

# Betonadalékanyagok viselkedése magas hőmérsékleten

## Performance of aggregates at high temperatures

BIRÓ András<sup>1</sup> doktorandusz, dr. HLAVIČKA Viktor<sup>2</sup> adjunktus,  
dr. habil. LUBLÓY Éva<sup>3</sup> docens

<sup>1,2,3</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,  
Építőanyagok és Magasépítés tanszék, 1111 Budapest Műegyetem rakpart 3.  
biro.andras@epito.bme.hu, hlavicka.viktor@epito.bme.hu, lubloy.eva@epito.bme.hu

### ABSTRACT

*The quality of natural stone aggregates can vary by every shipment and this greatly affects the fire performance of the concrete it is used in. For this reason, a classification system would be advantageous for aggregates based on behaviour at high temperatures. Such a system would be an economic solution to determine the quality of a shipment compared to measuring the properties only on the 28 days old concrete specimens. The goal of this study was to provide preliminary test results and conclusions. The chosen test method was the Hummel test with additional derivatographic measurement and scanning electron microscopic analysis to better understand the occurring changes. Quartz gravel, crushed limestone and crushed andesite were tested. The Hummel tests were evaluated based on the changes to the grain size distribution and the tests provided promising results, which followed the known chemical and physical changes of the tested materials, but further testing is required with more samples in the future to prove the applicability of the method and to calibrate it.*

### KIVONAT

*A természetes kőzet betonadalékanyagok minősége szállítmányonként változó lehet és a kőzet minősége nagyban befolyásolja a beton tűzzel szembeni ellenállását. Ezen okból előnyös lenne egy minősítési rendszer adalékanyagok magas hőmérsékleten való viselkedésére alapozva. Egy ilyen rendszer gazdaságos megoldás lenne egy-egy adalékanyag szállítmány minőségének vizsgálatára ahelyett, hogy minőségbeli eltérések csak a szilárd beton vizsgálatokkor derülnek ki. A kutatás célja előzetes vizsgálati eredmények megadása, illetve következtetések levonása. A kutatás során adalékanyag halmazokon, hőterhelést követően Hummel mozsaras vizsgálatot, valamint kiegészítésként derivatográfós illetve pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokat végeztünk, hogy jobban megértsük a végbemenő változásokat. A kutatás során kvarckavics, zúzott dolomitos mészkő és zúzott andezit adalékanyagokat vizsgáltunk. A Hummel vizsgálatokat a szemeloszlás megváltozása alapján értékeltük és ígéretes, az ismert kémiai, fizikai változásokat jól követő eredményeket kaptunk, de a későbbiekben nagyobb mintaszámmal, további vizsgálatok elvégzése lesz szükséges a módszer alkalmazhatóságának igazolásához és kalibrálásához.*

**Kulcsszavak:** tűz, adalékanyag, minősítés, Hummel vizsgálat, halmazszilárdság,

### 1. BEVEZETÉS

Egy korábbi tanszéki termékfejlesztési projekt során az volt a cél, hogy körüreges födempallók tűzállóságát javítsuk a geometria és a betonfedés változtatása nélkül. A terméket üzemi terhelés mellett 60 perces tűzállóságra minősítették 2003-ban, majd a projekt kezdetén, 2018-ban végzett vizsgálatok során a födempalló a 30 perces tűzállósági követelményeknek sem felelt meg. A két födempalló egyedül a betonban alkalmazott adalékanyag típusában tért el egymástól. A 2003-ban minősített szerkezeti elemnél kvarc kavics, míg a 2018-ban vizsgált födempallóknál zúzott dolomit került felhasználásra.

Ezen vizsgálatok következményeként felmerült az igény, hogy minősítsük az adalékanyagot felhasználás előtt tűzzel szembeni ellenállóképesség alapján. Bár sok tanulmányban foglalkoznak különböző adalékanyagokkal készített betonok tűz esetén tapasztalható viselkedésével [1–5], minden esetben a kész beton tulajdonságait vizsgálják.

Az adalékanyagok minősítéséhez a Hummel vizsgálatot [6] választottuk, ami egy korábban szélesebb körben alkalmazott szabványos vizsgálat volt halmazszilárdság meghatározásához, de manapság jellemzően inkább kutatásokhoz alkalmazzák. Ezen vizsgálatok eredményeit vettük alapul az adalékanyagok viselkedésének értékeléséhez és a változások követéséhez kiegészítésként végeztünk derivatográfus vizsgálatot, valamint pásztázó elektron mikroszkópos (SEM) analízist is.

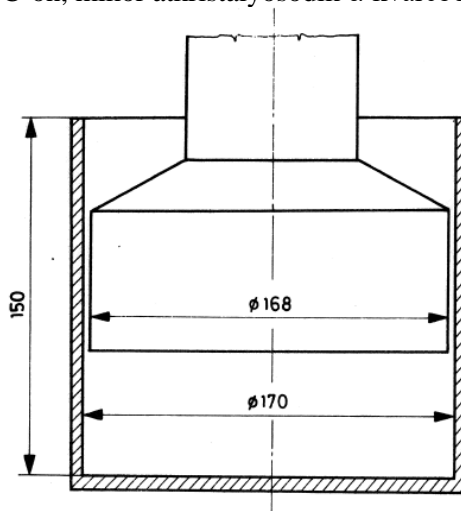
## 2. VIZSGÁLT ANYAGOK

A vizsgálatokhoz kvarc kavicsot (4/8), zúzott andezitet (11/22, Nógrádkövesd) és zúzott mészkövet (11/22, Pilisvörösvár) alkalmaztunk. Az így megválasztott anyagok között szerepelt a kvarc mellett karbonátos és vulkanikus eredetű kőzet is, valamint ezek mind olyan anyagok, amik jellemzően felhasználásra kerülnek, ha beton vagy vasbeton szerkezetnél kiemelt jelentőségű a tűzzel szembeni ellenállóképesség.

## 3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Az adalékanyagok minősítésének alapjául a potenciális halmazszilárdsági vizsgálatok közül a Hummel vizsgálatot választottuk, mert tartóssági vizsgálatokhoz illetve a teherbírás csökkenésének kimutatásához jól alkalmazható, későbbiekben diszkrét elemes módszerrel modellezhető [7-8]. A Mikro Deval és a Los Angeles vizsgálatok bár széleskörűen alkalmazottak, a koptató és dinamikus terhelés kevésbé jellemzi a vizsgálni kívánt állapotát az adalékanyagoknak az alkalmazás során. A Hummel mozsár vázlatos rajza az 1. ábrán látható. A Hummel vizsgálat során a vizsgált, ismert szemeloszlású halmazból  $2 \text{ dm}^3$ -t bemérünk a Hummel mozsárba, majd  $400 \text{ kN}$ -ig terheljük  $1,5$  perc alatt, majd a szemeloszlás megváltozása alapján értékeljük a vizsgálatot.

A vizsgált halmazokhoz a hőterhelést az ISO 834 [9] szabványban meghatározott beltéri tűzgörbe szerinti felfűtéssel végeztük, majd a célhőmérsékleten tartottuk  $1$  órán keresztül. A hőlépcsők minden kőzet esetében  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (referencia),  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  és  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  voltak. A hőlépcsőket a többi vizsgálatot megelőzően az andezit és a mészkő mintákon elvégzett derivatográfiai vizsgálatok eredményei alapján határoztuk meg. A kvarcot nem vizsgáltuk ilyen módszerrel, ott egy ismert átalakulást feltételeztünk  $573 \text{ }^\circ\text{C}$ -on, mikor átkristályosodik  $\alpha$ -kvarcból  $\beta$ -kvarccá.



1. ábra

Hummel mozsár vázlatos rajza és méretei [6]

A derivatográf egyszerre állít elő termogravimetriás (TG), derivatív termogravimetriás (DTG) és differenciált termoanalitikai (DTA) görbéket a porrá őrölt minta hevítése közben. Ezekon a görbéken látható úgynevezett hőbomlási csúcsok alapján megadhatók a vizsgált anyagban végbement hőreakciók.

A Hummel vizsgálatokhoz minta halmazonként 3 szitavizsgálat tartozott. Először meghatároztuk a halmaz kezdeti szemeloszlását, majd ezt megismételtük a hőterhelést követően is. Ezután következett a terhelés a mozsárban, és ezt egy harmadik szitavizsgálat követte. Így elkülöníthető volt a hőterhelés okozta aprózódás a terhelés okozta aprózódástól. A Hummel vizsgálatokat hőlépcsőnként és közetenként 2-2 mintával végeztük, majd vettük a vizsgálatok eredményeinek átlagát.

Az egyes hőterhelt mintákból SEM analízishez egy-egy szemcsét kivettünk, majd a szükséges előkészítést követően 5000x-es nagyításig vizsgáltuk az adalékanyag szemcsék megváltozott felületét.

## 4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

### 4.1 Derivatográfias vizsgálat

A derivatográfias vizsgálat során az andezit esetében csak a nedvességtartalom (1,2 m%) távozásához köthető csúcs volt látható a derivatogrammon és összesen 1,8 m% izzítási veszteséget tapasztaltunk, míg a mészkő esetében a víztartalom 0,2 m% volt összesen 45 m% izzítási veszteség mellett. Utóbbi esetben a karbonátok oxidációja igen jelentős hőbomlási csúcsként jelentkezett 650 °C és 950 °C között. Az ekkor távozó CO<sub>2</sub> a kezdeti tömeg 44,2 m%-a volt, ami lényegében megegyezik a CaCO<sub>3</sub>-nak a CO<sub>2</sub> tartalmával és így megállapítható, hogy az anyag MgCO<sub>3</sub>-ot csak igen kis részben tartalmazott.

### 4.2 Szemrevételezés

A hőterhelést követő szemrevételezés során megállapítottuk, hogy a kvarc szemcsék a hőmérséklet emelkedésével fokozatosan matt barna színűek lettek. Ezzel szemben az andezit szemcsék esetében a színváltozás a jellemző szürkéről vöröses barnába sokkal kisebb hőmérséklet tartományon ment végbe 200 és 500 °C között. Mind a két közet esetében a vastartalom oxidációjának volt köszönhető a szín megváltozása. A mészkő esetében a szemcsék felülete elvesztette a fényét és szürkébb lett 600 °C-ig, majd matt fehér lett a 800 °C-on hőterhelt minták esetében és finom por jelent meg a szemcsék felületén. A mészkő esetében a 800 °C-on tapasztaltak a CaCO<sub>3</sub> oxidációjának köszönhetőek.

### 4.3 Hummel vizsgálat

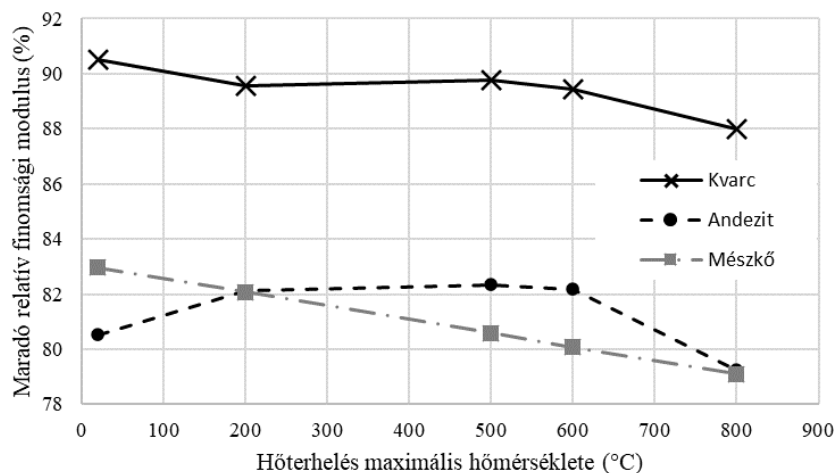
A Hummel vizsgálatok bár közvetetten halmazszilárdságra utalnak, azok értékelését a szemeloszlás megváltozása alapján végeztük, azonban ezt valamilyen módon szükséges volt számszerűsíteni. Ehhez kézenfekvő megoldás lenne a finomsági modulus megváltozásának elemzése. Ezt meg is tettük, az eredmények a 2. ábrán láthatók, ahol a kezdeti finomsági modulushoz képesti maradó relatív finomsági modulus adjuk meg a hőterhelés maximális hőmérsékletének függvényében. Mivel a szemeloszlás nem változott érdemben pusztán a hőterheléstől, ezért mindig a hőterhelést követő szitavizsgálat eredményeit vetettük össze a mozsárban való terhelést követő mérés eredményeivel.

Az elmúlt években Gálos és munkatársai [7], [8] a Hummel vizsgálatok értékeléséhez egy olyan módszert alkalmaztak, hogy csak az adott termékre jellemző szitákat vették figyelembe a finomsági modulus meghatározásánál. Ezt a módszert alkalmaztuk mi is és összehasonlítottuk a hagyományos módon megadott finomsági modulus változásokkal. Az adott termékre jellemző szitákat úgy határoztuk meg, hogy ezeken maradjon fent az összes tömeg legalább 95 %-a. A kvarc esetében így a 2, 4 és 8 mm, az andezitnél a 8, 16 és 22,4 mm, míg a mészkő esetében a 8 és 16 mm lyukbőségű szitákat vettük figyelembe. Az így kapott maradó relatív finomsági modulus eredményeket a 3. ábrán ismertetjük.

A két értékelési módszer összehasonlításából kitűnik, hogy míg az első esetben minden hőmérsékletnél a kvarcnak a legkedvezőbbek az eredményei, úgy a második esetben 500 és 600 °C között egy jelentős leromlás látható. Utóbbi jobban megfelel a valóságnak, hiszen kvarcnak az 573 °C-on végbemenő átkristályosodása jelentős térfogatnövekedéssel jár, ami nemcsak a betonban okoz repedéseket, de a kvarc kavics szemcsék belső szerkezetét is roncsolja, ami így szintén hozzájárul a beton szilárdságának csökkenéséhez. Ezen okból a termékspecifikus sziták figyelembevétele a

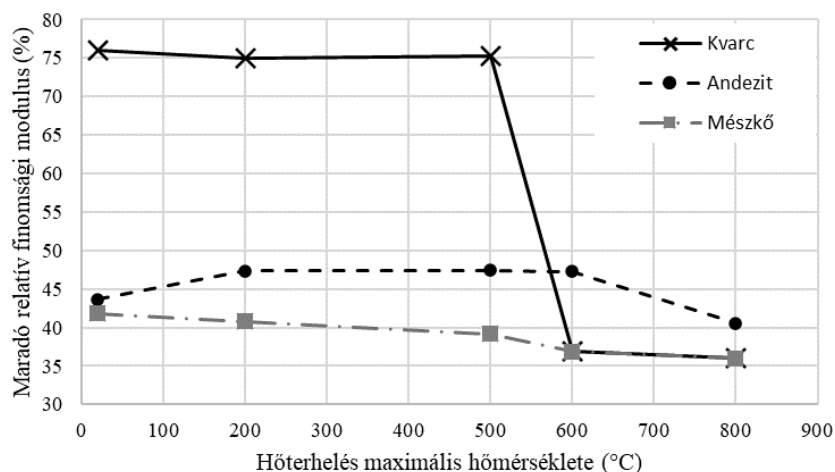
finomsági modulus meghatározásakor jobban követi a végbemenő átalakulásokat, így további vizsgálatoknál is ezt tervezzük alkalmazni. A mészkő és az andezit görbéinek tendenciái a két értékelési módszer szerint hasonlóak, de az első esetben a mészkőnek magasabbak az andezitnél a referencia hőmérsékleten meghatározott értékei. A mészkő esetében mind a két esetben egy folytonos csökkenést tapasztaltunk a hőmérséklet növekedésével, míg az andezitnél egy, a nedveségtartalom távozásával magyarázható kezdeti növekedést követően 600 °C-ig közel változatlan eredmények láthatók, amit egy kisebb mértékű csökkenés követ a 800 °C-on hőterhelt mintáknál.

Összességében a vizsgált minták közül az andezit viselkedett tűzállóság szempontjából a legkedvezőbben, de egyértelműen kitűnik a kvarc alkalmazásának előnye, amennyiben nem számítunk 500 °C-nál magasabb hőmérsékletre. A mészkő abból a szempontból kedvező, hogy a halmazszilárdságának csökkenése folytonos, de nem ugrásszerű, mint a kvarcé 500 és 600 °C között.



2. ábra

*Maradó relatív finomsági modulus a hőterhelés maximális hőmérsékletének függvényében*



3. ábra

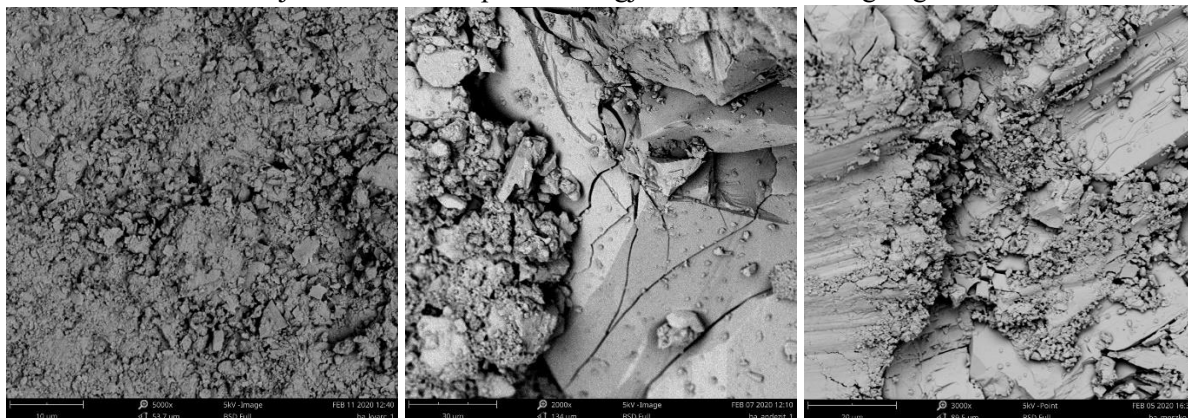
*A Hummel mozsaras terhelés utáni maradó relatív finomsági modulus csak termék specifikus szita lyukbőségekkel [10]*

#### 4.4 SEM analízis

A mintákból kivett 1-1 szemcsén SEM analízist is végeztünk (4. ábra), ami a mikrostruktúra változásainak követését is lehetővé tette. A kvarc esetében a hőmérséklet növelésével megfigyelhető volt a szemcsék felszínének fokozatos leromlása és egyre több apró szemcse jelent meg a felszín aprózódásának köszönhetően.

Az andezit esetében a 200 °C-on és afelett fokozatosan megjelenő repedések voltak hangsúlyosak, melyek száma és tágassága a 800 °C-os minták esetében ugrásszerűen megnőtt.

A mészkő mintákat főként nagyobb blokkos elemek alkották, amik mérete a hőmérséklet növelésével csökkent és jelentős számú repedés is megjelent főként a két legmagasabb hőterhelés esetén.



4. ábra

SEM felvételek, balról jobbra: kvarc, andezit, mészkő

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A betonadalékanyagok tűzre való előzetes minősítéséhez olyan kőzeteket választottunk, amiknek a felhasználása jellemző, ha a beton tűzállósága adott helyzetben fontos szempont. A vizsgálatokhoz kvarckavicsot, zúzott andezitet és zúzott mészkövet használtunk.

A betonadalékanyagok magas hőmérsékleten való viselkedésének értékelésére (kiegészítő vizsgálatok mellett) a Hummel vizsgálatot választottuk, mint halmazszilárdsági vizsgálatot. A Los Angeles és a mikro Deval vizsgálatokkal szemben megvan az az előnye, hogy nem koptató, dinamikus terhelésnek tesszük ki a halmazunkat, hanem egy növekedő statikus terhelésnek, így jobban hasonlít a betonban való alkalmazás körülményeire, illetve a későbbiekben jobban modellezhető.

A vizsgálatok eredményeit két módon értékeltük. Egyszer egy hagyományos módon meghatározott finomsági modulus megváltozása alapján, illetve egy olyan módon definiált finomsági modulus megváltozása alapján, ahol csak az adott termékre jellemző lyukbőségű szitákat vettük figyelembe (kezdetben ezeken marad fenn a termék tömegének 95 %-a). A két módszerrel kapott eredmények összehasonlításából kitűnik, hogy a termékspecifikus sziták figyelembevétele jobban követte a végbemenő fizikai és kémiai változásokat az adalékanyagokban.

Összességében a vizsgált minták közül az andezit viselkedett tűzállóság szempontjából a legkedvezőbbben, de egyértelműen kitűnik a kvarc alkalmazásának előnye, amennyiben nem számítunk 500 °C-nál magasabb hőmérsékletre. A mészkő abból a szempontból kedvező, hogy a halmazszilárdságának csökkenése folytonos, de nem ugrásszerű, mint a kvarcé 500 és 600 °C között.

A kapott eredmények ígéretesek, az ismert fizikai és kémiai változásokat jól követik, de további vizsgálatok szükségesek, nagyobb mintaszámmal, hogy igazolni lehessen a módszer alkalmazhatóságát egy potenciális minősítési rendszerhez.

## 6. KÖSZÖNETNYIVÁNÍTÁS

Ezen kutatás az Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP-19-3) Ösztöndíj támogatásával készült. A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében. A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP\_16-1-0019 “Fokozott ellenálló képességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

## 7. HIVATKOZÁSOK

1. S. HACHEMI, A. OUNIS, 2015: Performance of concrete containing crushed brick aggregate exposed to different fire temperatures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19/7, 805-824
2. X. YU, Z. TAO, T. Y. SONG, Z. PAN, 2016: Performance of concrete made with steel slag and waste glass, *Construction and Building Materials*, 114, 737-746
3. J. R. CORREIA, J. S. LIMA, J. DE BRITO, 2014: Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 53, 187-199
4. J. GALES, T. PARKER, D. CREE, M. GREEN, 2016: Fire Performance of Sustainable Recycled Concrete Aggregates: Mechanical Properties at Elevated Temperatures and Current Research Needs, *Fire Technology*, 52/3, 817-845
5. C. J. Zega, A. A. DI MAIO, 2009: Recycled concrete made with with different natural coarse aggregates exposed to high temperature, *Construction and Building Materials*, 23/5, 2047-2052
6. MSZ 18287-3:1983 Építési kőanyagok szilárdságvizsgálata próbahalmazon – Hummel vizsgálat
7. M. GÁLOS, Á. OROSZ, 2019: Ágyazati kőanyagok viselkedésének vizsgálata ismételt terhelés hatására, *Sínek világa*, 1, 10-15
8. M. GÁLOS, Á. OROSZ, J. P. RADICS, K. TAMÁS, 2017: Diszkrét elemes számítógépes módszer a vasúti zúzottkő ágyazat viselkedésének modellezésére, *Sínek világa*, 5, 22-28
9. ISO 834-1:1999 Fire resistance tests – Elements of building construction, Part 1: General requirements
10. A. BIRÓ, V. HLAVIČKA, É. LUBLÓY, Megjelenés folyamatban: Betonadalékanyag minősítése tűzhatásra, *Védelem Tudomány*