

ZÚZOTT BETON TÉRKŐ, MINT ÚJRAHASZNOSÍTOTT ADALÉKANYAG HATÁSA A BETON SZILÁRDSÁGÁRA ÉS HŐÁLLÓSÁGÁRA



<https://doi.org/10.32969/VB.2025.4.2>

Dr. Hlavicka Viktor – Dr. Majorosné dr. Lublóy Éva Eszter

A vizsgálat célja a beton térkő aprításából származó újrahasznosított adalékanyag hatásának elemzése az újrahasznosított beton mechanikai tulajdonságaira és hőállóságára. Öt keveréket készítettünk, amelyek közül négy tartalmazott törtbetont 20% és 50% adalékanyag térfogat arányban, külön vizsgálva a durva frakció, valamint a durva és finom frakció együttes helyettesítését. A kutatás során nyomószilárdsági és hajlító-húzószilárdsági vizsgálatokat végeztünk a hőterhelés (150–600 °C) előtt és után. Az eredmények szerint a durva frakció törtbetonra való cseréje nem csökkentette jelentősen a szilárdságot, sőt 50 V% tartalom esetén kedvező hatás mutatkozott. Ezzel szemben a finom frakció bevonása minden esetben gyengítette a beton tulajdonságait. A durva frakciót tartalmazó keverékek 450 °C-on nagyobb maradó szilárdságot mutattak, míg a finom frakcióval kiegészített keverékek kisebb ellenállást tanúsítottak. Összességében az újrahasznosított adalékanyag alkalmazása kedvező lehet, ha a finom frakció aránya minimális.

KULCSSZAVAK: beton újrahasznosítás, újrahasznosított beton adalékanyag, hőállóság, beton nyomószilárdság, beton hajlító-húzószilárdság, hőterhelés utáni maradó szilárdság

1. BEVEZETÉS

Az építőipar egyik legnagyobb mennyiségben használt anyaga a beton, amiből mind a szerkezetépítés, mind a közmű vagy infrastruktúra építés területén kiemelkedően nagy mennyiséget állítunk elő és építünk be. A Global Cement and Concrete Association felmérése alapján 2020-ban a világ összes beton előállítása 14 milliárd m³ volt (Global Cement and Concrete Association, 2023). A beton építőanyag előállításához alapvetően cementet, vizet és adalékanyagot használunk fel. Az évi több milliárd m³ beton előállításához így jelentős mennyiségű cement gyártására és adalékanyag kitermelésére van szükség. Nem csoda, hogy a betonhoz szükséges adalékanyag bányászat a világ egyik legnagyobb mennyiségben bányászott ásványi anyaga lett. Csak Európában (EU+EFTA) 2019-ben a beton előállításához kitermelt adalékanyag (bányászattal vagy kotrással) mennyisége 2644 millió tonna volt (European Aggregates Association, 2023a). Könnyen belátható, hogy ez a mennyiségű természetes adalékanyag felhasználás hosszútávon nem fenntartható. Ezért a jövőben a természetes adalékanyag bizonyos mennyiségű kiváltására lesz szükség.

Az építőipar napjainkban is zajló modernizációja a nagyfokú digitalizálás és robotizálás mellett egyre nagyobb hangsúlyt szentel az alkalmazott anyagok körforgásának biztosítására. Ezért a beton esetén is egyre nagyobb az elvárás a beton anyagának újra felhasználására. Erre az egyik legelterjedtebb módszer a betonzúalék adalékanyagként való felhasználása, új vasbetonszerkezetek esetén, ezzel is mérsékelve a természetes adalékanyagok kitermelésének igényét. Ennek hatásaként az éves statisztikai adatokból is jól látható, hogy Európában évről évre egyre nagyobb százalékban kerül felhasználásra újrahasznosított beton adalékanyag. Egyes országok esetén ez az arány

már most kiemelkedően magas: Belgium 29,33%, Hollandia 24,73%, Nagy Britannia 23,86%, Franciaország 16,79%, Németország 12,41% (European Aggregates Association, 2023b).

Megfelelő válogatás, és adalékanyag vizsgálat mellett hazai és nemzetközi tapasztalatok alapján ma már képesek vagyunk újrahasznosított beton adalékanyag felhasználásával az eredetihez képest legalább ugyan olyan, de akár jobb szilárdságú betont is előállítani (McNeil & Kang, 2013; B. Wang et al., 2021). Az erőtani szilárdság mellett azonban a betonnak a tartóssági követelményeknek is meg kell felelnie, mint pl. a szélsőségesen magas vagy alacsony hőmérsékleten, vagy kémiai agresszív közegben való ellenállás.

A vasbeton szerkezetek magas hőmérsékleten való ellenállásának fontosságára az utóbbi évek jelentős tüzesetei is felhívták a figyelmet: Gotthard alagút (2001); Grenfell Tower, London (2017); Torch Tower, Dubai (2017), Wang Fuk Court toronyház komplexum, Hong Kong (2025). A vasbeton szerkezetek tűzállóságát elsősorban a választott cement és különböző kiegészítő anyagok határozzák meg (metakaolin, kohósalak, műanyag szál). Azonban korábbi kutatások alapján az is látható, hogy beton magas hőmérséklet hatására történő szilárdságváltozására az adalékanyag típusának is jelentős hatása van (*fib BULLETIN* 38, 2007). Újrahasznosított beton adalékanyag használata esetén az eredeti beton paraméterei hatással lesznek az újrahasznosított beton tűzállóságára. Azonban ezek a hatások teljeskörűen még nem ismertek (Fernandes et al., 2021).

Jelen kutatás célja annak vizsgálata, hogy beton térkő aprításából származó adalékanyag milyen hatással lesz az újrahasznosított beton szilárdságára és hőállóságára. A hatályos szabvány (MSZ 4798, 2016) előírja, hogy különböző környezeti osztályokban alkalmazott betonok esetén milyen

paraméterekkel kell rendelkeznie az újrahasznosított beton adalékanyagoknak. Aprózódás szempontjából a legszigorúbb határértékeket a fagyálló (XF), karbonátosodásnak ellenálló (XC) és kloridionnak ellenálló (XD) betonok esetén ad a szabvány. Így a zúzott térkövek a gyártástechnológiából és a nagy porozitásból adódóan ezen határértékeknek nem felelnek meg. Ennek következtében csak olyan betonok esetén lehet felhasználni adalékanyagként, aminek környezeti hatásoknak nem kell megfelelnie (X0). Jellemzően ilyen típusú betonból készülhetnek a beltéri tartószerkezetek: pillérek, gerendák, födémek. Ezért különösen fontos annak vizsgálata, hogy hogyan hat a törtbeton adalékanyag az újrahasznosított beton tűzállóságára.

A 2028-tól kötelező érvényű második generációs Eurocode (EN 1992-1-2, 2024) az újrahasznosított beton adalékanyag használhatóságát 20%-os határértékben szabja meg. A szabvány alapján a tűzállóság meghatározására 20% törtbeton tartalomig használhatók a szokványos betonok esetén alkalmazott képletek. 20% törtbeton tartalom felett laboratóriumi kísérletekre van szükség. Ezért kísérletsorozatunkat úgy állítottuk össze, hogy megvizsgáljuk a törtbeton adalékanyag hatását 20 és 50% tartalom esetén. Továbbá külön vizsgáltuk annak hatását is, amikor csak a durva frakció, vagy együttesen a durva és a finom frakció is kiváltásra kerül törtbetonnal.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS A VIZSGÁLATOK SORÁN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

2.1 Kísérleti program

A 1. ábra vizsgálatokhoz használt térköveket mutatja be. Mindegyik típus azonos technológiával (extrudálás) készült. Tervezett összetételük közel azonos. A vizsgálatokhoz használt térkövek különféle, a minősítéshez használt vizsgálatok után, vagy a gyártásból nem megfelelésük révén maradtak meg. Ebből adódóan a vizsgált térkövek nem kerültek beépítésre, a használatból származó különféle szennyeződések nem tartalmaztak.

A beton térköveket a törtbeton elkészítéséhez pofás törő segítségével aprítottuk. Az így keletkezett törtbetont négy részre bontottuk méret szerint. Továbbá megmértük a törtbeton szemmegoszlását, vízfelszívását és testsűrűségét. A törtbeton tulajdonságainak figyelembevételével négy eltérő újrahasznosított betonkeveréket készítettünk, amit referenciaként kiegészítettünk további egy keverékkel, ami nem tartalmazott törtbetont.

A keverékekből 70x70x250 mm névleges geometriájú

1. ábra: Beton térkövek



hasábokat készítettünk. A próbatesteket vegyes körülmények (7 napos koráig vízben, majd 28 napos koráig laboratóriumi körülmények között) között tároltuk a hatályos előírásoknak (MSZ 4798, 2016) megfelelően. A próbatesteket minden keverék esetén két részre osztottuk. Egyik részét 28 napos korukban vizsgáltuk. A másik részét 24 napos koruktól 4 napon keresztül szárítottuk 60 °C-on. A szárítás célja az volt, hogy a hőterhelés során elkerüljük a próbatestek robbanásszerű tönkremenetelét. A robbanásszerű tönkremenetel elsődleges oka a beton magas víztartalma (Bošnjak, 2014; fib BULLETIN 38, 2007). A szárítás következtében csökkenteni tudtuk a beton nedvességtartalmát. Azonban a víztartalom csökkenése hatással lehet a beton szilárdulására is. Ezért a kiértékelés során külön vizsgáltuk a szárítás hatását a szárított és a nem szárított próbatestek szilárdságának összehasonlításával.

A szárított próbatestek egy részét hőterheltük. A hőterhelésnél négy hőlépcsőt alkalmaztunk (150, 300, 450, 600 °C). Minden hőlépcső esetén 3-3 db próbatestet vizsgáltunk. A hőterheléshez elektromos kemencéket használtunk. A kemencék felfűtési sebessége 5-6 °C/perc volt. A próbatesteket minden hőmérsékleti lépcsőn 2 órán keresztül hőntartottuk, hogy a teljes keresztmetszet átvegye a választott hőmérsékletet. Minden esetben megmértük a próbatestek tömegét a hőterhelés előtt és után is. A hőterhelt próbatesteken a mechanikai vizsgálatokat visszahűlt állapotban, a hőterhelést követő napon végeztük el.

A nem szárított, a szárított és a hőterhelt próbatesteken előbb hárompontos hajlító vizsgálatot végeztünk a hatályos szabvány alapján (MSZ EN 12390-5, 2009). Majd a hajlítás után megmaradt félhasábokon nyomószilárdság vizsgálatot is végeztünk. Ez a fajta nyomószilárdság vizsgálat eltért a betonoknál alkalmazott előírástól (MSZ EN 12390-3, 2009), azonban saját vizsgálataink azt bizonyították, hogy 11,2 mm-es maximális szemcse nagyság esetén a félhasábokon és a 150 mm élhosszúságú kockákon mért nyomószilárdság értéke közel megegyezik (Hlavička, 2021).

A kísérlet során alkalmazott vizsgálatok sorrendjét a 2. ábra szemlélteti.

2.2 Alkalmazott anyagok

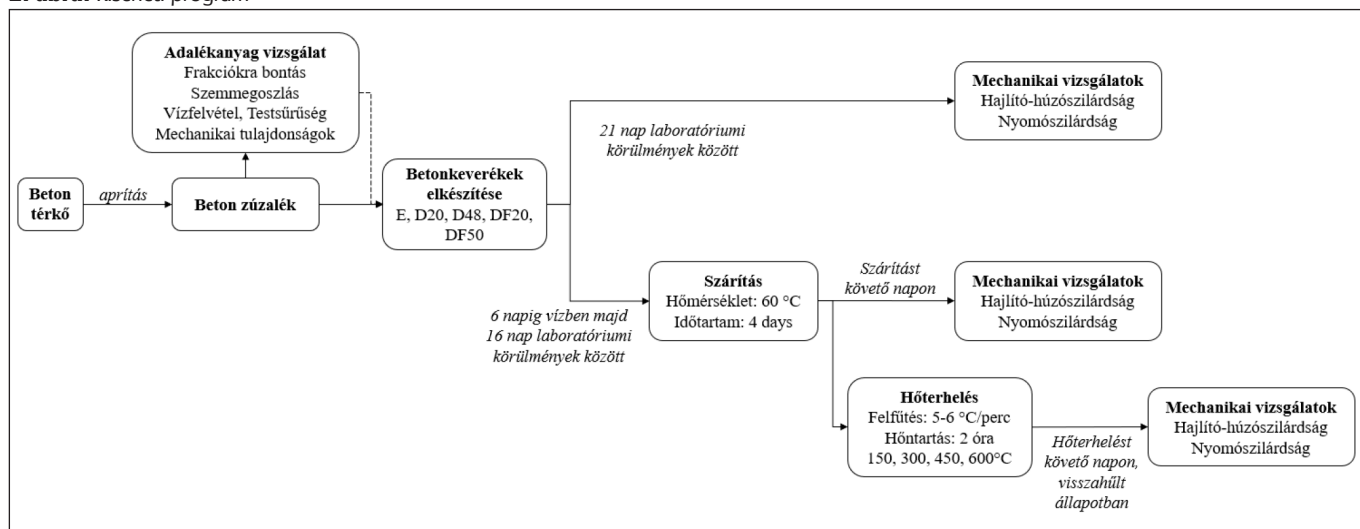
2.2.1 Cement

Az újrahasznosított betonok elkészítéséhez CEM I 32.5 N-LH cementet alkalmaztunk. Az alkalmazott cement kémiai összetételét az 1. táblázat foglalja össze. Az összetételre vonatkozó vizsgálatokat a gyártó végezte el a hatályos szabvány (EN 196-2, 2013) alapján.

1. táblázat: Az alkalmazott cement kémiai összetétele

Cement típus	Kémiai összetevők	
	Összetevők	Tartalom [m%]
CEM I 32.5 N-LH	Si O ₂	19,63
	Al ₂ O ₃	4,85
	Fe ₂ O ₃	3,81
	Ca O	65,32
	Mg O	1,39
	S O ₃	3,11
	Na ₂ O	0,36
	K ₂ O	0,59

2. ábra: Kísérleti program



2.2.2 Természetes adalékanyag

A betonkeverékek elkészítéséhez folyami kotrásból származó homokot (0/4 mm frakció), és kvarc kavicsot (4/8 mm frakció) használtunk természetes adalékanyagként. Az alkalmazott homok és a kavics szemmegoszlását az 3. ábra szemlélteti.

2.2.3 Újrahasznosított adalékanyag

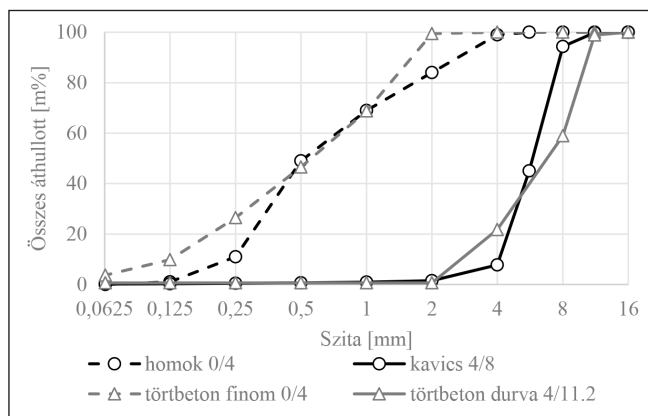
A beton térkövek aprítása után a törtbetont szétszittáltuk. Négy különböző kategóriát különítettünk el:

- < 0,063 mm;
- 0,063 – 4 mm (0/4 frakció);
- 4 – 11,2 mm (4/11,2 frakció);
- 11,2 mm <.

Ebből a vizsgálatok során csak a 0/4 és a 4/11,2 frakciók kerültek felhasználásra. Ehhez elvégeztük a két újrahasznosított beton adalékanyag frakció szemmegoszlás vizsgálatát is a hatályos szabvány (MSZ EN 933-2, 2020) alapján. Az újrahasznosított 0/4 és a 4/11,2 frakciók szemmegoszlását az 3. ábra szemlélteti.

A szitavizsgálat eredményei alapján látható, hogy a természetes és a törtbeton adalékanyag frakciók szemeloszlása nem tér el nagymértékben egymástól. Így a különböző frakciók jól kiegészíthetők egymással.

Az újrahasznosított adalékanyagot tartalmazó betonrecep-



3. ábra: Alkalmazott adalékanyagok szemeloszlása

túrák elkészítéséhez szükséges volt a zúzott adalékanyag test-sűrűségének és vízfelvételének megállapítása is. A szükséges tulajdonságok meghatározását a 4/11,2 frakcióból vett mintákon végeztük szabványos (MSZ EN 1936, 2007) piknométeres vizsgálattal. Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: Törtbeton vízfelszívása és testsűrűsége

Adalékanyag	Vízfelvétel [m%]		Testsűrűség [g/cm³]	
	30 perces	24 órás	látszólagos	szárított
törtbeton (4/11,2 mm)	2,15	2,2	2,5	2,37

4. táblázat: Beton receptúrák 1 m³ keverékre vonatkoztatva

		Keverék				
		E	D20	D48	DF20	DF50
Adalékanyag [kg/m³]	homok 0/4	946,2	946,2	946,2	764,2	582,3
	kavics 4/11	873,4	509,5	-	691,4	327,5
	törtbeton 0/4	-	-	-	172,0	344,0
	törtbeton 4/11,2	-	344,0	825,5	172,0	515,9
	törtbeton arány	0%	20%	50%	10+10=20%	20+30=50%
Cement (CEM I 32,5 N-LH) [kg/m³]		390,0	390,0	390,0	390,0	390,0
Víz [kg/m³]		175,5	175,5	175,5	175,5	175,5
v/c		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Többletvíz [kg/m³]		-	7,57	18,16	7,57	18,92
Folyósítószer [kg/m³]		1,8	1,7	2,2	2,1	1,5

Jelen vizsgálatok során a finom törtbeton (0/4 mm) vízfélvétel és testsűrűség vizsgálatát külön nem végeztük el. A beton receptúrák összeállításánál azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a finomrész vízfélvétele és testsűrűsége megegyezik a durva frakció tulajdonságaival.

A törtbeton durva frakciójának mechanikai tulajdonságainak meghatározásához Los-Angeles (MSZ EN 1097-2, 2020) és micro-Deval (MSZ EN 1097-1, 2024) vizsgálatokat is végeztünk. A vizsgálatok eredményeit a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat: Törtbeton mechanikai jellemzői

Adalékanyag	Frakció	Lemorzsolódási veszteség [m%]	
		Los-Angeles	micro-Deval
törtbeton	4/8 mm	34,1	24,6
	8/11,2 mm	40,6	20,9

2.3 Alkalmazott betonreceptúrák

A vizsgálatokhoz összesen 5 db eltérő betonkeveréket készítettünk, ebből négy keverék tartalmazott törtbetont adalékanyagként. Az újrahasznosított betonkeverékek esetén külön vizsgáltuk a finom és a durva frakciójú törtbeton hatását, úgy, hogy két keverék esetén csak a durva frakció lett helyettesítve törtbetonnal (D20, D48). A másik két keverék esetén pedig a finom és a durva frakció is törtbetonnal lett helyettesítve (DF20, DF50). Ennél a két keveréknél a finom és a durva frakció helyettesítési térfogat aránya összességében egyezett meg a másik két keveréknél alkalmazott helyettesítési térfogat aránnyal: 20% és 50%.

A törtbeton nélküli keverék (E) esetén a természetes adalékanyagok térfogat aránya úgy lett kiválasztva (0/4 mm 52%, 4/8 mm 48%), hogy a keverék szemmegoszlása köze-

lítse a szabványos B görbét (MSZ 4798, 2016) (4. ábra). Az újrahasznosított betonok esetén a természetes és az újrahasznosított adalékanyagok aránya úgy lett meghatározva, hogy a keverékek szemmegoszlása minél jobban közelítse a törtbeton felhasználása nélkül készült keverék (E) szemmegoszlását (5. ábra). Ezzel törekedtünk arra, hogy a vizsgálatok során kizárjuk az eltérő szemmegoszlás hatását a beton szilárdságára.

Az újrahasznosított betonok receptúráinak összeállításánál figyelembe vettük a törtbeton vízfelszívását is. A keverés során a betonhoz többletvizet adagoltunk, amit a törtbeton 30 perces vízfelszívása alapján számítottunk ki az újrahasznosított beton adalékanyag adagolása alapján. A vizsgálat során alkalmazott betonkeverékek összetételét a 4. táblázat foglalja össze.

A friss beton előállítása során a folyósítószer fokozatosan adagoltuk a keverékhez úgy, hogy a beton konzisztenciája terülméréssel ellenőrizve minden esetben az F3 kategóriának (MSZ EN 12350-5, 2009) feljen meg. A keverékekből készült próbatesteket másnap kiszalasztuk, majd 7 napos korig víz alatt, majd azt követően 21 napig labor körülmények között tároltuk a hatályos előírásoknak (MSZ 4798, 2016) megfelelően.

3. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A következő fejezetekben a vizsgálatok eredményeit mutatjuk be és hasonlítjuk össze különböző szempontok alapján. A kísérlet során a hőterhelésnek kitett próbatesteket a hőterhelés előtt szárítottuk, hogy a hőterhelés alatt elkerüljük a próbatestek robbanásszerű tönkremenetelét. Ennek ellenére a DF20 keverék esetén a 600 °C-on hőterhelt próbatestek a hőterhelés során felrobbantak. Így azokon a próbatesteken további vizsgálatokat nem tudtunk elvégezni.

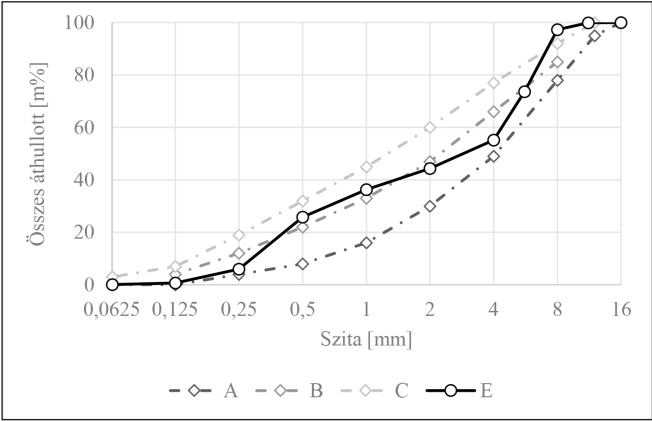
3.1 Törtbeton adagolás hatása a beton szilárdságára

A hőterhelés nélküli próbatesteken elvégzett nyomószilárdság és hajlító-húzószilárdság vizsgálatok eredményeit a 6. és 7. ábra foglalja össze. Nyomószilárdság esetén minden eredmény 6-6 mérés átlaga, míg hajlító húzószilárdság esetén minden eredmény 3-3 próbatesten végzett mérés átlaga

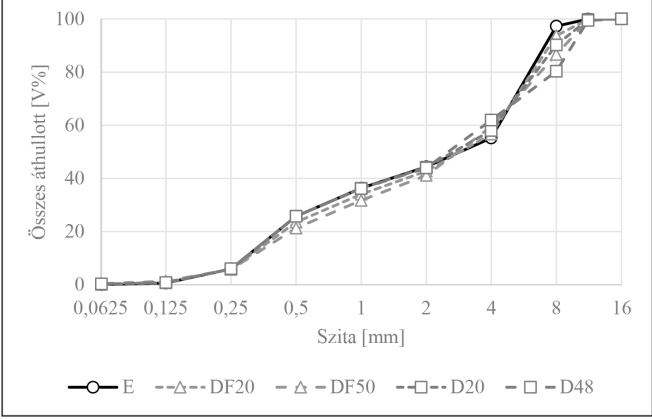
Az eredményekből látható, hogy a durva frakció törtbetonra való cserélése nem volt jelentős hatással a nyomószilárdság eredményekre. Az etalon keverékhez képest a 20% törtbeton durva frakció tartalom esetén a nyomószilárdság mindössze 3%-ot csökkent, míg 48% törtbeton durva frakció tartalom esetén a nyomószilárdság 1%-ot növekedett. Abban az esetben amikor a finom és durva frakciót is törtbetonra cseréltük a 20% zúzottbeton tartalom esetén szintén csak 3%-ot csökkent a nyomószilárdság. Azonban az 50% törtbeton tartalom (20% finom + 30% durva frakció) 11% nyomószilárdság csökkentést eredményezett.

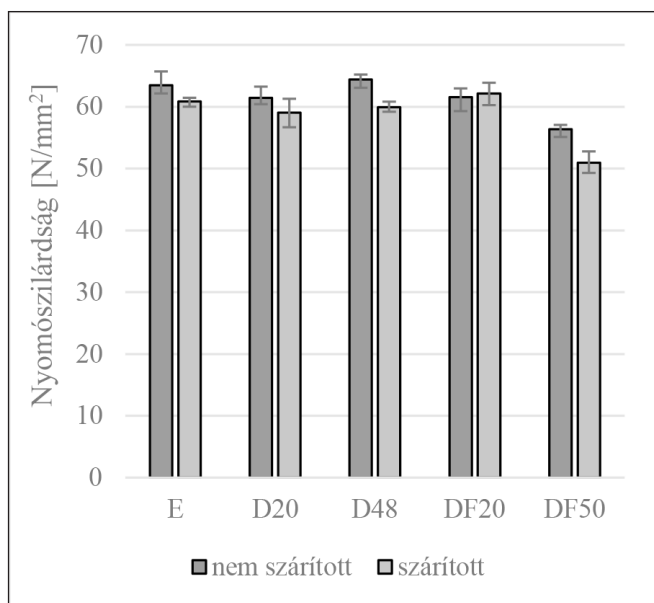
A nyomószilárdság változásával szemben a hajlító-húzószilárdság esetén a durva frakció törtbetonra való cserélése 20% törtbeton tartalom esetén 4%-al növelte a hajlító-húzószilárdságot. Ennek oka a törtbeton szemcsék alakjának hatása. Zúzott adalékanyag szemcsék jobban beékelődnek a cementkőbe ezért húzás esetén kis mértékben növelni tudják a beton szilárdságát (Chen et al., 2025; Kim, 2022). 50% törtbeton tartalom esetén viszont ez a hatás már nem érvényesült, a beton hajlító-húzószilárdsága 16%-al csökkent az etalon keverék szilárdságához képest. A finom és a zúzott frakciók együttes cseréje esetén a hajlító-húzószilárdság értéke már 20% törtbeton tartalom (10% finom + 10% durva frakció) esetén is csökkent 5%-al, majd 50% törtbeton tartalom (20% finom + 30% durva frakció) esetén 22%-al.

4. ábra: Törtbeton nélküli keverék szemmegoszlása

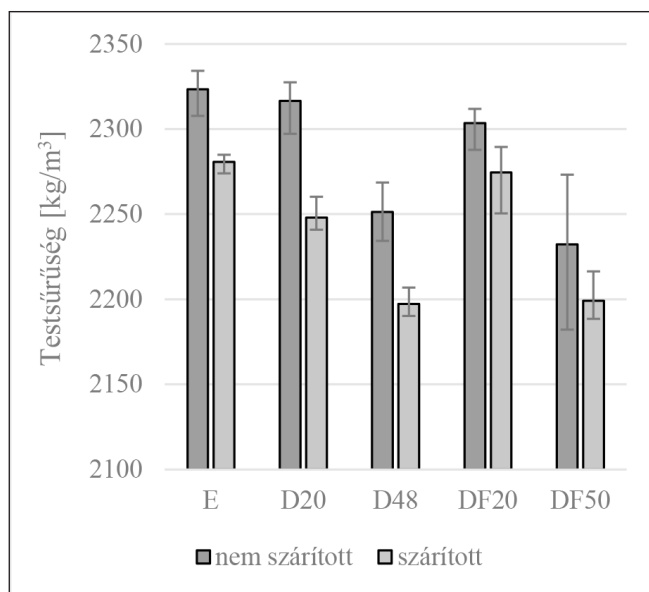


5. ábra: Keverékek szemmegoszlása

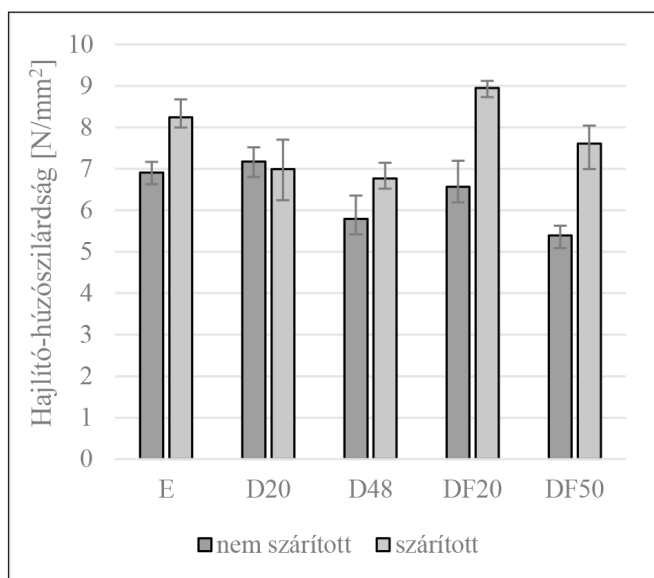




6. ábra: Törtbeton tartalom hatása a nyomószilárdságra



8. ábra: Szárítás hatása a testsűrűségre



7. ábra: Törtbeton tartalom hatása a hajlító-húzószilárdságra

3.2 Szárítás hatása a beton testsűrűségére és szilárdságára

A szárítás során csökkent a beton próbatestek testsűrűsége. A nem szárított és a szárított próbatestek testsűrűségét a 8. ábra szemlélteti. Minden eredmény 3-3 próbatesten végzett mérés átlaga.

A szárítás következtében mért testsűrűség csökkenés kevérenként eltérő volt. Az etalon keveréknél (E) a négy napos szárítás csak 1,84% testsűrűség csökkenést eredményezett. A csak durva törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknél a csökkenés 2,96% (D20) és 2,40% (D48) volt. Míg a durva és finom törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknél a csökkenés 1,26% (DF20) és 1,48% (DF50) volt.

A beton szilárdságát befolyásolja a próbatest nedvességtartalma. Minél több a víz a beton pórusaiban annál kisebb lesz a beton nyomószilárdsága. Ennek oka, hogy a próbatest terhelésekor a benne lévő víz belülről feszíti a betont, aminek következtében mikro repedések jönnek létre, ezért csökken a beton nyomószilárdsága (Rossi, 1991; Rossi & Boulay, 1990). Ugyanakkor a cement hidratációjához vízre van szükség. Ezért a cementnek folyamatosan biztosítani kell a vizet a szilárdulás teljes ideje alatt. Kezdetben a víz utánpótlását utókezeléssel

kell biztosítani, később a hidratáció folytatásához elegendő a pórusokban megmaradt víz is (MSZ 4798, 2016; Rahimi et al., 2023). Ezért a próbatestek vizsgálatok előtti szárítása akár szilárdságcsökkenéssel is járhat.

A nem szárított és szárított próbatestek szilárdsági eredményeit a 6. ábra és a 7. ábra foglalja össze. Az eredmények alapján látható, hogy a szárítás csak kis mértékben volt hatással a nyomószilárdság eredményekre. A szárítás következtében a nyomószilárdság a különböző keverékek esetén csökkent, azonban a csökkenés mértéke csak 3-9%. Így a keverékek nyomószilárdsága esetén megállapítható, hogy szárításból adódó két hatás (víztartalom csökkenése, hidratáció lassulása) jelen vizsgálat során közel kiegyenlítette egymást. Ebből adódóan a szárításnak nem volt jelentős hatása a keverékek nyomószilárdságára.

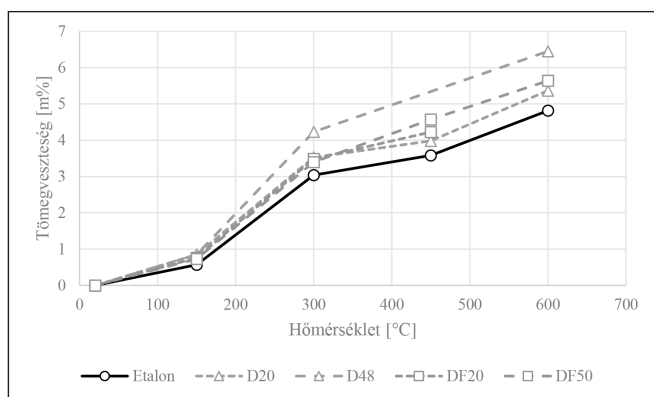
A nyomószilárdság eredményeknél tapasztaltakkal szemben a hajlító-húzószilárdság esetén a szárítás jelentős hatással volt az eredményekre. Szinte minden esetben a szárítás következtében nőtt a keverékek hajlító-húzószilárdsága. Az eredményekből látható, hogy az etalon keverék esetén a szilárdságnövekedés 19% volt. A csak durva törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknél kismértékű, 2% csökkenést tapasztaltunk a D20 keverék esetén, viszont a D48 keverék esetén a hajlító-húzószilárdság 17%-ot növekedett, míg a durva és finom törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknél a növekedés 36% (DF20) és 41% (DF50) volt. Az eredmények alapján elmondható, hogy a betonok hajlító-húzószilárdságát sokkal érzékenyebb a próbatest víztartalmára.

3.3 Törtbeton adagolás hatása a beton magas hőmérséklettel szembeni ellenállására

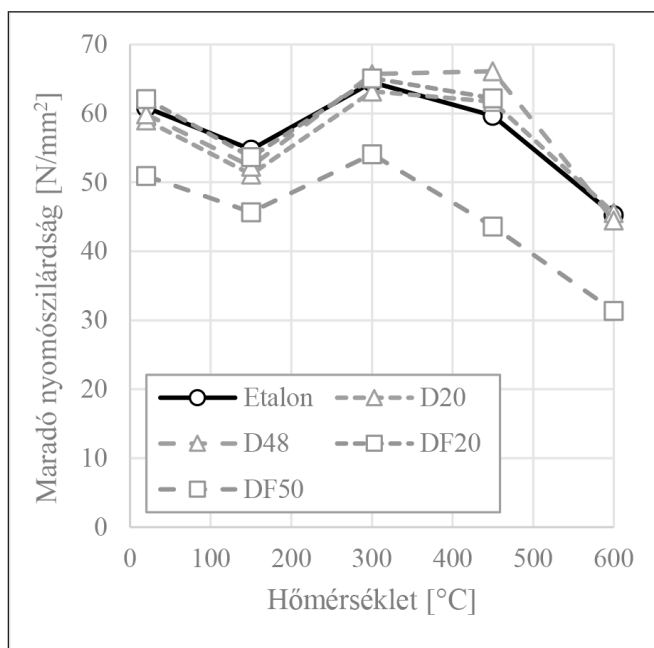
3.3.1 Tömegvesztesség

A hőterhelés előtt és után is megmértük a próbatestek tömegét. A hőterhelésből származó tömegvesztéseket a 9. ábra szemlélteti.

A hőterhelésnek kitett próbatesteket előzetesen szárítottuk. Ebből adódóan a 150 °C hőterhelés után mért tömegvesztesség még nem volt jelentős, mindössze 0,6-0,8%. A legnagyobb ugrás a tömegvesztésben mind az öt keverék esetén 150-300 °C



9. ábra: Tömegvesztesség a hőterhelés hatására



10. ábra: Maradó nyomószilárdság a hőterhelés függvényében

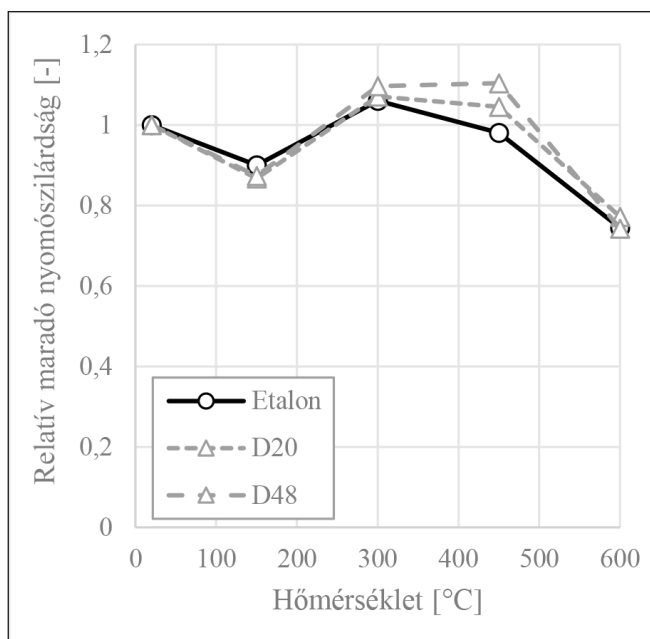
között következett be. Az eredményekből az is látható, hogy a törtbetont tartalmazó keverékek esetén a tömegvesztesség minden esetben nagyobb volt, mint az etalon keverék esetén. Ennek oka törtbetont tartalmazó keverékek elkészítéséhez használt többletvíz elpárolgása. Továbbá a törtbeton tartalom miatt ezekben a keverékekben nagyobb a cementkötőanyag is. Így a 200 °C környezetében bekövetkező kalcium-szilikát hidrát (CSH) dehidratáció is nagyobb tömegvesztést okoz. 300 °C felett a törtbetont tartalmazó keverékek tömegvesztése közel párhuzamosan haladt az etalon keverék tömegvesztésével.

3.3.2 Nyomószilárdság

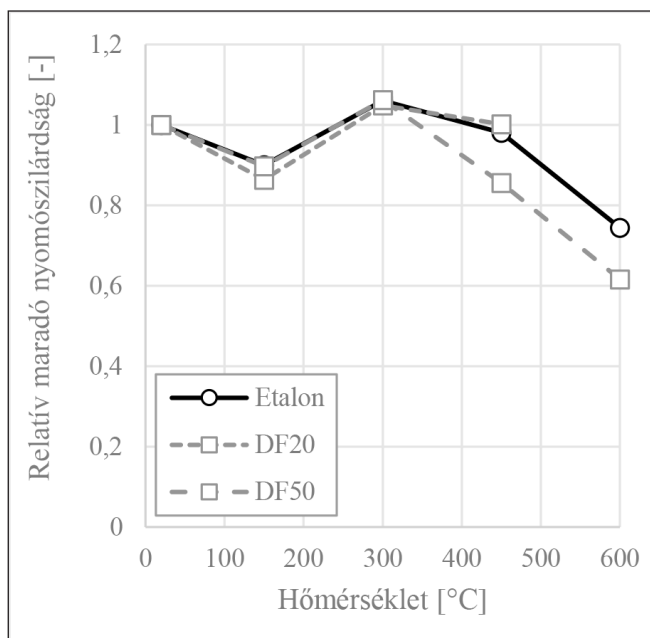
A hőterhelés utáni maradó nyomószilárdság értékeit a 10. ábra foglalja össze. Minden eredmény 6-6 mérés átlaga. A relatív maradó nyomószilárdság értékeit a 11. ábra és a 12. ábra szemlélteti.

A hőterhelés hatására bekövetkező szilárdságváltozás tendenciája mind az öt keverék esetén hasonló: kezdetben a nyomószilárdság csökken, majd a 150 °C-nál mért lokális minimum pont után emelkedik, ezt követően 300-450 °C után a nyomószilárdság minden esetben csökken.

Irodalmi adatok alapján a 100-150 °C elérése után a nyomószilárdság emelkedése több fizikai okra is visszavezethető. A hőtágulás következtében az adalékanyag szemcsék kismértékben összefeszülnek, ami szilárdságnövekedést okozhat (Sólyom et al., 2017; Zhang & Bicanic, 2006). Ezen a hőmérsékleti tartományon a cementgél rétegei elmozdulnak,



11. ábra: Relatív maradó nyomószilárdság – D20, D48



12. ábra: Relatív maradó nyomószilárdság – DF20, DF50

aminek következtében nő a Wan der Waals erő (Malik et al., 2021; Naus, 2006). A még nem hidratálódott cement részecskék ezen a hőmérsékleti tartományban hidratálódnak, ami szintén szilárdságnövekedést okozhat (Ma et al., 2015). A 100 °C utáni szilárdság növekedést követően 300 °C felett a kémiai kötött víz is elpárolgok, megkezdődik a CSH bomlása, ami porozitás növekedést és szilárdságvesztést eredményez (Pimienta et al., 2017). 400 °C felett megkezdődik a portlandit bomlása (Alonso & Schneider, 2019), majd 573 °C-on a kvarc hőtágulása (Waubke, 1973), ami tovább rontja a beton nyomószilárdságát.

A relatív maradó nyomószilárdság értékekből látható, hogy 300 °C-ig az öt keverék viselkedése közel megegyezik. Azonban 300 °C felett a törtbetont tartalmazó keverékek eltértek az etalon keverék viselkedésétől.

A csak durva törtbetont tartalmazó keverékek (D20, D48) 450 °C hőterhelés után jobb nyomószilárdságot értek el, mint az etalon keverék (11. ábra). A törtbeton tartalom növekedésével nőtt a maradó nyomószilárdság értéke. Ennek oka, hogy a törtbeton adalékanyag kedvezőbb hőtágulási tulajdonságokkal rendelkezik, ezért a hőterhelés hatására jobban együttműködik

a cementkövel, így kevesebb mikro repedés jön létre (Beatriz da Silva et al., 2020).

Ezzel szemben a durva és finom frakciójú törtbetont tartalmazó keverékek esetén 300 °C hőterhelés után a nyomószilárdság változása megegyezett (DF20) vagy alulmaradt (DF50) az etalon keverék szilárdságához képest (12. ábra). A törtbeton tartalom növelésével csökkent a maradó nyomószilárdság értéke. Ennek oka, hogy a finom rész tartalom növelésével növekszik az összesített cementkő tartalma a keveréknek, ami gyorsítja a beton leromlását (Zega & Di Maio, 2009).

3.3.3 Hajlító-húzószilárdság

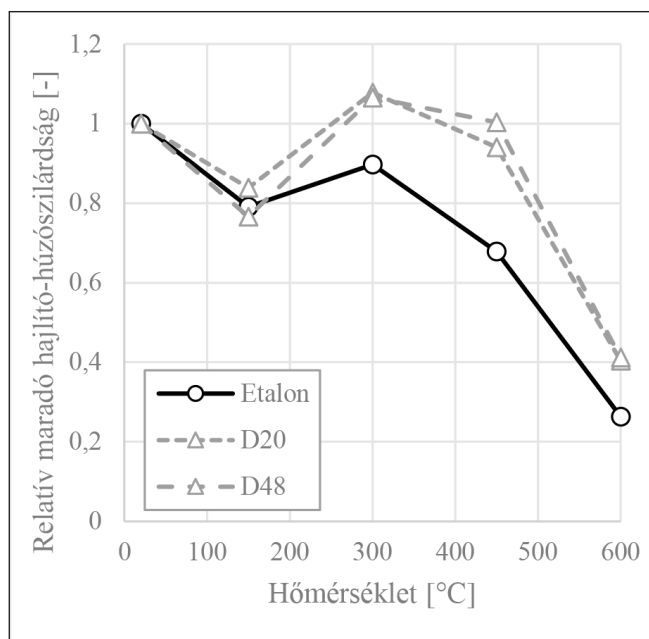
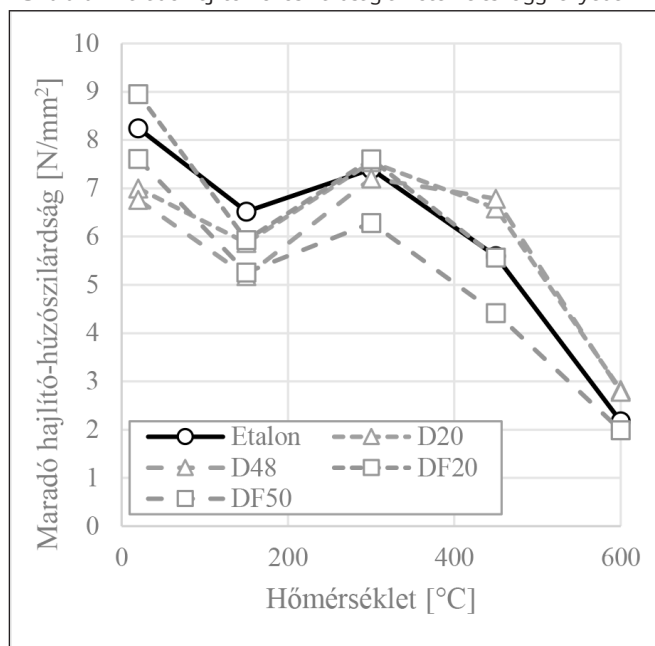
A hőterhelés utáni maradó hajlító-húzószilárdság értékeit a 13. ábra foglalja össze. Az ábrán bemutatott eredmények 3-3 próbatest átlaga. A relatív maradó hajlító-húzószilárdság értékeit a 14. ábra és a 15. ábra szemlélteti.

A hőterhelés hatására bekövetkező hajlító-húzószilárdság változás mind az öt keverék esetén hasonló tendenciát mutatott. Ebben az esetben is kezdeti szilárdságcsökkenés után, 150 °C felett újabb szilárdság növekedés figyelhető meg, majd 300 °C-tól a hajlító-húzószilárdság értéke rohamosan csökken. Megfigyelhető, hogy a hajlító-húzószilárdság érzékenyebb a hőmérsékleti teherre, mint a nyomószilárdság. A hőmérséklet emelkedésével a hajlító-húzószilárdság értéke egyértelműen csökken a kiindulási értékhez képest, mint az etalon, mint a betonüzalékok tartalmazó keverékek esetén. Ennek fő oka, hogy a hajlító-húzószilárdságot nagymértékben befolyásolják a hőterhelés következtében kialakuló mikro és makro repedések mennyisége (fib BULLETIN 38, 2007; Y. Wang et al., 2019).

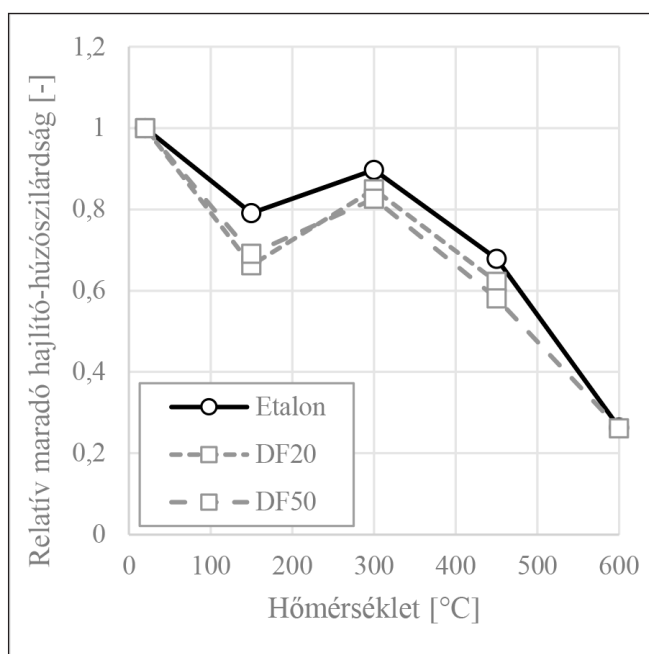
A csak durva törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknel (D20, D48) ugyanúgy szilárdság növekedés tapasztalható az etalon keverékhez képest, (14. ábra) mint a nyomószilárdság esetén (11. ábra). Azonban ebben az esetben már 300 °C hőterhelés után is jelentős szilárdságnövekedés látható. A kedvezőbb hőtágulási együttdolgozás mellett ez a hatás visszavezethető a törtbeton adalékanyag alakjából származó jobb hajlító-húzószilárdság értékekre is (Sarhat & Sherwood, 2013).

A finom és durva törtbeton frakciókat tartalmazó keverékek esetén a maradó hajlító-húzószilárdsági értékek minden esetben alulmaradtak a referencia beton értékeihez képest. Ez a hatás

13. ábra: Maradó hajlító-húzószilárdság a hőterhelés függvényében



14. ábra: Relatív maradó hajlító-húzószilárdság – D20, D48



15. ábra: Relatív maradó hajlító-húzószilárdság – DF20, DF50

is visszavezethető a növekvő összesített cementkő tartalom és az összesített kontaktfelületek növekedésével, ami fokozhatja a repedések kialakulását (Laneyrie et al., 2016).

4. MEGÁLLAPÍTÁSOK

Jelen kutatás célja annak vizsgálata, hogy beton térkö aprításából származó adalékanyag milyen hatással lesz az újrahasznosított beton szilárdságára és hőállóságára. A kísérletsorozatunkat úgy állítottuk össze, hogy megvizsgáljuk a törtbeton adalékanyag hatását 20 és 50% tartalom esetén. Továbbá külön vizsgáltuk annak hatását is, amikor csak a durva frakció, vagy együttesen a durva és a finom frakció is kiváltásra kerül törtbetonnal.

A vizsgálati eredmények alapján a következő megállapításokat tesszük:

- A durva frakció törtbetonra való cserélése nem volt jelentős hatással a nyomószilárdság eredményekre. Az etalon keverékhez képest 20% törtbeton durva frakció tartalom esetén

a nyomószilárdság mindössze 3%-ot csökkent, míg 48% törtbeton durva frakció tartalom esetén a nyomószilárdság 1%-ot növekedett.

- Abban az esetben amikor a finom és durva frakciót is törtbetonra cseréltük a 20% zúzottbeton tartalom esetén szintén csak 3%-ot csökkent a nyomószilárdság. Azonban az 50% törtbeton tartalom (20% finom + 30% durva frakció) 11% nyomószilárdság csökkentést eredményezett.
 - A hajlító-húzószilárdság esetén a durva frakció törtbetonra való cserélése 20% törtbeton tartalom esetén 4%-al növelte a hajlító-húzószilárdságot. 50% törtbeton tartalom esetén viszont ez a hatás már nem érvényesült, a beton hajlító-húzószilárdsága 16%-al csökkent az etalon keverék szilárdságához képest.
 - A finom és a zúzott frakciók együttes cseréje esetén a hajlító-húzószilárdság értéke már 20% törtbeton tartalom esetén is csökkent 5%-al, majd 50% törtbeton tartalom esetén 22%-al.
 - A szárítás csak kis mértékben volt hatással a nyomószilárdság eredményekre. A szárítás következtében a nyomószilárdság a különböző keverékek esetén csökkent, azonban a csökkenés mértéke csak 3-9%.
 - A hajlító-húzószilárdság esetén a szárítás jelentős hatással volt az eredményekre. Szinte minden esetben a szárítás következtében nőtt a keverékek hajlító-húzószilárdsága. Az eredmények alapján elmondható, hogy a betonok hajlító-húzószilárdságát sokkal érzékenyebb a próbatest víztartalmára.
 - A hőterhelés hatására bekövetkező nyomószilárdság változásának tendenciája mind az öt keverék esetén hasonló volt.
 - A csak durva törtbetont tartalmazó keverékek 450 °C hőterhelés után jobb nyomószilárdságot értek el, mint az etalon keverék. A törtbeton tartalom növekedésével nőtt a maradó nyomószilárdság értéke.
 - A durva és finom frakciójú törtbetont tartalmazó keverékek esetén 300 °C hőterhelés után a nyomószilárdság változása megegyezett vagy alulmaradt az etalon keverék szilárdságához képest. A törtbeton tartalom növelésével csökkent a maradó nyomószilárdság értéke.
 - A hőterhelés hatására bekövetkező hajlító-húzószilárdság változása mind az öt keverék esetén hasonló tendenciát mutatott.
 - A csak durva törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknel hajlító-húzószilárdság növekedés tapasztalható az etalon keverékhez képest. Azonban ebben az esetben már 300 °C hőterhelés után is jelentős szilárdságnövekedés látható.
 - A finom és durva törtbeton frakciókat tartalmazó keverékek esetén a maradó hajlító-húzószilárdsági értékek minden esetben alulmaradtak a referencia beton értékeihez képest.
- Összességében megállapítható, hogy a finomrész törtbetonra való cseréje minden esetben rontotta az újrahaznosított beton tulajdonságait az etalon vagy a tisztán durva frakciójú törtbetont tartalmazó keverékekhez képest.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők szeretnék köszönetet mondani Somogyi Farkas Pálnak és Takács Krisztiánnak a laboratóriumi vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségért. Tovább szeretnék köszönetet mondani Cseri Viktornak és a Duna-Dráva Cement Kft.-nek a vizsgálatok során használt cement biztosításáért. A cikk szerzői köszönetet mondanak a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2021-00252 "Innovatív, esztétikus, előregyártott, cement-kötésű szénszál kompozit beton homlokzati és burkolati elemek kifejlesztése a MOLNÁRBETON Kft.-nél" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért. A PD 146109 számú

projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az OTKA PD_23 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

6. HIVATKOZÁSOK

- Alonso, M. C., & Schneider, U. (2019). Degradation Reactions in Concretes Exposed to High Temperatures (pp. 5–40). https://doi.org/10.1007/978-3-319-95432-5_2
- Beatriz da Silva, J., Pepe, M., & Toledo Filho, R. D. (2020). High temperatures effect on mechanical and physical performance of normal and high strength recycled aggregate concrete. *Fire Safety Journal*, 117, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103222>
- Bošnjak, J. (2014). Explosive spalling and permeability of high performance concrete under fire – numerical and experimental investigations [PhD Thesis]. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- Chen, Y., Chen, C., Cai, Z., Zhu, P., Liu, R., & Liu, H. (2025). Effect of strength of parent concrete on utilization of recycled aggregate concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 103, 112187. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112187>
- EN 196-2. (2013). Method of testing cement - Part 2: Chemical analysis of cement.
- EN 1992-1-2. (2024). Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-2: Structural fire design .
- European Aggregates Association. (2023a). Annual Review 2020-2021. https://uepg.eu/mediatheque/media/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf
- European Aggregates Association. (2023b). Annual Reviews. <https://uepg.eu/mediatheque/index/1.html>
- Fernandes, B., Carré, H., Mindeguia, J.-C., Perlot, C., & La Borderie, C. (2021). Effect of elevated temperatures on concrete made with recycled concrete aggregates - An overview. *Journal of Building Engineering*, 44, 103235. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103235>
- fib BULLETIN 38. (2007). Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling. Sprint-Digital-Druck.
- Global Cement and Concrete Association. (2023). CEMENT AND CONCRETE AROUND THE WORLD. <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>
- Hlavička, V. (2021). Comparison of the result of notched three point bending test with Model Code 2010 formulas. *Concrete Structures*, 22, 5–12. <https://doi.org/10.32970/cs.2021.1.2>
- Kim, J. (2022). Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Construction and Building Materials*, 328, 127071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127071>
- Laneyrie, C., Beaucour, A.-L., Green, M. F., Hebert, R. L., Ledesert, B., & Noumowe, A. (2016). Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 111, 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056>
- Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., & He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials*, 93, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>
- Malik, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2021). Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review. *Construction and Building Materials*, 270, 121398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121398>
- McNeil, K., & Kang, T. H. K. (2013). Recycled Concrete Aggregates: A Review. In *International Journal of Concrete Structures and Materials* (Vol. 7, Issue 1, pp. 61–69). Korea Concrete Institute. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- MSZ 4798. (2016). Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon.
- MSZ EN 933-2. (2020). Kőanyagalmazok geometriai tulajdonságainak vizsgálata. 2. rész: A szemmegoszlás meghatározása. Vizsgálósziták, a szitanyílások névleges mérete.
- MSZ EN 1097-1. (2024). Kőanyagalmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 1. rész: A kopásállóság meghatározása (mikro-Deval).
- MSZ EN 1097-2. (2020). Kőanyagalmazok mechanikai és fizikai

- tulajdonságainak vizsgálata. 2. rész: Az aprózódással szembeni ellenállás meghatározása.
- MSZ EN 1936. (2007). Természetes építőkövek vizsgálati módszerei. Az anyagsűrűség és a testsűrűség, valamint a teljes és a nyílt porozitás meghatározása.
- MSZ EN 12350-5. (2009). A friss beton vizsgálata - Terülmérés.
- MSZ EN 12390-3. (2009). A megszilárdult beton vizsgálata – A próbatestek nyomószilárdsága.
- MSZ EN 12390-5. (2009). A megszilárdult beton vizsgálata - A próbatestek hajlító-húzószilárdság vizsgálata.
- Naus, D. J. (2006). The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures - a Literature Review. <https://doi.org/10.2172/974590>
- Pimienta, P., Alonso, M. C., Jansson McNamee, R., & Mindeguia, J.-C. (2017). Behaviour of high-performance concrete at high temperatures: some highlights. RILEM Technical Letters, 2, 45–52. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2017.53>
- Rahimi, M. Z., Zhao, R., Sadozai, S., Zhu, F., Ji, N., & Xu, L. (2023). Research on the influence of curing strategies on the compressive strength and hardening behaviour of concrete prepared with Ordinary Portland Cement. Case Studies in Construction Materials, 18, e02045. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02045>
- Rossi, P. (1991). Influence of cracking in the presence of free water on the mechanical behaviour of concrete. Magazine of Concrete Research, 43(154), 53–57. <https://doi.org/10.1680/mac.1991.43.154.53>
- Rossi, P., & Boulay, C. (1990). Influence of free water in concrete on the cracking process. Magazine of Concrete Research, 42(152), 143–146. <https://doi.org/10.1680/mac.1990.42.152.143>
- Sarhat, S. R., & Sherwood, Edward. G. (2013). Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(11), 1721–1730. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000719](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000719)
- Sólyom, S., Balázs, G. L., Di Benedetti, M., Guadagnini, M., & Zappa, E. (2017). Bond strength of GFRP rebars in concrete at elevated temperature. In S. Keighley & M. Guadagnini (Eds.), Advanced Composites in Construction - ACIC 2017 (pp. 337–343).
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. In Resources, Conservation and Recycling (Vol. 171). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>
- Wang, Y., Liu, F., Xu, L., & Zhao, H. (2019). Effect of elevated temperatures and cooling methods on strength of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials, 210, 540–547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.215>
- Waubke, N. V. (1973). Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C Brandverhalten von Bauteilen [Dissertation]. TU Braunschweig.
- Zega, C. J., & Di Maio, A. A. (2009). Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. Construction and Building Materials, 23(5), 2047–2052. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.017>
- Zhang, B., & Bicanic, N. (2006). Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450°C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold). Magazine of Concrete Research, 58(5), 277–288.
- Dr. Hlavička Viktor** (1987): okl. szerkezet-építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2014), okl. betontechnológus szakmérnök (2017), okl. tűzvédelmi szakmérnök (2017), egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, beton újrahasznosítás, rögzítések betonban, 3D beton nyomtatás. A *fib* Magyar Tagozat tagja.
- Dr. Lublőy Éva** (1976): okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2001), okl. betontechnológus szakmérnök (2011), okl. tűzvédelmi szakmérnök (2011), egyetemi tanár a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A *fib* Magyar Tagozat tagja.

Influence of Crushed Concrete Paving Blocks as Recycled Aggregate on the Mechanical Properties and Thermal Resistance of Concrete

Viktor Hlavička – Éva Lublőy

This study investigates the effect of recycled aggregate obtained from crushed concrete paving blocks on the mechanical properties and heat resistance of recycled concrete. Five mixes were prepared, four of which contained recycled aggregate at 20% and 50% replacement levels, examining both coarse fraction substitution and combined coarse and fine fraction replacement. Compressive strength, flexural tensile strength, and residual strength after thermal exposure were tested at temperatures between 150 °C and 600 °C. Results indicate that replacing the coarse fraction with recycled aggregate did not significantly reduce strength; in fact, a slight improvement was observed at 48% content. In contrast, incorporating fine fractions consistently weakened the concrete properties. Under thermal loading, a local strength increase occurred above 150 °C, followed by a marked decrease beyond 300 °C. Overall, the use of recycled aggregate can be beneficial if the proportion of fine fraction is minimized.