

## Design burkolat újrahasznosított pórusbeton hulladékból

Jankus Bence

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék  
bence.jankus@gmail.com

Fenyvesi Olivér

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék  
fenyvesioliver@yahoo.com

### Összefoglalás

Hulladékgazdálkodás: egy fogalom, mely napról napra egyre nagyobb jelentőséggel bír életünk számos területén. Mind az Európai Unió, mind Magyarország vezetősége újabb és újabb jogszabályokban, műszaki előírásokban rögzíti és fejt ki egyre szigorúbban a hulladékok kezelésére vonatkozó szabályokat. Nem képeznek kivételt az építési- és bontási munkálatokból származó hulladékok sem. 2012 januárjában a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén indított kutatásunk pórusbeton hulladékból beton adalékanyag előállításával és vizsgálatával foglalkozik. Témaválasztásunk indoklása egyszerű: a pórusbeton egy széles körben alkalmazott, népszerű, komplex építési rendszer, ám újrahasznosítására még nem igazán van elterjedt műszaki megoldás. Kutatásunk első fázisában függőleges tartószerkezeti elemek készítésére alkalmas beton keverékeket terveztünk és készítettünk, melyeken nyomószilárdsági, testsűrűségi, hővezetési és vízzárósági vizsgálatokat végeztünk. Az eredmények alapján elmondható, hogy a vizsgált anyag alkalmas egy többszintes épület függőleges (akár talajszint alatti) tartószerkezeti igényeinek kielégítésére. Kutatásunk jelenlegi, második fázisában (mind kül-, mind beltéri) függőleges felületek burkolásának céljára terveztünk betonkeverékeket. Az így készített keverékeken nyomószilárdsági, hajlító-húzó szilárdsági, testsűrűségi, ütészállósági, fagyállósági, illetve vízfelvételi vizsgálatokat végeztünk.

*Kulcsszavak: zúzott pórusbeton, építési-bontási hulladék, újrahasznosítás, könnyűbeton, falburkolat*

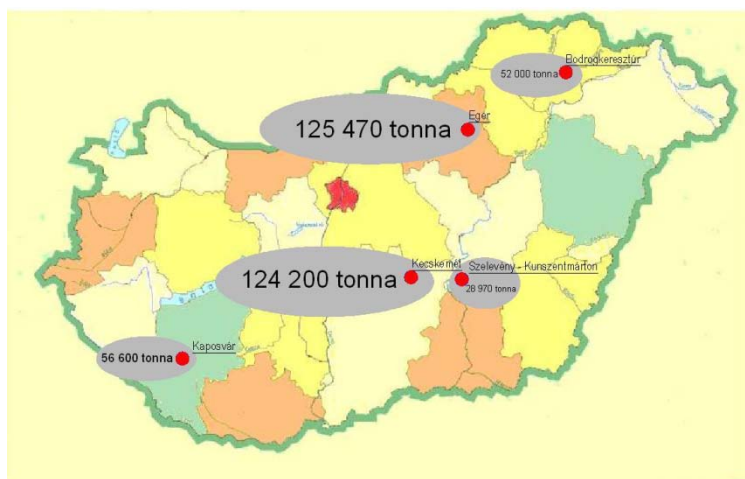
### 1 BEVEZETÉS

#### 1.1 Az építőipari hulladékok kezelésének jogi háttere

Az egyre növekvő hulladékképződés hatásának veszélyeit uniós és hazai szinten is felismerték. Körülbelül 15 éve az Európai Unió döntéshozó szervek elhatározták, hogy drasztikusan változtatnak a témára vonatkozó jogszabályokon. Ennek keretében készült el az első, kifejezetten a hulladékgazdálkodás és hulladék újrahasznosítás témájával foglalkozó előírás (2000/532/EK), amely először kezeli az építési és bontási hulladékokat különálló kategóriaként. 2004-ben a magyar kormány kiadott egy rendeletet (45/2004. (VII. 26.) BM-KvVM), mely részletesen taglalja az építési és bontási hulladékok kezelésének szabályait. E rendelet:

1. Meghatároz egy mennyiségi korlátot, amittől kezdve a szelektív bontás kötelező,
2. lehetőségeket kínál az újrahasznosításra,
3. megnevezi a keletkezett hulladék kezeléséért felelős személyeket,
4. a keletkezési helyen való újrafelhasználási módokat javasol.

A napjainkban hatályos jogszabály (2012. évi CLXXXV. törvény) - a korábbi rendelkezéseken túlmutatva – meghatároz egy maximális mennyiséget, amely felett a keletkezett építési-bontási törmelék nem tekinthető normál települési hulladéknak és nem rakható le általános hulladéklerakó telepeken. 2003 és 2008 között öt nagyméretű, kifejezetten építőipari hulladékok kezelésére specializálódott telepet (1. ábra) létesítettek országunkban (OHT 2014-2020) – a meghatározott mennyiségi korlátot meghaladó, a keletkezési helyszínen újrahasznosításra nem kerülő hulladékot itt lehet deponálni. Ezeknek a telepeknek a hatása rohamos javulást idézett elő a települési hulladéklerakókban elhelyezett építési hulladékok mennyiségében (2004-ben 91%, 2009-ben 46% került lerakásra).



**1. ábra.** Építőipari hulladék-kezelő telepek Magyarországon (OHT 2014-2020)

A jogszabály – az újrahasznosításra való ösztönzés szempontjából – talán legfontosabb eleme, hogy bevezeti a hulladéklerakási járulékot. (1. táblázat)

**1. táblázat.** Hulladéklerakási járulék (2012. évi CLXXXV. törvény)

Hulladék típusa	Lerakott hulladék egységára évenként (HUF/tonna)			
	2013	2014	2015	2016
Települési hulladék	3000	6000	9000	12000
Építési-bontási hulladék	3000	6000	9000	12000
Veszélyes hulladék	3000	6000	9000	12000
Települési szennyvíziszap	3000	6000	9000	12000
Hasznosítás után visszamaradt és tovább hasznosítható veszélyes és nem veszélyes hulladék	1500	3000	4500	6000

Az OHT 2014-2020 (Országos Hulladékgazdálkodási Terv 2014-2020) – az Európai Unió elvárásának megfelelően – 2020. december 31-ig elérendő célnak tűzte ki a 70%-os hulladék újrahasznosítási ráta elérését. Ennek érdekében a magyar kormány tervezi:

1. további építőipari hulladékot feldolgozó létesítmények alapítását,
2. a magas-, mély-, víz-, és útépítési munkálatok során a minimálisan újrahasznosítandó hulladékmennyiség meghatározását,
3. a talajfeltöltések szabályainak szigorítását,
4. a zöld közbeszerzések értékének megnövelését,
5. irányelvek és rendeletek kidolgozását a szelektív bontás bevezetésére (a tervek szerint az irányelvek alkalmazására törvényi úton kötelezik majd a kivitelezőket, beruházókat).

Az OHT-hez kapcsolódó kimutatások azt is bebizonyították, hogy a Hulladéki Információs Rendszer előrejelzései pontatlanok voltak. Az előrejelzések szerint évente 10 millió tonna építőipari hulladék keletkezik, amelyből 7 millió tonna (70%) a kitermelt föld. Ezzel szemben a statisztikák szerint évi 4,5 millió tonna hulladékkal kell számolni, amelyből „csak” 0,7 millió tonna (20%) a földkitermelés.

A hasonló jövőbeli hibákat elkerülendő, a kormány egy 2012-ben kiadott rendeletében (A Kormány 440/2012. (XII. 29.) rendelete) pontosan meghatározza a hulladékgazdálkodással járó nyilvántartási és adatszolgáltatási kötelezettségeket. A hulladéklerakóknak minden, a vonatkozó jogszabályban meghatározott hulladéktípusról – ha abból egy évben 5 tonnánál többet kezelnek - nyilvántartást és anyagmérleget kell vezetnie, amelyről az illetékes minisztériumnak minden tárgyévét követő év március 1-

ig adatszolgáltatást kell nyújtania (az adatszolgáltatás egy alkalommal korrigálható a tárgyévet követő év szeptember 1-ig).

Az OHT nyilvántartásai alapján hazánk jól halad a kitűzött 70%-os újrahasznosítási ráta elérése felé. (2. táblázat)

## 2. táblázat. Építési-bontási hulladékok újrahasznosítási aránya Magyarországon (OHT 2014-2020)

Építési-bontási hulladék	2010	2011
Keletkezett hulladék (tonna/év)	3 053 144	3 269 451
Újrahasznosított (tonna/év)	1 840 400	1 956 791
Újrahasznosítási arány (%)	60,3	59,9

Összességében elmondható, hogy az eddigi eredmények mellett a teljes siker eléréséhez nagymértékű szemléletváltásra lenne szükség. Az építési-bontási hulladékokra nem mint terhekre, a jogszabályokban meghatározott kötelező kellemetlenségekre, hanem mint potenciális nyersanyagokra kellene tekintenünk. Újrahasznosítási lehetőségeikre kísérletekkel alátámasztott módszereket kell kidolgozni, ám ehhez a teljes építőipari szektor támogatására és elfogadó, együttműködő magatartására van szükség.

## 2 ELSŐ KUTATÁSI FÁZIS – TEHERHORDÓ ANYAG

### 2.1 Célkitűzés

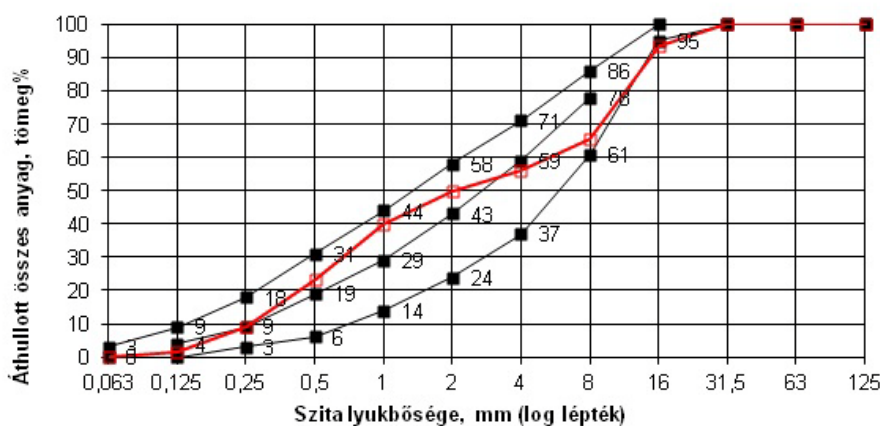
Kutatásunk alapvető célja volt olyan anyaggal foglalkozni, mely széleskörűen elterjedt, az építőiparban közkedvelten alkalmazott, azonban újrahasznosítására nincs még kidolgozott megoldás: így esett a választásunk a pórusbetonra, mely egy komplett építési rendszert kínál, mind hazánkban, mind a világon széleskörűen elterjedt anyag. Mindezt az évente forgalmazott anyagok mennyisége is jól illusztrálja: Magyarországon évente mintegy 120.000 m<sup>3</sup> pórusbeton falazóelem kerül értékesítésre – ez a szám a világgazdasági válság előtti években 300-400.000 volt -, míg világszinten ez az érték ma meghaladja a 10.000.000 m<sup>3</sup>-t is. A pórusbeton (régebbi nevén gázbeton) technológia Svédországból származik, a gyártás Johan Axel Eriksson svéd építész 1924-es szabadalma alapján (Kausay 2002). Ebből is látható, hogy a legkorábbi, pórusbetonból épített épületek lassan 100 évesek lesznek, így bontásuk egyre hangsúlyosabb kérdés lesz a közeljövőben. Az első Magyarországi gázbeton gyárat 1963-ban alapították, így a hazai gyártású anyagból készült első épületek is már több mint 50 évesek.

Kutatásunk célja a pórusbeton hulladékok újrahasznosításának egy műszakilag széles körűen alkalmazható, környezetbarát módjának kidolgozása.

### 2.2 Betonkeverékek tervezése

Első kutatási fázisunkban alapvető célunk egy olyan újrahasznosított adalékanyaggal készülő betonkeverék (BV-MI 01:2005 (H)) kidolgozása volt, mely alkalmas egy többszintes lakó/irodaépület függőleges tartószerkezeti igényeinek kielégítésére. A keverékeket úgy terveztük, hogy megfeleljenek az igénybevételekből származó követelményeknek: nyomószilárdság, testsűrűség, vízzáróság, hővezetés.

A keverékek megkezdése előtt az adalékanyagot elő kellett készíteni. A megfelelő, bedolgozásra alkalmas szemhalmaz előállításának érdekében a nagyobb pórusbeton darabokat pofás törőgéppel zúztuk (Csőke 2005). Az így előállított adalékanyag-halmazon szitasoros szemeloszlási vizsgálatot végeztünk, melynek eredményei egy II. osztályú, bedolgozásra alkalmas szemhalmazt mutattak. További előkészítést nem végeztünk, az adalékanyagot ebben a formában dolgoztuk be. (2 ábra)



2. ábra. Adalékanyag szemeloszlása az első kutatási fázisban

A keverékek tervezésénél a fő szempont a péptelítettség hatásának vizsgálata volt a teljesítőképességre vonatkoztatva. Ehhez először szükségünk volt az adalékanyag halmazsűrűségének és hézagosságának meghatározására, mely az MSZ EN 1097-3:2000 szabvány szerint történt. A vizsgálatokhoz készült egy telítetlen (110%), egy telített (100%) és két túltelített (90%; 80%) keverék. (3. táblázat)

3. táblázat. Kutatási mátrix az első fázishoz

Betonkeverék	Víz-cement tényező	Cement típusa	Adalékanyag mennyiség	Adalékanyag fajtája
JB/80%	0,55	CEM II/B-S 42,5 N (V)	80%	Zúzott pórusbeton
JB/90%			90%	
JB/100%			100%	
JB/110%			110%	
JB/100% ref			100%	Kvarchomok + kvarckavics

A minél jobb összehasonlíthatóság érdekében készült egy péptelített referencia keverék is, kvarchomok és kvarckavics adalékanyaggal. A hasonló pórusbeton adalékanyaggal foglalkozó kutatásokkal (Sinica et al.,2009; Topcu et al., 2007) szemben előrelépés, hogy eddig csak a durva szemcsefrakciókban ( $d > 4\text{mm}$ ) alkalmazták a pórusbeton adalékanyagot és a finomrészt ( $d < 4\text{mm}$ ) kvarchomokkal helyettesítették. Ez a teljes adalékanyag mindössze 43%-ban jelent pórusbeton felhasználást. Kutatásunkban a teljes adalékanyag halmaz (0-16 mm) pórusbetonból állt.

### 2.3 Beton keverése

A próbakeverés során nyilvánvalóvá vált, hogy az adalékanyag az előzetes vízfelvételi vizsgálatok során számított vízfelvételi értékeknél (fél óra alatt 3-8 m%) lényegesen nagyobb mennyiségű vizet vesz fel (3. ábra). Ez a nem számítható vízfelvételű, por állagú finomrészt szemcséinek felületén megkötött vízmennyiséggel magyarázható. A keverés során tehát elsődleges volt a megfelelő mennyiségű többletvíz hozzáadása. A konzisztencia beállítása folyósító adalékszerrel történt (4. ábra).



4. ábra. Bedolgozásra alkalmatlan földnedves keverék



3. ábra. Jól bedolgozható konzisztenciájú keverék

## 2.4 Próbatestek

A laboratóriumi vizsgálatokhoz a megfelelő szabványnak megfelelő próbatestek készültek: nyomószilárdság – 150\*150\*150 mm-es kocka (5. ábra) (MSZ 4798-1:2004), vízzáróság – 150\*150\*150 mm-es kocka (MSZ EN 12390-8:2001), hővezetési tényező – 300\*300\*30 mm-es lap (6. ábra) (ISO 8302:1991 (E)). A próbatesteket 28 naposan, vegyes tárolást (kizsuzás 1 naposan, víz alatt tárolás 7 napos korig, laborlevegőn való tárolás 28 napos korig) követően vizsgáltuk.



5. ábra. Kocka próbatest



6. ábra. Hővezetési vizsgálat próbateste

## 2.5 Vizsgálati eredmények

### 2.5.1 Nyomószilárdság

Az általunk tervezett keverékek átlagos nyomószilárdsága 28 napos korban **12-16 N/mm<sup>2</sup>**-es értéket mutatott (7. ábra). A könnyűbetonok teherviselésének fontos sajátossága, hogy míg a normál adalékanyagos betonoknál az adalékanyag, a könnyű adalékanyagos keverékeknel a cementpép viseli a terheket (8. ábra). Ez a viselkedés szépen lekövethető az általunk készített keverékeken is: a kisebb péptartalomhoz kisebb nyomószilárdság tartozik. Ezt összevetve a referencia kavicsbeton keverék 40 N/mm<sup>2</sup>-ével kevésnek tűnhet, de célunk nem is a vasalható betonok kategóriájának elérése volt. A pórusbeton adalékanyagos keverékekről elmondható, hogy nyomószilárdságuk alapján tökéletesen alkalmasak falazóelemek készítésére (a magyar piacon kapható pórusbeton falazóelemek nyomószilárdsága 2-4 N/mm<sup>2</sup>).



7. ábra. Nyomószilárdsági vizsgálat



8. ábra. Jellegzetes töréskép

### 2.5.2 Testsűrűség

A könnyű pórusbeton adalékanyaggal készített keverékekről elmondható, hogy szilárd testsűrűségük **1350-1450 kg/m<sup>3</sup>** között mozog. Ez a referencia keverék testsűrűségének (2250 kg/m<sup>3</sup>) mintegy 60-65%-a, mely a teherhordó szerkezet önsúlyának drasztikus csökkenését eredményezi. Ezen felül az új keverékek jól alkalmazhatók teherelosztó betonok, rábetonozások készítésénél, ahol nem kifejezett követelmény a nagy nyomószilárdság, ám az önsúly csökkenése jótékony hatással van a tartószerkezet erőjátékára.

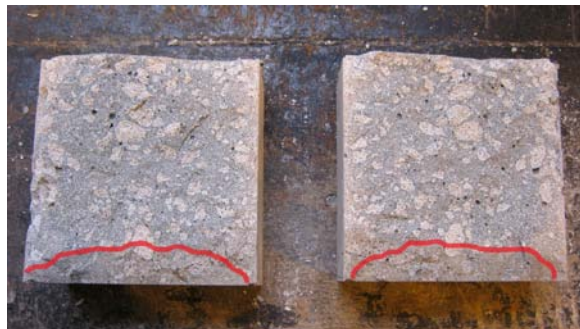
### 2.5.3 Vízzáróság

A vízzárósági vizsgálatok (9. ábra) alapján az összes keverék besorolható az **XVI**-es osztályba (maximális vízbehatolási mélység: 60 mm – 10. ábra) – ez megegyezik a kavicsbeton keverék vízzárósági

tulajdonságaival. Ezen eredmények alapján kijelenthetjük, hogy a keverékekből készített falazóelemek alkalmasak felszín alatti függőleges tartószerkezetek (pincefalak) készítésére, mely tulajdonsággal egyik hazánkban forgalmazott falazóelem család sem rendelkezik (a pincefalakat jellemzően monolit vasbetonból, vagy kibetonozott zsaluköből szokták készíteni).



9. ábra. Vízzárósági vizsgálat



10. ábra. Vízbehatolás elhasított vízzárósági pró-batesten

#### 2.5.4 Hővezetési tényező

Az új könnyű adalékanyagos keverékek hővezetési tényezője a vizsgálatok alapján (11. ábra) **0,36-0,45 W/mK**. Ez a kavicsbeton keverékénél (1,31 W/mK) lényegesen jobb, ám természetesen elmarad a korszerű falazóelemekétől (~0,1 W/mK) és a hőszigetelő anyagokétól (0,02-0,08 W/mK). Alkalmazásakor mérlegelendő, hogy a nyomószilárdság és a hőszigetelő képesség mekkora súllyal esik latba a tervezésnél.



11. ábra. Hővezetési tényező mérése

#### 2.6 Eredmények kiértékelése

Az első fázis eredményeit összefoglalva elmondható, hogy a kezdeti célkitűzéseket elértük. Sikeresen előállítottunk egy olyan zúzott pórusbeton hulladék adalékanyagos betonkeveréket, mely kielégíti a többszintes épületek függőleges tartószerkezeti igényeit. Körültekintő tervezéssel – hőszigetelő tulajdonságainak köszönhetően – vékonyabb falszerkezet készíthető, mint a legnépszerűbb korszerű falazóelemek vagy monolit vasbeton alkalmazásával (a teljes falkeresztmetszetre vonatkozó azonos hőátbocsájtási tényezővel számolva). Vizsgált műszaki paramétereit alapján egyéb kiegészítő betonszerkezetek (rábetonozások, teherelosztó betonok) készítésére is alkalmas.

#### 2.7 Nemzetgazdasági és ökológiai hatás

Az építőipari hulladékok alkalmazásával készülő betonkeverékek nagy előnye, hogy az adalékanyag – a bányászott adalékanyagokhoz képest – szinte ingyen van. Természetesen a tisztítás és előkészítés (Csóke, 2005) költségekkel jár, ám a napjainkban folyamatosan szigorodó hulladékgazdálkodási törvényekre való tekintettel ettől eltekinthetünk. Ez ugyanis – akár csak a szelektív bontás (BV-MI 01:2005 (H)) - rövid időn belül kötelező lesz (OHT 2014-2020).

Ezen felül az adalékanyag bányák rekultivációja a nemzetgazdaságot terhelő nem csekély kiadás. Egy közepes méretű bánya bezárása megközelítőleg 110 milliárd HUF. Ezt a jelentős összeget támogatások formájában visszaforgatva a kivitelezői szektorba ösztönözni lehetne a hulladékújrahasznosítás mértékének növekedését és az építőipar minőségi fejlődését.

A gazdasági hatáson túl egy nem elhanyagolható szempont az építési-bontási hulladékok újrahasznosításával elkerülhető környezeti károkozás sem. Az adalékanyag bányák és hulladéklerakók a szennyező hatáson túl esztétikailag is tönkreteszik a természeti környezetet. Az építőipari hulladékok újrahasznosítása egy remek válasz ennek a folyamatnak a lassítására, ideális esetben visszafordítására.

### 3 MÁSODIK KUTATÁSI FÁZIS – BURKOLÓANYAG

#### 3.1 Célkitűzés

Az első fázisban végzett hővezetési tényező mérés során csiszolt felületű, nagy méretpontosságú próbatestekre volt szükség. Ennek elérésére a testek felületét vizes csiszolókoronggal egyenlítettük ki. A csiszolás során felfigyeltünk rá, hogy a kialakuló felület magas esztétikai értékkel bír, alkalmas lehet burkolatok készítésére.

#### 3.2 Betonkeverékek tervezése

A tartószerkezeti anyagnak szánt betonkeverékek vizsgálataiból levont tanulságokat figyelembe véve néhány alapvető változást eszközöltünk a betonkeverékek tervezésénél.

Az első változtatás a bedolgozott adalékanyag szemeloszlásának javítása. A burkolati célra szánt keverékeknél célunk az optimális szemeloszlású adalékanyag halmaz használata volt, így a bedolgozáshoz az MSZ EN 12620:2013 szabvány szerinti szemeloszlási diagram B-görbáját használtuk (2. ábra).

A második változtatás a cement minősége (CEM I 52,5 N).

A harmadik kardinális pont a tervezési módszer. Míg az első fázisnál a péptelítettség függvényben határoztuk meg a keverékek összetételét, a második fázisban konkrét cementadagolási mennyiségeket vettünk mérvadónak, a betonösszetételeket ezekhez igazítottuk. Célunk a minél költségghatékonyabb, lehetőleg alacsony cementfelhasználású keverékek készítése volt.

Az első fázis próbaestjein fél év elteltével hajszálrepedések voltak megfigyelhetők a pórusbeton adalékanyag szemek duzzadása miatt. Ennek elkerülése érdekében a burkolatnak szánt keverékekbe műanyag szál adagolást is terveztünk. (Kozák, Magyarai, 2013)

Az esztétikai igényszint növelése érdekében bizonyos keverékekhez színező fém-oxid festéket is kevertünk. (12. ábra)



**12. ábra.** Színezett keverék

A keverékek tervezését az alábbi kutatási mátrix szerint végeztük (4. táblázat).

#### 4. táblázat. Kutatási mátrix a második kutatási fázishoz

Betonkeverék	Víz-cement tényező	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Cementtípus	Adalékanyag	Szálerősítés (kg/m <sup>3</sup> )	Színezék (5 cem m%)
I	0,4	350	CEM I 52,5 N szürke portlandcement	Zúzott	1,5	vörös
III		400		pórusbeton		sárga
IV		450				-
Ref		400		Kvarchomok + kvarckavics		sárga

A készített próbatesteken a homlokzat- és belső falburkolatok számára szükséges műszaki paramétereket vizsgáltuk: nyomószilárdság, hajlító-húzó szilárdság, fagyállóság, ütésállóság.

#### 3.3 Beton keverése

A keverések előtt mind a hat szétválasztott adalékanyag frakciónak egyenként megmértük a halmazsűrűségét/porsűrűségét, illetve az 1 mm-nél nagyobb szemmagyságú frakciók esetén a vízfelvételt. Az így számított vízfelvételi adatok alapján (13-17 m%) végeztük a próbakeverést. A próbakeverés mérési tapasztalatai itt is azt mutatták, hogy a vízfelvétel többszöröse volt az előzetes vizsgálatok során számítottnál (55 m%). A keverés metodikája a következő volt: a referenciaként készített kavicsbeton keveréket a meghatározott víz-cement tényezővel összekeverve a konzisztenciát folyósító adalékszer adagolásával állítottuk be. A pórusbeton keverékeknel a víz-cement tényező alapján számított keverővizet túl addig adagoltunk többletvizet, míg a keverékben száraz adalékanyag halmazokat tapasztaltunk. Miután az adalékanyag vízfelvételét kielégítettük, a konzisztencia beállítását itt is folyósító adalékszerrel végeztük. A konzisztenciát az etalon keverékkel azonosra állítottuk be.

#### 3.4 Vizsgálati eredmények

##### 3.4.1 Nyomószilárdság

A nyomószilárdsági vizsgálatokat az MSZ EN 14617-15:2005 szabvány szerint 70\*70\*70 mm-es, 28 napos korig víz alatt tárolt, kocka próbatesteken végeztük (13. ábra). A burkolati célra készített pórusbeton adalékanyag keverékek szabványos nyomószilárdsága **6-10 N/mm<sup>2</sup>**, testsűrűsége **1200-1250 kg/m<sup>3</sup>** (14. ábra). Ez kevésnek tűnhet (a referencia keverék nyomószilárdsága **85 N/mm<sup>2</sup>**, testsűrűsége **2400 kg/m<sup>3</sup>**), hiszen betonról beszélünk, de fontos figyelembe venni, hogy a keverékek nem teherhordó, kizárólag önhordó célra készültek.



13. ábra. Kocka próbatestek



14. ábra. Tönkrement nyomószilárdsági próbatest



### 3.4.2 Hajlító-húzó szilárdság

A hajlító-húzó szilárdsági vizsgálatokat az MSZ EN 14617-2:2008 szabvány szerint 70\*70\*250 mm-es, 28 napos korig víz alatt tárolt, hasáb próbatesteken végeztük. A pórusbeton adalékanyagos keverékek hajlító-húzó szilárdsága 1,5-2,5 N/mm<sup>2</sup>, a referencia keveréké 9 N/mm<sup>2</sup>. Kiemelendő, hogy míg a kvarchomok és kvarckavics adalékanyaggal készített etalon keverékek rendkívül rideg módon, hirtelen mentek tönkre (15. ábra), addig a burkolóanyagok készített pórusbeton felhasználású keverékeknel a tönkremenetel pillanatában nem is repedt be a teljes keresztmetszet (16. ábra). A burkolati keverékből készített próbatestek még jelentős alakváltozást voltak képesek elviselni a próbatest két oldalának elválása nélkül. Ez egyrészt a rugalmasabb, jobb duktilitást biztosító adalékanyaggal, másrészt a szál-erősítéssel magyarázható. Ezen tulajdonság nagy előnyt jelent a falburkolati alkalmazásnál. Az esetleges szilárdsági tönkremenetel esetén a burkolólapok még rendelkeznek maradékteherbírással, mely lehetővé teszi a biztonságos javítást és a hirtelen elpattanó, teljes keresztmetszetükben átrepedő lapokkal ellentétben a lehulló törmelék sem okoz károkat, sérüléseket.



15. ábra. Kvarckavics adalékanyagos keverék tönkremenetele



16. ábra. Pórusbeton adalékanyagos keverék tönkremenetele

### 3.4.3 Fagyállóság

A fagyállósági vizsgálatokat az MSZ EN 14617-5:2012 szabvány szerint 70\*70\*250 mm-es, 28 napos korig víz alatt tárolt, hasáb próbatesteken végeztük. A szabványos vizsgálat szerint a fagyállóságot egy állandóval (KM<sub>f25</sub>) lehet megadni, mely a 25 fagyás-olvadási cikluson átesett (RM<sub>f</sub>) és a nem fagyasztott etalon testek (R<sub>f</sub>) hajlító-húzó szilárdságának hányadosa. (1. képlet)

$$KM_{f25} = RM_f / R_f \times 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

A vizsgált könnyű adalékanyagos keverékeken már 10 fagyási ciklus után (17. ábra) is szabad szemmel látható fagyási károk voltak észlelhetők. A próbatestek 25 fagyási ciklus során bekövetkezett károsodás olyan súlyos volt, hogy a hajlító-húzó szilárdságuk nem mutatott mérhető értéket (18. ábra).



17. ábra. 10 fagyási cikluson átesett próbatest



18. ábra. 25 fagyási cikluson átesett próbatest

### 3.4.4 Ütésállóság

Az ütésállósági vizsgálat a szabvány (MSZ EN 14617-9:2005) szerint egy adott átmérőjű, adott tömegű (M) fémgolyó egyre magasabbról a próbatestre való ejtetésével végzendő (19. ábra). Az ütésállóságot a becsapódáskor elnyelt energia (L), illetve a becsapódás magasságának (h) mértékében adjuk meg. Az egyenletben a „g” a földfelszínen mérhető gravitációs gyorsulás értéke (9,806 m/s<sup>2</sup>) (2. képlet).

$$L=M*g*h \quad (2)$$

Az eredmények szerint a pórusbeton adalékanyaggal készített keverékek **45-55 cm** magasságból leeső golyó esetén mentek tönkre (20. ábra), a referencia keveréknél ez már **40 cm**-nél bekövetkezett. A könnyűbeton keverékek tehát jobb szívóssággal rendelkeznek, mint a nagyszilárdságú kvarchomok és kvarckavics adalékanyaggal készített normál beton.



19. ábra. Ütésállósági vizsgálat



20. ábra. Ütésállósági vizsgálat során tönkrement próbatest

### 3.5 Vizsgálatok kiértékelése

A laboratóriumi vizsgálatok eredményeit összefoglalva az általunk burkolati célra készített könnyűbeton keverékek beltéri falburkolásra alkalmasak. Mivel az önhordáshoz elegendő nyomószilárdsággal rendelkeznek, akár előregyártott falburkoló elemek, akár csiszolt felületű öntött válaszfal is készíthető lenne belőlük. Előnytelen fagyállósági tulajdonságaik miatt kültérben nem javasolt az alkalmazásuk.

### 3.6 További kutatási célok

Az eddigi eredmények alapján a továbbiakban tervezzük az akasztott rögzíthetőség vizsgálatát (Dowel-furat), illetve a színező pigmentek élénkebb érvényesülésének érdekében fehér portlandcement alkalmazását.

## 4 ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk alapvető célja működőképes, gazdaságosan hasznosítható megoldások keresése a pórusbeton falazóelemekből származó építési és bontási hulladékok újrahasznosítására. Eddigi eredményeink alapján a megfelelően előkészített, zúzott pórusbeton adalékanyaggal készíthető teherhordó-hőszigetelő funkciójú, illetve beltéri függőleges burkolati, és/vagy tételhatárolási funkció kielégítésére alkalmas betonkeverék.

Az eddigi, hasonló alapanyaggal készült kutatásokkal szemben az egyik legnagyobb alapvető előrelépés, hogy míg az eddigiekben az adalékanyag finom frakcióit ( $d < 4\text{mm}$ ) kvarchomokkal helyettesítettek, kutatásunkban a teljes adalékanyag halmaz ( $0 < d < 16\text{mm}$ ) újrahasznosított pórusbetonból áll.

Az első kutatási fázisban függőleges tartószerkezeti felhasználásra készültek betonkeverékek. A laboratóriumi vizsgálatok alapján a keverékek nyomószilárdsága  $12\text{-}16\text{ N/mm}^2$ , testsűrűsége  $1350\text{-}1450\text{ kg/m}^3$ , hővezetési tényezője  $0,36\text{-}0,45\text{ W/mK}$ , vízzárósága szerint pedig XV1-es osztályba sorolhatóak. Ezen tulajdonságok alapján a vizsgált keverékek alkalmasak függőleges, akár földfelszín alatti tartószerkezetek készítésére. Testsűrűségük és nyomószilárdságuk alapján javasoljuk teherelosztó betonlemezek, rábetonozások készítésére is.

A második kutatási fázis során burkolati célra készültek keverékek. A laboratóriumi vizsgálatok szerint a keverékek nyomószilárdsága 6-10 N/mm<sup>2</sup>, hajlító-húzó szilárdsága 1,5-2,5 N/mm<sup>2</sup>, ütésállósága a vizsgálati szabvány szerint 45-55 cm magasságból leeső 90 dkg-os fémgolyó becsapódásának felel meg. Csiszolt felülete esztétikus struktúrát mutat. Ezen tulajdonságok alapján a keverékek alkalmazását beltéri falburkolatnak, térelhatároló falnak javasoljuk. Kedvezőtlen fagyállósági tulajdonságaik miatt, kültéri alkalmazásuk nem ajánlott.

## 5 IRODALMI HIVATKOZÁSOK

2000/532/EK biztonságtechnikai előírás

45/2004. (VII. 26.) BM-KvVM együttes rendelet az építési és bontási hulladék kezelésének részletes szabályairól

2012. évi CLXXXV. törvény: A hulladékról

Országos Hulladékgazdálkodási Terv 2014-2020 (bázisév: 2011)

A Kormány 440/2012. (XII. 29.) rendelete: A hulladékkal kapcsolatos nyilvántartási és adatszolgáltatási kötelezettségekről

BV-VM 01:2005 (H) – Beton és vasbetonépítési műszaki irányelv: Betonkészítés bontási, építési és építőanyag gyártási hulladék újrahasznosításával, *fib*, 2005

Csőke B. 2005. Építési hulladékok előkészítése építési, útépítési célra. *Építőanyag*, 57(2), 39-42.

Kausay T. 2002. Gázbeton-pórusbeton, *BETON*, X(7-8), 1-25.

Kozák J., Magyar B. 2013. A budapesti négyes metróvonal építése 4: FRC burkolatok a négyes metró három állomásán, Budapesten. *Vasbetonépítés*; XV(2), 53-56.

Topcu I.B., Seridemir M. 2007. Prediction of properties of waste AAC aggregate concrete using artificial neural network. *Computational Materials Science*, 41(1), Pages 117-125

Sinica M., Sezamanas G., Mikulskis D., Kligys M., Cesnauskas V., Zacharcenko P., Kuprijenko P., Scerbina N., Pivenj M. 2009. Investigation of the Composite Material with Inclusions of Autoclaved Aerated Concrete Chips. *Materials Science (Medziagotyra)*, 15(4), 356-362.