

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

## Kövek hőágulási együtthatójának vizsgálata

Készítő: Szigethi-Kocsis Ádám

*Szigethi-Kocsis Ádám*

BSc építőmérnök hallgató

Konzulens: Dr. Vásárhelyi Balázs

egyetemi docens

Budapest, 2019

## Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b> .....	3
<b>2. Elméleti összefoglalás, eddigi mérési eredmények ismertetése</b> .....	4
2.1. A kőzetek hőtágulása együtthatója .....	4
2.2. A kőzetek hőtágulási együtthatójának változása az ásványi összetétel, a nyomás, a hőmérséklet és más mennyiségek függvényében .....	6
2.3. A lineáris hőtágulás mérése.....	8
2.4. A termikus kőzetaprítás alapelve .....	9
<b>3. Vizsgált kőanyagok és mérési módszer ismertetése</b> .....	9
3.1. Vizsgált kőanyagok bemutatása .....	9
3.2. A labor vizsgálati módszer ismertetése.....	11
<b>4. Mérési eredmények bemutatása</b> .....	18
4.1. Kőzetminták fő méreteinek, tömegének és UH terjedési eredményeinek ismertetése .....	18
4.2. A kőzetminták hőtágulási együtthatójának eredményeinek ismertetése .....	21
<b>5. Összefoglalás, elemzés</b> .....	25
<b>6. További mérési lehetőségek</b> .....	25
<b>7. Irodalomjegyzék</b> .....	26

## 1. Bevezetés

### Kövek hőtágulási együtthatójának vizsgálata

A kőzetek hőtágulási tényezőjének ismerete az építési kőanyagok vizsgálatánál fontos tényező: az időjárásnak kitett burkolókövek a hő hatására tágulnak, míg lehűléskor összemennek. Ezen folyamatok hatására feszültségek léphetnek fel, melynek ismerete fontos a kövek méretezésekor.

Jelen kutatás keretében többféle típusú kőzetet vizsgálok. A hasáb alakú próbatesteknek megmérem a három méretét: magasságát, szélességét és vastagságát. Ebből kiszámoltam azok térfogatát. Lemérve a kövek tömegét, a tömeg és térfogat hányadosból kiszámoltam a kőzet sűrűségét.

Ezek után szobahőmérséklet lemérem az UH terjedési sebességeket (km/s), majd különböző hőmérsékleten magasság változását ezred mm pontosan mérő műszerrel. A magasság változását az hőmérséklet függvényében ábrázolom és az itt kapott görbe meredeksége a hőtágulási tényező.

### Investigation of the coefficient of thermal expansion of the rocks

The knowledge of the coefficient of thermal expansion of rocks is an important factor in the study of building materials: weather cladding stones increase in heat and shrink when cooled. These processes can cause stresses, which are important to know when dimensioning stones.

In this research I investigated several types of rocks. For column samples, I measure three sizes: height, width, and thickness. From this I calculated their volume. By measuring the weight of the stones, I calculated the density of the rock based on the weight / volume ratio.

The room temperature is then measured at the UH propagation speed (km / s), and at various temperatures. The height change in millimeters is measured with an accurate instrument. The change in height is plotted against temperature and the slope of the curve obtained here is the coefficient of thermal expansion.

## 2. Elméleti összefoglalás, eddigi mérési eredmények ismertetése

### 2.1. A kőzetek hőtágulása együtthatója

A kőzetek hőtágulási együtthatójának ismeretében lehetőség van a hőmérséklet-változás hatására bekövetkező hossz (ill. térfogat) változás meghatározására. Ezen tényező főleg időjárásnak kitett burkolókövek esetében fontos – sok esetben megfigyelhető, hogy a hőmérséklet hatására bekövetkezett hossz-változás hatására az anyag tönkremegy.

A kőzetek lineáris hőtágulási együtthatója ( $\alpha$ ) kiszámításánál feltételezzük, hogy az lineárisan függ a hőmérséklet-változástól, azaz,

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \quad (2.1)$$

formulával, számolható ki.

A térfogati hőtágulási együtthatóját ( $\beta$ ) esetben pedig a

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T} \quad (2.2)$$

formulával definiáljuk.

A fenti egyenletekben

- a hőmérséklet változás:  $\Delta T = T - T_0$ ,
- a lineáris hossz-változás:  $\Delta l = l_T - l_0$ ,
- valamint a térfogat-változás:  $\Delta V = V_T - V_0$ 
  - $T_0$  – kiindulási hőmérséklet
  - $l_0$  – kőzetminta hossza
  - $V_0$  – kőzetminta térfogata
  - $T$  – méréskori hőmérséklet
  - $l_T$  – kőzetminta hossza T hőmérsékleten
  - $V_T$  – kőzetminta térfogata T hőmérsékleten

A két mennyiség közül a lineáris hőtágulás a gyakorlatban gyakrabban alkalmazott mennyiség, részben azért, mert jobban mérhető és számolható, mint a térfogati hőtágulási együttható, másrészt kapcsolata egyszerűbb a mechanikai jellemzőkkel, mint például a Young-modulussal és a fajlagos alakváltozással.

Ezek alapján a hőtágulás tenzora szimmetrikus és a főtengetyes ( $x_1, x_2, x_3$ ) alaknak megfelelő ellipszoid egyenlete a hőtágulási együttható esetén a

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

tenzor alapján

$$\alpha_1 \cdot x_1^2 + \alpha_2 \cdot x_2^2 + \alpha_3 \cdot x_3^2 = 1. \quad (2.4)$$

Tehát a hőtágulási együttható ásványok esetén irányfüggő mennyiség, amelynek eloszlása anizotróp (ami az ásvány definíciójából adódóan következik). Nye (1964) alapján állítottuk össze a 1. táblázatot, az általa publikált adatokat összefoglalva különböző ásványok esetén.

Ásvány	Kristályrendszer	Optikai tengelyek száma	Hőmérséklet (°C)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
				(10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )		
Gipsz	monoklin	2	40	1,6	42	29
Aragonit	rombos	2	40	35	17	10
Kvarc	trigonális	1	20	13		8
Kalcit	trigonális	1	40	5,6		25
Rutil	tetragonális	1	40	7,1		9,2
Réz	szabályos		20	16		
Gyémánt	szabályos		20	0,89		

1. táblázat: Ásványok lineáris hőtágulási együtthatója és annak anizotrópiája

Közetek esetén az anizotróp tulajdonságról a legtöbb esetben eltekinthetünk. Különböző közetek lineáris hőtágulási együtthatójáról tájékoztató értékeket a 2. táblázatban foglaltuk össze Rzhovsky-Novik (1971) publikációját figyelembe véve.

Kőzet	$10^{-6} \text{ K}^{-1}$ egységben
Agyagmárga	9
Azbeszt	7
Bazalt	5,4
Diabáz	5,4
Dolomit	12
Gránit	6—9
Homokkő	5—12
Kvarcit	11
Mészkö	5—8,9
Márvány	3—15

2. táblázat: Néhány kőzet lineáris hőtágulási együtthatója (Rzhevsky-Novik 1971)

## 2.2. A kőzetek hőtágulási együtthatójának változása az ásványi összetétel, a nyomás, a hőmérséklet és más mennyiségek függvényében

Az ásványi összetétel triviálisan, úgy befolyásolja a kőzetek hőtágulási együtthatóját, hogy a nagy hőtágulási együtthatójú ásványok (pl. kvarc) tartalma növeli a kőzet hőtágulási együtthatóját, de ugyanakkor igaz fordítva is.

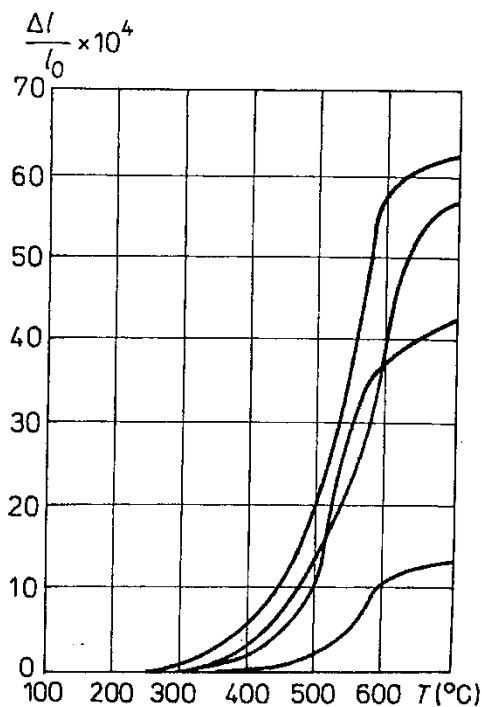
A 3. táblázat mutatja a kőzetek hőtágulási együtthatójának változását a kvarc tartalom függvényében, amelyet Dimitrijev, Goncsarov és Kuzjajev (1973) után közölt.

Kőzet	Kvarctartalom, %	Lineáris hőtágulás $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ egységben
Mikrokvarcit	99	1,7
Kvarcit	97	1,1
Homokkő	95	1,0
Gneisz	25	0,83
Diorit	20	0,72

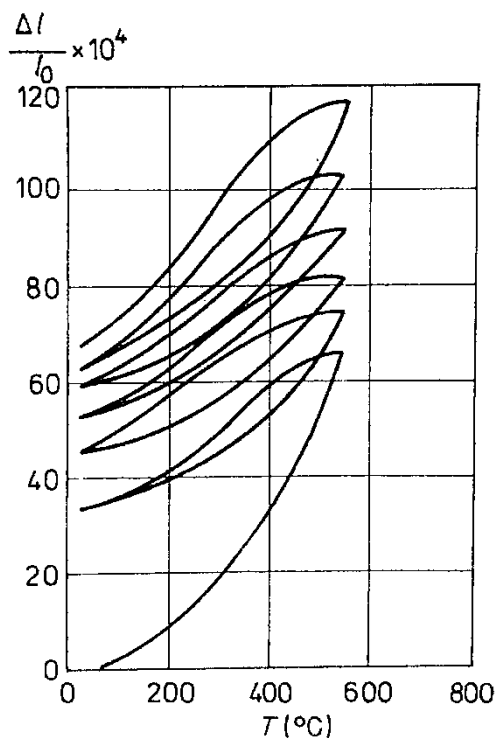
3. táblázat: Kőzetek hőtágulási együtthatója a kvarctartalom függvényében (20-100 °C között)

A porozitás száraz állapotban általában nem hat a hőtágulásra viszont a kőzetzárványban levő folyadékok és gázok azt jelentős mértékben befolyásolják, amiből magasabb hőtágulás alakulhat ki az olvadási pont közelébe eső hőmérsékleten (pl. perlit).

A hőmérséklet és a nyomás emelkedésével nő a lineáris hőtágulási együttható. Az 1. ábra mutatja a keletkező deformációt a hőmérséklet függvényében, különböző kvarcitok esetén.



1. ábra: Különböző kvarcitok relatív hőtágulás a hőmérséklet függvényében (Dimitrijev - Goncsarov 1978)



2. ábra: Kvarcit maradandó és pillanatnyi alakváltozásai többszöri felfűtés és lehűtés után (Dimitrijev - Goncsarvo 1978)

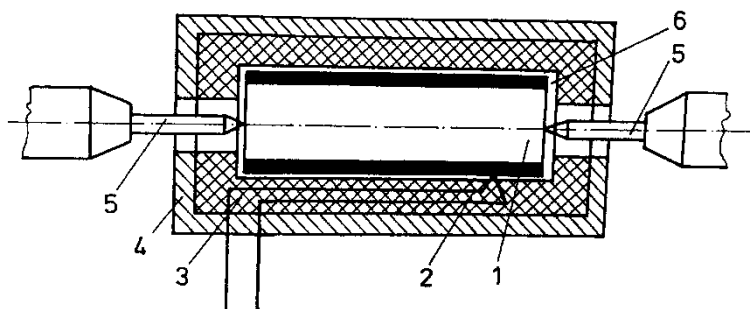
A 2. ábrán láthatjuk, hogy a kezdeti állapot, hogyan változik többszöri felfűtés és lehűtés hatására. A következő 4. táblázat mutatja a hőtágulási együttható anizotrópiájának változásával arányos alakváltozásokat Dimitrijev és Goncsarov (1978) után.

Kőzet	Hőmérséklet °C						
	300	400	450	500	550	600	650
Kvarcit 1 (rétegződéssel párhuzamosan)	2	6	10	16	28	50	54
Kvarcit 1 (rétegződésre merőlegesen)	2	5	10	11	31	55	71
Kvarcit 2 (rétegződéssel párhuzamosan)	1	4	11	24	36	56	60
Kvarcit 2 (rétegződésre merőlegesen)	7	14	—	36	40	50	61

4. táblázat: Az alakváltozás  $\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)$  irányfüggése a hőmérséklet függvényében ( $10^{-4}$  egységekben)

### 2.3. A lineáris hőtágulási együttható mérése

A lineáris hőtágulási együttható mérésének egyszerű módszerét láthatjuk a 3. ábrán, ahol hőszigetelt kályhába helyezett kőzetmintának a hőmérséklet okozta méretváltozását kvarcrudak továbbítják. (A szigetelések miatt a kvarc-rudak méretváltozása általában elhanyagolható.) A kvarc-rudakra helyezett jelek közötti méretváltozást optikai vagy piezoelektromos úton mérik.



3. ábra: A lineáris hőtágulási együttható mérése (Dimitrijev - Goncsarov 1978)

1 – kőzetminta, 2 – termoelem, 3 – hőszigetelő réteg, 4 – burkolat, 5 – kvarc-rudak, 6 – fűtés



## 2.4. A termikus kőzetaprítás alapelve

A kőzetekben a termikus hatásra kialakul belső feszültséget már ősidők óta használja az emberiség kőzetroncsolásra. Ennek a régóta alkalmazott eljárásnak vagy módszernek az elve egyszerűen megfogalmazható. Tekintsünk a már fentebb ismertetett (2.1) formulát

$$\alpha \cdot \Delta T = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.5)$$

Ahol a  $\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon$ -nal, ami a fajlagos alakváltozás, a feszültség ( $\sigma$ ) pedig az egyszerűsített Hooke-törvény szerint a következő:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (2.6)$$

ahol E – a vizsgált kőzet Young-modulusa.

Ezek alapján (2.5) felírható a következő egyenlet:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T. \quad (2.7)$$

Ha a  $\Delta T$  növeljük, tekintettel arra, hogy az  $\alpha$  és az E egyaránt a hőmérséklet függvénye, akkor elérjük a kőzetre jellemző törőfeszültséget ( $\sigma_t$ ), amin a kőzet tönkremegy, majd szétesik. Ez alapján a fenti képlet következő alakban írható fel:

$$\sigma_t = \alpha(T) \cdot E(T) \cdot \Delta T_t \quad (2.8)$$

összefüggés értelmében előállítható a hőmérséklet-különbség, ahol a  $\Delta T_t$  a törőfeszültség. A fentiekben vázolt egyszerű elv az alapja pl. a jet-eljárásnak, a termikus fúrásnak és a kőzetjövésztésnek [L. pl. Dimitrijevič és Goncsarov (1978) munkája alapján].

## 3. Vizsgált kőanyagok és mérési módszer ismertetése

### 3.1. Vizsgált kőanyagok bemutatása

A laboratóriumi vizsgálat során négy, eltérő típusú kőzetet vizsgáltam. Minden típusú kőzetből 3-3 próbatesten végeztem el a méréseket. A következőkben a vizsgált kőzet típusokat mutatom be.

Első kettő kőzet típusom két eltérő ásványi összetételű **gránit**, amely a leggyakoribb savanyú, mélységi magmás kőzet. Viszonylag könnyű, szilárd, durva kristályos mélységi magmás kőzet. Három fő ásványa: az áttetsző, szürkés kvarc, a fehér vagy sárga plagioklász (oligoklász, illetve albit) és a rózsaszínű vagy fehér kálföldpát (ortoklász, néha mikroklin). Emellett található még benne biotit és amfiból is. Az 1. képen vöröses **brazil gránitot** a 2. képen pedig rózsaszínes **rozabeta gránitot** láthatunk.



1. kép: Brazil gránit



2. kép: Rozabeta gránit

A harmadik vizsgált kőzet típusom **forrásvízi mészkő**, amely jellemzően monomineralikus (egyásványos) vegyi üledékes kőzet, aminek legalább 90%-a kalcium-karbonát ( $\text{CaCO}_3$ ), azaz kalcit vagy aragonit. Édesvízi forrásokból, folyókból, tavakból modern és fosszilis kőzetváltozatai is ismertek. Krémszínű, lyukacsos-porózus, de nagy szilárdságú, polírozható. A következő 3. képen a süttői forrásvízi mészkövet láthatjuk.



3. kép: Forrásvízi mészkő



4. kép: Gneisz

Végül a 4. képen látható a **gneisz** típusú kőzet, amely világosszürke, rózsaszín, irányított szemcsés szövetű, metamorf kőzet, amely közepes vagy nagyfokú metamorfózison ment keresztül. A gneiszfélék gránitos (savanyú) magmából létrejövő magmás kőzetekből képződnek. Ásványai jól azonosítható, jellemző ásványai: megegyeznek a gránit ásványaival, de csillám dúsabb és a muszkovit gyakoribb.

### 3.2. A labor vizsgálati módszer ismertetése

A kőzetek azonosításához a vizsgálat megkezdése előtt elhelyezett jeleket használtam és ez alapján jelöltem a későbbiekben a táblázatokban is.



Az első mérési folyamatot szoba hőmérsékleten végeztem és elektromos tolómérő műszer segítségével lemértem a kőzet minták három fő méretét: a magasságot, a szélességet és a vastagságot. A következő 5-8. képeken ez a mérési folyamat látható.



5. kép: H2, H4 jelű brazil gránit kőzetminta



6. kép: A3 jelű rozabeta gránit kőzetminta



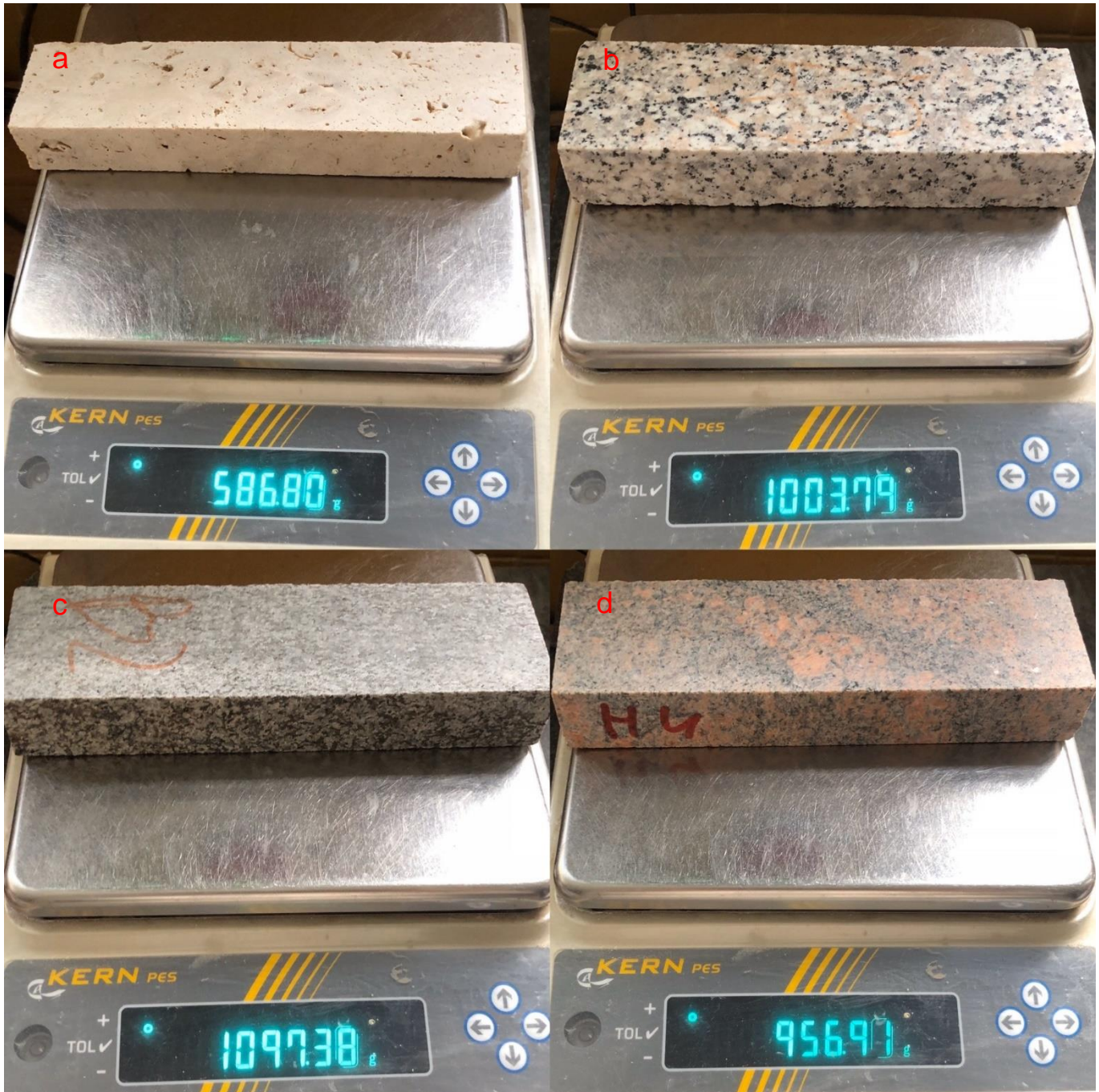
7. kép: B2 jelű gneisz kőzetminta



8. kép: H6 jelű forrásvízi mészkő kőzetminta



A kőzetek főbb méreteinek a lemérése után a kőzet minták tömegének mérése következett, ami a 9. képen látható. A súlymérést egy KERN PES digitális asztali mérleggel végeztem, ahol 0,01 gramm pontossággal tudtam meghatározni a minták tömegét.



9. kép: Kőzetminták tömegének a mérése (a - forrásvízi mészkő, b - rozabeta gránit, c – gneisz, d - brazil gránit)

A három fő méret 0,01 mm pontossággal való lemérése után lehetőség nyílt a próbatestek térfogatának a kiszámítására, ami következő képlet szerint történt

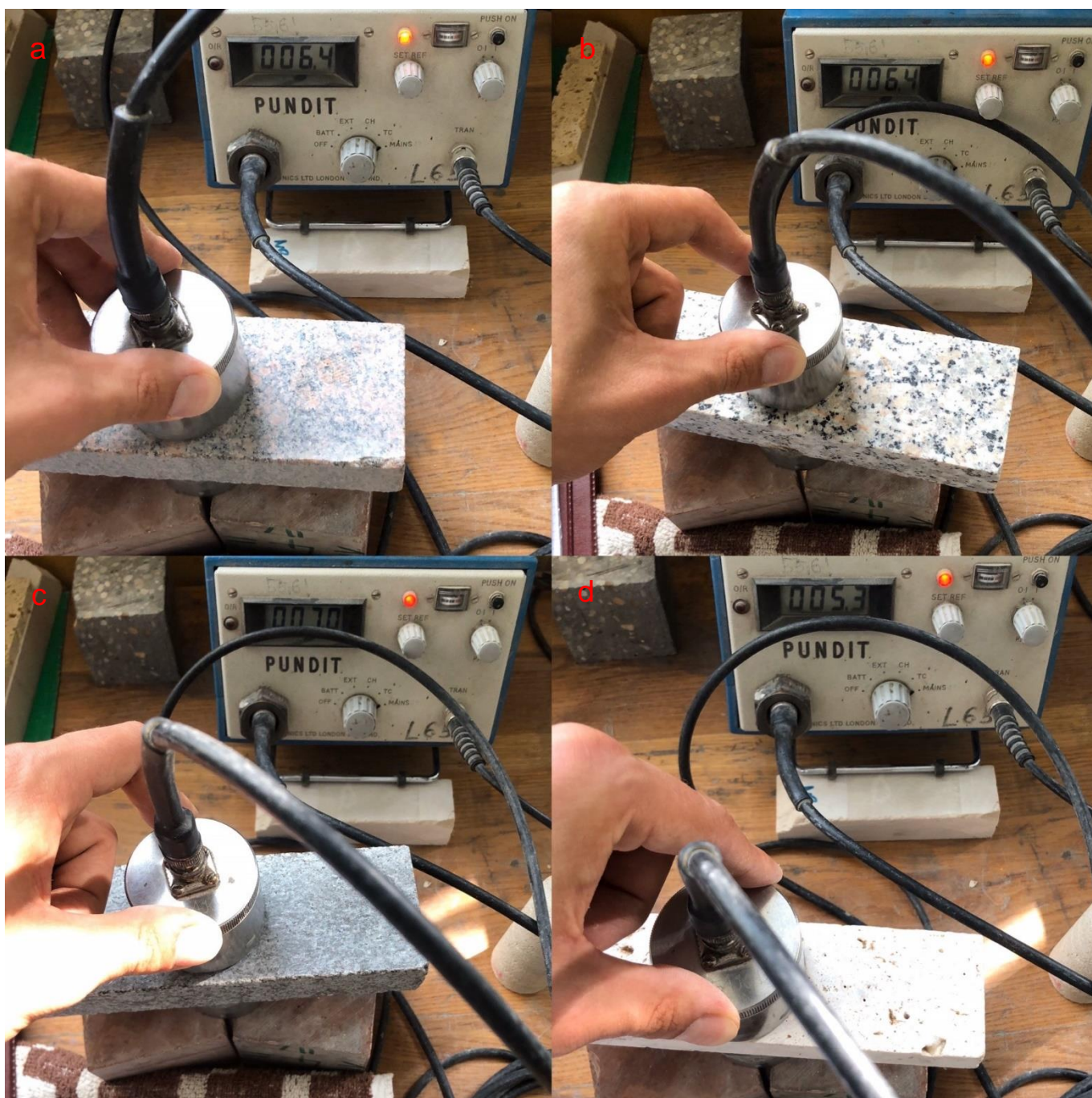


$$V = a \cdot b \cdot c, \quad (3.1)$$

A vizsgált közet térfogat és tömeg mennyiségei alapján kiszámítottam a sűrűségüket a már régóta ismert képlet alapján

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.2)$$

az egyes közet típusok szerint ezeket átlagoltam is.



10. kép: Ultrahanghullám terjedési sebessége a minták vastagságának függvényében (a – brazil gránit, b – rozabeta gránit, c – gneisz, d – forrásvízi mészkő)



A kőzetek sűrűségének számítása után az ultrahanghullám roncsolás-mentes vizsgálatot hajtottam végre a Pudit típusú készülékkel, amellyel  $0,1 \mu\text{s}$  pontossággal mértem.

A próbatesteket a két mérőfej (adó- és vevőfej) közé helyeztem, ami a 10. képen látható, majd leolvastam az ultrahang hullám terjedési idejét.



11. kép: Ultrahanghullám terjedési sebessége a minták magasságának függvényében és a Pundit ultrahang terjedési sebesség mérő berendezés (a – gneisz, b – forrásvízi mészkő, c – rozabeta gránit, d – brazil gránit)

A kőzetanyag és az adó-, illetve a vevőfej között a kapcsolatot pasztilin réteg biztosította ez látható a 11. képen. A műszer az eltelt időt méri, hogy a jel az adóból a vevőig mennyi idő alatt jut el.

Az ultrahang terjedési sebesség kiszámítása a következő képen (Egerer, Kertész, 1993)

$$v_m = \frac{a}{t_m}, \text{ illetve } v_v = \frac{c}{t_v}, \quad (3.3)$$

ahol megtett út a kőzet minták magassága (a) valamint vastagsága (c) és az út megtételéhez szükséges idő ( $t_m$  és  $t_v$ ), ami az ultrahang terjedési idő.

Az ultrahang terjedési sebesség számolása után a kőzetek lineáris hőtágulását kezdtem el mérni, amit a Mitutoyo Absolute digitális 0,001 mm pontosságú műszerrel mértem. A műszert a méréshez megfelelő állványra rögzítettem, amin felvettem a próbatestek átlagos magasságát és ez alapján mértem a különböző hőmérsékleten a relatív hőtágulást. A műszert a tartalék próbatestek közül kiválasztott etalonhoz kalibráltam minden mérés előtt, amit ideális szobahőmérsékleten tároltam.





12. kép: Mitutoyo Absolute digitális műszer állvánnyal és a kijelölt etalonnal

A 12. képen látható az állványra felszerelt mérőműszer az etalonnal. A próbatestek meréséhez fém tappancsokat ragasztottam pillanat ragasztóval a kőzet minták tengelyének aljára és tetejére, hogy a mérő állvány tapintócsúcsai közé be tudjam helyezni és fekete vonallal jelöltem, hogy mindig ugyan abba az álláspontba mérjem le a kőzetmintáimat.

A méréseim során különböző hőmérsékleti fokozatokon:

- -30,0 °C,
- 23,0 °C (szobahőmérséklet),
- 40 °C,
- 60 °C,
- 80 °C,

- 100 °C és maradandó alakváltozás miatt, utólag még lemértem a mintáimat
- 25 °C-on, ami a laboratórium adott hőmérséklete volt a méréskor.

A megfelelő hőmérséklet értékek eléréséhez mélyhűtő és kemence berendezéseket használtam és általában 2-3 napon keresztül tároltam adott hőmérsékleten a kőzettesteket.



13. kép: Mélyhűtőbe helyezett próbatestek



14. kép: Kemencébe helyezett próbatestek

A lemért relatív távolságokat táblázatban rögzítettem, majd elkezdtem a lineáris hőtáguláshoz szükséges számítási folyamatokat. Először minden állapotban mért eredményeket a 23 °C-os állapothoz viszonyítottam a következő képen:

$$\Delta l = \Delta l_T - \Delta l_{23}, \quad (3.4)$$

ahol az  $\Delta l_T$  – a kőzetminta relatív hosszváltozása T hőmérsékleten és az  $\Delta l_{23}$  – a kőzetminta relatív hosszváltozása 23,0 °C-on. Ezek után vettem a lineáris hőtágulás (2.1) összefüggést és kiátlagoltam az adott kőzet próbatesteim típusai szerinti értékeit.

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l_i}{l_{o,i} \Delta T_i \cdot n} \quad (3.5)$$

## 4. Mérési eredmények bemutatása

### 4.1. Kőzetminták fő méreteinek, tömegének és UH terjedési eredményeinek ismertetése

A vizsgált próbatestek fő méretei kicsivel térnek el egymástól, kivéve a forrásvízi mészkő mintákat, mert keskenyebb próbatestek álltak rendelkezésre a mérés elvégzéséhez. A tömeg mennyiségek esetén is a könnyebb forrásvízi mészkő minták kiemelkednek a sorból, viszont legnehezebb kőzetnek a gneisz minták bizonyultak, amit az 5. táblázat ismertet.

Kőzet típusa	Kőzet jele	Magasság [a] (mm)	Szélesség [b] (mm)	Vastagság [c] (mm)	Tömeg [m] (g)	UH terjedés vastagság függvényében [t <sub>v,i</sub> ] (μs)			UH terjedés magasság függvényében [t <sub>m</sub> ] (μs)
Brazíl gránit	H2	200,90	60,75	30,30	968,94	6,7	6,4	6,5	45,6
	H4	200,83	61,02	29,92	956,91	6,8	6,4	6,6	46,8
	H10	200,81	60,72	30,53	973,45	6,4	6,7	6,5	45,5
Rozabeta gránit	A2	202,40	61,93	30,57	1006,17	6,5	6,2	6,3	43,6
	A3	202,00	62,10	30,61	1003,79	6,5	6,4	6,6	43,2
	A4	201,60	61,34	30,46	984,83	6,6	6,5	6,6	43,3
Forrásv. mészkő	H4	200,31	48,73	26,42	631,13	6,3	5,5	5,8	43,5
	H6	200,52	48,80	24,57	586,80	5,4	5,3	5,1	42,9
	H8	199,55	49,51	26,12	622,10	6,0	5,6	5,8	43,0
Gneisz	B1	200,56	61,04	30,57	1083,67	7,1	7,0	7,3	41,2
	B2	200,88	61,08	30,92	1097,38	7,2	7,0	6,7	41,0
	B3	200,67	60,69	30,98	1093,76	6,8	6,9	7,0	40,8

5. táblázat: Kőzet minták főbb méreteinek, tömegének és UH terjedési eredményei

Az UH terjedési mérés során a minták vastagságán keresztül kisebb értékeket kaptunk, mint a magasságuk esetén, de ez várható volt, mivel a próbatestek magassága során az ultrahang hullám nagyobb utat tesz meg, mint a próbatestek vastagsága esetén.

A sűrűség számítása során a két gránit esetében közel hasonló értékeket kaptunk, míg a gneisz mintáknál nagyobb sűrűségi érték, a forrásvízi mészkő esetében pedig kisebb sűrűségi eredmény jött ki, amely a következő 6. táblázatba látható.



Kőzet típusa	Kőzet jele	Térfogat [V] (mm <sup>3</sup> )	Testsűrűség [ $\rho_t$ ] (g/mm <sup>3</sup> )	UH terjedés vastagság függvényében vett átlaga [ $t_v$ ] ( $\mu$ s)	Sebesség vastagság függvényében [ $v_v$ ] (km/s)	Sebesség magasság függvényében [ $v_m$ ] (km/s)
		$V=a \cdot b \cdot c$	$\rho_t=m/V$	$t_v=(t_{v,1}+t_{v,2}+t_{v,3})/3$	$v_v=c/t_v$	$v_m=a/t_m$
Brazil gránit	H2	369801,65	2,6202E-03	6,53	4,6378	4,4057
	H4	366659,03	2,6098E-03	6,60	4,5333	4,2912
	H10	372257,88	2,6150E-03	6,53	4,6730	4,4134
<b>Átlag értékek:</b>			2,6150E-03	6,56	4,6147	4,3701
Rozabeta gránit	A2	383183,70	2,6258E-03	6,33	4,8268	4,6422
	A3	383977,96	2,6142E-03	6,50	4,7092	4,6759
	A4	376672,75	2,6146E-03	6,57	4,6386	4,6559
<b>Átlag értékek:</b>			2,6182E-03	6,47	4,7249	4,6580
Forrásv. mészkő	H4	257888,43	2,4473E-03	5,87	4,5034	4,6048
	H6	240426,69	2,4407E-03	5,27	4,6652	4,6741
	H8	258058,30	2,4107E-03	5,80	4,5034	4,6407
<b>Átlag értékek:</b>			2,4329E-03	5,64	4,5573	4,6399
Gneisz	B1	374243,52	2,8956E-03	7,13	4,2855	4,8680
	B2	379380,68	2,8926E-03	6,97	4,4383	4,8995
	B3	377294,96	2,8990E-03	6,90	4,4899	4,9184
<b>Átlag értékek:</b>			2,8957E-03	7,00	4,4045	4,8953

6. táblázat: Kőzet minták jellemző értékeinek számított eredményei

A ultrahang hullám terjedési sebesség számítása során a kőzetek magassága és vastagsága esetében is közel nagyságrendileg hasonló értékeket kaptam, ami megnyugtatónak bizonyult. Persze kisebb eltérések keletkeztek, aminek valószínűleg a testsűrűséghez és látszólagos porozításhoz van köze.

## 4.2. A kőzetminták hőtágulási együtthatójának eredményeinek ismertetése

A 7. táblázat a különböző hőmérsékleti fokozatokon mért próbatestek hőtágulás értékeinek ismertetése az etalonhoz viszonyítva. A kapott eredményekből látható, hogy a mérés előtt az állványra rögzített Mitutoyo Absolute digitális műszert körülbelül jól rögzítettem fel, mert a mérés során  $\pm 2$  mm tartományban mozogtam az etalon magasságához viszonyítva, amit 12. képen mutattam be.

Kőzet típusa	Kőzet jele	Magasság [l <sub>0</sub> ] (mm)	Etalonhoz viszonyított értékek [Δl <sub>T</sub> ] (mm)						
			T=23°C	T = -30,0 °C	T=40°C	T=60°C	T=80°C	T=100°C	T=25°C
Brazil gránit	H2	200,90	-0,897	-0,946	-0,851	-0,815	-0,781	-0,767	-0,884
	H4	200,83	-1,149	-1,222	-1,125	-1,088	-1,057	-0,983	-1,146
	H10	200,81	-0,644	-	-	-	-	-	-
Rozabeta gránit	A2	202,40	0,524	0,525	0,632	0,673	0,706	0,765	0,61
	A3	202,00	1,847	1,851	1,957	2,006	2,055	2,106	1,943
	A4	201,60	-1,747	-1,736	-1,632	-1,595	-	-	-
Forrásv. mészkő	H4	200,31	-0,327	-0,378	-0,300	-0,274	-0,239	-0,215	-0,328
	H6	200,52	-1,054	-1,099	-1,014	-0,987	-0,953	-0,928	-1,043
	H8	199,55	-1,336	-1,352	-1,288	-1,253	-1,120	-1,184	-1,305
Gneisz	B1	200,56	-0,383	-0,375	-0,299	-0,279	-0,234	-0,230	-0,315
	B2	200,88	-0,128	-0,121	-0,060	-0,034	-0,004	0,020	-0,071
	B3	200,67	-0,867	-0,930	-0,852	-0,829	-0,809	-0,763	-0,876

7. táblázat: A próbatestek relatív hőtágulási értékei az etalonhoz viszonyítva

Látható, hogy a gránit próbatestek esetében 0,040 mm körüli változás van 23 °C és 80 °C hőmérsékleti tartományban, ami lineárisnak mondható.

A többi próbatest esetében ez a jelenség nem figyelhető meg, inkább a nagyobb hőmérsékleten nagyobb hőtágulás vehető észre. Sajnos néhány próbatest elég hamar kieset mérésből, mert a pillanatragasztóval felragasztott fém tappancsok a hőmérséklet-változás hatására leestek.

A 8. táblázatban a 23 °C-os kiindulási állapothoz viszonyított értéket láthatjuk, ahol észrevehető, hogy a két gránit típusú kőzet közül a rozabeta gránitnak nagyobb a hőtágulása, közel kétszerese a brazil gránitéhoz képest. Viszont az is elmondható róla, hogy kiemelkedő a maradandó alakváltozása.

Kőzet típusa	Kőzet jele	Magasság [ $l_0$ ] (mm)	T = 23,0 °C kiindulási állapothoz való viszonyítás $\Delta l = \Delta l_T - \Delta l_{23}$ (mm)					
Hőmérséklet-változás [ $\Delta T$ ] (°C)			$\Delta T = -53^\circ\text{C}$	$\Delta T = 17^\circ\text{C}$	$\Delta T = 37^\circ\text{C}$	$\Delta T = 57^\circ\text{C}$	$\Delta T = 77^\circ\text{C}$	$\Delta T = 2^\circ\text{C}$
Brazil gránit	H2	200,90	-0,049	0,046	0,082	0,116	0,130	0,013
	H4	200,83	-0,073	0,024	0,061	0,092	0,166	0,003
	H10	200,81	-	-	-	-	-	-
<b><math>\Delta l</math> átlag értékek:</b>			-0,061	0,035	0,072	0,104	0,148	0,008
Rozabeta gránit	A2	202,40	0,001	0,108	0,149	0,182	0,241	0,086
	A3	202,00	0,004	0,110	0,159	0,208	0,259	0,096
	A4	201,60	0,011	0,115	0,152	-	-	-
<b><math>\Delta l</math> átlag értékek:</b>			0,005	0,111	0,153	0,195	0,250	0,091
Forrásv. mészkő	H4	200,31	-0,051	0,027	0,053	0,088	0,112	-0,001
	H6	200,52	-0,045	0,040	0,067	0,101	0,126	0,011
	H8	199,55	-0,016	0,048	0,083	0,216	0,152	0,031
<b><math>\Delta l</math> átlag értékek:</b>			-0,037	0,038	0,068	0,135	0,130	0,014
Gneisz	B1	200,56	0,008	0,084	0,104	0,149	0,153	0,068
	B2	200,88	0,007	0,068	0,094	0,124	0,148	0,057
	B3	200,67	-0,063	0,015	0,038	0,058	0,104	-0,009
<b><math>\Delta l</math> átlag értékek:</b>			-0,016	0,056	0,079	0,110	0,135	0,039

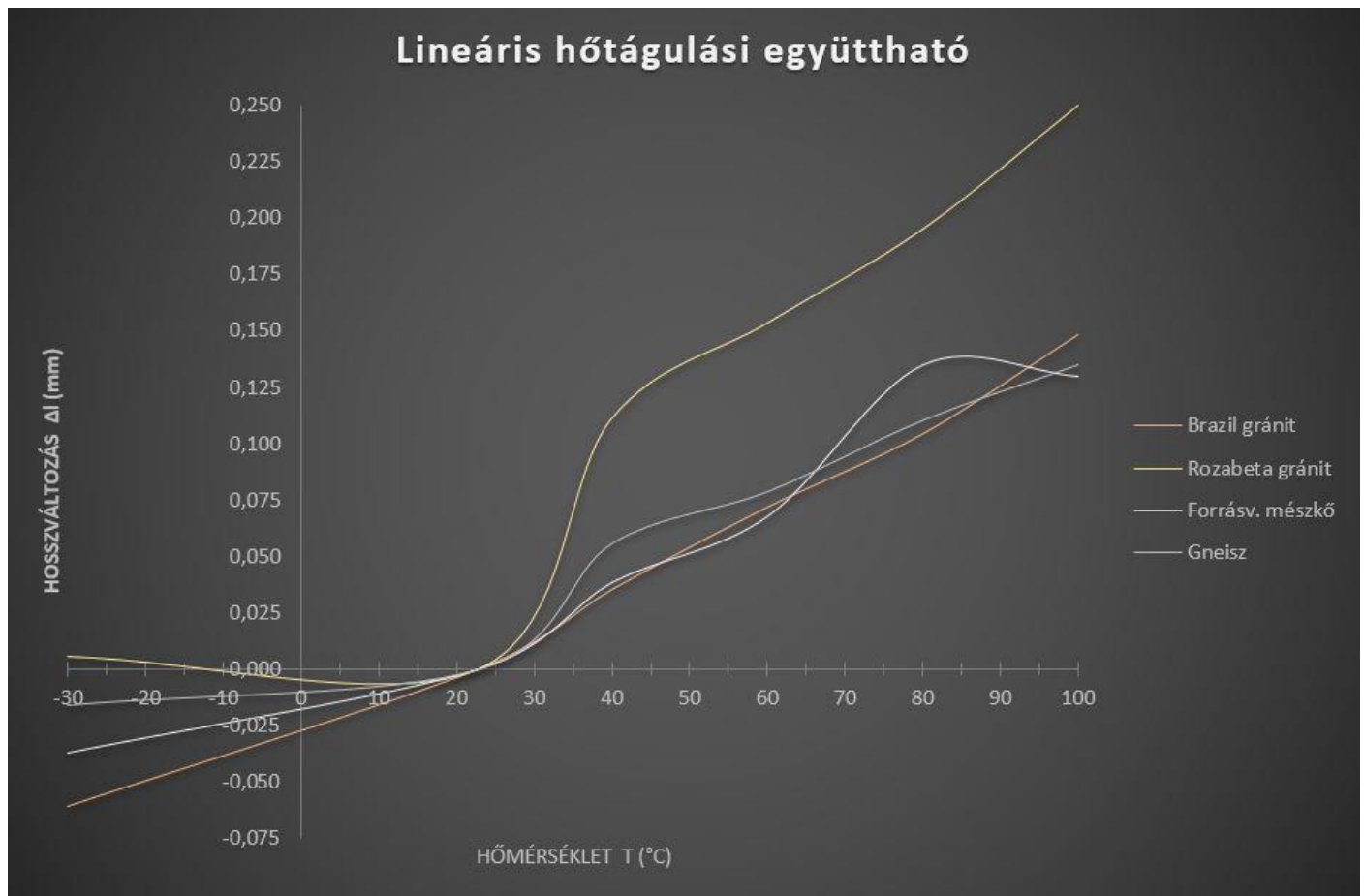
8. táblázat: A próbatestek relatív hőtágulási értékei az kiindulási állapothoz viszonyítva



Kőzet típusa	Lineáris hőtágulási együttható számítása $\alpha = \Delta l / (l_0 \cdot \Delta T)$ (mm)						
	Hőmérséklet-változás [ $\Delta T$ ] (°C)	$\Delta T = -53^\circ\text{C}$	$\Delta T = 17^\circ\text{C}$	$\Delta T = 37^\circ\text{C}$	$\Delta T = 57^\circ\text{C}$	$\Delta T = 77^\circ\text{C}$	$\Delta T = 2^\circ\text{C}$
Brazil gránit		5,7301E-06	1,0249E-05	9,6203E-06	9,0833E-06	9,5692E-06	1,9912E-05
Rozabeta gránit		4,9878E-07	3,2325E-05	2,0516E-05	1,6920E-05	1,6058E-05	2,2504E-04
Forrásv. mészkő		3,5170E-06	1,1271E-05	9,1411E-06	1,1845E-05	8,4382E-06	3,4202E-05
Gneisz		1,5045E-06	1,6315E-05	1,0593E-05	9,6447E-06	8,7354E-06	9,6325E-05

9. táblázat: A kőzetminták lineáris hőtágulási együttható értékei

A 9. táblázatban a különböző hőmérséklet értékeken számolt lineáris hőtágulási együttható látható, amely a kiindulási állapothoz viszonyított hőmérséklet különbségek alapján lett számolva. A 4. ábrán meg a kőzetminták lineáris hőtágulási együttható görbéje látható. A lineáris egyeneshez a brazil gránit görbéje közelít a legjobban.



4. ábra: A kőzetminták lineáris hőtágulási együttható görbéje

Emellett látható, hogy a rozabeta gránit hőtágulása ténylegesen kétszerese a brazil gránitéhoz képest, viszont a görbéje nem teljesen lineáris, inkább egy s alakú görbéhez hasonlít. A forrásvízi mészkő görbéje 20 °C – 70 °C közötti tartományba simul a brazil gránitéhoz, míg a gneisz görbéje inkább a 70 °C – 90 °C között.



## 5. Összefoglalás, elemzés

Megállapítom, hogy a négy kőzet típusú próbatesteim közül a mérések alapján a legkisebb a testsűrűségű kőzet a forrsávízi mészkő lett, aminek nagy porozitása miatt várható volt, a legangyobb sűrűségű vizsgáltkőzet pedig a gneisz lett. A két gránit kőzet hasonló sűrűségű, ami várható volt.

Az UH terjedési sebesség kőzet hasábok 2 méretén is meglettek mérve és közel hasnoló értékeket kaptunk, amit vártunk.

A relatív hőtágulás értékei is szépen kirajzolodtak és legnagyobb hőtágulást a gneisz produkálta, míg a legkisebb hőtágulást a forrásvízi mészkő. A két gránit minden mérés során általában a köztes értékeket produkálta.

A dolgozat fő témája a lineáris hőtágulás, amelyben a rozabeta gránitnak a hőtágulása legangyobb, ami valószínű magas kvarc tartalomnak is köszönhető, amit a dolgozat elején ismertettem, a másik három kőzet típusnak közel azonos és a brazil gránit hőtágulása környékén mozog. A brazil gránit mért eredményei szépen bele esnek, egy-két kivétellel a Rzhovsky-Novik (1971) publikációja során meghatározott gránit hőtágulási együttható tartományába. A gneisz kapott értékei között is vannak olyan értékek, amit régebbi mérések alapján is már kimutattak.

## 6. További mérési lehetőségek

Egy remek mérési lehetőség lehetne, ezeknek a kőzeteknek, vagy új más kőzet típusú hasáboknak a megmérés nyúlásmérő bélyeggel, amivel lehet pontosabban megtudnák mérni a próbatestek relatív hőtágulását, akár a kemencén vagy a mélyhűtőn belül. Így lehet kevesebb hibát ejtenénk a mérésben.

## 7. Irodalomjegyzék

Nye 1964. Ásványok lineáris hőtágulási együtthatója és annak anizotrópiája.

Rzhevsky-Novik 1971. Néhány kőzet lineáris hőtágulási együtthatója.

Dimitrijev, Goncsarov és Kuzjajev 1973. Kőzetek hőtágulási együtthatója a kvarctartalom függvényében (20-100 °C között).

Dimitrijev - Goncsarov 1978. Különböző kvarcitok relatív hőtágulás a hőmérséklet függvényében.

Dimitrijev - Goncsarvo 1978. Kvarcit maradandó és pillanatnyi alakváltozásai többszöri felfűtés és lehűtés után.

Dimitrijev - Goncsarov 1978. Az alakváltozás  $\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)$  irányfüggése a hőmérséklet függvényében.

Dimitrijev - Goncsarov 1978. A lineáris hőtágulási együttható mérése.

## **Köszönetnyilvánítás:**

Köszönettel tartozom Pálincás Bálintnak, aki a laborvizsgálatok során segédkezett és tanácsokkal látott el emellett Dr. Vásárhelyi Balázsnak köszönöm a segítségnyújtást a dolgozat elkészítésében.

Budapest, 2019.10.28.