



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2  
Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

# VULKÁNI TUFÁK KONZERVÁLÁSA

PhD téziszfüzet

**Forgó Lea Zamfira**

okl. építőmérnök, okl. műemlékvédelmi szakmérnök

Tudományos vezető

**Dr. Török Ákos**

egyetemi docens

Budapest, 2008.

## 1. A kutatás előzményei

A műemléki kőanyagok védelme és megóvása régóta foglalkoztatja a tudományt, és heves vitákat okozva meg is osztja a szakembereket. A hazai gyakorlat számos módszert ismer és használ a műemléki kőanyagok védelmére, de ezek egy része inkább hagyományok alapján, mint tudományos megalapozottsággal került a szakma látókörébe. A korábbi rossz tapasztalatok tanulsága alapján célszerű, hogy alkalmazásuk előtt a kezelendő kőzetre vonatkozóan, tudományos igénnyel vizsgáljuk a kőkonzerváló szerek hatását. Ennek szellemében készült el a doktori értekezésem, amely a vulkáni tufák mállási jelenségeit írja le, és kőzetfizikai tulajdonságainak változását elemzi különböző kezelőszerek hatására.

A kőkonzerváló szerek vizsgálatára a homokkövek mellett a vulkáni tufák a legalkalmasabbak (Weber 1983). A magyarországi kőzettani adottságok és éghajlati viszonyok mellett eredményesen alkalmazható kezelőszerek kiválasztására Kertész és Marek (1978) a Keszthely környéki homokkőn és a sóskúti durva mészkőn kívül az Eger környéki tufák vizsgálatát javasolja.

A tufák rendkívül változatos megjelenésű, nagy porozitású, heterogén összetételű vulkáni törmelékes kőzetek. Víz- és fagyérzékenységük közismert, mint ahogy az is, hogy duzzadó agyagásvány-tartalmuknak köszönhetően mállásra hajlamosak.

A vulkáni tufák elterjedtségét és fontosságát olyan világörökségi rangú helyszínek bizonyítják, mint például Kappadókia (Törökország) kőbe vájt barlanglakásai és ókeresztény emlékei, a Húsvét-szigetek (Chile) monumentális 'moai' szobrai, Pompeii városa, a kölni dóm és a kassai dóm. A legjelentősebb magyar példák Eger, Füzér, Sirok, Sárospatak, Visegrád és Somló várai, illetve várromjai.

## 2. Célkitűzések

Az értekezés célja a következő kérdések megválaszolása volt:

- Kőzettanilag milyen eredetűek az egri vár műemléki területén található vulkáni tufák és melyek a legjellemzőbb mállási jelenségeik?
- Megváltoztatják-e a vulkáni tufák nedvesség- és vízháztartását a kőszilárdító szerek? Ha igen, hogyan / milyen mértékben?
- A vizsgált kezelőszerek esetében mekkora a laboratóriumi körülmények között elérhető maximális szilárdító hatás, azaz kőzetszilárdítási szempontból milyen mértékű az egyes kezelőszerek hatékonysága?
- Hogyan befolyásolják a kőszilárdító szerek a tufák szöveti irányítottságtól függő tulajdonságait?
- Helyettesíthető-e roncsolásmentes vizsgálattal a közvetett húzószilárdság-vizsgálat?
- Befolyásolják-e a kezelőszerek a vizsgált tufák hőtágulási viselkedését? Milyenek az Eger környéki tufák hőtágulási paraméterei?
- Vannak-e speciális (jellegzetes) tulajdonságai az Eger környéki tufáknak?
- Tufák esetén mely kezelőszerek alkalmasak műemléki helyszíneken, illetve műtárgyakon való felhasználásra?

### 3. A kutatás módszere

#### 3.1. Vizsgált kőzetminták és kezelőszerek

A kutatásaim az egeri vár területén, helyszíni vizsgálatokkal kezdődtek. Innen 5 különböző tufatípust tanulmányoztam (Eger I-V). A mintavétel mennyisége itt – tekintettel a műemléki környezetre – korlátozott volt, és behatárolta a további, laboratóriumi körülmények között elvégezhető kőzetfizikai vizsgálatok körét.

A kőzetfizikai tulajdonságok elemzésére különböző bányákból származó, eltérő összetételű és időállóságú vulkáni tufákon nyílt lehetőségem. A kőszilárdítási kísérletekhez a hazai miocén korú eger-demjéni és eger-tihaméri dácittufa mellett összehasonlításként német tufákat is elemeztem. Ezek közül negyedidőszaki, fonolitos összetételű weiberni tufa, Habichtswald területéről származó miocén bazaltlapilli és perm időszaki, dácitos összetételű rochlitz tufa mintákat vizsgáltam (1. táblázat).

**1. táblázat** Az egeri vár területéről, továbbá a vizsgált magyar és német bányákból származó kőzetfajták makroszkópos jellemzése ([13] és [6] nyomán [1], [2], [3], [7]).

| Típus        | Jellemzők  |
|--------------|--|
| Eger I       | Világosszürke, horzsakőben gazdag, mállásra hajlamos tufa  |
| Eger II      | Középszürke – rózsaszín, időálló tufa                      |
| Eger III     | Szürke – vörös, krémszínű, biotitban gazdag, időálló tufa  |
| Eger IV      | Krémszínű – barna, mállásra hajlamos tufit litoklasztokkal |
| Eger V       | Fehér – krémszínű, mállásra hajlamos tufa                  |
| Eger-Demjén  | Szürke – krémszínű, időálló tufa                           |
| Eger-Tihamér | Szürke – krémszínű, mállásra hajlamos tufa                 |
| Weibern      | Világosbarna – krémszínű, mállásra hajlamos tufa           |
| Habichtswald | Sötétzöld – szürkésbarna, időálló tufa                     |
| Rochlitz     | Vörös, porfíros, időálló tufa                              |

**2. táblázat** A felhasznált kezelőszerek főbb paramétere

| Kezelőszér                   | Duzzadáscsökkentő                         | Kőszilárdító               |                            |                           |
|------------------------------|---|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                              |   | Hagyományos kovasavészter  | Rugalmas kovasavészter     | Akrilgyanta               |
| Jelölés                      | AH  | KSE I                      | KSE II                     | PMMA                      |
| Hatóanyag                    | 0,2 mol/l tenzid (butildiammónium-klorid) | 75 m% orto-kovasavészter   | ~ 40 m% orto-kovasavészter | 25 % polimetilmetaakrilát |
| Oldószer                     | víz                                       | 25 m% etanol               | ~ 60 m% etanol             | 75 % xilol                |
| Sűrűség [g/cm <sup>3</sup> ] | 1 (20 °C)                                 | 0,94                       | 0,92 (20 °C)               | 0,95 (20°C)               |
| Molekulaméret                | nem ismert                                | 1,2 – 6 nm                 | 1,2 – 6 nm                 | 24 nm                     |
| Megjegyzések                 |   | egykomponensű nem hidrofób | egykomponensű nem hidrofób | kétkomponensű             |

A kőkonzerválás első lépéseként a duzzadó agyagásvány-tartalom miatti térfogatváltozás csökkentésére a próbatesteket előzetesen duzzadásgátló szerrel (2. táblázat, AH) itattam át. A kőszilárdítási kísérleteknél egy hagyományos kovasavészter (KSE I), egy rugalmas kovasavészter (KSE II) és egy akrilgyanta (PMMA) (2. táblázat) hatását hasonlítottam össze, melyet vákuum-impregnálással juttattunk a mintákba.

### 3.2. Vizsgálati módszerek

Míg az egri vár területén roncsolásmentes vizsgálatokat folytattam, laboratóriumi körülmények között ásványtani-, kémiai és közzetfizikai vizsgálatokat végeztem. A megvalósult kísérleti tervről a következő oldalon található felsorolás ad áttekintést. Az alkalmazott vizsgálati módszerek, szabványok és műszerek felsorolását, a felhasznált minták, illetve próbatestek számát és méretét, valamint a tufák irányítottságához igazodó merőleges koordinátarendszer szerint vizsgált irányokat a 3. táblázat tartalmazza.

#### I. Eredeti történeti és restaurált (kőcsere, konzerválás) falazatok tufái

Helyszíni vizsgálatok: egri vár

- Makroszkópos vizsgálatok
- Felületi keménység vizsgálata
- Mállási jelenségek leírása: a vulkáni tufák mállási formáinak jellemzésére a Fitzner-féle német leírási rendszert használtam, amely 4 csoportba sorolva 25 fő-, és 75 egyéni mállási formát különböztet meg (Fitzner & Heinrichs 2002). Az egri vár területén egy XVI. századi történeti falazat és egy restaurált falazat mállási jelenségeit vizsgáltam és hasonlítottam össze. A közel azonos méretű falfelületeken (12 m<sup>2</sup>) látható mállási jelenségek gyakoriságát statisztikai alapon hasonlítottam össze.
- Mintavételezés: 5 kőzettípus (**Eger I-V**)

Laboratóriumi vizsgálatok

Minták elkészítése

Ásványtani és kémiai vizsgálatok

- Polarizációs mikroszkópia
- Páztázó elektronmikroszkópia
- Röntgen-diffrakció
- Röntgen-fluoreszcencia

Próbatestek kialakítása

Közzetfizikai vizsgálatok

- Látszólagos porozitás (higanyporozimetria)
- Póruseloszlás

#### II. Bányákból származó tufaminták

(Eger-Demjén, Eger-Tihamér, Weibern, Habichtswald, Rochlitz)

- Makroszkópos vizsgálatok
- Felületi keménység vizsgálata

Laboratóriumi vizsgálatok

Minták elkészítése

Ásványtani és kémiai vizsgálatok

- Polarizációs mikroszkópia
- Páztázó elektronmikroszkópia
- Röntgen-diffrakció
- Röntgen-fluoreszcencia

Próbatestek kialakítása → Vizsgálati csoportok képzése (minőségi szintjelző alapján)

Konzerválás (vákuum-impregnálás)

- 1, Duzzadáscsökkentő szer (**AH**)
- 2, Hagyományos kovasavészter (**KSE I**)  
Rugalmas kovasavészter (**KSE II**)  
Akrilgyanta (**PMMA**)

Közzetfizikai vizsgálatok

természetes (**N**),  
KSE I, KSE II, PMMA állapotok

- Látszólagos porozitás
  - Póruseloszlás
  - Higroszkópos nedvességfelvétel
  - Kapilláris vízfelvétel
  - Hőtágulás
- légszáraz (**N**), vákuumosan vízzel telített (**V**),  
KSE I, KSE II, PMMA állapotok
- Testsűrűség
  - Ultrahang terjedési sebesség
  - Közvetett húzószilárdság

**3. táblázat** Az alkalmazott vizsgálatok áttekintése

| Vizsgálat                      | Műszer / Szabvány /<br>Módszer | Minták / Pró-<br>batestek [db] | Próbatestek<br>mérete [mm] | Vizsgált<br>irányok |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Makroszkópos leírás            | Szemrevételezés                | 10                             | változó                    |                     |
| Mállási jelenségek leírása     | Fitzner rendszere              | 2 falazat                      | nem értelm.                |                     |
| Felületi keménység             | MSZ EN 12504-2:2001            | > 10                           | változó                    |                     |
| Polarizációs mikroszkópia      | Leica DMRX                     | > 20                           | 25 • 40 • 0,03             | x, y, z             |
| Pásztázó elektronmikroszkópia  | Hitachi S 2300, LEO 1530       | > 30                           | változó                    |                     |
| Röntgen-diffrakció             | Phillips PW 1800               | > 12                           | nem értelm.                |                     |
| Röntgen-fluoreszcencia         | Phillips PW 1480               | 14                             | nem értelm.                |                     |
| Higroszkópos nedvességfelvétel | Feutron KPK 400                | 10                             | Ø 15 • 50                  | x                   |
| Kapilláris vízfelvétel         | MSZ EN 13755:2002              | 20                             | 65 • 65 • 65               | x, z                |
| Minőségi szintjelző            | MSZ 18282-4:1988               | 450                            | Ø 40 • 20                  | x, y, z             |
| Látszólagos porozitás          | MSZ EN 1936:2000               | 150                            | Ø 40 • 20                  | x, y, z             |
| Testsűrűség                    | MSZ EN 1936:2000               | 20                             | 65 • 65 • 65               |                     |
| Póruseloszlás                  | Carlo Erba 2000                | > 26                           | ~ Ø 10 • 15                |                     |
| Ultrahang terjedési sebesség   | MSZ EN 14579:2005              | 450                            | Ø 40 • 20                  | x, y, z             |
| Közvetett húzószilárdság       | DIN 22024:1989                 | 450                            | Ø 40 • 20                  | x, y, z             |
| Hőtágulás                      | MSZ EN 14581:2005              | 20                             | Ø 15 • 50                  | x, z                |

#### 4. Új tudományos eredmények

**A továbbiakban az új tudományos eredményeimet bemutató téziseket vastag betűvel szedtem.** Az ezekhez tartozó magyarázó szövegrészek és irodalmi utalások normál betűvel szerepelnek.

##### 1. tézis

**Ásványtani és kémiai vizsgálatokkal kimutattam, hogy az egeri vár eredeti, történeti falazatában mind a dácittufák, mind az andezittufák előfordulása jellemző. A hazai klimatikus viszonyok között a tufák legjellemzőbb mállási formái – differenciált mállás, szemcsekipergés, pikkelyesedés és levelesedés – mellett azonosíthatók a kéregképződés különböző formái is, továbbá sókiválások és biogén bevonatok is megjelennek.**

Geokémiai vizsgálatokkal igazoltam, hogy az egeri vár Eger I, Eger IV és Eger V kőzettípusának kémiai összetétele hasonlít Eger-Demjén és Eger-Tihámér tufáinak komponenseihez, kova- és alkálitartalmuk dácitos összetételt mutat. Az Eger II és Eger III kőzettípusok titán-, vas-, magnézium- és foszfortartalma, továbbá króm, cink és cirkon

nyomelemtartalma sokkal nagyobb, alumínium-, mangán- és nikkeltartalma nagyobb, kova- és alkálitartalma viszont kisebb a többi mintáénál (4. táblázat).

A magasabb vastartalom és így a kőzetek sötétebb árnyalata (1. táblázat), a röntgenvizsgálatok során kimutatott magas plagioklász-tartalom (albit, anortit), a piroxén (ensztatit) jelenléte, valamint a dácittufákénál nagyobb felületi keménység (5. táblázat) alapján az Eger II és Eger III kőzettípusokat az andezites összetételű kőzetcsoporthoz sorolom.

Bár az irodalmi adatok Eger környékén riodácit- és dácittufáról számolnak be (Kleb 1976), Gyöngyös térségéből több korabeli andezittufa-bányát is ismerünk (Schafarzik 1904). Valószínűnek tartom, hogy közeli andezittufa-lelőhelyekről is építettek be kőzeteket az egri vár területére.

**4. táblázat** A vizsgált magyar tufák kémiai összetétele [7]

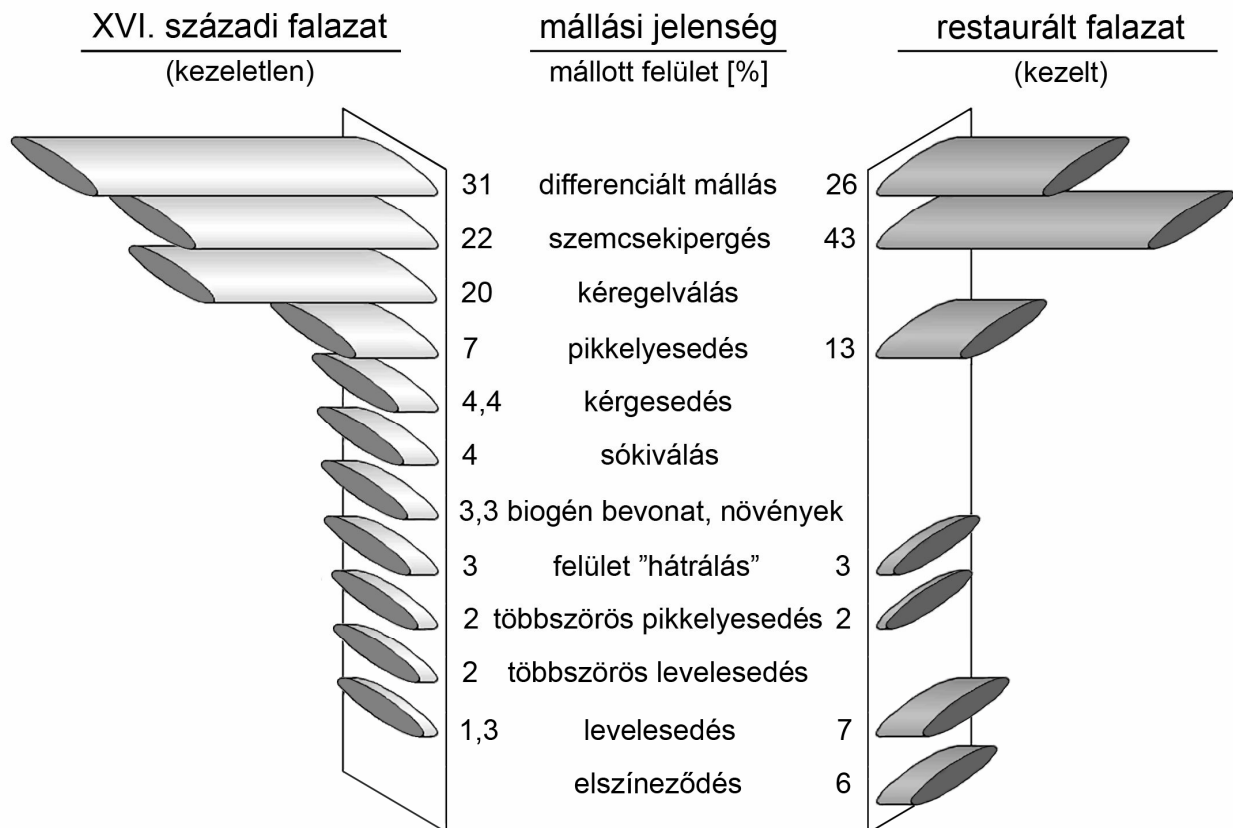
|                                |       | Eger I | Eger II | Eger III | Eger IV | Eger V | Eger-Demjén | Eger-Tihamér |
|--------------------------------|-------|--------|---------|----------|---------|--------|-------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>               | (%)   | 69.4   | 60.8    | 58.8     | 65.8    | 67.3   | 67.7        | 69.7         |
| TiO <sub>2</sub>               | (%)   | 0.169  | 0.800   | 0.886    | 0.264   | 0.166  | 0.265       | 0.210        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | (%)   | 13.3   | 16.4    | 16.4     | 14.7    | 13.0   | 14.8        | 14.1         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | (%)   | 1.83   | 5.18    | 5.82     | 2.56    | 1.28   | 2.01        | 2.08         |
| MnO                            | (%)   | 0.064  | 0.077   | 0.081    | 0.046   | 0.01   | 0.042       | 0.037        |
| MgO                            | (%)   | 0.50   | 2.15    | 2.17     | 0.70    | 0.50   | 0.62        | 0.50         |
| CaO                            | (%)   | 2.65   | 3.85    | 3.62     | 3.52    | 1.90   | 2.97        | 2.48         |
| Na <sub>2</sub> O              | (%)   | 2.77   | 2.23    | 1.81     | 2.47    | 2.07   | 2.62        | 2.53         |
| K <sub>2</sub> O               | (%)   | 3.71   | 2.72    | 2.64     | 4.23    | 4.94   | 3.43        | 3.99         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | (%)   | 0.041  | 0.156   | 0.179    | 0.061   | 0.029  | 0.063       | 0.046        |
| Cr                             | (ppm) | 10     | 33      | 37       | 5       | 8      | 10          | 7            |
| Ni                             | (ppm) | 2      | 8       | 10       | 9       | 4      | 3           | 6            |
| Zn                             | (ppm) | 34     | 75      | 91       | 35      | 36     | 42          | 37           |
| Zr                             | (ppm) | 107    | 293     | 376      | 151     | 112    | 148         | 122          |

**5. táblázat** A vizsgált magyar tufák ásványi összetétele és felületi keménysége ([1] nyomán)

| Típus        | Fő komponensek (++) uralkodó; (+) gyakori                        | Felületi keménység |
|--------------|--|--------------------|
| Eger I       | üveg (++) , kvarc (+), albit (+), biotit, szmektit               | 14,3               |
| Eger II      | üveg (++) , anortit-albit (+), ensztatit-hipersztén (+)          | 21,4               |
| Eger III     | üveg (++) , anortit-albit (++) , ensztatit-hipersztén (+), illit | 23,0               |
| Eger IV      | üveg (++) , anortit-albit (++) , ensztatit-hipersztén (+), illit | 8,2                |
| Eger V       | üveg (++) , kvarc (+), szanidin (+), albit (+), zeolit           | 16,5               |
| Eger-Demjén  | üveg (++) , albit-anortit (+), szanidin (+), kvarc, biotit       | 50,9               |
| Eger-Tihamér | üveg (++) , albit-anortit (+), kvarc (+), biotit (+), szmektit   | 37,9               |

A mállási jelenségek statisztikus alapú összehasonlítását az 1. ábra szemlélteti. A statisztikai elemzés természetesen a XVI. századi falazatnál fajlagosan nagyobb mértékű mállást tükröz, mint a restaurált falazat esetében. A történeti falazaton a különböző mállási formák által halmozottan, egyidejűleg lefedett területeket megfelelően többször vettem figyelembe az egyes mállási jelenségek számbavételekor. Következésképpen a restaurált falazaton a mállási formák csekély összfelülete reprezentálja a 100 %-ot.

A történeti és a restaurált falazaton tapasztalható mállási jelenségeket összevetve arra következtettem, hogy a mállási kéreg képződéséhez az adott klimatikus viszonyok között évtizedek szükségesek. A biogén organizmusok és a magasabbrendű növények megtelepedése, valamint a sók feldúsulása szintén időben elnyújtott folyamat (1. ábra).



1. ábra XVI. századi történeti falazat mállási jelenségeinek statisztikus összehasonlítása egy már restaurált és konzervált falazatával ([1] nyomán)

## 2. tézis

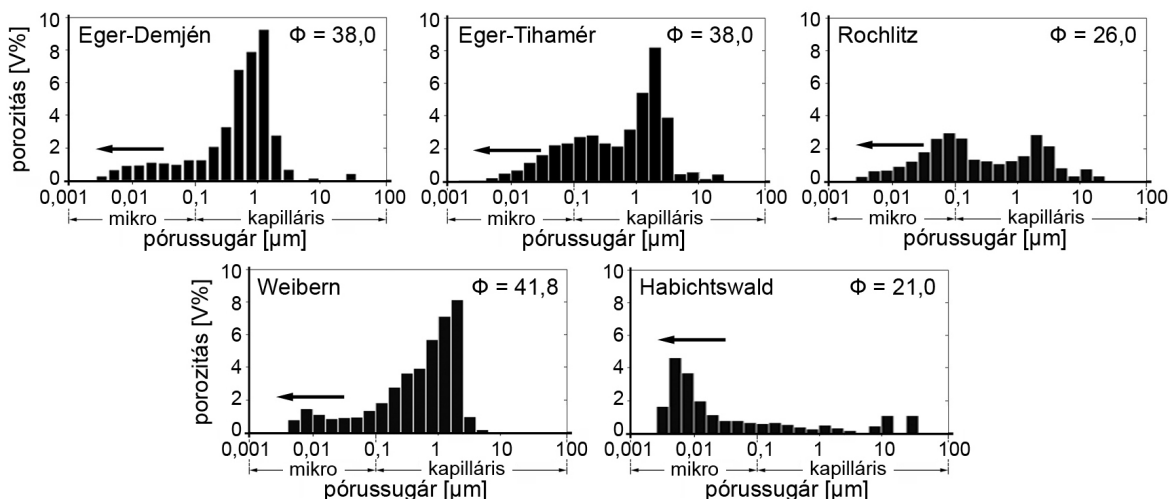
Kísérleti körülmények között igazoltam, hogy az alkalmazott kőszilárdító szerek hatására a vizsgált makroporozus tufák pára- és higroszkópos nedvességfelvétele jelentősen megnövekszik, és kapilláris vízfelvétele nagymértékben lelassul. Míg a párafelvételt a rugalmas kovasavészter növeli a legnagyobb mértékben, addig a kapilláris vízfelvételi tulajdonságokat a hagyományos kovasavészter változtatja meg a leginkább. A víztaszító adalékok (szilán, sziloxán) nélküli kovasavésztereknél is számolnunk kell tehát a nedvességfelvételi tulajdonságok megváltozásával. A vizsgált szerek közül az akrilgyanta hatása a legradikálisabb, ugyanis az elemzett tufák többségénél elhanyagolható mértékűvé csökkenti a kapilláris vízfelvételt.

A higroszkópos nedvességfelvétel maximális értékeit a 6. táblázat mutatja be. A kezeletlen vulkanitok tömegnövekedését következetesen egységnyinek véve szembevetve, hogy a kezelőszerek hatására a higroszkópos nedvességfelvétel akár a többszörösére is növekedhet.

**6. táblázat** Higroszkópos nedvességfelvétel 95 % relatív páratartalom mellett természetes (N), és konzervált állapotokban (KSE I, KSE II, PMMA), valamint a kezelőszerek hatása a kezeltetlen minták párafelvételeire vonatkoztatva, %-ban kifejezve

| Kezelőszerek | N                |      | KSE I |      | KSE II |      | PMMA |      |
|--------------|------------------|------|-------|------|--------|------|------|------|
|              | Lelőhely / Felv. | [m%] | [%]   | [m%] | [%]    | [m%] | [%]  | [m%] |
| Eger-Demjén  | 1,56             | 100  | 4,77  | 310  | 5,79   | 370  | 3,84 | 250  |
| Eger-Tihamér | 1,41             | 100  | 5,13  | 360  | 6,50   | 460  | 4,53 | 320  |
| Weibern      | 5,31             | 100  | 7,45  | 140  | 9,53   | 180  | 9,15 | 170  |
| Habichtswald | 5,19             | 100  | 4,31  | 80   | 5,01   | 100  | 4,80 | 90   |
| Rochlitz     | 1,52             | 100  | 2,43  | 160  | 3,48   | 230  | 1,93 | 130  |

A dácitos összetételű tufákon (Eger-Demjén, Eger-Tihamér és Rochlitz) a KSE I okozta változás erőteljesebb a PMMA hatásánál. A weiberni és a habichtswaldi tufák esetében ennek az ellenkezője igaz. A konzerválószer a Eger környéki tufák higroszkópos nedvességfelvételét erőteljesebben befolyásolja, mint a német tufákét. Csúppán a mikroporózus habichtswaldi tufa (2. ábra) nem érzékeny a kezelőszerekre.



**2. ábra** A természetes állapotú tufák póruseloszlása (a higroszkópos nedvességfelvétel tartományát nyíljelzi) (részben [6] nyomán)

A kezelőszerek a legnagyobb változást a weiberni tufa kapilláris vízfelvételeiben idézik elő. Ezt követik az eger-demjéni, majd a rochlitz és az eger-tihaméri vulkanitok. A konzerválószer a legkevésbé a habichtswaldi tufa kapilláris vízfelvételi tulajdonságait befolyásolja (7. táblázat).

**7. táblázat** Kapilláris vízfelvételi tényezők [ $\text{kg/m}^2 \sqrt{\text{h}}$ ] természetes (N), és konzervált állapotokban (KSE I, KSE II, PMMA) a foliáció irányában (x) és arra merőlegesen (z) [2]

| Kezelőszerek | N                |       | KSE I |      | KSE II |      | PMMA |      |
|--------------|------------------|-------|-------|------|--------|------|------|------|
|              | Lelőhely / irány | x     | z     | x    | z      | x    | z    | x    |
| Eger-Demjén  | 8,54             | 8,85  | 3,75  | 2,94 | 4,18   | 3,11 | 0,33 | 0,26 |
| Eger-Tihamér | 11,34            | 11,09 | 6,04  | 4,78 | 7,81   | 7,44 | 0,25 | 0,28 |
| Weibern      | 16,45            | 16,28 | 4,39  | 3,45 | 7,46   | 7,00 | 0,41 | 0,31 |
| Habichtswald | 2,10             | 1,87  | 1,23  | 1,05 | 1,82   | 1,50 | 0,40 | 0,29 |
| Rochlitz     | 3,51             | 3,21  | 1,78  | 1,52 | 2,04   | 1,78 | 1,57 | 1,52 |



### 3. tézis

**Kísérletileg kimutattam, hogy a konzervált tufák közvetett húzószilárdságát, látszólagos porozitását és testsűrűségét a hagyományos kovasavészter változtatja meg a legnagyobb mértékben. A rugalmas kovasavészteres kezelés kisebb változást idéz elő, mint a hagyományos kovasavészter. Az akrilgyanta kevésbé változtatja meg mindkét kovasavészternél a vizsgált tufák fenti fizikai tulajdonságait.**

A látszólagos porozitást a KSE I 23-27 %-kal redukálta. A KSE II a vizsgált kőzeteken általában 16-19 %-kal, a habichtswaldi tufa esetében 11 %-kal csökkentette azt. A PMMA hatására a megvizsgált magyar tufák porozitása 21 %-kal, a német tufáké 10-14 %-kal csökkent. A kisebb porozitású tufák nagyobb sűrűségűek. Ennek megfelelően a habichtswaldi tufának a legnagyobb, a weiberninek a legkisebb a sűrűsége. A sűrűség-növekedés a kezeletlen állapothoz képest V (vákuumosan vízzel telített), KSE I, KSE II és PMMA konzerválószerrel kezelt sorrendben az eger-demjéni tufa esetén 19, 6, 1 és 0 %, az eger-tihaméri tufánál 17, 9, 4 és 3 %, a weiberni tufánál 29, 12, 8 és 8 %, a habichtswaldi kőzet esetében 7, 2, 1 és 2 %, a rochlitz vulkanitnál pedig 9, 4, 2 és 0 % volt (8. táblázat).

**8. táblázat** Látszólagos porozitás és testsűrűség légszáraz (N), vákuumosan vízzel telített (V) és konzervált állapotokban (KSE I, KSE II, PMMA) [2]

| Állapot<br>Lelőhely | N                 |                                | V                              |                   | KSE I                          |                   | KSE II                         |                   | PMMA                           |  |
|---------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|--|
|                     | $\Phi$<br>[Vol.%] | $\rho$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | $\rho$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | $\Phi$<br>[Vol.%] | $\rho$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | $\Phi$<br>[Vol.%] | $\rho$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | $\Phi$<br>[Vol.%] | $\rho$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |  |
| Eger-Demjén         | 34,8              | 1,653                          | 1,967                          | 25,7              | 1,751                          | 28,2              | 1,669                          | 27,4              | 1,646                          |  |
| Eger-Tihamér        | 36,0              | 1,532                          | 1,797                          | 27,9              | 1,673                          | 29,8              | 1,594                          | 28,5              | 1,573                          |  |
| Weibern             | 43,1              | 1,423                          | 1,835                          | 31,3              | 1,595                          | 36,0              | 1,535                          | 37,3              | 1,534                          |  |
| Habichtswald        | 22,0              | 2,195                          | 2,359                          | 16,4              | 2,245                          | 19,7              | 2,214                          | 19,8              | 2,237                          |  |
| Rochlitz            | 28,3              | 1,971                          | 2,154                          | 20,9              | 2,046                          | 23,3              | 2,001                          | 24,8              | 1,964                          |  |

**9. táblázat** Közvetett húzószilárdsági értékek légszáraz (N), vákuumosan vízzel telített (V) és konzervált állapotokban (KSE I, KSE II, PMMA) ([2], részben [6] nyomán)

| Lelőhely / áll.<br>Húzószil.[MPa] | N     |        | V     |        | KSE I |        | KSE II |        | PMMA  |        |
|-----------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
|                                   | átlag | szórás | átlag | szórás | átlag | szórás | átlag  | szórás | átlag | szórás |
| Eger-Demjén                       | 3,300 | 0,57   | 2,784 | 0,36   | 4,208 | 0,72   | 3,847  | 0,75   | 3,207 | 0,51   |
| Eger-Tihamér                      | 0,814 | 0,14   | 0,314 | 0,08   | 1,558 | 0,34   | 1,538  | 0,33   | 1,201 | 0,14   |
| Weibern                           | 1,636 | 0,22   | 1,234 | 0,14   | 2,619 | 0,41   | 2,180  | 0,40   | 2,074 | 0,19   |
| Habichtswald                      | 2,676 | 0,91   | 2,374 | 0,60   | 3,683 | 0,96   | 3,281  | 0,90   | 3,149 | 0,66   |
| Rochlitz                          | 2,423 | 0,28   | 1,472 | 0,26   | 3,577 | 0,61   | 3,264  | 0,65   | 3,372 | 0,57   |

Légszáraz állapotban az eger-tihaméri dácittufa szilárdsága volt a legcsekélyebb. A weiberni tufa szilárdsága az előzőnek a dupláját, a rochlitz kőzeté a háromszorosát, a habichtswaldi vulkanit a 3,3-szorosát, az eger-demjéni kőzeté pedig a négyszeresét tette ki (9. táblázat).

Vízzel telített állapotban fajlagosan a legszilárdabb tufáknak csökkent a legkevésbé a szilárdságuk (Habichtswald 11 %, Eger-Demjén 16 %). A weiberni tufa a szilárdsága egynegyedét, a rochlitz kőzet több mint egyharmadát, az eger-tihaméri dácittufa pedig több mint a felét elveszítette (9. táblázat).

A konzerválások hatására fajlagosan tekintve az eger-demjéni dácittufa szilárdságában következett be a legenyhébb változás. Míg a KSE I közelítőleg egynegyedével és KSE II közelítőleg egyhatodával növelte a szilárdságát, a PMMA hatástalannak bizonyult. Ezt a habichtswaldi lapillitufa követte: a KSE I közelítőleg egyharmadával, a KSE II egynegyedével, a PMMA közelítőleg egyötödével növelte a szilárdsági értékét. A weiberni vulkanit szilárdsága KSE I hatására közelítőleg kétharmadával, KSE II hatására egyharmadával, PMMA hatására egynegyedével nőtt meg. A rochlitzzi porfír szilárdsága a KSE I-től másfélszeresére, a KSE II-től négyharmadára, a PMMA-tól hétötödére emelkedett. Az eger-tihaméri tufán észlelhető a legmarkánsabb változás. Míg a kovasavészterek 90 % körüli szilárdságnövekedést eredményeztek, az akrilgyanta másfélszeresére változtatta azt (9. táblázat).

#### 4. tézis

Közvetett húzószilárdsági vizsgálatokat végeztem el a foliációhoz (közetszövet rétegzettsége) és a lineációhoz (fenokristályok irányítottsága) igazodó merőleges koordináta-rendszer 3 irányában.

**Kimutattam, hogy a kőszilárdító szerek megváltoztathatják a vulkáni tufák kőzettani irányítottságával kapcsolatos tulajdonságait. A konzerválás hatására a kisebb szilárdságú kőzettípusoknál (eger-tihaméri, weiberni és rochlitzzi tufák) anizotróp jellegű szilárdságnövekedést tapasztaltam. Azaz, a közvetett húzószilárdsági paraméterek különböző mértékben nőttek meg a vizsgált irányokban a konzerválás hatására.**

**10. táblázat** A közvetett húzószilárdsági vizsgálatok eredményeinek irányonkénti összehasonlítása. Az egyes kőzeteknél állapotonként megfelelően az x irány szilárdságát 100 %-nak tekintve, az y és z irány szilárdságai [%] légszáras (N), vákuumosan vízzel telített (V) és konzervált állapotokban (KSE I, KSE II, PMMA)

| Lelőhely / Állapot | irány | N  | V   | KSE I | KSE II | PMMA |
|--------------------|-------|----|-----|-------|--------|------|
| Eger-Demjén        | y     | 85 | 90  | 86    | 88     | 89   |
|                    | z     | 68 | 75  | 68    | 74     | 92   |
| Eger-Tihamér       | y     | 84 | 70  | 79    | 90     | 91   |
|                    | z     | 97 | 92  | 83    | 87     | 88   |
| Weibern            | y     | 96 | 100 | 109   | 107    | 105  |
|                    | z     | 83 | 96  | 81    | 93     | 98   |
| Habichtswald       | y     | 73 | 64  | 90    | 80     | 70   |
|                    | z     | 75 | 68  | 89    | 86     | 73   |
| Rochlitz           | y     | 88 | 82  | 95    | 102    | 96   |
|                    | z     | 67 | 68  | 82    | 77     | 76   |

Bizonyítottam, hogy az eger-demjéni, a habichtswaldi és a rochlitzzi vulkanitok anizotrópák, és a szilárdsági eltérés az egymásra merőleges irányokban akár egyharmad is lehet. Az eger-tihaméri és a weiberni kőzetek anizotrópiája ennél enyhébb, a maximális eltérés a különböző irányok között maximum 20 % (10. táblázat).

A konzerválószerek a legszilárdabb kőzetek, az eger-demjéni és a habichtswaldi tufák esetében nem változtattak a foliáció és a lineáció viszonyán. A rochlitzzi porfírban a pórusokba juttatott anyagok a foliációs jelleg dominanciáját eredményezték, és a szemcse-irányítottság felerősödése a háttérbe szorította az idiomorf és hipidiomorf ásványok

okozta lineációt. A weiberni kőzet esetén a konzerválás hatása arra enged következtetni, hogy a folyásos kőzetszövetben a szemcsék a lineáció szerint is irányítottak. A kezelőszerek az eger-tihaméri tufa szemcséinek enyhe irányítottságát emelték ki a foliáció síkjában, és a lineáció elhanyagolhatóvá vált (10. táblázat).

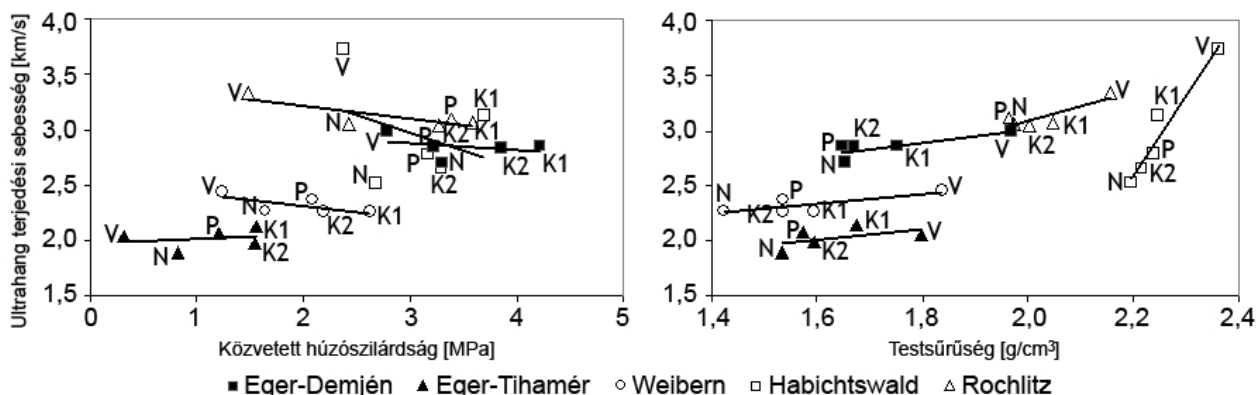
## 5. tézis

Kísérletileg kimutattam, hogy az alkalmazott kőszilárdító szerek a vizsgált makroporozus tufák ultrahang terjedési sebességét kismértékben befolyásolják. Ezen tufáknál a vákuum víztelítés és az alkalmazott kezelőszerek okozta szilárdság- és sűrűségváltozás, valamint az ultrahang terjedési sebesség változása között lineáris kapcsolat mutatható ki (3. ábra).

Az ultrahang terjedési sebessége a kezelőszerek hatására jellemzően 10 % alatti mértékben változik meg (11. táblázat).

**11. táblázat** Ultrahang-terjedési sebesség [km/s] légszáraz (N), vákuumosan vízzel telített (V) és konzervált állapotokban (KSE I, KSE II, PMMA) [2]

| Lelőhely / áll.<br>Uh.t.s. [km/s] | N     |        | V     |        | KSE I |        | KSE II |        | PMMA  |        |
|-----------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
|                                   | átlag | szórás | átlag | szórás | átlag | szórás | átlag  | szórás | átlag | szórás |
| Eger-Demjén                       | 2,710 | 0,06   | 2,992 | 0,04   | 2,858 | 0,06   | 2,843  | 0,04   | 2,858 | 0,07   |
| Eger-Tihamér                      | 1,896 | 0,06   | 2,055 | 0,14   | 2,141 | 0,06   | 1,987  | 0,08   | 2,078 | 0,09   |
| Weibern                           | 2,276 | 0,02   | 2,457 | 0,08   | 2,266 | 0,07   | 2,263  | 0,04   | 2,373 | 0,05   |
| Habichtswald                      | 2,526 | 0,12   | 3,729 | 0,16   | 3,135 | 0,19   | 2,654  | 0,11   | 2,787 | 0,17   |
| Rochlitz                          | 3,059 | 0,02   | 3,335 | 0,05   | 3,069 | 0,06   | 3,043  | 0,06   | 3,107 | 0,10   |



**3. ábra** Az ultrahang terjedési sebességének összefüggése a közvetett húzószilárdsággal és a sűrűséggel. Jelölések: N: légszáraz, V: vákuumosan vízzel telített, K1: hagyományos kovasavészterrel kezelt, K2: rugalmas kovasavészterrel kezelt, P: akrilgyantával kezelt állapot. Az ábra egyes pontjai 18 próbatest mérési átlagát reprezentálják.

## 6. tézis

Meghatároztam az Eger környéki tufák hőtágulási paramétereit. Kísérletileg kimutattam, hogy a konzervált vulkáni tufák hőtágulása nagyobb a természetes állapotú tufákénál.

Míg a földpátoknak (albit, anortit, szanidin) alacsony, a piroxéneknek (klinopiroxén), az olivinnek és a kvarcnak magas a hőtágulási együtthatója (Weiss et al. 2004). Az

elemzett savanyú tufák ásványi összetétele (5. és 13. táblázat) és lineáris hőtágulási együtthatói (12. táblázat) között közvetlen kapcsolat fedezhető fel. Ennek köszönhető, hogy a magyar tufák hőtágulása kisebb a habichtswaldi és a rochlitz tufáknál.

**12. táblázat** Lineáris hőtágulási együtthatók [ $\alpha$ ,  $10^{-6} K^{-1}$ ] természetes (N), és konzervált állapotokban (KSE I, KSE II, PMMA) a foliáció irányában (x) és arra merőlegesen (z) (részben [2])

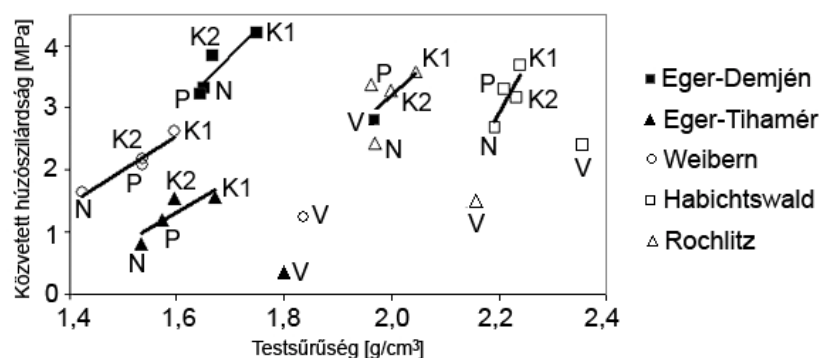
| Kezelőszér<br>Lelőhely / irány | N    |      | KSE I |      | KSE II |      | PMMA |      |
|--------------------------------|------|------|-------|------|--------|------|------|------|
|                                | x    | z    | x     | z    | x      | z    | x    | z    |
| Eger-Demjén                    | 4,64 | 4,89 | 5,52  | 5,48 | 5,46   | 5,40 | 6,62 | 6,51 |
| Eger-Tihamér                   | 3,65 | 3,70 | 5,85  | 6,15 | 3,68   | 3,34 | 7,67 | 5,75 |
| Weibern                        | 4,88 | 4,99 | 6,45  | 6,49 | 6,49   | 5,48 | 6,36 | 5,01 |
| Habichtswald                   | 5,64 | 6,34 | 6,86  | 6,87 | 6,86   | 7,15 | 7,37 | 7,93 |
| Rochlitz                       | 7,53 | 7,22 | 9,70  | 8,13 | 8,14   | 8,88 | 9,88 | 8,46 |

**13. táblázat** Ásványi összetétel a röntgendiffrakciós vizsgálatok alapján

| Típus        | Fő komponensek. (++) uralkodó; (+) gyakori       |
|--------------|--|
| Weibern      | üveg (+), szanidin (+), albit, csillám, zeolit   |
| Habichtswald | üveg (+), olivin (+), klinopiroxén (+), szmektit |
| Rochlitz     | kvarc (++) , üveg, kaolinit (+), hematit         |

## 7. tézis

**Kőzetfizikai vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy az eger-demjéni, eger-tihaméri és rochlitz tufákhoz hasonló jellegű (savanyú piroklasztikus, makroporozus) kőzetek konzerválására a rugalmas kovasavészter a legalkalmasabb. Az akrilgyanta kültéri alkalmazása vulkáni tufákra nem célszerű, mivel hajlamos filmréteget képezni a kőzetfelületen, és a kovasavészterekhez képest kisebb szilárdító-képessége mellett jelentősen megváltoztatja a kőzetek vízháztartását.**



**3. ábra** A közvetett húzószilárdság összefüggése a sűrűséggel. Jelölések: N: légszáraz, V: vákuumban vízzel telített, K1: hagyományos kovasavészterrel kezelt, K2: rugalmas kovasavészterrel kezelt, P: akrilgyantával kezelt állapot. Az ábra egyes pontjai 18 próbatest mérési átlagát reprezentálják.

Az eger-demjéni, eger-tihaméri és rochlitz tufáknál a KSE II okozta szilárdságnövekedés a sűrűség kisebb mértékű változása mellett következett be, mint a KSE I esetében (3. ábra). A KSE II az eger-tihaméri tufa hőtágulását nem változtatta meg, továbbá a rochlitz tufáét kisebb mértékben növelte meg, mint a KSE I (12. táblázat). A weiberni fonolittufánál a KSE I a közvetett húzószilárdság és a testsűrűség viszonyában a KSE II-höz hasonló jellegű, de annál erőteljesebb hatást fejtett ki (4. ábra), miközben a hőtágu-

lási értékeket a KSE II-vel azonos mértékben változtatta meg (12. táblázat). A habichtswaldi bazaltlapilli mikroporózus jellege miatt (2. ábra) a KSE II kovagélhíd-képző képessége (300  $\mu\text{m}$ -ig) nem érvényesült.

## 5. Az eredmények hasznosítása

Az eger-demjéni, eger-tihaméri és rochlitzzi tufákhoz hasonló savanyú piroklasztikus műemléki kőanyagokon a rugalmas kovasavészter különböző változatait érdemes műemléki próbafelületeken kipróbálni. A mikroporózus habichtswaldi bazaltlapillihez és a weiberni fonolittufához hasonló kőzetek esetén mindkét kovasavészter változatai megvizsgálандók. Az akrilgyanta alkalmazása vulkáni tufák esetén kültéren kerülendő.

Műemléki jellegű épületek, szobrok, műtárgyak állagmegóvásakor a kőkonzerváló szerek nem csak pozitív hatást okozhatnak, ezért gyakorlati alkalmazásuk mindig gondos elővizsgálatot (laboratóriumi kísérletek, helyszíni próbafelületek) igényel.

## 6. Jövőbeni kutatási lehetőségek

A vulkáni tufákon további kezelőszerek hatása is megvizsgálható, illetve a kezelőszerek laboratóriumi vizsgálata további kőzetekre is kiterjeszhető. Az időállósági viselkedés változásának elemzése (sókristályosítási, fagyasztási kísérletek) további új információkkal szolgálna.

A laboratóriumi vizsgálatok alapján kijelölt kezelőszerek hatását műemlékek teszt felületein is elemezni kell (pl. roncsolásmentes vizsgálatokkal), mert a beépített kőzetanyag viselkedése eltérhet a laboratóriumi körülmények között kapott eredményektől.

A nemzetközi irodalomból ismertek olyan kísérletek és mérések, amelyek az egyes konzerválószeres évtizedes távlatú hatását mutatják be. A magyar tudományos irodalomban kevés erre vonatkozó mérést publikáltak, ezért érdemesnek tartom ezt a munkát tovább folytatni.

## 7. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm a „Műemléki kőzetek mállási jelenségei” (ny.sz.: UH/2607) és a „Kezelőszerek hatásának vizsgálata a természetes kőanyagból készült kulturális örökségünk megóvásának érdekében” (ny.sz.: UH/30) címet viselő német-magyar DAAD-MÖB kutatási projektek és a Pro Progressio Alapítvány támogatását.

## 8. Hivatkozások a tézisfűzetben

Fitzner, B., & Heinrichs, K. (2002) Damage diagnosis on stone monuments – weathering forms, damage categories and damage indices. In: Přikryl, R. & Viles, H. (eds) Understanding and managing stone decay. Proceedings of the Int. Conf. Stone Weathering and Atmospheric Pollution Network, 2001, Charles University Prague. The Karolinum Press, Prague. pp. 11-56.

Kertész P. és Marek I. (1978) Kőzetkonzerválási kísérletek. Földtani Kutatás 21/1-2: 69-75.

Kleb B. (1976) Észlelési magyarázó Eger 1:10000 építésföldtani térképsorozatához. KözDok, Budapest. 521 p.

Schafarzik F. (1904) A magyar korona országai területén létező kőbányák részletes ismertetése. Magyar Királyi Földtani Intézet, Budapest. 416 p.

Weber, H. (1983) Steinkonservierung: der Leitfaden zur Konservierung und Restaurierung von Natursteinen. Expert Verlag, Grafenau. 197 p.

Weiss, T., Siegesmund, S., Kirchner, D. & Sippel, J. (2004) Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in stone degradation. *Environmental Geology* 46/3-4: 402-413.

## 9. Az értekezés témakörében készült publikációk

### Cikk szerkesztett könyvben

- [1] Török, Á., **Forgó, L.Z.**, Vogt, T., Löbens, S., Siegesmund, S. & Weiss, T. (2007) The influence of lithology and pore-size distribution on the durability of acid volcanic tuffs. In: *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation* (eds: Prikryl, R. & Smith, B.J.), Geological Society, London, Special Publications, 271: 251-260. (IF)

### Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk

- [2] Stück, H., **Forgó, L.Z.**, Ruedrich, J., Siegesmund, S. & Török, Á. (2008) The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. *Environmental Geology, Special Issue*, 15 p. Elsőként online: [www.springerlink.com/index/7003m045773r7107.pdf](http://www.springerlink.com/index/7003m045773r7107.pdf) (IF)
- [3] Török, Á., Vogt, T., Löbens, S., **Forgó, L.Z.**, Siegesmund, S. & Weiss, T. (2005) Weathering forms of rhyolite tuff and changes in physical properties. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 156/1: 177-187. (lektorált)

### Magyarországon megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk

- [4] **Forgó, L.Z.** & Finck, F. (2005) Fracture mechanical testing by means of acoustic emission analysis. *Concrete Structures* 7/1: 3-6. (lektorált)
- [5] **Forgó, L.Z.** & Finck, F. (2005) Theoretical backgrounds of acoustic emission analysis. *Concrete Structures* 7/1: 7-12. (lektorált)

### Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű publikáció

- [6] **Forgó, L.Z.**, Stück, H., Maróthy, E., Siegesmund, S., Török, Á. & Ruedrich, J. (2006) Materialverhalten von natürlichen und modellhaft konsolidierten Tuffen. In: *Denkmalgestein Tuff*, Institut für Steinkonservierung e.V., 22: 65-75.
- [7] Török, Á., **Forgó, L.Z.** & Siegesmund, S. (2006) Assessment of the susceptibility of various tuff types to weathering: field and laboratory tests. In: *Denkmalgestein Tuff*, Institut für Steinkonservierung e.V., 22: 25-34.
- [8] **Forgó, L.Z.** (2004) Engineering Geological Properties of Rhyolite Tuffs in Monuments, Examples from Hungary. In: *Proceedings of the International Symposium of Earth System Science*, Kelebek & Grafika Grup, Istanbul, pp. 651-658.
- [9] **Forgó L.Z.** & Török Á. (2004) Influence of petrophysical and petrographical properties on the behaviour of rhyolite tuff, example from Eger, Hungary. In: *Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering* (Eds: Walraven, J. et. al.), Taylor and Francis Group, London, pp. 589-598. (lektorált)

### Magyar nyelvű folyóiratcikk

- [10] **Forgó L.Z.** (2004) Törésmechanikai vizsgálatok a hangemisszió-analízis segítségével. *Vasbetonépítés*, 6/2: 49-54. (lektorált)
- [11] **Forgó L.Z.** (2004) A hangemisszió-analízis elméleti alapjai. *Vasbetonépítés*, 6/1: 21-24. (lektorált)

- [12] **Forgó L.Z.** és Török Á. (2003) A jordániai Petra műemlékei és kőzetanyaga. *Kő*, 5/3: 10-15.

**Magyar nyelvű konferencia kiadványban megjelent publikáció**

- [13] **Forgó, L.Z.** (2005) Az egri vár riolittufa kőzetanyagának mérnökgeológiai vizsgálata. In: *Doktori kutatások a BME Építőmérnöki Karán* (Szerk: Barna Zs., Józsa Zs.), Műegyetem Ipari Nyílt Nap, Műegyetemi Kiadó, Budapest, pp. 16-21. (lektorált)
- [14] **Forgó L.Z.** (2003) Riolittufa műemléki kőzetanyagának roncsolásmentes vizsgálata. In: *Mérnökgeológiai Jubileumi Konferencia* (ed: Török Á.) Műegyetemi Kiadó, Budapest, pp. 313-323.

**Egyéb – nem publikáció értékű munka**

- [15] **Forgó L.Z.** (1999) Petra műemlékeinek vizsgálata. TDK-dolgozat, BME, Budapest, 44 p.
- [16] **Forgó L.Z.** (2006) Az egri vár műemléki kőzetanyaga és helyi tufák konzerválása. Szakdolgozat, BME Építészettörténeti és Műemléki Tanszék, Budapest, 56 p.