budapest.
- Kleb B. Török E. 1972. Geológia Praktikum. Nemzeti Tankönyvkiadó. Budapest.
- Schafarzik F. Vendl A. Papp F. 1964. Geológiai Kirándulások Budapest Környékén. Műszaki Kiadó. Budapest.
- Török Á. Pápay Z. 2006. Durva mészkövek időállóságának és szövetszerkezetének kapcsolata. *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006*: 185-196.
- Török Á. 2007. Geológia mérnököknek. Műegyetemi Kiadó. Budapest.
- Török Á. Pápay Z. 2006. Durva mészkövek vízfelvételi tulajdonságai. *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006*: 197-208.
- Török Á. Rozgonyi N. 2004. Mineralogy and morphology of salt crusts on porous limestone in urban environment. *Environmental Geology* 46/3: 323–339.
- Vásárhelyi B. 2003. Víz hatásának vizsgálata a durva mészkő szilárdságára. *Közúti és mélyépítési szemle* 53/2: 64-69.
- Wallis S 2009. Budapest Metro standoff resolved. <https://www.tunneltalk.com/BudapestMetro-May09.php> (2018. október 26.)

### **Köszönetnyilvánítás:**

Köszönettel tartozom Pálinkás Bálintnak, aki a laborvizsgálatok során segédkezett és tanácsokkal látott el. Ezen felül Dr. Rozgonyi-Boissinot Nikolettának és Dr. Vásárhelyi Baláznak köszönöm a segítségnyújtást a dolgozat elkészítésében.

Budapest, 2018.10.26.