



Fehérvári Sándor

## ELTÉRŐ KORBAN HŐTERHELTE HOMOGÉN ÉS HETEROGÉN CEMENTKÖVEK TULAJDONSÁGAINAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

### Absztrakt

A betonszerkezetekre leselkedő legrombolóbb hatást a tűz és a magas hőmérséklet jelenti. A betonszerkezetek nagy hőmérsékleti viselkedésének jobb megismerése érdekében homogén és heterogén cementköveken végeztünk vizsgálatokat. Homogén Portlandcementek esetében 3 víz-cement tényezővel (0,3; 0,25 és 0,222), 3 vizsgálati korban (28, 90 és 180 nap) hajtottuk végre a vizsgálatokat nyolc hőlépcsővel (20-900 °C). Heterogén cementkövek esetén megegyező korban és hőlépcsőkkel, konstans víz-finomrész tényező megtartása mellett két adagolással (20% és 35%) végeztük el vizsgálatainkat. A felhasznált cementkiegészítő anyagok a kvarcliszt, a magnetit, a bórkarbid, a samottliszt és a perlitliszt voltak. Vizsgálataink során megállapítottuk, hogy a homogén Portlandcementk esetében, 200-300 °C környezetében jelentkező lokális szilárdsági maximumhelyek az idő múlásával, 28 és 180 napos kor között, 10-30%-kal csökkennek oly módon, hogy a kiindulási szilárdság 85%-át egy esetben sem múlják alul. A lokális szilárdsági maximumpontok csökkenését a Hőtűrés értékeiben is kimutattuk. A cementkiegészítő anyagok közül a bórkarbid és perlit hozott vizsgálatra érdemes eredményt. A bórkarbid esetében a maradó nyomószilárdsági értékek a 600 és 900 °C-on vizsgált próbatestek között, minden korban és víz-finomrész tényező mellett, növekedtek elérve a kiindulási szilárdság 43-56%-át. A perlit adagolásával készített cementkövek szilárdságai minden esetben elérték, vagy meghaladták a kiindulási szilárdság 80-90%-át egészen a 600°C-os hőterhelési értékig.

**Kulcsszavak:** cementkő, cementkiegészítő-anyagok, reziduális nyomószilárdság, bórkarbid, perlit



## COMPARISON OF PROPERTIES OF HOMOGENOUS AND HETEROGENOUS HARDENED CEMENT PASTS EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE AT DIFFERENT AGES

### Abstract

Fire and high temperatures are the most destructive effect on concrete structures. To better understand the behaviour of the concrete exposed to high-temperature series of tests were carried out on homogenous and heterogenous hardened cement pastes. At three ages (28, 90, and 180 days) with three water-cement ratios (0.300; 0.250; 0.222), at eight different heat steps (from 20 °C to 900 °C), pure Ordinary Portland cement was tested. A study at the same ages and heat steps on heterogenous cements with two dosages (20% and 35%) of cementitious material with constant water-fine ratio was also carried out. The examined fines were powdered quartz, magnetite, boron carbide, powdered chamotte, and powdered perlite. Our experiment showed that the local maximum value between 200-300 °C of the relative residual compressive strength of Ordinary Portland Cement specimens decreased 10-30% from the values of 28 days old specimens to the 180 days old samples. However, the lowest strength value was at least 85% of the initial strength. The disappearance of the local strength maximum points is also noticeable in the rates of the Integrated Temperature Endurance. Among the cementitious materials, boron carbide and perlite eventuated remarkable results. The boron carbide resulted residual strength increment between 600 °C to 900 °C and ended 43-56% of the initial strength in all ages and water-fines ratios. The perlite powder containing cement pastes produced nearly constant, at least 80-90%, residual compressive strength up to 600 °C.

**Keywords:** hardened cement paste, cementitious material, residual compressive strength, boron carbide, perlite



## 1. PROBLÉMAFELVETÉS

A világ legnagyobb mennyiségben felhasznált építőanyaga és a víz után a második legnagyobb mennyiségben felhasznált anyaga a beton (Humphreys és Mahasenan, 2002). Ez a hatalmas igény egy évszázada irányítja az anyagtechnológiával foglalkozó kutatók figyelmét arra, hogy minél jobban megismerjék e heterogén anyag belső tulajdonságait, külső hatásokkal szemben történő ellenállását. A történeti anyagtan elsősorban a makrostrukturális tulajdonságokkal, a teherbírás tervezéséhez szorosan kapcsolódó jellemzőkkel foglalkozott. Az utóbbi évtizedekben vált egyértelművé, hogy „egyéb” külső hatásokkal szembeni ellenállás kérdése is legalább olyan fontos, mint a pusztán teherbírás meghatározása (Elsen et al., 2011; Lublók, 2021).

Egyértelműen kijelenthető, hogy a betonszerkezetekre ható legrombolóbb hatás a szerkezetet érő tűz láng- és hőhatása (Lublók, 2021). Az elmúlt évtizedek statisztikai elemzései igazolják továbbá, hogy a tüzesetek száma folyamatosan növekszik (Lublók, 2008; Fehérvári, 2009), melynek okai egyrészt a megnövekedett veszélyforrás-koncentrációban (több éghető anyag alkalmazása, illetve terelése a szerkezetbe; a forgalmi terhelés növekedése stb.) illetve az épületek és műtárgyak számának növekedésében keresendők.

Mindezek alapján egyértelmű, hogy az elmúlt években miért irányult számos kutatás a betonszerkezetek tűzzel szembeni viselkedésének, komplex és partikuláris tulajdonságainak megoldásai felé. Számos kutató foglalkozott magának a szerkezetnek a viselkedésével, míg mások az anyag hőmérséklettel szembeni hatásait vizsgálták.

A hagyományos Portlandcement és a heterogén cementek tűzzel szembeni viselkedésének elemzése is hosszú múltra tekint vissza. A heterogén cementekben alkalmazott cementkiegészítő anyagok használatát már több szempontból is kedvezőnek értékelték a kutatók:

1. A Portlandcement gyártása az egyik legenergia-igényesebb folyamat az építőipari alapanyag-előállításai között. Mennyiségét tekintve az egyik legjelentősebb is. Amennyiben sikerül csökkenteni a kötőanyagként használt cementben Portlandcement (klinkerek) részarányát



az világszinten is jelentősen csökkentheti az építőipar karbon-emisszióját ezáltal védve bolygónkat (Habert et al, 2020; Scrivener et al, 2018 és Fehervari et al, 2021).

2. A jól megválasztott cementkiegészítő-anyagok javíthatják a cement bizonyos tulajdonságait, kutatásom vonatkozásában a hőhatással szembeni ellenállást is. Az e körben végzett vizsgálatok értékeléséből összefoglalót a következőképpen foglalhatjuk össze:

Természetesen elsőként a cement- és betoniparban legnagyobb mennyiségben felhasznált kiegészítő anyagok, mint a mészkő- és dolomitliszt, a kohóslak, a pernye stb., kutatásai indultak meg. A vizsgálatok az egyes anyagokra különböző eredményeket hoztak (pl. Sabri et al, 2022; Fehérvári, 2016; Lublőy, 2008.; Schneider és Horvath, 2003; Wang 2008.). Megfelelő módon megválasztott kiegészítő anyagok, pl. pernye és kohósalak esetén még közepes és magas hőmérsékleti tartományban is az etalon, homogén portlandcementeknél kedvezőbb maradé tulajdonságok mutathatók ki.

Második vizsgálati körbe sorolható a kevésbé gyakori, de még mindig betontechnológiai szempontból közismert kiegészítő anyagok vizsgálatát, mint a trass, a metakaolin, a kvarcliszt és a szilikapor. Jellemzően, tekintve a célirányosabb vizsgálatokra, már a legtöbb anyag semleges vagy kedvezőbb hatásokat mutatott (pl. Lublőy et al, 2017; Abdelmalek et al, 2022).

Az anyagkutatások harmadik körébe rendelhető azok célirányos kutatások, „anyagkereséseket”, amelyek ismert, de a betontechnológiában kevésbé járatos, de még nagymennyiségben fellelhető anyagok felhasználást vizsgálták a tűzzel szembeni viselkedés szempontjából. Olyan anyagokra gondolok itt, mint a különböző pelyvák, meddő kőzetek, egyéb bánya-kőzetek stb. Jelen kutatás alapjait ezek az anyagok és ez a filozófia határozta meg.

A kiegészítő anyagokkal kapcsolatos kutatások negyedik és – jelenleg – utolsó körébe tartoznak azon anyagok, melyek kutatása még csak laboratóriumi fázisban van, nagytömegű felhasználásuk az anyag előállítási nehézségei vagy költségvonzata miatt jelenleg még nem reális. Ide sorolható pl. az aerogél betontechnológiai szempontú alkalmazásának vizsgálatát is (Stefanidou és Vasiliki, 2020).

Az anyagi összetétel hatásainak vizsgálata mellett fontos, hogy az adott anyag hőhatással szembeni viselkedését az idő függvényében (28 napos minősítési kortól egészen 180 napos korig) is vizsgáljuk. A kutatás prekonceptiója szerint a cement ismert időbeni változásai hatással lehetnek a hővel szembeni viselkedésre is.



A vizsgálatok előtt tisztázni kell a cementkőben hő hatására bekövetkező alapvető, mind a mikro-, mind a makrostruktúrát érintő változásokat:

- A hőmérséklet emelkedésével először a beton pórusaiban található, szabad víz távozik (30-120 °C).
- 140-180 °C között megtörténik az ettringit és a monoszulfát vízvesztése (Schneider és Horvath, 2002).
- 300 °C-tól tapasztalható a mikrorepedések számának és a cementkő porozitásának jelentős növekedése (Alonso et al 2003; Short és Purkiss, 2004).
- 373 °C, vagyis a víz hármaspontja felett folyékony halmazállapotú víz a rendszerben már nem lehet (Alonso et al, 2003).
- 400 °C környezetében megtörténik a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dehidratációja.
- 800 °C-on a  $\text{CaCO}_3$  hőbomlás is megtörténik.
- 850-1000 °C a CSH kristályok bomlása is megkezdődik (Khoury et al, 2002).

## 2. KÍSÉRLETI PROGRAM

A jelenleg bemutatandó kísérletsorozat során az alábbi kérdésekre kerestük a választ:

- A jelenlegi gyakorlat szerint „ritkábbnak” nevezhető cementkiegészítő anyagoknak a cementkő reziduális tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálata.
- A kor hatása mind a homogén, mind a heterogén cementkövek reziduális tulajdonságaira.

Fenti kérdések vizsgálatához egyedi kísérleti programot állítottunk össze és hajtottunk végre az alábbiak szerint:



## 2.1. Felhasznált anyagok, próbatestek

A kísérletsorozat során egységesen CEM I 42,5 N homogén portlandcementet alkalmaztunk.

A heterogén cementek vizsgálata során nem gyártóművi keverékeket alkalmaztunk, hiszen jó pár, vizsgálatra szánt anyagnál ilyenre nem is lett volna lehetőség, hanem a pontos, egyenletes és ezáltal jobban összehasonlítható adagolás érdekében a homogén portlandcementet kevertünk össze megfelelő arányban a vizsgálni kívánt kiegészítő anyaggal, illetve anyagokkal.

A kísérletsorozat során felhasznált kiegészítőanyagok a kvarcliszt, a magnetit, a bórkarbid, samottliszt és a perlitliszt voltak.

Kizárólag 0,063 mm alatti szemcseméretű kiegészítő anyagot alkalmaztunk.

A teljes vizsgálatsorozat során, egységesen 30 mm élhosszúságú kockákat alkalmaztunk.

## 2.2. Összetétel

A homogén portlandcement vizsgálatához három víz-cement tényezőt alkalmaztunk. Ezek rendre 0,300; 0,250 és 0,222 voltak. A keverékekhez a kiegészítőanyagokból a cement tömegére vonatkoztatva 20%, illetve 35% adagoltuk. A portlandcemente vonatkoztatott elméleti víz-cement tényezőt 0,3 értéken tartottuk, így a heterogén cementekre megállapítható víz-cement tényező (más értelmezés szerint víz/finomrész tényező) a 20%-os adagolás esetén 0,250 értékre, míg 35%-os adagolás esetén 0,222 értékre adódott.

## 2.3. Próbatestek készítése

A meghatározott összetételű receptúrákat habarcskeverővel dolgoztuk össze.. A bedolgozáshoz szükséges konzisztenciát polikarboxilát-éter alapú folyósítószer (MasterGlenium SKY 8330, korábban, mint Glenium C330 ismert) alkalmazásával állítottam be. Az alkalmazott adagolás a homogén portlandcement tömegére vetítve 0,2-1,3% között mozgott. Heterogén víz-cement tényezőre vonatkoztatva ezek az értékek rendre 0,15-1,0% voltak.

Az egy receptúrához tartozó összes próbatestet (120 db.) egy keverési és bedolgozási folyamattal állítottuk elő, így az egyes keverések közötti esetleges eltérésekből származó anomáliákat ki tudtuk zárni, összehasonlító-vizsgálatokra nem volt szükség.





A próbatesteket 1 napos korukig laboratóriumi körülmények között tartottuk úgy, hogy a sablonokat a gyorskiszáradás elkerülés érdekében letakartuk. A próbatesteket 1 napos korukban zsaluztuk ki majd  $20 \pm 2$  °C-os vízzel telt kádakba helyeztük el. A tárolókádakban a vizet  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  adagolással kezeltük, hogy a mészkioldást minél jobban meggátoljuk. A vegyes tárolás szabályainak megfelelően a vízből 7 napos korban kerültek ki a próbatestek, melyeket ezek után a vizsgálatig, kisebb légréssel tálcákra sorakoztatva, laboratóriumi környezetben tároltuk. A vegyes tárolás segítségével a próbatestek (szabad)víz-tartalma kellő mértékben lecsökkent így a vizsgálatok előtt további szárításra nem volt szükség.

## 2.4. A vizsgálat

A fenti módon elkészített mintákból elállított csoportokat rendre 28 napos, 90 napos és 180 napos korban vizsgáltam. Az előkészített próbatestek tömegét és geometriai méreteit mind a hőterhelés előtt, mind azt követően lemértük, így a tömegváltozásra és hozzávetőlegesen a térfogat és testsűrűség-változásra is eredményeket kaptam. A mérések elvégzése után a próbatestek törőerejét roncsolásos vizsgálattal állapítottuk meg. A vizsgálatok során erővezérelt törőgépet használtunk, a terhelési sebesség  $0,45 \text{ kN/s}$  volt, ami megfelel a  $0,5 \text{ MPa/s}$  feszültségváltozási sebességnek. Az így kapott eredmények segítségével határozzuk meg a nyomószilárdságokat. A próbatestek hőterhelés utáni eredményei így értelemszerűen a visszahűlt állapotot tükrözik, mely elfogadott módszert jelent a témával foglalkozó szakirodalomban fellelhető adatok szerint. A vonatkozó összehasonlító kutatások alapján a biztonság javára történő közelítés, hiszen a „meleg” állapotú szilárdsági eredmények jellemzően nagyobb, vagy legfeljebb azonos szilárdsági paraméterekkel rendelkeznek, mint amit a „visszahűlt” próbatesteken mérhetünk.

A kísérletsorozat során a hőterhelés hatásainak vizsgálatára 8 hőlépcsőt jelöltünk ki. Az összehasonlítás célját szolgáló laboratóriumi állapotú, hőterheletlen próbatestek (továbbiakban a  $20$  °C-os jelzővel ellátott minták) mellett elektromos fűtésű kemencékben előállított  $50$  °C,  $100$  °C,  $150$  °C,  $200$  °C,  $300$  °C,  $600$  °C és  $900$  °C hőmérsékletnek tettük ki a próbatesteket. A hőközelés időtartama egységesen  $120$  perc volt.



## 2.5. A kísérleti mátrix

Fenti leírásból látható, hogy számos paraméter változott a végrehajtott kísérletsorozatok során.

Homogén portlandcementek esetében a kísérleti változók a víz/cement tényező (3), a vizsgálati hőmérséklet (8), és a kor (3) voltak. A homogén portlandcementekkel végzett kísérletek összefoglaló mátrixát az 1.-es táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A homogén portlandcementek kísérleti mátrixa

Vizsgált darabszám									
kor	v/c	Hőterhelés hőmérséklete [°C]							
		20 °C	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C	300 °C	600 °C	900 °C
28 nap	0,300	5	5	5	5	5	5	5	5
	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5
	0,222	5	5	5	5	5	5	5	5
90 nap	0,300	5	5	5	5	5	5	5	5
	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5
	0,222	5	5	5	5	5	5	5	5
180 nap	0,300	5	5	5	5	5	5	5	5
	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5
	0,222	5	5	5	5	5	5	5	5

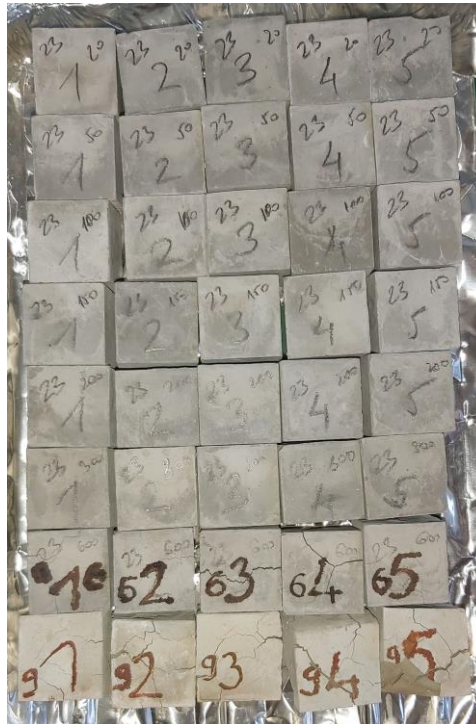
Kiegészítőanyagok segítségével előállított heterogén cementek vizsgálata során változó paraméterek voltak a kiegészítő anyag fajtása (5), az alkalmazott keverési arány és így a heterogén víz/cement tényező (2), a vizsgálati hőmérséklet (8) és a kor (3). A heterogén cementekkel folytatott kísérletek összefoglaló kísérleti mátrixát az 2.-es táblázat tartalmazza.

Mindösszesen 1560 db. próbatest vizsgálatára került sor a kísérletsorozat során.





Egy adott korú, víz-cement tényezőjű és kiegészítő anyag tartalmú próbatestersorozatot mutat a 1. ábra.



1. ábra: Egy sorozat próbatest a hőterhelés után (a 600 és 900 °C hőterhelt próbatestek feliratozására vasklorid oldatot kellett használni, mivel a ceruzafelirat eltűnhetett a próbatestről)

2. táblázat: A heterogén cementek kísérleti mátrixa

Vizsgált darabszám										
kor	kiegészítő- anyag	v/c	Hőterhelés hőmérséklete [°C]							
			20 °C	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C	300 °C	600 °C	900 °C
28 nap	kvarcliszt	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5
	magnetit	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5
	bórkarbid	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5



	samottliszt	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
	perlitiszt	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
90 nap	kvarcliszt	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
	magnetit	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
	bórkarbid	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
	samottliszt	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
	perlitiszt	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
	180 nap	kvarcliszt	0,250	5	5	5	5	5	5	5	5
			0,222	5	5	5	5	5	5	5	5
magnetit		0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
bórkarbid		0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
samottliszt		0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	
perlitiszt		0,250	5	5	5	5	5	5	5	5	
		0,222	5	5	5	5	5	5	5	5	



## 2.6. Az eredmények értékelésének módszerei

Az eredmények értékelésére az alábbi lehetőségek állnak rendelkezésre:

- Abszolút szilárdsági adatokból szerkesztett diagrammok. Ez a fajta ábrázolás az egyes anyagtípusok adott hőmérsékleten tapasztalt szilárdsági paramétereinek összehasonlítását teszi lehetővé.
- Relatív szilárdsági adatok esetén lehetőségünk van az egyes anyagtípusok viselkedésnek grafikus összehasonlítására.
- A kiindulási hőmérséklettől eltérő alapra skálázott (pl. 300 °C) relatív szilárdsági adatok összehasonlítása.
- A hőtűrés módszere, mely során a relatív szilárdsági adatok diagramja alatti terület kerül meghatározására. A hőterhelést, mint határozott integrált, értelmezhetjük a teljes hőmérsékleti tartományban (20-900 °C) vagy annak csak egy szakaszában (pl. 300-900 °C) között is.

## 3. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az elvégzett vizsgálatok során, a számos kísérleti változó és hőlépcső miatt számos eredménygörbe meghatározása vált lehetségessé. Az eredmények feldolgozást elősegítette, a vizualizációt javította az eredmények feldolgozásának fent bemutatott, számos módja, ugyanakkor ez a megkapott diagrammok számát is jelentősen növelte. Terjedelmi okokból nem foglalkozunk a szokványos, illetve a korábbi nemzetközi gyakorlat által már közölt folyamatok megjelenítésével. Mindazonáltal a feldolgozás után megállapítottuk, hogy a szakirodalomból ismert folyamatok, az elvárásoknak megfelelően, a tárgyi kísérletsorozatnál is megjelentek:

- A víz-cement tényező csökkenésének hatására, a vizsgált tartományban és technológiai paraméterek mellett a kiindulási nyomószilárdság növekedése tapasztalható.
- A vizsgált receptúráknál jellemzően 300 °C-os hőmérsékleti tartományig jelentős szilárdság-csökkenés nem tapasztalható.



- Több esetben megjelenik a 150-300 °C tartományban a szakirodalomból és korábbi kísérleteimből ismert lokális maximum.
- A kvarcliszt általános kedvező hatását a korábbi kísérleteinkkel (Fehérvári és Nehme, 2009) megegyező módon, de más cementfajttal és adagolással is sikerült kimutatni.

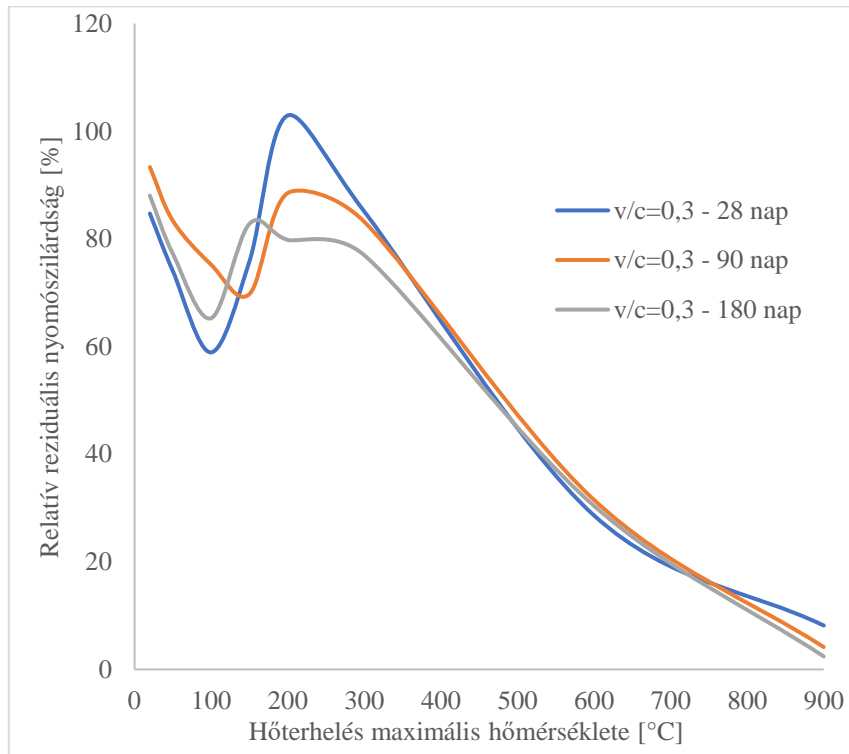
A vizsgálati eredményekből több új, eddig nem publikált eredmény kimutatása vált lehetségessé, amelyek az anyag viselkedése, illetve a tűzhatására bekövetkező szilárdság csökkenés mérséklésének új aspektusaira hívják fel a figyelmet.

### 3.1. Új eredmények

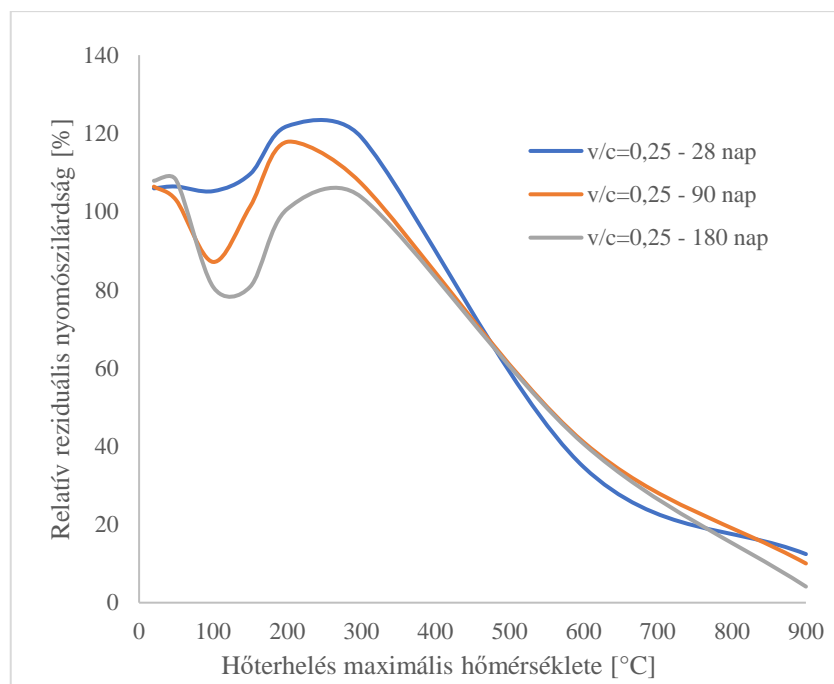
A homogén portlandcementeire vonatkozó kísérleti eredmények értékelésénél a szokványos 28 napos korú vizsgálatoknál, a 200-300 °C zónában, kísérleti paraméterektől függő módon, de mindig megfigyelhető egy szilárdsági lokális maximumhely. Ennek a maximumhelynek a léte jól ismert és oka visszavezethető a hő hatására felszabaduló, addig fizikailag és kémiaailag kötött víz és a részben hidratálatlan cement közti utóhidratációs jelenségek szilárdságnövelő hatására (Fehérvári, 2016).

Az ismert folyamat korfüggőségének vizsgálatokor megállapítottuk, hogy a lokális maximumhelyek értékei vizsgálva az adott víz-cement tényezőt és hőfokot rendre csökkenő tendenciát mutatnak. A csökkenés mértéke 10 és 30% közötti értékre tehető összevetve a 28 és a 180 napos értékhez tartozó kiugró lokális maximumhelyekhez. Meg kell jegyezni ugyanakkor a kiindulási érték 85%-a alá még a legnagyobb lokális szilárdságcsökkenés esetén sem kerültek az értékek. A három-három eredményből szerkeszthető görbék jellege arra enged következtetni, hogy a folyamat végértékhez tart, de ennek bizonyítását további, hosszabb időtávot átfogó kísérletsorozattal kell alátámasztani.

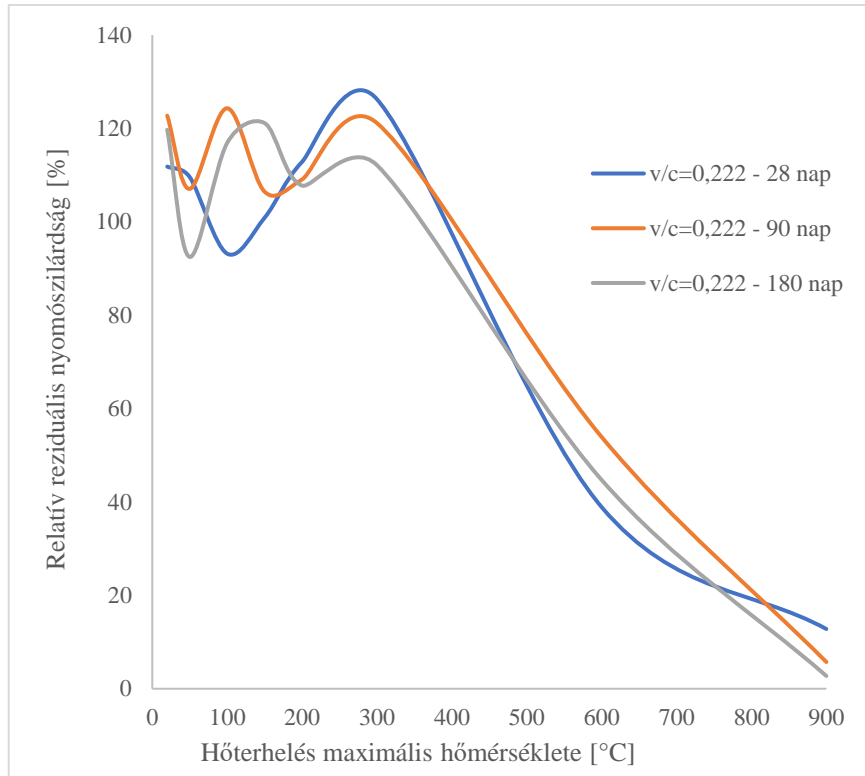
A relatív reziduális nyomószilárdság eredménygörbéi a 2.-4. ábrán láthatóak. Mindhárom görbeseregénél megfigyelhető a lokális maximum folyamatos, monoton csökkenése.



2. ábra: Homogén portlandcement relatív reziduális nyomószilárdsága a kor függvényében, víz-cement tényező 0,3



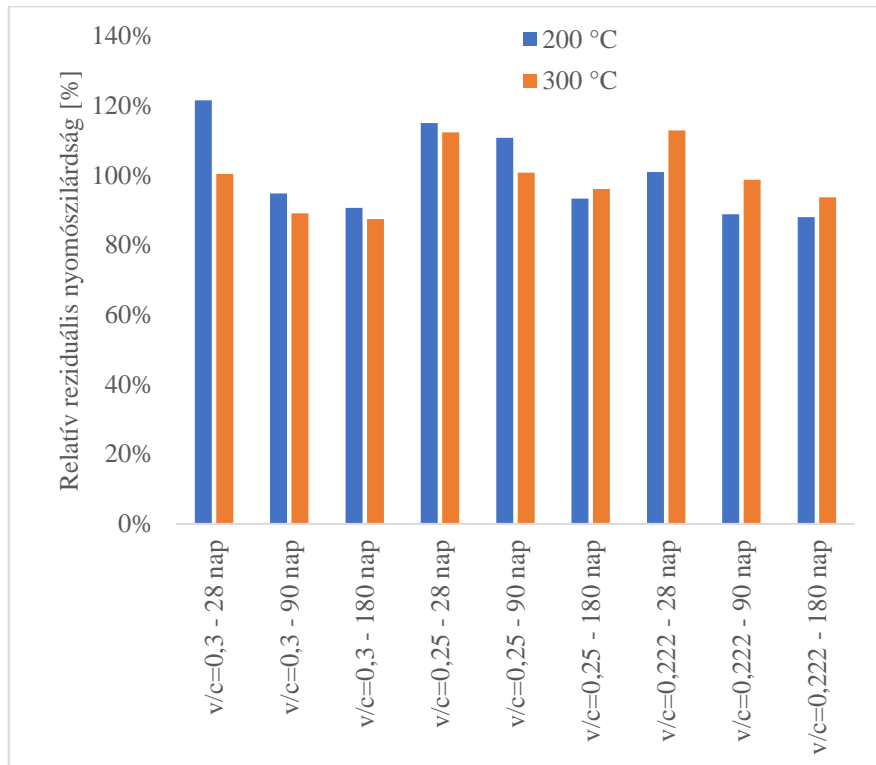
3. ábra: Homogén portlandcement relatív reziduális nyomószilárdsága a kor függvényében, víz-cement tényező 0,250



4. ábra: Homogén portlandcement relatív reziduális nyomószilárdsága a kor függvényében, víz-cement tényező 0,222

Az 5. ábrával kapcsolatban külön kiemelés érdemel a 200 °C és 300 °C hőterheléshez tartozó, 20 °C-os eredményhez viszonyított relatív reziduális nyomószilárdság értékeit. A monoton csökkenés minden hármas csoportban jól megfigyelhető.



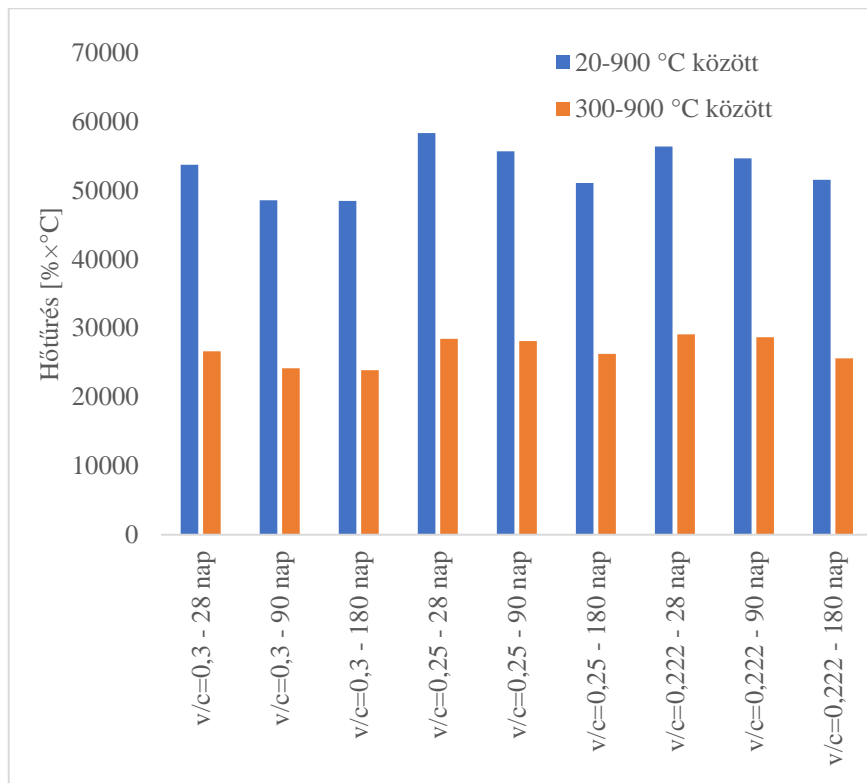


5. ábra: Homogén portlandcement relatív reziduális nyomószilárdsága 200 és 300 °C értéken (viszonyítási alap a 20 °C-os érték), a kor és a víz-cement tényező függvényében

A hőtűrés értékek vizsgálatával egy-egy értékke vonhatóak össze a relatív maradó nyomószilárdságok görbéi. A homogén Portlandcementek vizsgálatokor előállított 3×3 eredmény sor vizsgálatokor már a görbék alakja is felhívta a figyelmet arra, hogy a kiindulási, tehát laborkondíciójú szilárdságok közel azonos volta mellett a hőterhelt próbatestek a maradó nyomószilárdságában a kor előrehaladtával rendre csökkenő tendencia tapasztalható.

A csökkenés tendenciája folyamatos és minden víz-cement tényező esetén megfigyelhető.

A hőtűrés értékeinek meghatározásakor a görbék alakjáról megfigyelt tendencia számszerű értéket öltött. Egyértelműen megállapíthatóvá vált, hogy mind a teljes (20-900 °C), mind a nagy (300-900 °C) hőmérsékleten értelmezett hőtűrés esetén monoton csökkenő tendenciát tapasztalhatunk. A hőtűrés értékei a 6. ábrán láthatóak. A csökkenés értéke a két szélső érték között 10-13% a teljes, míg 8-11% a nagy hőmérsékleten értelmezett hőtűrés esetén.



6. ábra: Homogén portlandcement Hőtűrése a kor és a víz cement tényező függvényében

A vizsgálat kiegészítő-anyagok közül különösen a bór-karbid és a perlitliszt anyagokkal értünk el figyelemre méltó eredményeket.

A bórkarbid kiegészítőanyag tartalmú próbatetek hőterhelési utáni első szemrevételezése során már felmerült, hogy míg a 600 °C hőterhelésnek kitett próbatetek esetén a kinézet nem jelentősen tér el a „szokásos”, már több ezerszer látott cementkocka kinézettől, a 900 °C-os kemencéből kikerülő majd visszahűlő próbatetek jelentős változáson mentek át. Szerkezeti integritásuk meglepően egységes volt, felületükön fényes fémek jelentek meg, a próbatetek felszíne általában fényesebbé vált, amint az a 7. ábrán is szemléletesen látható.

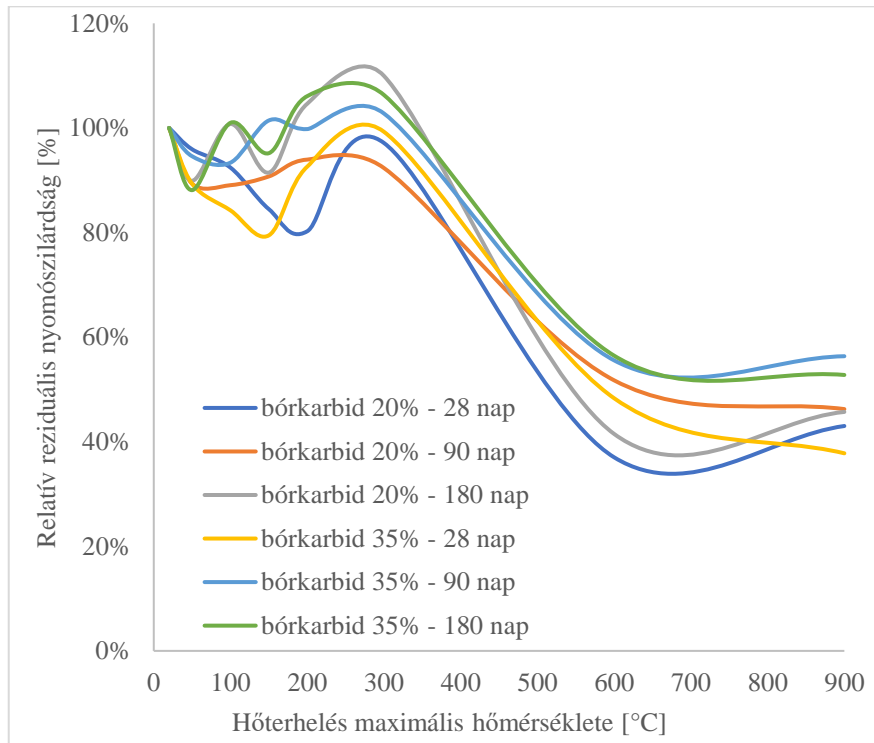


7. ábra: 900 °C hőmérsékleten hőterhelt, bórkarbid kiegészítőanyag tartalmú próbatest

A nyomószilárdságok megállapítása után egyértelművé vált, hogy a 900 °C hőterhelés anyagszerkezeti változásokat eredményezett, hiszen a nyomószilárdság értéke jellemzően azonos szinten maradt, vagy meg is haladta a 600 °C-on hőterhelt próbatesteken mérhető nyomószilárdságokat. A pozitív hatás különösen szembeötlő, ha figyelembe vesszük, hogy a homogén portlandcementeken mért maradó nyomószilárdság 900 °C-os hőterhelés után jellemzően 2-10% között mozog, addig bórkarbid adagolásával ez az érték 43-56 %-ra adódott.

A hatás jellege független a víz-cement tényezőtől és a vizsgálati kortól.

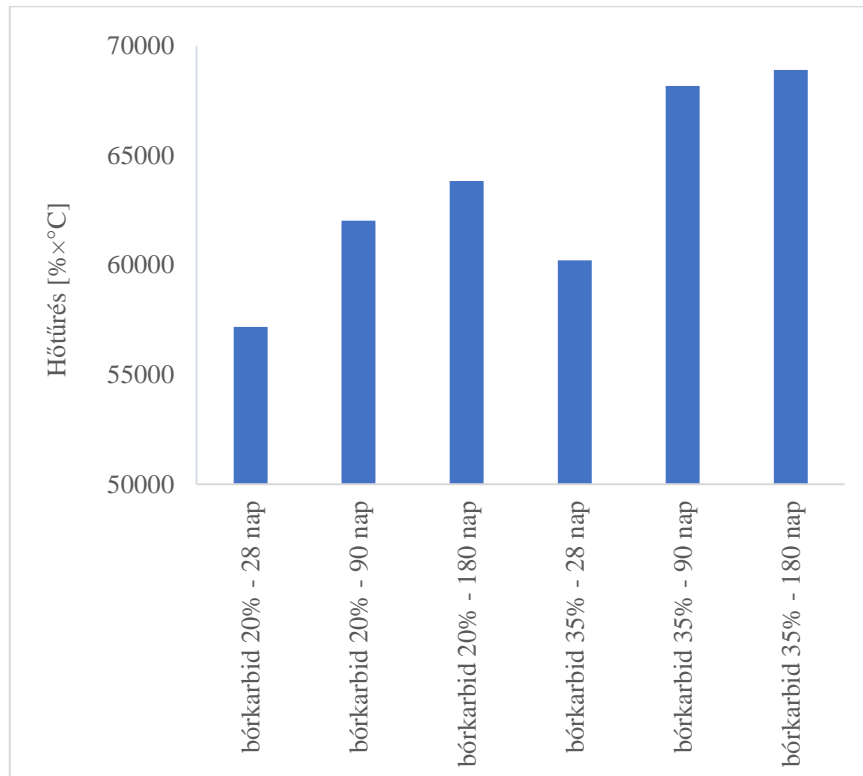
Az összefoglaló eredménygörbéket a 8. ábrán mutatjuk be. Az eredményeket szemeltetésen igazolja a 600 °C után tapasztalható a korábbiaktól szokatlan viselkedési jelleg.



8. ábra: Bórkarbid kiegészítőanyag tartalmú heterogén cementkövek relatív reziduális nyomószilárdsága a kor és a víz-cement tényező (20% :  $v/c = 0,25$ ; 35% :  $v/c = 0,222$ ) függvényében

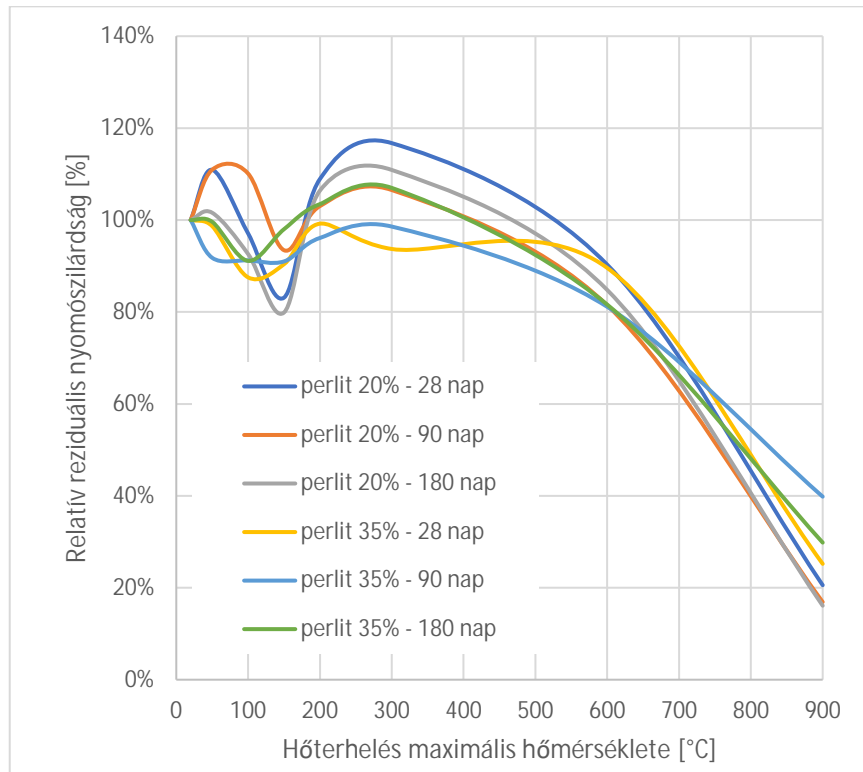
A bórkarbid próbatestek relatív nyomószilárdsági eredményeinek értékelésekor is elvégeztük a hőtűrés meghatározását. Nyilvánvaló, hogy a korábban ismertetett, „szokatlan” viselkedés miatt a minták hőtűrése kedvező értéket kell, hogy mutasson. Az eredmények korfüggősége ugyanakkor további eltérést mutatott a szokványos portlandcement-jellegű viselkedéstől.

Megállapítottuk, hogy a homogén portlandcementektől eltérően a kor előrehaladtával a hőtűrés értéke növekszik, vagyis a cementkövek kedvezőbb maradó nyomószilárdsági eredményekkel rendelkeznek. A hőtűrés összefoglaló eredményei a 9. ábrán láthatóak, ahol a két darab hármas csoport viselkedésében egyértelműen megfigyelhető a növekvő tendencia.



9. ábra: Bórkarbid kiegészítőanyag tartalmú heterogén cementkövek hőtűrése a kor és a víz-cement tényező (20% :  $v/c = 0,25$ ; 35% :  $v/c = 0,222$ ) függvényében

A perlit kiegészítőanyag adagolású heterogén cementkövek viselkedése kevésbé nevezhető atipikusnak mint, amit a bórkarbid esetében láthattunk, ugyanakkor a tervezés szempontjából lényeges tartományokban rendkívül kedvező hőterhelés utáni reziduális szilárdsági jellemzőkkel rendelkezik. Kijelenthető, hogy a relatív hőterhelés utáni reziduális nyomószilárdsági eredményei egészen a 600 °C-os hőterhelési értékig megtartják a rendkívül magas, 80-90% közötti értékeket. A perlit alkalmazásával a cementkő szilárdsága így, tervezési szempontból jó közelítéssel, egészen 600 °C-os hőmérsékletig közel konstansnak feltételezhető. A vizsgálati eredménygörbék a 10. ábrán láthatóak, ahol megfigyelhető a közel konstans viselkedés. Mindezek alapján egyértelműen javasolható a perlit, mint cementkiegészítő anyag további vizsgálata mind cementköveken, mind betonokon.



10. ábra: Perlit kiegészítőanyag tartalmú heterogén cementkövek relatív reziduális nyomószilárdsága a kor és a víz-cement tényező függvényében

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A homogén és heterogén cementkövek hőhatás utáni reziduális tulajdonságainak meghatározása jelentős kutatási iránya korunk betontechnológiájának. A jelen cikkben tárgyalt vizsgálsorozat ebbe a rendszerbe illeszkedik, vizsgálva mind a homogén Portlandcement maradó tulajdonságainak időfüggését, mind különböző, ritkábban alkalmazott cementkiegészítő anyag hatását a heterogén cementkőre. A több, mint 1500 próbatesttel elvégzett vizsgálat során, 20 °C és 900 °C között, mindösszesen nyolc hőlépcső segítségével, három korban vizsgáltuk a visszahűlt, 30 mm élhosszúságú, cementkő próbatestek maradó nyomószilárdságát.

A homogén Portlandcementekkel elvégzett vizsgálatok során kimutattuk, hogy mindhárom vizsgált víz-cement tényező esetén a 28 napos korban, a 200-300 °C-os zónában jól





megfigyelhető, lokális szilárdsági maximumhely csökken. A relatív reziduális nyomószilárdsági görbe alatti terület mérőszámaként bevezetett Hőtűrés értékek is mindhárom víz-cement tényező esetén alátámasztották a csökkenés jelenségét.

A heterogén cementkövekkel végzett vizsgálatok során 20%, illetve 35%-os adagolás mellett a kvarcliszt, a magnetit, a bórkarbid, samottliszt és a perlitliszt kiegészítő anyagokat alkalmaztunk állandó víz-finomrész tényező megtartása mellett. Az alkalmazott kiegészítő anyagok közül a bórkarbid és a perlit tűnt ki kifejezetten kedvező tulajdonságaival. A bórkarbid esetén a 900 °C-on hőkezelt próbatesteknél, a 600 °C-on vizsgáltkához képest, szignifikáns maradó szilárdsági növekedést tapasztaltunk mely végértékben a kiinduló szilárdság közel 50%-át is képes volt kimutatni. A hőtűrés értékei – a vizsgált homogén Portlandcementekéhez képest – a kor előrehaladtával folyamatosan emelkedtek. A perlitliszt adagolásával ugyanakkor 600 °C-ig közel állandó maradó szilárdsági értékeket sikerült kimutatni minden vizsgálati korban.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetünket fejezzük ki a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékének a felhasznált anyagok, a laboratóriumi felszerelés és a laboratóriumi asszisztencia biztosításáért. Külön köszönjük Dr. Salem G. Nehme tanszékvezető úrnak segítségét.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

Abdelmelek, N., Lubloy, E. The impact of metakaolin, silica fume and fly ash on the temperature resistance of high strength cement paste. *J Therm Anal Calorim* 147, 2895–2906 2022. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10700-x>

Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. és Khoury, G. A. Effect of Heat on Concrete: Microstructure – Solid Phase. Course on Effect of Heat on Concrete. International Centre for Mechanical Sciences. 2003. június 9-13., Udine, Olaszország



- Elsen, J., Mertens, G., Snellings, R. Portland cement and other calcareous hydraulic binders: History, production and mineralogy. In: Christidis, G. E. Advances in the characterization of industrial minerals. European Mineralogical Union and the Mineralogical Society of Great Britain & Ireland. Egyesült Királyság. 2011. <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.9.11>
- Fehervari, A., Gates, W.P., Gallage, C., Collins, F. A. Porous Stone Technique to Measure the Initial Water Uptake by Supplementary Cementitious Materials. Minerals. 2021. 11. 1185. <https://doi.org/10.3390/min11111185>
- Fehérvári, S. Betonösszetevők hatása az alagútfalazatok hőtűrésére. PhD értekezés. BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék. Budapest. 2009.
- Fehérvári, S. Betonösszetevők hatása az alagútfalazatok hőtűrésére. ISBN: 9783330813208. Globedit. Németország. 196 p. 2016.
- Fehérvári, S., Nehme, S.G. How portland and blended cements resist high temperatures of tunnel fires?. in Concrete Structures. 2009. pp 24-29. 2009.
- Habert, G., Miller, S.A., John, V.M. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nat Rev Earth Environ 1, 559–573. 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Humphreys, K; Mahasenana, M. Towards a sustainable cement industry. Substudy 8: Climate change. Svájc. 61 p. 2002.
- Khoury, G. A. Majorana, C. E. Pesavento, F., Schrefler, B. A. Modelling of heated concrete. Magazine of Concrete Research. 54/2. pp 77-101. 2002.
- Lublóy, Majorosné É. E. Betonanyagú szerkezetek tűzállósága. Akadémiai doktori értekezés. MTA. Budapest. 111 p, 2021. <http://real-d.mtak.hu/1401/>
- Lublóy, Majorosné É. E. Tűz hatása betonszerkezetek anyagaira. PhD értekezés, BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék. Budapest. 2008
- Lublóy, É., Kopecskó, K., Balázs, Gy. L. Restás, Á., Szilágyi, I. M. Improved fire resistance by using Portland-pozzolana or Portland-fly ash cements. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 129, pp 925-936. 2017.



Sabri, M.Z.H.A., Malek, R.A., Omar, A.A., Ismail, K.N., Study of Fly Ash Concrete Exposed to Elevated Temperature. KEM. 2022. <https://doi.org/10.4028/p-13p036>

Schneider, U., Horvath, J. Behaviour of Ordinary Concrete at High Temperature. Vienna University of Technology. Institute of Building Material. Building Physics and Fire Protection. Vienna, Austria, 2002, in Khroustailev, B. M., Leonovich, S. N., Schneider, U. Behaviour of Concrete at High Temperature and Advanced Design of Concrete Structures. Proceedings of the International Conference. Construction and Architecture, Minsk, 2003.

Scrivener, K.L., John, V.M., Gartner, E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cementbased materials industry. Cement and Concrete Research. 114. 2–26. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

Short, N., Purkiss, J. Petrographic Analysis of Fire-Damaged Concrete. in Gambarova, P. G., Felicetti, R., Meda, A. és Riva, P. Proceedings of the Workshop: Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?. Milan Inversity of Technology. 2004. december 2-3., pp 221-230. Milánó, Olaszország 2004.

Stefanidou, M., Vasiliki P. Influence of perlite and aerogel addition on the performance of cement-based mortars at elevated temperatures. 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 410 012111

Wang, H. Y. The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS. Cement and Concrete Composites, 30(10), 992-999. 2008.

## **Dr. Fehérvári Sándor PhD**

tanszékvezető egyetemi docens

okl. építőmérnök, okl. szerkezetépítő betontechnológus szakmérnök, okl. építőmérnök-közgazdász, jogi szakokleveles építőmérnök

Óbudai Egyetem Ybl Miklós Építéstudományi Kar Tűzvédelmi és Építőanyag-tudományi Tanszék

[fehervari.sandor@ybl.uni-obuda.hu](mailto:fehervari.sandor@ybl.uni-obuda.hu)

ORCID: 0000-0003-4680-084X