

# HULLADÉKFELHASZNÁLÁSÚ, ÖNTÖMÖRÖDŐ, NAGYSZILÁRDSÁGÚ BETONOK FAGYÁLLÓSÁGA

<https://doi.org/10.32969/VB.2021.4.1>



Dr. Abed Mohammed - Dr. Nemes Rita - Szobor Tivadar - Pollák András - Nasios Theofanis - Dr. Nehme Salem

*A fenntarthatóság szempontjából rendkívül fontos a károsanyag kibocsátás csökkentése, a meglévő anyagok hosszú időn át tartó használata és az élettartamuk végén az újrahasznosításuk. Egyre jelentősebb a törekvés, hogy a betonok anyagában növeljük a hulladékok és ipari melléktermékek mennyiségét, és csökkentjük a cementtartalmat és a bányászott vagy nagy távolságból szállított összetevőket. Közben a tartósság és a szilárdság is fontos, mert ez az összes felhasznált beton mennyiséget csökkenti. Kísérletsorozatunkban huszonegy öntömörödő betonkeverék (SCHPC) fagyhámlás vizsgálatát végeztük el, ahol az adalékanyag durva frakciójának egy részét újrahasznosított (visszanyert) betonüzalékre cseréltük, illetve három feldolgozás nélküli hulladék alapú poranyagot, erőművi pernyét, hulladék perlitport és hulladék pórusbetonport alkalmaztunk cementhelyettesítő vagy cement kiegészítő anyagként kísérleti jelleggel. A szilárdságokat is vizsgáltuk, de a magyarországi felhasználásokban a legkritikusabb kérdés általában a fagyállóság. A vizsgálatokat 270 napos korban végeztük, hogy a kiegészítőanyagok cementnél lassabban lejátszódó kémiai reakciói is kifejthessék hatásukat. Az eredmények azt mutatták, hogy a betonüzalék alkalmazása nem befolyásolja szignifikánsan az öntömörödő beton fagyhámlással szembeni ellenállását, a cementkőváz összetételének hatása jelentősebb. A cementhelyettesítő anyagként alkalmazott pernye és perlitpor (15%-ig) a beton fagyhámlással szembeni ellenállásának növekedését eredményezték, függetlenül attól, hogy az alkalmazott adalékanyag kizárólag természetes volt vagy betonüzaléket is tartalmazott. A vizsgálatokkal igazoltuk, hogy jelentős hulladékfelhasználás (adalékanyag durva frakciójának 25-50%-os, illetve a cement legfeljebb 15%-os helyettesítése) mellett is a fagyállóság szempontjából tartós betont lehet készíteni.*

**Kulcsszavak:** újrahasznosított betonüzalék (RCA), visszanyert betonüzalék, hulladék alapú poranyagok, pernye, perlit, cementhelyettesítő anyagok (CRM), fagyhámlás, fagyállóság, hosszútávú vizsgálatok

## 1. BEVEZETÉS

A fenntartható fejlődéssel foglalkozó 1992-es riói konferencia (Agenda, June 1992) megrendezése nem volt hiábavaló, tanúsította a múlt század hatalmas népességnövekedését és a fejlődő országok településeinek gyors városiasodását. A XXI. század elején a fenntartható technológiákra kell helyezni a hangsúlyt. Számos előnye miatt a beton a legszélesebb körben használt építőanyag lett, de a gyártása nagy mennyiségű természeti erőforrást igényel, és nagy mennyiségű széndioxidot bocsát ki a cement előállításában. A beton egy kompozit anyag, amelyet elsősorban adalékanyag (kőanyaghalmoz), cement és víz alkot. A betongyártás kb. 20 milliárd tonna nyersanyagot használ fel évente (Fredonia, 2011). A beton térfogatának kb. 2/3-t teszi ki az adalékanyag, aminek bányászata, kereskedelme, szállítása növeli a széndioxid kibocsátást és az energiafelhasználást (Limbachiya et al., 2012). Az építés és bontás során keletkező hulladékokat (C&D = construction and demoltion) nem lehet a hagyományos módszerekkel kezelni. Ezek a hulladékok lerakókba kerülnek, ahol kedvezőtlen hatást gyakorolnak a környezetre, és ezzel együtt a lehetséges lerakó területek csökkennek az iparosodás és a városiasodás miatt. Az építési és bontási hulladékok mennyiségének és az adalékanyagok beszerzési költségeinek növekedése miatt szükség van a hulladékok

szerkezeti betonokban való felhasználására (Kisku et al., 2017). Ez a fejlesztés lehetővé teszi a betonipar számára a folyamatos növekedést, miközben csökkenti a szénlábnyom (karbonlábnyom) értékét és a környezetre gyakorolt kedvezőtlen hatást. Az újrahasznosított betonüzaléket (RCA = recycled concrete aggregate) a természetes adalékanyag (NA = natural aggregate) durva frakciója helyett dokumentáltan először Angliában a II. világháború alatt használtak járdák építéséhez.

A kutatók a bontási hulladékok újrahasznosításával kapcsolatos vizsgálatok során arra a következtetésre jutottak, hogy ezek az anyagok felhasználhatók a természetes kőanyaghalmozok helyett (Kisku et al. 2017) többszáz betonüzalékkal foglalkozó kutatás alapján arra a következtetésre jutottak, hogy ásványi kiegészítő anyagok alkalmazásával növelhetők az újrahasznosított betonüzalékos betonok anyagjellemzői. További kutatásokat javasoltak a hagyományostól eltérő hulladék alapú cementhelyettesítő anyagok (CRM = cement replacement material) és a betonüzalék adalékanyag hosszú távú hatására mechanikai és tartóssági szempontból. Meyer (2009) számos cementhelyettesítő anyagként használható hulladékot vizsgált és arra a következtetésre jutott, hogy a betonüzalék használata az ipari hulladékok megfelelő százalékban való hozzáadásával igen hasznos lehet. A természetes adalékanyag lecserélését

betonzúzalékra már széles körben vizsgálták, de csak néhány tanulmány foglalkozott az öntömörödő betonban (self-compacting concrete = SCC) való alkalmazással (Rajhans et al., 2018; Abed, 2018). Például egy korábbi munkában a CO<sub>2</sub> kibocsajtást 24%-kal csökkentették a betonzúzalék használatával a referencia keverékhez képest (Yap et al., 2018), de több folyósítószerre volt szükség az öntömörödő képesség eléréséhez (Guo et al., 2018). A szakirodalom szerint - tekintettel az újrahasznosítási trendekre - a jelenlegi irány a betonzúzalékok szokásostól eltérő felhasználása speciális betonokban hulladék alapú poranyagok használatával, mint például az öntömörödő nagy teljesítőképességű betonok készítéséhez is felhasználhatók (Abed, 2019).

## 2. A FAGYÁLLÓSÁG KÉRDÉSE

Magyarországi környezetben a kültéri szerkezetek tartóssága elsősorban a fagyállóságtól függ. A fagykárosodás a kültéri betonok tönkremenetelének leggyakoribb oka. A víz, amikor megfagy, akkor kb. 9%-kal növekszik a térfogata, ha ez a kapilláris pórusokban megy végbe, akkor a beton megreped és a felülete lehámlik, főleg, ha a beton pórusai telítettek. Porózus adalékanyag (pl. visszanyert betonzúzalék, könnyű adalékanyag, tufa) esetén megnő a teljes keresztmetszet tönkremenetelének valószínűsége is. A tönkremenetel sebessége, az anyagjellemzőkön kívül elsősorban a ciklusszám függvénye, amely éghajlati tényező. Magyarországon az éves ciklusszám nagyon magas, évi 20, akár 25 ciklussal is számolni kell. A téli időszakban gyakori a nappali 0 °C feletti, éjszaka a 0 °C alatti hőmérséklet. Ez jóval hidegebb országokban (pl. Skandináviában) kevesebb, mert a hosszantartó fagy kevesebb fagyás-olvadás ciklussal jár (a tél elején minden megfagy, és majd csak tavasszal kezd el kiolvadni). Melegebb éghajlaton (Dél-Európában vagy a tengerparti országokban) pedig ritkább a fagypontra alatti hőmérséklet.

A fagykárosodásnak alapvetően két oka van: a) a nyomószilárdság és a tömeg csökkenésével járó fagykárosodás a betontest belsejében megfagyó víz miatt; b) a beton felületének leválása jellemzően a jégolvasztó sózás következtében.

A fagyhámlás mértékét befolyásolja a beton összetétele, a permeabilitása, a porozitás mértéke és típusa (kapilláris vagy gömb alakú pórusok), a nedvességtartalma, illetve a telítettség, a beton kora, a bedolgozási és tömörítési módja, a környezeti osztálya és az adalékanyag típusa. Visszanyert betonzúzalék újrahasznosított adalékanyagként való alkalmazása esetén a fagyhámlással szembeni ellenállás a visszanyert betonzúzalék minőségétől és a helyettesítési arányától is függ (Zaharieva et al., 2004), (Tuyan et al., 2014). A visszanyert betonzúzalék porózus, ezért várhatóan csökken a fagyhámlással szembeni ellenállás (Šeps et al., 2016), (Hao et al., 2018), (Gokce et al., 2004), amelyet kísérletileg ellenőrizni szükséges.

## 3. ALKALMAZOTT ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

### 3.1 Cement és cementkiegészítő anyagok

A cementkiegészítő anyagok hatását vizsgáltuk CEM I 42,5 N tiszta portlandcement (OPC) alkalmazása mellett, annak tisztázására, hogy az alkalmazott kiegészítőanyagok milyen hatással vannak a beton tulajdonságaira. Három különféle Magyarországon is előforduló, további kémiai vagy fizikai

feldolgozás nélkül is használható, nyers hulladék poranyagot alkalmaztunk a cement részleges helyettesítésére a 1. táblázat szerint. Az alkalmazott anyagok kémiai és fizikai tulajdonságait a 2. táblázat mutatja be. A vizsgálatokat az MSZ EN 196-2:2013 és az MSZ 525 12:2014 szerint végeztük.

**1. táblázat:** Hulladék alapú kiegészítőanyagok származási helyei

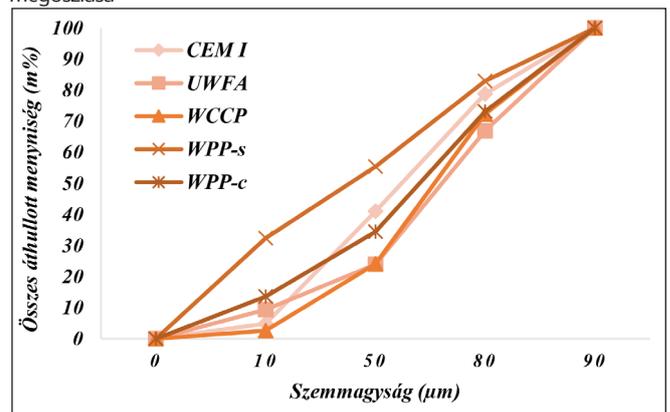
Kiegészítőanyag	Forrás
Feldolgozás nélküli erómuvi pernye (unprocessed waste fly ash = UWFA)	Mátrai Erómu (Visonta) pernyéje, feldolgozás nélküli állapotban
Hulladék perlitpor (waste perlite powder = WPP)	A nyers perlit (Magyarországon nagy mennyiségben előforduló, amorf vulkanikus szilícium- vagy alumínium-oxid tartalmú kőzet) kőzetek vágásakor keletkező hulladék poranyag, két különböző finomságban (fajlagos felülettel) WPP-c és WPP-s változatban.
Hulladék pórusbetonpor (waste cellular concrete powder = WCCP)	A pórusbeton falazóelemek gyártás közbeni vágásakor keletkező hulladék

Az 1. ábra a vizsgálatosorozatban alkalmazott cement és a cementkiegészítő-anyagok szemmegoszlását mutatja. Mint látható, az UWFA, WCCP és WPP-c részecskéi nagyobbak, mint a cementé, míg a WPPs szemmegoszlása finomabb. A jelen vizsgálatban alkalmazott WPP olyan keverék volt, amely 50% WPP-c és 50% WPP-s kiegészítőanyagot tartalmazott.

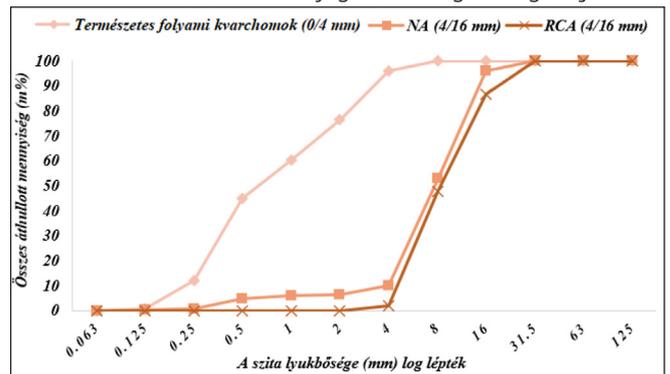
### 3.2. Adalékanyag

Az adalékanyag finom frakciója (0/4 mm) természetes folyami kvarchomok voltak az összes keverékben, az összes adalékanyag mennyiség 45 m%-a volt. A durva adalékanyag (kavicsfrakció:

**1. ábra:** Az alkalmazott cement és cementkiegészítő-anyagok szemmegoszlása



**2. ábra:** Az alkalmazott adalékanyagok szemmegoszlási görbéje.



**2. táblázat:** Az alkalmazott cement és a kiegészítőanyagok alapvető fizikai jellemzői és kémiai összetétele

Vizsgált jellemzők	CEM I	UWFA	WPP-c	WPP-s	WCCP
Sűrűség (g/cm <sup>3</sup> )	3.02	2.15	2.33	2.33	1.96
Fajlagos felület (cm <sup>2</sup> /g)	3326	4323	843.3	4159	2513
Izzítási veszteség (m%)	3.0	1.95	2.8	1.21	9.25
SiO <sub>2</sub> (m%)	19.33	43.02	73.8	73.2	54.28
CaO (m%)	63.43	15.07	1.7	1.06	22.81
MgO (m%)	1.45	3.14	0.11	0.2	1.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (m%)	3.42	14.17	2.57	2.6	2.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (m%)	4.67	15.6	13.8	16.6	5.09
SO <sub>3</sub> (m%)	2.6	3.56	-	-	4.90
Klorid tartalom (m%)	0.04	0.02	-	-	0.02
Szabad CaO (m%)	0.71	0.37	-	-	-
K <sub>2</sub> O (m%)	0.78	-	4.01	3.5	-
Na <sub>2</sub> O (m%)	0.33	-	2.66	1.5	-
TiO <sub>2</sub> (m%)	-	-	0.083	0.09	-
Híg sósavban oldhatatlan rész (m%)	0.26	49.72	92.07	86.19	33.02

4/16 mm) aránya 55% volt, de kétféle durva adalékanyagot használtunk; természetes folyami kvarckavicsot (normal aggregate = NA) és visszanyert betonzúalékot (recycled concrete aggregate = RCA), amelyeket a laboratóriumban vizsgált betonkockákból állítottunk elő pofás törőben lezúzva, úgy, hogy a legnagyobb szemmagyság 16 mm legyen. A 4 mm alatti szemmagyságot szitálással leválasztottuk, és nem használtuk a kísérletekhez. A visszanyert betonzúalékhoz használt eredeti betonok minden esetben szokványos betonok voltak és átlagos nyomószilárdságuk 28-33 MPa között volt (C16/20-C20/25). A visszanyert betonzúalék Los Angeles értéke (36,1 m%) magasabb volt, mint a természetes kavicsé (26,3 m%), továbbá a visszanyert betonzúaléknak van vízfelvétele (5,6 m%), szemben a tömör kavicsal. A szemmegoszlást a három adalékanyag típusnál (homok, NA és RCA) a 2. ábra mutatja.

## 4. ÖSSZETÉTEL-TERVEZÉS ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

### 4.1 Összetétel-tervezés

Huszonegy különböző összetételű keveréket készítettünk (3. táblázat). A keverékek mindegyike megfelelt az öntömörödő beton követelményeinek. A keverékben a referencia kvarckavics és portlandcement mellett visszanyert betonzúalékot és hulladék poranyagokat alkalmaztunk durva adalékanyagként, illetve kiegészítőanyagként a káros környezeti hatások csökkentése érdekében. Az összes adalékanyagot megvizsgáltuk és megfelelt az MSZ EN 12620:2002+A1 követelményeinek.

A vizsgálatokat 7 sorozatra osztottuk. Az egy sorozaton belüli fő különbség a természetes adalékanyag helyettesítésének a mértéke volt. Mindegyik sorozatban három keverék volt, három különféle visszanyert betonzúalék mennyiséggel (0-25-50 m%). A hulladékpórányanyagok helyettesítési arányai (0-15-30 m%) voltak. Az összes keverék egy optimalizációs kísérlet eredményeként adódott; amelyben a legnagyobb lehetséges kiegészítőanyag-tartalmat határoztuk meg (Abed, 2019; Abed, Nemes 2019a). A nagy kötőanyag tartalom (500 kg/m<sup>3</sup>) és a kis víz-kötőanyag („cement+kiegészítőanyag”) tényező (0,35) állandó volt az összes keverékben. Mivel a

visszanyert betonzúalék porózus, és így van vízfelvétele, biztosítani kellett, hogy a keverés során ne szívja el a vizet a cemenetpéből, ezzel megváltoztatva a pép víz-kötőanyag tényezőjét és konzisztenciáját; ezért a visszanyert betonzúalék vízfelvétele és alkalmazott mennyisége alapján számított vízmennyiséggel többet adagoltunk a keverés során.

Az öntömörödő képesség eléréséhez szükséges nagy finomrész-tartalmat és a kis  $d_{max}$  értéket biztosítottuk, a konzisztenciát pedig folyósítószerrel (Sika ViscoCrete-5 Neu) állítottuk be, így minden keverék megfelelt az SCC európai irányelveinek (EFNARC, 2005). Az adalékszer adagolását a cementhelyettesítő anyagok fajtájához kellett igazítani. A szükséges mennyiséget kísérleti úton határoztuk meg (Abed, Nemes 2019b). A keverék rendszerét a 3. táblázatban, míg a keverékek összetételét a 4. táblázatban adjuk meg.

**3. táblázat:** A kísérletsorozatban vizsgált összetételek rendszere

Sorozat száma	Cement helyettesítés aránya	Természetes kvarckavics (0% betonzúalék)	25% betonzúalékkal való helyettesítés	50% betonzúalékkal való helyettesítés
I.	0%	RA0	RA25	RA50
II.	15% UWFA	F15RA0	F15RA25	F15RA50
III.	30% UWFA	F30RA0	F30RA25	F30RA50
IV.	15% WCCP	C15RA0	C15RA25	C15RA50
V.	30% WCCP	C30RA0	C30RA25	C30RA50
VI.	15% WPP	P15RA0	P15RA25	P15RA50
VII.	30% WPP	P30RA0	P30RA25	P30RA50

A keverékeket kényszerkeverőben készítettük laboratóriumi körülmények között. A teljes keverési idő négy és fél perc volt, három szakaszra osztva. Az első lépésben az adalékanyag(ka)t és a kötőanyag(ka)t kevertük össze, a második lépésben vizet adtunk hozzá, a harmadik lépésben pedig a folyósítószer. Az öntömörödő beton konzisztenciáját területtel és a kifolyási idő mérésével vizsgáltuk, szükség esetén további adalékszer adagolással módosítottuk. A próbatesteket másnap zsáultuk ki, majd mésztelített vízbe helyeztük 7 napos korig, ezt követően laborlevegőn tároltuk a vizsgálatig, 90, illetve 270 napos korig.

**4. táblázat:** Az alkalmazott összetételek

Az összetétel jele	Adagolás [kg/m <sup>3</sup> ]						Adalékszer	Víz
	CEMI 42,5 N	Kiegészítőanyag	Homok frakció	Kavics frakció				
			term. homok	NA	RCA			
			0/4 mm	4/16 mm				
I. sorozat (0, 25 és 50% RCA adalékanyag helyettesítéssel)								
RA0	500	0	783	939	0	1.5	175	
RA25	500	0	783	704	230	1.5	175	
RA50	500	0	783	470	460	1.5	175	
II. sorozat (pernye kiegészítő anyag 15%-os helyettesítésével és RCA-val )								
F15RA0	425	75	767	920	0	2	175	
F15RA25	425	75	767	690	226	2	175	
F15RA50	425	75	767	460	251	2	175	
III. sorozat (pernye kiegészítő anyag 30%-os helyettesítésével és RCA-val )								
F30RA0	350	150	751	901	0	3	175	
F30RA25	350	150	751	475	221	3	175	
F30RA50	350	150	751	451	442	3	175	
IV. sorozat (pórusbetonpor kiegészítő anyag 15%-os helyettesítésével és RCA-val )								
C15RA0	425	75	766	919	0	1.7	175	
C15RA25	425	75	766	690	225	1.7	175	
C15RA50	425	75	766	459	451	1.7	175	
V. sorozat (pórusbetonpor kiegészítő anyag 30%-os helyettesítésével és RCA-val )								
C30RA0	350	150	750	899	0	3.25	175	
C30RA25	350	150	750	674	220	3.25	175	
C30RA50	350	150	750	451	442	3.25	175	
VI. sorozat (perlitpor kiegészítő anyag 15%-os helyettesítésével és RCA-val )								
P15RA0	425	75	774	928	0	3	175	
P15RA25	425	75	774	697	228	3	175	
P15RA50	425	75	774	464	455	3	175	
VII. sorozat (perlitpor kiegészítő anyag 30%-os helyettesítésével és RCA-val )								
P30RA0	350	150	766	918	0	3.75	175	
P30RA25	350	150	766	688	225	3.75	175	
P30RA50	350	150	766	459	450	3.75	175	

## 4.2 Vizsgálatok

A bemejtéses vizsgálatokat (MSZ EN 12371) és a fagyhámlás vizsgálatokat (MSZ CEN/TS 12390) minden betonkeverékre elvégeztük 270 nap elteltével. A cement-kiegészítő anyagok hatása később jelenik meg, mint cementeké, ezért ilyen anyagok alkalmazásakor fontos a megfelelő időzítés az alkalmazás során, de 9 hónapos korban már mindenképpen fagyhatásnak lesz kitéve a kültéri szerkezet, és eddigre már a kiegészítő anyagok alkalmazása mellett is véglegesnek tekinthető a szilárdság.

### 4.2.1. Bemejtéses vizsgálat

A maradó nyomószilárdságot 50 és 150 fagyasztás-olvasztás ciklus után az MSZ EN 12371 alapján, 150 mm élhosszúságú betonkockákon vizsgáltuk. A vizsgálat során kilenc kockát használtunk minden betonkeverékhez. A víztelített próbatesteket ciklusonként 2 óra hűtés és 2 óra -20 °C-on tartást követően +20 °C-os vízben olvasztottuk ki, majd tároltuk 4 órán keresztül. Keverékenként 3 db-on 50 ciklusos fagyasztást, 3 db-on pedig 150 ciklusos fagyasztást végeztünk, további

3 db próbatestet a vizsgálat végéig referenciaként tároltunk és egyidőben vizsgáltuk az összes próbatestet. A nyomószilárdság és a testsűrűség változását mértük.

### 4.2.2 Fagyhámlás vizsgálat

Vízszintes fagyhatásnak kitett szerkezetnél az MSZ CEN/TS 12390-9 vizsgálat javasolt, amely figyelembe veszi, hogy a beton felületén meg tud állni a víz, sőt jégolvasztó sózás alkalmazása esetén a sóoldat is. A vizsgálat során csak egy vízszintes felületen éri fagyhatás a próbatestet, ahol 3 m%-os NaCl oldatot kell elhelyezni. A vizsgálat általában az 56 ismételt fagyasztás-olvasztás ciklus következtében leváló anyag mennyiségének meghatározását jelenti, de sok esetben a 28 ciklus utáni eredmény is fontos. Mindegyik ciklus 6 órás hűtést, 6 óra -20 °C hőmérsékleten tartást, 6 órás olvasztást és 6 órás +20 °C hőmérsékleten tartást jelent. 7, 14, 28 és 56 ciklus után mértük a lehámlott anyagmennyiséget, majd összegeztük. A vizsgálatot keverékenként 4 db 150 mm élhosszúságú kocka vágott felületén végeztük el.

## 5. EREDMÉNYEK

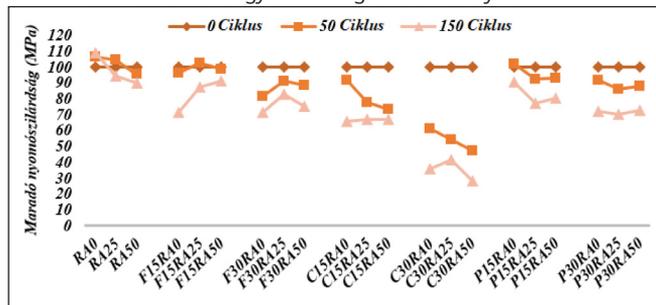
### 5.1 Betonzúzalék alkalmazásának hatása

A durva adalékanyag frakció (4/16 mm) 25-50%-ának visszanyert betonzúzalékkal való helyettesítése gyakorlatilag nem befolyásolta a fagyállóságot, minden esetben a 15%-on belül volt a szilárdságcsökkenés. A bemeztéses vizsgálat esetén a maradó nyomószilárdság csak kissé csökkent (3. ábra), ennek a fő oka a visszanyert betonzúzalék okozta póruseloszlás változása lehet. A fagyhámítás vizsgálat azt mutatta, hogy a visszanyert betonzúzalék alkalmazása csökkentette mind 28, mind 56 ciklus után a lehámlott anyagmennyiséget (4. ábra). Az újrahasznosított betonban az adalékanyag és a régi habarcs, valamint az új és a régi habarcs között erős intertranszmissziós zóna (ITZ) alakul ki (Medina et al. 2013). Ezesetben a cementkőváznak van a legjelentősebb szerepe, amely a nagy cementtartalom és a kis víz-cement tényező következtében rendkívül jó fagyállóságot biztosít.

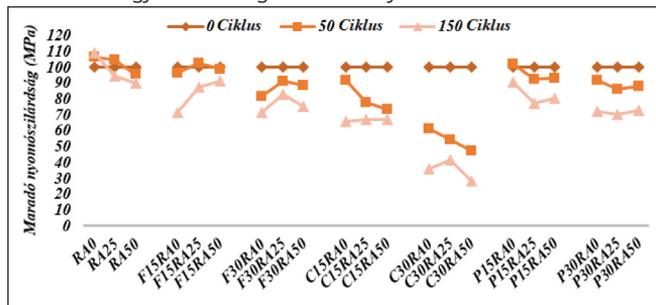
### 5.2 Cementkiegészítő anyag alkalmazásának hatása

25 és 50% visszanyert betonzúzalék alkalmazása esetén legfeljebb 15% pernye használata cementhelyettesítő-anyagként a fagyállóság növekedését eredményezte. A fagyhámítás vizsgálat esetén a magasabb (30 m%-os) adagolás is kedvező volt. 15 m% perlitpor alkalmazása esetén minden vizsgált kombinációban 1000 g/m<sup>2</sup> alatt maradt lehámlott érték (XF4 környezeti osztály), de nagyobb mennyiségben alkalmazva már csökkent a fagyhámítással szembeni ellenállás. A pernye és perlitpor hozzájárult a mikroszerkezet finomításához és a pórusok összekapcsolhatóságának csökkentéséhez pozzolános aktivitásuk folytán, ezáltal megnövekedett mennyiségű kalcium-szilikát-hidrát gélt hozva létre, amely kitölti a pórusokat. Korábbi vizsgálatunkban (Gyurkó, Szijártó, Nemes 2019) a pórusbetonpor kedvezőnek bizonyult, jelen kutatás során azt tapasztaltuk, hogy a pórusbetonpor alkalmazása kiegészítőanyagként jelentősen rontotta a fagyállóságot. Ez a hatás annál kedvezőtlenebb, minél tömörebb a cementkőváz

3. ábra: A bemeztéses fagyasztásvizsgálat eredményei



4. ábra: A fagyhámítás vizsgálat eredményei



(Gyurkó, Szijártó, Nemes 2019). A jelen kísérletben vizsgált pórusbetonpor az elemgyártás folyamatában végzett vágás során keletkező hulladék, amelynek szemnagysága nagyobb és fajlagos felülete kisebb, mint a korábban vizsgált, vésés során keletkező pórusbetonporé. Sajnos ez a méret nem megfelelő sem a szilárdság, sem pedig a fagyállóság növelésére, ezért a pórusbeton elemek vágási hulladékporát nem javasoljuk kiegészítőanyagként alkalmazni.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Több mint 250 próbatestenen végeztünk vizsgálatokat annak megfigyelésére, hogy az öntömörödő beton fagyállóságára milyen hatással van a durva frakció 25, illetve 50%-ának visszanyert betonzúzalékkal (RCA) cserélése, és mi a hatása három különböző hulladékpor cementkiegészítő-anyagként való alkalmazásának a csak természetes adalékanyagot és a visszanyert betonzúzalékot is tartalmazó összetétel esetén. A három megmunkálás nélküli hulladék por: feldolgozatlan pernye (UWFA), hulladék perlitpor (WPP) és hulladék pórusbetonpor (WCCP) volt. Az összes keveréket azonos kötőanyagtartalom és víz-kötőanyag tényezővel készítettük, 0-25-50% eredetileg C16/20-C25/30 közötti szilárdsági osztályú beton zúzalékával és 0-15-30% kiegészítőanyaggal mindegyik kombinációban. Az eredmények azt mutatták, hogy az öntömörödő beton az egyik kedvező választási lehetőség a hulladékok felhasználására, mert a visszanyert betonzúzalék nem befolyásolta kedvezőtlenül az öntömörödő beton tartóssági tulajdonságait, mivel a cementkőváz hatása sokkal hangsúlyosabb a fagyással szembeni ellenállásra. Az alkalmazott pernyét és perlitport is alkalmasnak találtuk maximum 15%-os helyettesítéssel, különösen, ha visszanyert betonzúzalékot is alkalmazunk az összetételben. A vizsgált pórusbetonport az eredeti gyári vágási hulladék formájában nem szabad fagyálló betonokhoz alkalmazni, mert a szemnagysága nem megfelelő sem a nyomószilárdság, sem a fagyállóság növelésére, sem hagyományos adalékanyag, sem visszanyert betonzúzalék felhasználása esetén.

## HIVATKOZÁSOK

- Abed, M. (2018) Self-compacting high-performance concrete in terms of mixing proportions and procedure. *Concrete Structures*, 19. pp. 22-27.
- Abed, M. (2019) Green Self-compacting High-performance Concrete, PhD értekezés, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem, Építőmérnöki Kar*
- Abed, M. (2019) Green Self-compacting High-performance Concrete, PhD értekezés, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem, Építőmérnöki Kar*
- Abed, M., Nemes, R. (2019a) Mechanical Properties of Recycled Aggregate Self-Compacting High Strength Concrete Utilizing Waste Fly Ash, Cellular Concrete and Perlite Powders, *Periodica Polytechnica-Civil Engineering* 63 : 1 pp. 266-277.
- Abed, M., Nemes, R. (2019b) Fresh properties of the self-compacting high-performance concrete using recycled concrete aggregate, *Építőanyag: Journal of Silicate Based and Composite Materials* 71 : 1 pp. 18-23.
- Agenda June 1992. the Rio Declaration on Environment and Development, the Statement of Forest Principles, the United Nations Framework Convention on Climate Change and the United Nations Convention on Biological Diversity. *United Nations Conference on Environment and Development (UNCED)*. Rio de Janeiro.
- EFNARC (2005) Specifications and guidelines for self-compacting concrete, *European federation for specialist construction chemicals & concrete systems*.
- Fredonia World Construction Aggregates to 2011– Demand and Sales Forecasts. 2011. *Market Share, Market Size, Market leaders, Industry*.
- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T. & Hisada, M. (2004) Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 799-806.
- Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T.-C., Zhang, H. & Wang,

- Y. (2018) Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 251-259.
- Gyurkó, Z. ; Szijártó, A. ; Nemes, R. (2019) Cellular concrete waste as an economical alternative to traditional supplementary cementitious materials *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 138 pp. 947-961.
- Hao, L., Liu, Y., Wang, W., Zhang, J. & Zhang, Y. (2018) Effect of salty freeze-thaw cycles on durability of thermal insulation concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 189, 478-486.
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S. & Dutta, S. C. 2017. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721-740.
- Limbachiya, M., Meddah, M. S. & Ouchagour, Y. 2012. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*, 27, 439-449.
- Medina, C., Sánchez De Rojas, M. I. & Frías, M. (2013) Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 40, 151-160.
- Meyer, C. 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31, 601-605.
- MSZ CEN/TS 12390-9:2018 A megszilárdult beton vizsgálata. 9. rész: Fagyállóság jégolvasztó sóval. Lehámlás
- MSZ EN 196-2:2013 Cementvizsgálási módszerek. 2. rész: A cement kémiai elemzése
- MSZ 525-12:2014 Cementek kémiai elemzése. 12. rész: A szabad mésztartalom meghatározása
- MSZ EN 12371:2010 Természetes építőkövek vizsgálati módszerei. A fagyállóság meghatározása
- MSZ EN 12620:2002+A1:2008 Kőanyagalmazatok (adalékanyagok) betonhoz
- Rajhans, P., Panda, S. K. & Nayak, S. 2018. Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ. *Construction and Building Materials*, 163, 557-570.
- Šeps, K., Fládr, J. & Broukalová, I. (2016) Resistance of Recycled Aggregate Concrete to Freeze-thaw and Deicing Salts. *Procedia Engineering*, 151, 329-336.
- Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A. & Ramyar, K. (2014) Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials & Design*, 53, 983-991.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. & Wirquin, E. (2004) Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 1927-1932.

**Dr. Abed Mohammed** (1991) okl. építőmérnök, PhD, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék. Fő érdeklődési területe: környezetbarát, nagy teljesítőképességű, öntömörödő betonok, hulladékfelhasználás betonokban, cementkiegészítő-anyagok alkalmazása. Roncsolásmentes betonvizsgálatok, tűzállóság, fenntarthatóság. A fib Magyar Tagozat és a fib Member of Young Member Group (YMG) tagja.

**Dr. Nemes Rita** (1978) okl. építőmérnök, okl. betontechnológus szakmérnök, PhD, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék egyetemi docense, Fő érdeklődési területei: speciális betonok, roncsolásmentes vizsgálatok, tartósság vizsgálatok, építőipari hulladékhasznosítás. A fib Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

**Szoby Tivadar Tamás** (1994) építőmérnök hallgató a Széchenyi István Egyetem Építész-, Építő- és Közlekedésmérnöki Karán, szerkezetépítési szakirányon. 2015-2019 között Szenavis Betonkenu csapattag és a laboratóriumi munkák résztvevője.

**Pollák András** (1987) építőmérnök, tanszéki mérnök, laboratóriumvezető a Széchenyi István Egyetem Építészeti és Épületszerkezet-tani tanszék Építőanyagvizsgáló és Épületfizikai laboratóriumán. Fő érdeklődési területei: különleges betonok, betonok és szerkezetek műszeres vizsgálatai.

**Nasios Theofanis** (1990) építőmérnök (BSc) (1990) **építőmérnök** (BSc), a BME ösztöndíjas hallgatója

**Dr. Nehme Salem** (1963) okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: a beton porozítása, a betonok és öntömörödő betonok tartósságának összefüggése a porozítással, az öntömörödő betonok és acélzászaló öntömörödő betonok alkalmazása a beton és vasbeton megerősítésében, az öntömörödő betonok tömegbetonként történő alkalmazási problémáinak megszüntetése. A Magyar Mérnöki Kamara (T1-01-9159), a fib Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

#### FROST RESISTANCE OF SELF-COMPACTED HIGH-STRENGTH CONCRETE PRODUCED WITH RECYCLED INDUSTRIAL WASTE MATERIAL

**Mohammed Abed - Rita Nemes - Tivadar Szoby - András Pollák - Theofanis Nasios - Salem Nehme**

Freeze/thaw tests for twenty-one self-compacting high performance concrete (SCHPC) mixtures have been conducted to investigate the impact of using coarse recycled concrete aggregate (RCA) and three other unprocessed waste powder materials: unprocessed waste fly ash (UWFA), waste perlite powder (WPP), and waste cellular concrete powder (WCCP). Internal frost damage and frost scaling tests have been investigated at age of 270 days to figure out the freeze/thaw resistance of the green SCHPC. The results showed that using RCA has no significant effect on the freeze/thaw resistance of SCHPC when used up to 50% for producing SCHPC. Concretes produced using UWFA or WPP as a replacement of cement mass up to 15% showed excellent durability performance regardless if the aggregate used was natural aggregate (NA) or RCA. SCHPC proved it can be produced as a green concrete, where the pozzolanic activity and the amorphous waste powder materials help the concrete resist aggressive environments. Using WCCP is not recommended for the purpose of enhancing the durability of SCHPC, as well as excessive replacement amounts of either WPP or UWFA.