

## Ipari hulladékok újrahasznosítása beton adalékanyagként

**Kenéz Ágnes**

*BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék  
agnes.kenez@gmail.com*

**Kovács Ágnes**

*BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék  
kovacseva.bme@gmail.com*

**Rácz Annamária**

*BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék  
annamari.racz@gmail.com*

**Fenyvesi Olivér**

*BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék  
fenyvesioliver@yahoo.com*

### **Összefoglalás**

A hulladék anyagok újrahasznosítása napjainkban egyre szükségesebbé válik, nagy előnyökkel jár az alkalmazásuk nagyszilárdságú betonok adalékanyagaként. Kutatásunk témája az újrahasznosított adalékanyagokból készült könnyűbetonok szilárdságának vizsgálata hidépítési célra alkalmas tartószerkezeti elemek gyártásához. Egy ipari kutatási projekthez kapcsolódtunk, mely során főleg duzzasztott agyagkavicsot vizsgáltak. A kutatás eredményeit egészítettük ki hulladék alapanyagú könnyű adalékanyagok könnyűbetonok vizsgálatával. Kísérleteink és számításaink eredményként elmondható, hogy az eredeti célkitűzésünknek megfelelően sikerült kohósalakból nagyobb szilárdságú betont készíteni, mint a duzzasztott agyagkavicsból, metakaolin vagy szilikapor hozzáadása nélkül is. Ezt az adalékanyag váz szemeloszlásának helyes beállításával, az adalékanyag különleges vízfelvételi tulajdonságait figyelembe véve tudtuk elérni. Az építőipari hulladékból előállított téglazúzalék (mely habarcs hulladékot is tartalmazott) esetén pedig szintén sikerült szerkezeti beton előállítására alkalmas keveréket készítenünk. A kísérleti eredmények alapján alternatívát állítottunk a manapság legelterjedtebb könnyű adalékanyaggal szemben, olyan adalékanyagok felhasználásával, melyek 100%-ban ipari hulladék felhasználásával készültek.

*Kulcsszavak: könnyűbeton, kohósalak, téglazúzalék, duzzasztott agyagkavics, előregyártott beton*

### **1. BEVEZETÉS**

Napjainkban, a közönséges betonok mellett egyre elterjedtebbé válik a könnyűbetonok alkalmazása, mind nemzetközi, mind hazai szinten. A szerkezeti könnyűbeton előnyös tulajdonsága a kisebb önsúly. A szerkezeti könnyűbetont főként hidak, magasházak, héjszerkezetek vagy tengeri olajfűrótoronyok építésénél használják. (Nemes & Józsa 2010) Magyarországon a szerkezeti könnyűbetonok alkalmazása még nem annyira elterjedt, mint például a Skandináv országokban, az

USA-ban, Kanadában vagy Németországban, de reméljük, hogy a növekvő számú kutatási eredmény és tapasztalat erre fogja ösztönözni a tervezőket/építetőket.

A gazdasági és környezetvédelmi szempontok igen meghatározóak a hídszerkezetek építésénél. Jelen cikk egy ipari kutatási projekthez kapcsolódik, melyben duzzasztott agyagkavics adalékanyagú könnyűbetont fejlesztettek előregyártott hídszerkezeti elemekhez. Munkánk során olyan betonösszetételeket alkottunk, amelyek nagy szilárdságúak, gazdaságosak, és kisebb környezeti terhelés mellett alternatívát jelentenek a bányászott adalékanyagú betonok helyett.

Az Egyesült Államokban és Kanadában több mint 50 éve készítenek könnyű adalékanyagú betonból hidakat (pl. Napa folyó híd, Amerika). Európában is már az 1960-as évektől épültek ilyen szerkezetek (pl. közúti híd a Rajnán, Köln; Négyvízlás híd, Belgium; Tricastin híd, Franciaország, New Eindhoven híd Norvégia, etc.). Ezeknél a hidaknál az önsúlymegtakarítás akár 30%-os is lehet, a betonacél megtakarítás elérheti a 17%-ot, így a relatív anyagköltséget figyelembe véve a teljes megtakarítás kb. 15%. A tapasztalatokból kiindulva a 28 napos kockaszilárdság karakterisztikus értéke 39-73 N/mm<sup>2</sup> közötti érték duzzasztott agyagpala adalékanyagú betonoknál. (Raithby & Lydon 1981)

Könnnyűbetonok esetén a szokásos „szabályok” a betonösszetétel tervezésére vonatkoztatva alig alkalmazhatók, és a fellelhető szakirodalmi eredmények csak közvetett segítséget adnak.

Kutatásunk során, a Magyarországon gazdasági és környezetvédelmi szempontok alapján elérhető könnyű adalékanyagok: a téglazúzalék és a kohósalak alkalmazását vizsgáltuk, az előbbi épületek bontásakor keletkező hulladék, az utóbbi ipari melléktermék. A duzzasztott agyagkavics, melyet ma elterjedten használ az építőipar, előállításához magas költségeket von maga után (1200 °C-on égetés), és bányászott alapanyagból készül. A téglazúzalék előállításához kisméretű tömör téglát alkalmaztunk, mely habarcsot is tartalmazott. Laboratóriumi kísérleteink során a kohósalak és a téglazúzalék alkalmazását vizsgáltuk, és igyekeztünk minél optimálisabb keveréket előállítani, a lehető legjobb szilárdság elérése céljából. (Farkas et al. 2006, Ujhelyi 1960, Yang et al )

A célunk az volt, hogy bemutassuk a könnyű adalékanyagú betonok alkalmazásának előnyeit jelentősebb mérnöki létesítmények megvalósítása során, és hogy hulladék alapanyagból (tégla, kohósalak) előállítsunk laboratóriumi körülmények között olyan betonkeverékeket, melyek alternatívát jelenthetnek a leggyakrabban alkalmazott duzzasztott agyagkavics adalékanyag helyett. Továbbá a kísérleti eredményekkel be szeretnénk bizonyítani, hogy a könnyűbetonok fő profilja nem csak a hőszigetelés, emellett más, előnyös tulajdonságaik is hasznosak lehetnek.

A beton nyomószilárdságát nagyban befolyásolja az adalékanyag halmazszilárdsága és a habarcs szilárdsága, testsűrűsége, a finomrész mennyisége a keverékben, illetve a beton testsűrűsége. Ezért először az adalékanyagok (duzzasztott agyagkavics, téglazúzalék, kohósalak) fizikai tulajdonságait vizsgáltuk (vízfelvétel, halmazszilárdság, halmazsűrűség, szemcse-testsűrűség, szemeloszlás). A mért adalékanyag jellemzők alapján állítottuk össze a betonkeverékeket, melyek frissbeton testsűrűségét mértük és számítottuk, konzisztencia vizsgálatokat végeztünk, majd a megszilárdult próbatesteken nyomó-, és hajlító-húzószilárdsági vizsgálatokat végeztünk 1, 2, és 28 napos korban.



**1. ábra.**  
Kohósalak: durva és finom frakció

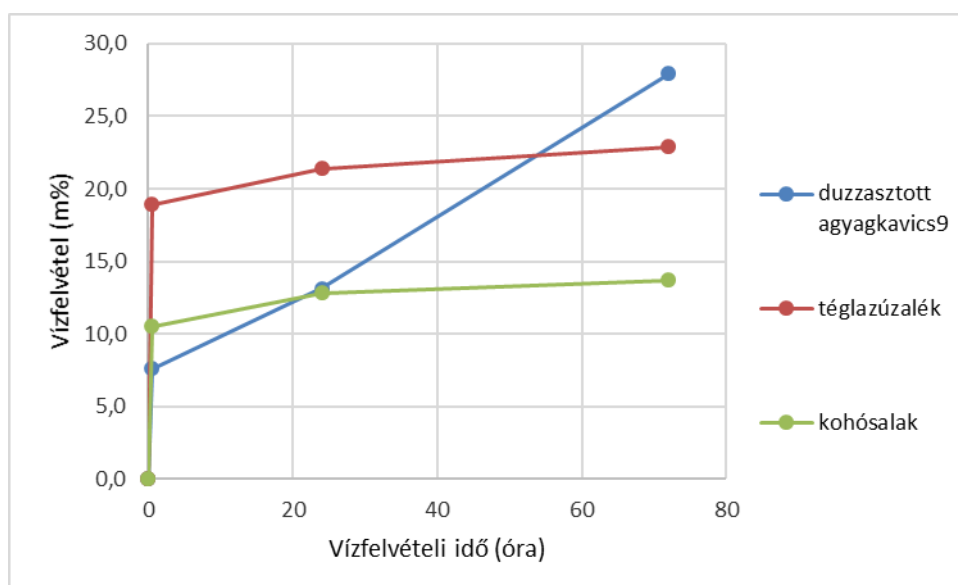


**2. ábra.**  
Téglazúzalék 8-16 mm-es frakció

## 2. ADALÉKANYAG VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

### 2.1. Vízfelvétel

A mérési eredmények azt mutatták, hogy a téglazúzalék és a nagy szilárdságú duzzasztott agyagkavics 9 vízfelvétele számottevő, míg a kohósalaké valamivel alacsonyabb (3. ábra). Fontos, hogy a kohósalak felveszi ezt a vízmennyiséget, de nem tartja magában, a nagy nyitott pórusszerkezetnek köszönhetően. Ezek alapján mindegyik betonkeveréknél többletvíz hozzáadása volt szükséges. A nagy vízfelvétel előnyös lehet olyan szempontból, hogy az adalékanyag a betont belülről utókezeli (hidratálja), ami a kezdeti zsugorodási repedések csökkenését, illetve nagyobb szilárdság kialakulását eredményezheti. Ez különösen igaz a téglazúzalékra, amit Suzuki kutatásai is alátámasztanak. (Suzuki et al. 2009) Ennek a hátulütője azonban, hogy a gyors vízfelvétel következtében a beton eltarthatósága kedvezőtlen lehet, ezért a téglazúzalék alkalmazását kifejezetten előregyártás esetében ajánljuk, ahol rövidebb eltarthatósági idő szükséges és jobban tervezhető az adalékanyag vízfelvétele miatt szükséges hozzáadott vízmennyiség. (Ujhelyi 1960)



3. ábra. Adalékanyagok vízfelvétele

### 2.2. Halmazszilárdság

A legnagyobb halmazszilárdsága a duzzasztott agyagkavics 9 típusú adalékanyagoknak van, mely elérte a  $12 \text{ N/mm}^2$  értéket (1. táblázat). Ez részben annak köszönhető, hogy az adalékanyag szemcsék gömb alakúak, ami a feszültségelvezetés szempontjából előnyös, a duzzasztott agyagkavics 7 nem gömb, és kisebb szemcse-testsűrűségű, ennek köszönhető a kisebb halmazszilárdsága is. A 8-16 frakciójú téglazúzaléknak nagyobb a halmazszilárdsága, mint a 4-8-as frakciónak, mivel a nagyobb téglaszemek kevésbé érzékenyek a zúzásra, ezért is lehet a halmazszilárdságuk nagyobb a szemcsenagyság ellenére.

1. táblázat Adalékanyagok halmazszilárdsága

Adalékanyag	Halmazszilárdság [ $\text{N/mm}^2$ ]
Duzzasztott agyagkavics9	12,52
Duzzasztott agyagkavics7	8,59
Téglazúzalék 4-8 mm	1,54
Téglazúzalék 8-16 mm	3,31
Kohósalak (finom)	1,19

### 3. KÖNNYŰBETON ÖSSZETÉTEL TERVEZÉSE

Az 2. táblázatban láthatóak a kutatás során tervezett és megkevert betonösszetételek változó paraméterei. A baloldali oszlop a durva adalékanyagok mennyiségét tartalmazza a homok (0-4 mm) frakció nélkül. A keverékeket úgy terveztük meg, hogy meg lehessen figyelni a kiegészítő anyagok (metakaolin, szilikapor) és a könnyű adalékanyag tartalom hatását is a referencia betonokhoz viszonyítva. A téglazúzalékos keverékek esetén a kvarchomok-finom téglazúzalék tartalom arányának változtatásával kísérleteztünk.

Az utolsó három sor a metakaolin (MK) és a szilikapor (SZP) adagolását is tartalmazza a cement tömegére vonatkoztatva [m%-ban].

A 19h és 20 jelű keverék egyaránt 40% téglazúzaléket tartalmazott. A különbség az volt, hogy az egyikben a 4 mm alatti frakció csak téglazúzalék a másikban fele téglazúzalék, fele pedig kvarchomok (19h jelű).

2. táblázat. Összetétel tervezési mátrix

Durva adalékanyag és kiegészítőanyag tartalom	Duzzasztott agyagkavics 7 (~8 N/mm <sup>2</sup> halmazszilárdságú)	Duzzasztott agyagkavics 9 (~12 N/mm <sup>2</sup> halmazszilárdságú)	Téglazúzalék	Kohósalak
35%	4			
40%	1	9	19h, 20	
45%	2,3	8	6	12,13
50%	5	18		21
45%+MK20%	7	17		23
45%+MK10%		10		22
45%+SZP10%		11		24

### 4. FRISSBETON VIZSGÁLATOK

A terület mérési eredmények szerint a duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 45,5-53,5 cm között volt, míg a téglazúzalékos adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 52-64 cm, illetve a kohósalak adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 38-46 cm volt. A kisebb terület esetén hosszabb tömörítési/ bedolgozási időt alkalmaztunk.

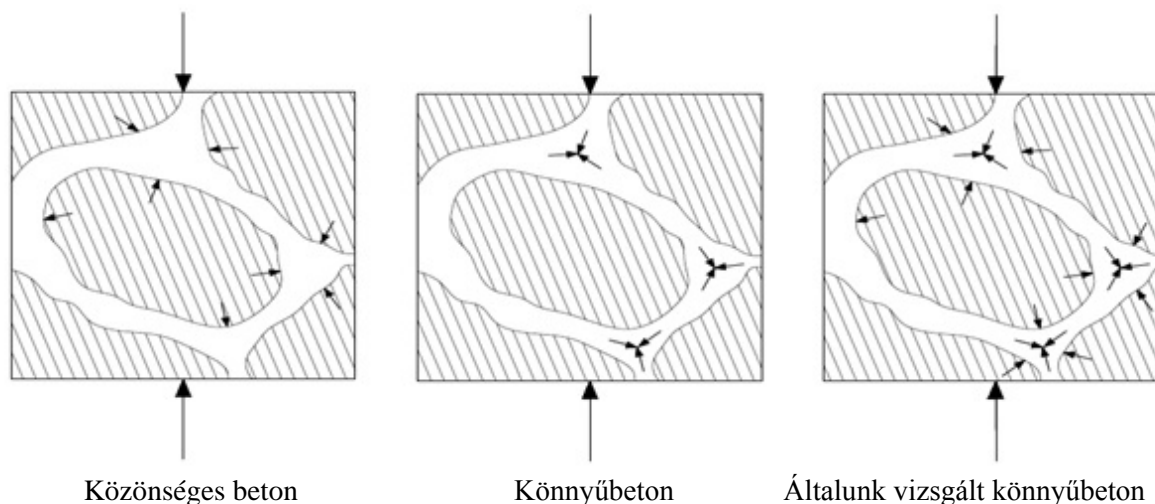
A 20.-as téglazúzalékos keveréknél több időpontban is végeztünk mérést, hogy bizonyítsuk azt a hipotézisünket, miszerint a téglá bedolgozást követően jelentős vizet szív el a betontól, ami a konzisztencia eltarthatóság szempontjából hátrányos. Az első mérés (15 perces kor) eredménye F5 területi osztályba sorolható (57/52), a második mérés 45 perc múlva történt, az eredmény F1 területi osztály (26/25). Ez alapján a téglazúzalék esetén nagyobb mennyiségű többletvíz hozzáadása javasolt, hogy a keverék még bedolgozható (min. F2 konzisztencia osztályú) maradjon.

### 5. MEGSZILÁRDULT BETON

A 3. táblázatban összefoglalt eredmények alapján a kiegészítő anyag nélküli betonok szilárdsága a polisztirol gyönggyel készített beton (cementhabarcs-mátrix, 22,1 N/mm<sup>2</sup>) és a csak cementhabarcsból készített minta szilárdsága (69,1 N/mm<sup>2</sup>) között van. Ebből látható, hogy a hagyományos könnyűbetonokkal ellentétben, esetünkben nem csak a cementkő váz vesz részt a teherhordásban, viszont nem is csak az adalékanyag-váz. Ez előnyösebbé teszi a szerkezeti könnyűbeton erőjátékát, mivel az adalékanyag és a cementkő közösen veszik fel a terheket (4. ábra). A metakaolin nagyobb mértékben növelte a szilárdságot, mint azonos mennyiségű szilikapor. A szilikapor maximális adagolása 10 tömegszázalék a cement tömegére vonatkoztatva, a keverések során ezzel dolgoztunk, hogy ne érjük el a tartósság szempontjából már kritikus 11 m%-t. (E fölött a szilikapor túl sok portlanditot köt meg, ami csökkenti a beton lúgosságát.)

**3. táblázat.** Könnyűbetonok 28 napos, átlagos nyomószilárdsága szabványos kockán mérve

Adalékanyag	Nyomószilárdság [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Kiegészítő anyag nélküli	Szilikapor 10%	Metakaolin 10%	Metakaolin 20%
Kohósalak	49,5	84,0	92,9	101,2
Duzzasztott agyagkavics 9	66,8	71,9	76,9	80,9



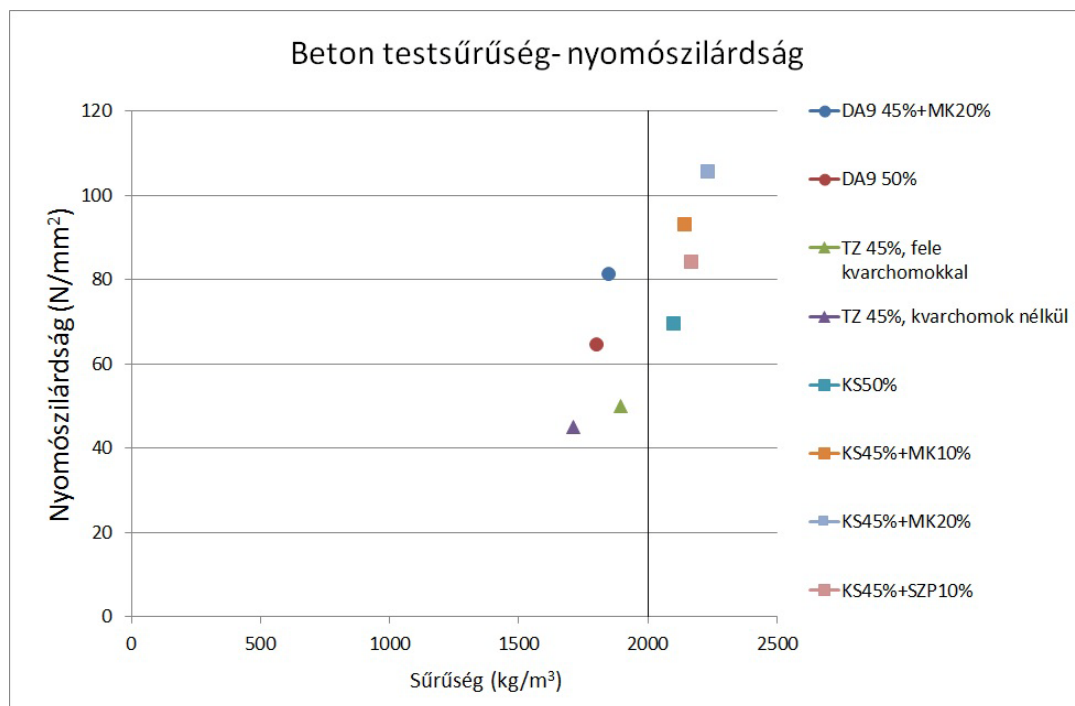
**4. ábra.** Nyomásra igénybe vett betonok erőjátéka

**4. táblázat.** Beton nyomószilárdság [N/mm<sup>2</sup>] szabványos kockán mérve

Adalékanyag típus	Adalékanyag tartalom		
	40%	45%	50%
Duzzasztott agyagkavics 7	52,7	47,6	47,2
Duzzasztott agyagkavics 9	67,7	66,8	63,1
Kohósalak	-	49,5	69,4

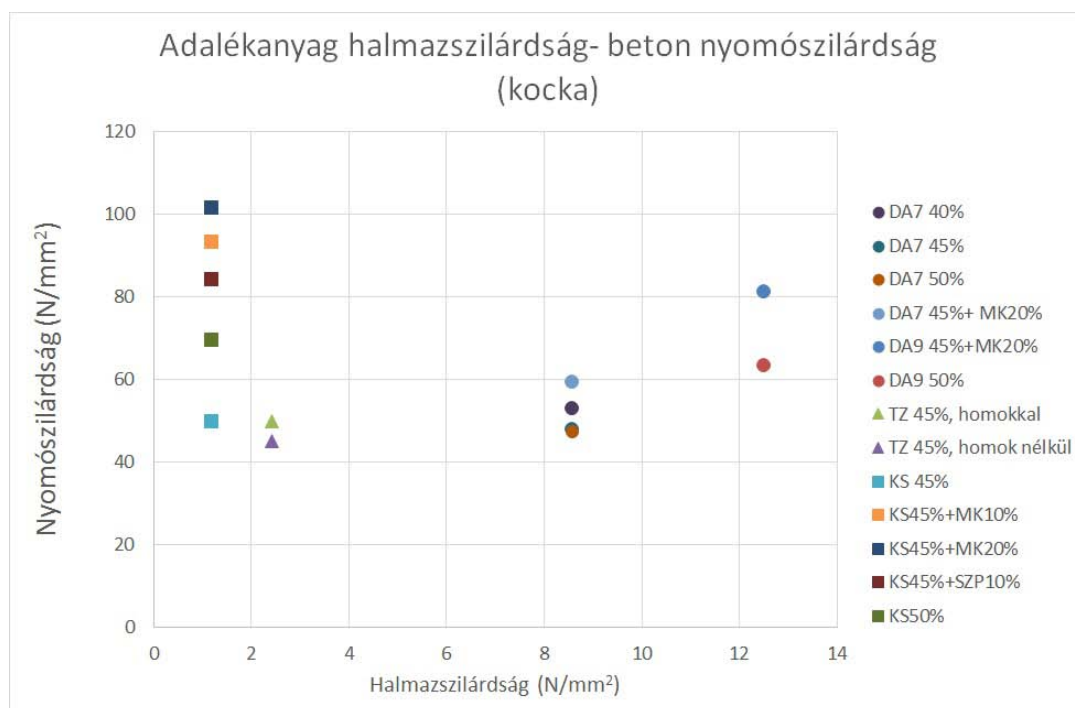
A könnyű adalékanyag tartalom növelésével csökken a nyomószilárdság, ez a csökkenés azonban a vizsgált tartományban nem jelentős. A téglazúzalék esetében a homoktartalom volt a változó. A 45%-os téglazúzalék adalékanyagú, homokkal kevert beton több homokot tartalmaz, mint a fele homokkal készített keverék, mégsem lett nagyobb a szilárdsága, viszont a homok nélkül készített beton szilárdsága kb. 5 MPa-lal kisebb. Tehát a homoktartalom növelése egy bizonyos szintig növeli a szilárdságot, viszont utána nem változtat rajta számottevően a vizsgált adalékanyag tartalom mellett.

Az általános szabály, miszerint nagyobb testsűrűséggel nagyobb nyomószilárdság érhető el az 5. ábrán is látható. (Bergmeister & Wörner 2005) A kohósalak esetében azonban nem ez a tendencia, mivel a szilikapor és a metakaolin segítségével úgy tudtuk növelni a szilárdságot, hogy közben a beton testsűrűsége nem változott számottevően. (Chen & Liu 2008) A KS45%+MK20% jelű keverék testsűrűsége nagyobb lett, mint a többié, viszont ez a szilárdság növekedésével együtt következett be. Tehát a hulladékból előállított kohósalak adalékanyagú betonnal sikerült nagyobb szilárdságot elérni, mint a bányászott alapanyagból gyártott duzzasztott agyagkaviccsal. Ezzel egy fontos célkitűzést valósítottunk meg.



5. ábra. Könnyűbetonok testsűrűség- nyomószilárdság összefüggése

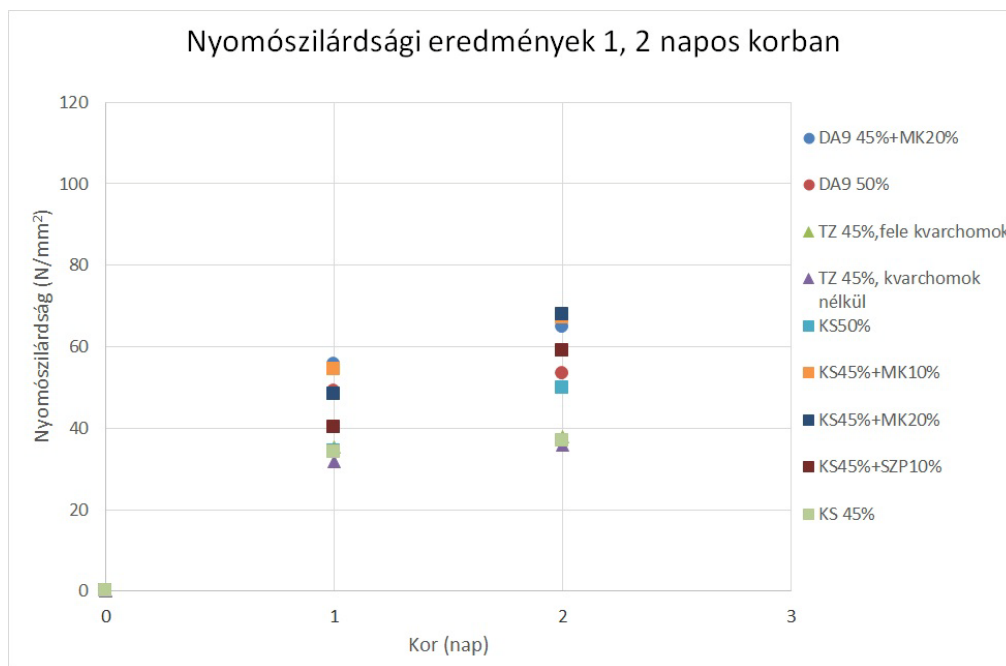
Általában elmondható, hogy a nagyobb halmazszilárdságú anyagból nagyobb nyomószilárdságú beton készíthető (6. ábra). Ezen a tendencián természetesen a hozzáadott metakaolin és szilikapor változtatható. A kohósalak adalékanyagú keverékek kiugróan magas nyomószilárdságát és hajlító-húzószilárdságát az okozhatta, hogy elég nagyok a pórusai ahhoz, hogy a cementpép befolyjon és kitöltse azokat. Így a cementpép és a kohósalak együttdolgozása sokkal hatékonyabb, mint más adalékanyag esetében. Ez egyben magyarázat a nagyobb testsűrűségekre is.



6. ábra. Adalékanyag halmazszilárdság- beton 28 napos nyomószilárdsága (kocka)

Előregyártott vasbeton elemek esetében fontos paraméter a kizsaluzásig eltelt idő, a zsaluforgás gyorsítása. Az egy napos mérési eredmények alapján mindegyik betonkeverék alkalmas a kizsaluzásra már egy napos korban (min. 6 N/mm<sup>2</sup> nyomószilárdság), tehát a szükséges zsaluforgási idő

meglehetősen rövid, egy napnál is kevesebb lehet. Ez igen kedvező a gyártó szempontjából, és további vizsgálatokkal igazolható ennél rövidebb zsaluforgási idő alkalmazhatósága a vizsgált könnyűbeton keverékeken.



7. ábra. Átlagos nyomószilárdsági eredmények egy és két napos korban (kocka)

## 6. KUTATÁSI EREDMÉNYEK

A könnyűbeton alkalmazása az előregyártás során is előnyös, mivel a kisebb súlyú beton kizsaluzásakor kisebb erő keletkezik az elemek felszakításánál. A felhasználás során pedig kisebb a szállítási költség, kevesebb vasalást igényel a szerkezet és kisebb alapozás kialakítása szükséges. Mindegyik betonkeverék alkalmas a kizsaluzásra már egy napos korban, tehát a szükséges zsaluforgási idő meglehetősen rövid, egy napnál is kevesebb. Ez igen kedvező a gyártó szempontjából.

A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú könnyűbetonok eredményei szerint a legmagasabb nyomószilárdsági értéket (az adalékanyag tartalom változtatása esetén) a 45%-os adalékanyag tartalom mellett lehet elérni a vizsgált duzzasztott agyagkavicsok esetén. Ezért a kohósalak és a téglazúzalék tartalmú betonösszetételek tervezésénél a kiegészítő anyagok, illetve a homok arányát változtattuk, azonos adalékanyag tartalom mellett.

Vízfelvétel szempontjából több érdekességet is tapasztaltunk a kutatás alatt. A kohósalak keverék készítésénél észrevettük, hogy bár a kohósalak felvesz egy tekintélyes vízmennyiséget, nem tartja magában, ezért kevesebb többletvíz kell adagolni a betonkeverékhez, mint az adalékanyagon mért vízfelvétel mennyisége. A nagy vízfelvétel előnyös lehet olyan szempontból, hogy az adalékanyag a betont belülről hidratálja (belső utókezelő hatás), ami a kezdeti zsugorodási repedések csökkenését, illetve nagyobb szilárdság kialakulását eredményezi. Ez különösen igaz a téglazúzalékra, amit Suzuki M. mérései is alátámasztanak. (Suzuki et al. 2009) Ennek a hátulütője azonban az, hogy a túl nagy vízfelvétel következtében a beton eltarthatósága kedvezőtlen lehet, ezért a téglazúzalék alkalmazását kifejezetten előregyártás esetében ajánljuk, ahol rövidebb eltarthatósági idő szükséges és jobban tervezhető (az adalékanyag vízfelvétele miatt szükséges) a hozzáadott többlet vízmennyiség.

Az általunk vizsgált könnyűbetonok szilárdsága a polisztirol gyönggyel készített beton szilárdságát meghaladta, tehát az adalékanyagok is részt vettek a teherhordásban. Ebből következik, hogy a cementváz és az adalékanyag közösen vesz részt a teherhordásban, fontos az együttműködésük. Különösen igaz ez a nagy nyitott pórusokkal rendelkező kohósalak adalékanyag esetén, ahol a cementpép be tud folyni a pórusokba.

A kiegészítő anyagok közül a 10% metakaolin kis mértékben jobb szilárdságot eredményezett, mint azonos adagolású szilikapor. További kismértékű szilárdságnövekedést tudunk elérni a metakaolin 20%-os adagolásával, aminek a gazdaságosságát a gyártás során kell mérlegelni.

A könnyű adalékanyag tartalom növelésével a szilárdság csökken, de egy adott határértéken túl nem változik. Ez a határ, különböző adalékanyagok esetén, más-más lehet.

A kohósalak tartalmú betonok voltak a legnagyobb nyomó- és hajlító-húzószilárdságúak, annak ellenére, hogy annak a halmazszilárdsága volt a legkisebb. Az 50%-os adalékanyag tartalom esetén 20 N/mm<sup>2</sup>-rel növekedett a nyomószilárdság a 45%-os adalékanyag tartalmú keverékhez képest, ami magyarázható azzal, hogy a kohósalak pórusaiba a cementpép be tud hatolni, ami jobb együttdolgozást biztosít. Ezért fordulhatott elő, hogy bár a kohósalaknak jóval kisebb a halmazszilárdsága, mint a duzzasztott agyagkavicsnak, mégis nagyobb nyomószilárdsági értéket értünk el vele, nagyobb testsűrűség mellett.

A kohósalak keverék esetében 10% metakaolin hozzáadásával majdnem kétszeresére növekedett a nyomószilárdság (50 MPa-ról 90 MPa-ra), a 20%-os metakaolin adagolás viszont csak további 10 N/mm<sup>2</sup>-nyi nyomószilárdság növekedést eredményezett, ami arányait tekintve nem olyan számottevő. A szilikapor hozzáadásával hasonló eredményeket kaptunk, mint a 10% metakaolin tartalmú keverékeknel, azonban a szilikaporral készült beton nyomószilárdsága mindig egy kissé alacsonyabb volt.

A téglazúzával készített keverékek átlagos nyomószilárdsága eléri a kb. 50MPa értéket, mely az általunk mért eredmények közül a legalacsonyabb, viszont általánosságban véve jónak számít. A kvarchomok tartalom növelése egy szintig növeli a szilárdságot, viszont afelett már nem változtat rajta, ami azért jelentős eredmény, mert a téglazúzával finom frakciója (ami az összes adalékanyag mennyiség kb. 60%-a) is felhasználható a beton készítéséhez.

## 7. KUTATÁSI KITEKINTÉS

Hídszerkezetek használatakor nem csak a szilárdság, hanem a tartósság vizsgálata (fagyállóság, vízzáróság, kloridállóság, karbonátosodás, stb.) is lényeges paraméter, amit a közeljövőben tervezünk kutatni.

A kohósalak adalékanyag tartalom optimalizálásával akár még nagyobb szilárdságú beton készítése is lehetővé válna. Az egy napnál fiatalabb betonok szilárdságának vizsgálatával a zsaluforgási idő optimuma is megállapítható szükség esetén. A további kutatásaink során, mindehhez további kísérletsorozatok elvégzését tervezzük.

## 8. FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bergmeister K., Wörner, J.D. 2005. *BetonKalender 2005 Teil 2: Fertigteile-Tunnelbauwerke*. Ernst & Sohn, Berlin, 1-141.
- Chen B., Liu J. Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high-strength and workability. *Construction and Building Materials*, 22, 1108-1113.
- Farkas Gy., Kovács T., Keleti I., Kiss R., Gács S., Bán L., Farkas J. 2006. *A 2007-08. évi üzleti kutatás-fejlesztési programot megalapozó tanulmány 2006. Hidak (építési technológia)*, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke
- Nemes R., Józsa Zs. 2010. Vegyes falazatok jellemzői és problémái Budapest belső kerületeiben. In: Török Ákos, Vásárhelyi Balázs (szerk.) *Mérnökgeológia-Közetmechanika Műegyetemi Kiadó*, Budapest, 61-70.
- Raithby K. D., Lydon F. D. 1981. Lightweight concrete in highway bridges. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 2(3), 133-146.
- Suzuki M., Meddah M. S., Sato R. 2009. Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research Institute* 39, 373-381.
- Ujhelyi J. 1960. *A könnyű adalékanyag beton fajtái, betonösszetételének tervezése és a beton készítése*. Mérnöki továbbképző Intézet előadásorozatából: 3797, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 14-27.
- Yang K.H., Song J.K., Lee J.S. *Properties of alkali-activated mortar and concrete using*