

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

**ZÚZOTT BETON ADALÉKANYAG TARTALMÚ
ÚJRAHASZNOSÍTOTT BETONOK SZILÁRDSÁGI
TULAJDONSÁGAINAK VÁLTOZÁSA MAGAS
HŐMÉRSÉKLET HATÁSÁRA**

Készítette: Annus Roland
(BME-ÉMK BSc hallgató)

Konzulens: Dr. Hlavička Viktor, adjunktus

Budapest, 2023. november 5.

Tartalom

1.	Bevezető.....	3
2.	Szakirodalmi áttekintés	4
2.1	Újrahasznosított betonok.....	4
2.2	Betonok viselkedése magas hőmérséklet hatására	7
2.3	Újrahasznosított adalékanyagú betonok viselkedése magas hőmérséklet hatására	14
3.	Kutatás célkitűzése, menete	20
4.	TAB előkészítése.....	21
4.1	Keverék receptúrák.....	21
4.2	Próbatestek előkészítése	22
5.	TAB vizsgálata	25
5.1	Nyomószilárdság vizsgálat.....	25
5.2	Hajlító-húzószilárdság vizsgálat.....	27
5.3	Testsűrűség mérés	29
5.4	Látszólagos porozitás mérés.....	30
5.5	Összefoglaló	31
6.	UAB előkészítése	32
6.1	Adalékanyag elkészítése.....	32
6.2	Adalékanyag vizsgálatok.....	33
6.2.1	Adalékanyag szemeloszlási vizsgálata	34
6.2.2	Adalékanyag vízfelvételi vizsgálata	35
6.2.3	Adalékanyag testsűrűség mérése	37
6.2.4	Adalékanyag vizsgálati összefoglaló.....	38
6.3	UAB és referencia receptúrák	39
6.4	Próbatestek előkészítése	40
7.	UAB vizsgálata.....	41
7.1	Nyomószilárdság vizsgálat.....	41
7.1.1	Hőterhelés nélküli próbatestek	41
7.1.2	Hőterhelt próbatestek	43
7.2	Hajlító-húzószilárdság vizsgálat.....	44
7.3	CMOD vizsgálat.....	46
7.4	Testsűrűség mérés	48
7.5	Látszólagos porozitás mérés.....	49
8.	Eredmények kiértékelése.....	50
8.1	Tömegveszteségek alakulása.....	50
8.2	Szilárdsági paraméterek alakulása.....	51

8.3	Törési energia alakulása	54
9.	Összefoglalás	56
10.	Summary	57
11.	Felhasznált szakirodalom	58
11.1	Irodalom jegyzék	58
11.2	Szabvány jegyzék	59

1. BEVEZETŐ

Az építőipar egyik legnagyobb mennyiségben használt anyaga a beton. A Global Cement and Concrete Association [1] felmérése alapján 2020-ban a világ összes beton előállítása 14 milliárd m³ volt. Az építőipar napjainkban is zajló modernizációja a nagyfokú digitalizálás és robotizálás mellett egyre nagyobb hangsúlyt szentel az alkalmazott anyagok körforgásának biztosítására is, a beépített anyagok minél nagyobb mennyiségben való újrahasznosítását.

A beton esetében ennek főbb okai közé sorolható a természetben található adalékanyagforrások kiapadása, illetve annak minőségromlása. Csak Európában 2019-ben a beton előállításhoz kitermelt adalékanyag (bányászattal vagy kotrással) mennyisége 2644 millió tonna [2] volt. Ebből az adatból egyszerűen belátható, ez az állapot hosszútávon nem fenntartható, ennek okán szükségszerű az alternatív adalékanyagok kutatása, fejlesztése.

Ilyen alternatív adalékanyag a zúzott beton. Megszilárdult betonból zúzással, majd a kívánt frakciókra szitálással előállítható nagy mennyiségben olyan adalékanyag, amelyből megfelelő minőségű keverék készíthető. Fontos megemlíteni, hogy kutatásom során ellenőrzött, laboratóriumi körülmények között készültek a keverékek. Jelen leírásban közölt eredmények ennek értelmében csak megfelelő pontosság mellett érhetőek el.

Kutatásom által nem csak az ily módon készült újrahasznosított betonok tulajdonságait kívánom bemutatni, hanem egyúttal fel szeretném hívni a figyelmet a jelenünkben zajló túltermelésre, az ebből adódó alapanyaghiányra. Ezt a hiányt nem, vagy csak néhány szakterületen érzékelhetjük, ám idővel egyre több iparágban jelentős gondot fog okozni. Erre célszerű megoldás az újrahasznosítás. Kísérleteimmel szeretném bizonyítani, hogy lehetséges jó minőségű betont előállítani ily módon.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Újrahasznosított betonok

Újrahasznosított betonok alatt azokat a betonokat értjük, melyek adalékanyagvázai korábbi megszilárdult-, vagy frissbetonból készülnek valamilyen eljárással. Ilyen eljárás történhet kémiai úton (általában frissbetonhoz vegyszer hozzáadásával készülő adalékanyag), vagy fizikai módon, például zúzással. Kutatásomban az utóbbi módszert alkalmaztam, az így kapott eredményeket ismertetem. Az újrahasznosítással készülő betonokra is igaz a mára jól ismert termékhasználati körforgás, melyet a 2.1. ábrán lehet megtekinteni. Az ábrán kiemelendő a tervezés fázisa. A tervezés lényege, hogy az adott termék megalkotásánál ne csak a funkcióját vegyük figyelembe, hanem legalább ekkora hangsúlyt fordítsunk az utóéletének megvizsgálására. Ennek értelmében úgy alakítsuk ki a produktumot, hogy ismerjük, mely eleméből mit lehet előállítani a termék élettartama után [3]. Ez igaz a kutatásom tárgyára, a betonra is. Már a receptúra kialakításánál ügyelni kell arra, hogy lehetőség szerint olyan anyagokat használjunk, amelyeket a kialakítandó szerkezet esetleges tönkremenetele után fel tudunk használni alapanyagként.



2.1. ábra A körforgásos gazdaság folyamatábrája [4]

Az újrahasznosított betonok előállítása a 2000-es évek elején kezdett kibontakozni. Ezzel kapcsolatban az alábbi, 2.1 táblázat jelent magyarázatot, amelyben néhány európai ország által 2015-ben előállított adalékanyagok forrását mutatja be.

2.1. táblázat 2015-ben előállított különféle adalékanyagok becsült mennyisége (Európai Adalékanyag Szövetség (UEPG) statisztikája alapján) [5]

Ország	Homok és kavics	Zúzottkő	Tengeri	Újra-hasznosított	Helyszínen újra-hasznosított	Gyártott	Összesen	Újrahasznosított/összes
Anglia	49	121	12	52	2	12	248	21,0%
Ausztria	63	33	0	4	0	2	102	3,9%
Belgium	13	45	6	15	0	1	81	18,5%
Hollandia	50	0	12	18	0	0	80	22,5%
Horvátország	4	15	0	0	0	0	20	0,0%
Magyarország	40	16	0	2	0	0	58	3,4%
Németország	231	207	10	68	0	29	545	12,5%
Románia	55	34	0	0	0	0	90	0,0%
Szlovákia	10	18	0	0	1	0	30	0,0%
Szlovénia	3	8	0	0	0	0	11	0,0%

Hazánkban főként 2005 után indult meg az érdeklődés az újrahasznosított adalékanyagból készülő betonok készítése iránt. Ezt megelőzően nem álltak rendelkezésre a téma iránti szabványok, szabályozások, illetve a szakmai tapasztalat hiánya is hozzájárult ahhoz, hogy ne alkalmazzanak ilyen betonokat. Áttörésnek a 2005-ben, a *fib* Magyar Tagozat által készített „Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával” című irányelv számított, amely segítséget nyújtott a kutatóknak, kivitelezőknek. Azóta megjelent az MSZ 4798:2016 szabvány, illetve az 1M és 2M szabványmódosítás is. A szabvány egyértelműen meghatározza, hogy mely betonok minősülnek újrahasznosítottnak: „A szabvány szerint újrahasznosított betonról beszélünk, ha újrahasznosított adalékanyagot vagy az adalékanyag-mennyiségre vonatkoztatva több mint 5 tömegszázalék visszanyert adalékanyagot tartalmaz.” [5]

A szükséges szakmai tapasztalat azonban a mai napig hiányos, emiatt még napjainkban is csekély az újrahasznosított betonok aránya. Részben ezt is prezentálja a 2.1 táblázat, ahol látható, hogy hazánkban mindössze 3,4% az újrahasznosítás aránya. Az tapasztalható, hogy a szakmai köztudatban az a kép alakult ki, hogy az újrahasznosított betonok minden esetben

gyengébb szilárdsági tulajdonságokkal bírnak, mint a megszokott, természetes adalékanyagvázú betonok. Ez azonban kiküszöbölhető az alapos, körültekinő újrahasznosított adalékanyag vizsgálatával, illetve a recept tervezésével [5]. Itt fontos megemlíteni, hogy a zúzottbeton adalékanyagú újrahasznosított betonok nem kavicsbetonnak, hanem zúzottkőbetonnak minősülnek, ennek értelmében a zúzottbeton közetfizikai paramétereit is figyelembe kell venni [6].

Erre példaként egy meglévő kísérlet eredményeit szeretném ismertetni. A keverék receptúráját a 2.2. táblázat tartalmazza. A keveréket a recept alapján elkészítették zúzott alapanyaggal is, kicserélve a homokos kavics adalékanyagvázat. Az így kapott nyomószilárdsági eredményeket a 2.3. táblázat prezentálja. (A homokos kavics adalékanyagú betont a HK jelöli, míg a zúzott adalékanyagút a REC) [5].

2.2. táblázat A kísérlet receptúrája [5]

Anyag	Típus	Tömeg [kg/m ³]
Adalékanyag	0/4 mm frakció (45%): természetes homok	824
	4/16 mm frakció (55%): természetes kavics, vagy visszanyert tört beton	1008
	Összesen (100%)	1832
Cement	CEM I 42,5 N (Duna-Dráva Cement)	380
Víz	$m_w/m_c = 0,43$	163
Adalékszer	polikarboxilát-éter hatóanyagú folyósító	max. 0,7 m _c %
Szál	acélszál, illetve polimer makroszál	0,5 V%

2.3. táblázat Átlag nyomószilárdság és testsűrűség 90 napos korban (minden eredmény 3 mérés átlaga) [5]

Minta jele	Nyomószilárdság [N/mm ²]	Testsűrűség [kg/m ³]
HK – szál nélküli	91,34	2382,02
REC – szál nélküli	99,13	2357,61
HK – acélszál (0,5V%)	74,19	2286,14
REC – acélszál (0,5V%)	100,56	2297,27
HK – polimer makro szál (0,5V%)	88,88	2355,69
REC – polimer makro szál (0,5V%)	101,57	2283,48

A 2.2. táblázat alapján a kísérletben három különböző típusú betont alkalmaztak:

- szál nélküli,
- acélszál erősítésű, (0,5V%)
- polimer makro szál erősítésű (0,5V%).

Jól látható, hogy az adalékanyag megfelelő megválasztásával, és a receptúra optimalizálásával közel azonos testsűrűség mellett nagyobb nyomószilárdságokat értek el a kutatók.

Az ily módon előállított beton alkalmas lehet [6]:

- az MSZ 4798:2016 szabvány szerinti közönséges betonok készítésére,
- közönséges beton és vasbeton monolit szerkezetek készítésére,
- beton, vasbeton, feszített vasbeton előregyártott elemek gyártására, de feszített vasbeton elemek gyártására csak a betonelőregyártó üzem saját építőanyaggyártási hulladékát lehet felhasználni.

Emellett azonban nagyon fontos kihangsúlyozni, hogy nem minden betonhulladék alkalmas újrahasznosításra. Az alábbi betontípusok ilyenek [6]:

- bauxitbeton,
- acél-gyártási Martin-salak adalékanyagú salakbeton,
- kazánsalak (szénsalak) adalékanyagú salakbeton,
- radioaktív salak,
- azbeszt tartalmú hulladék.

2.2 *Betonok viselkedése magas hőmérséklet hatására*

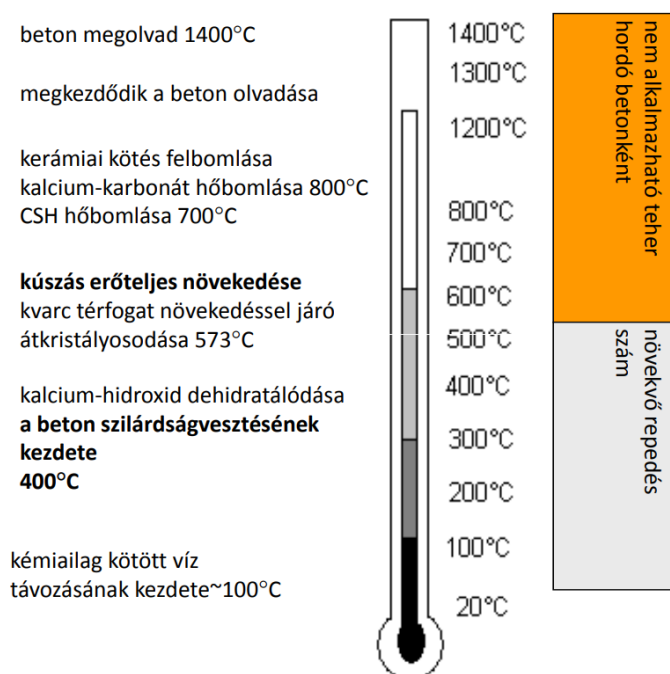
Magas hőmérséklet hatására a legtöbb építőiparban használt építőanyagunk viselkedése megváltozik. Ez igaz a betonra is, sőt összetett reakció jellemzi. Ennek oka az inhomogenitás. A beton viselkedése alaptól nagyban függ az elkészítéstől, kismértékben eltérő receptúra is már nagy változást okozhat a beton viselkedésében, így a tűzállóságában is. Ebben a fejezetben összegyűjtöm azon jellemzőket, amelyek általánosságban igazak a beton viselkedésére magas hőmérséklet esetén.

Hőterheléses vizsgálatok folyamán azt tapasztalhatjuk, hogy a hőmérséklet növekedésével arányosan veszt szilárdsági paramétereiből a beton. Ezen negatív változások az anyag lehűlésével továbbra is fennállnak, tehát maradandó szilárdságvesztésről beszélhetünk [7]. A betonszerkezeteink tönkremenetele a beton alkotóelemeiben lejátszódó fizikai és kémiai átalakulásokra vezethető vissza [7,8].

A hőmérséklet növekedésének hatására végbemenő exoterm vagy endoterm folyamatok pontosan nyomon követhetők az úgynevezett DTA (differenciál termoanalízis) görbékkel [7,8,9]. Ezen változások hőfoklépcsők alapján [7,8,10,11]:

- 50-110 °C: bekövetkezik az ettringit bomlása,
- 100 °C: kémiaileg kötött víz távozása, tömegvesztés,
- 200 °C: további dehidratációs folyamatok, tömegvesztés,
- 300 °C: további tömegvesztés a kiinduló nedvességtartalom függvényében nem érzékelhető,
- 450-550 °C: a nem karbonátosodott portlandit bomlása, endoterm csúcs, újabb tömegvesztés,
- 573 °C: normálbetonok esetén kristályátalakulás figyelhető meg, kvarc α módosulathoz kvarc β módosulatba változik, ami nagyjából 5,7%-os térfogatnövekedéssel jár, a beton szilárdságvesztését okozva,
- 700 °C: a kalcium-szilikát-hidrát (CSH) vegyületek bomlása vízleadással, további térfogatnövekedéssel, további szilárdságvesztéssel.

A felsorolt változások megtekinthetők az alábbi, 2.2. ábrán, amely szemléletes prezentációt biztosít.

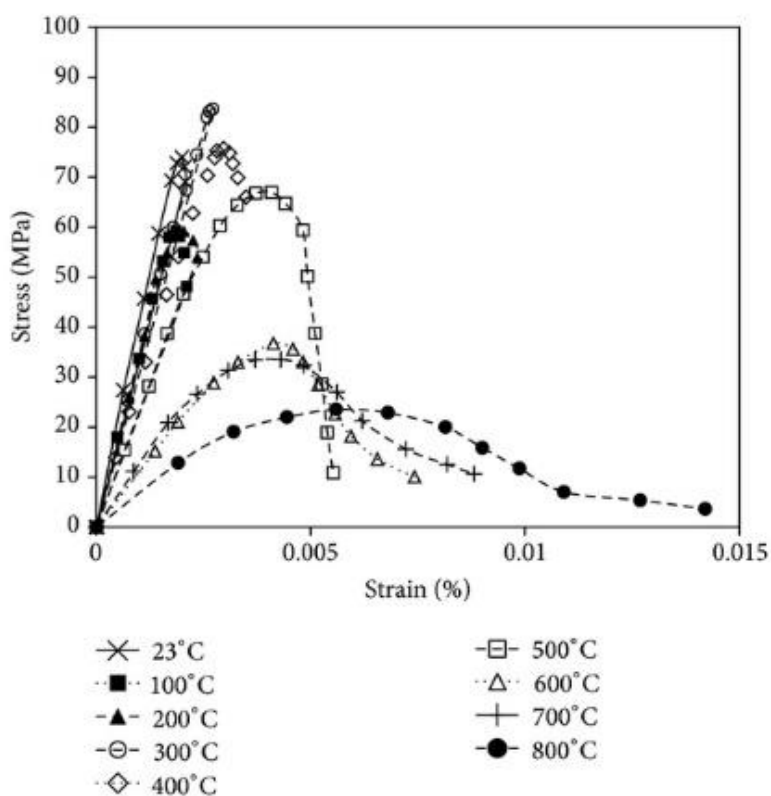


2.2. ábra A betonban lejátszódó változások különböző hőmérsékleteken [7,11]

A fentebb említett endoterm és exoterm folyamatok mellett a próbatest porozitása is változik, amelyeket alább részletezem [7]:

- 150 °C-ig: kvarckavics adalékanyagvázú beton esetén a cementkő- és az adalékanyag és cementkő közötti kontaktzóna porozitása nő,
- 150 °C felett: repedések keletkez(het)nek a kontaktzónában,
- 150-450 °C: a cementkő struktúrája stabil,
- 450-550 °C: további porozitás növekedés a portlandit bomlása miatt,
- 550-650 °C: a cementkő struktúrája nem változik,
- 650-750 °C: a kalcium-szilikát-hidrát (CSH) bomlása megkezdődik, ezzel a kapillárisok száma megnő,
- 750 °C felett: a pórusok átmérője jelentősen megnő.

A beton különböző hőfokon mért feszültség-alakváltozás (σ - ϵ) diagramját a 2.3. ábrán mutatom be. Az ábráról leolvasható, hogy a hőterhelés intenzitásának növelésével a görbék csúcspontjai eltolódnak, tehát a nyomószilárdság csökken, azonban ezzel egyidejűleg a törési összenyomódás növekszik [8].



2.3. ábra Beton feszültség-alakváltozás diagramja különböző hőmérsékleteken [12]

Számos kutatás folyt korábban a beton tűzterhelésben történő vagy azt követő viselkedéséről, amelyekből azt a konklúziót vonhatjuk le, hogy a szilárdságcsökkenés az adalékanyagváztól csak kis mértékben függ, és a leromlás kémiai folyamatai a cementkőben játszódhatnak le. Így belátható, hogy az adalékanyagvázat kitöltő cementmátrix tulajdonságai szabályák meg a beton viselkedését magas hőmérsékleten [8].

Ezt követően felmerülő kérdés, hogy a cement típusa befolyásoló tényező-e a beton maradó nyomószilárdságvesztés kialakulásában. Ennek megismerésére szintén egy kutatást szeretnék bemutatni, mely során három különböző cement típust vizsgáltak [8]:

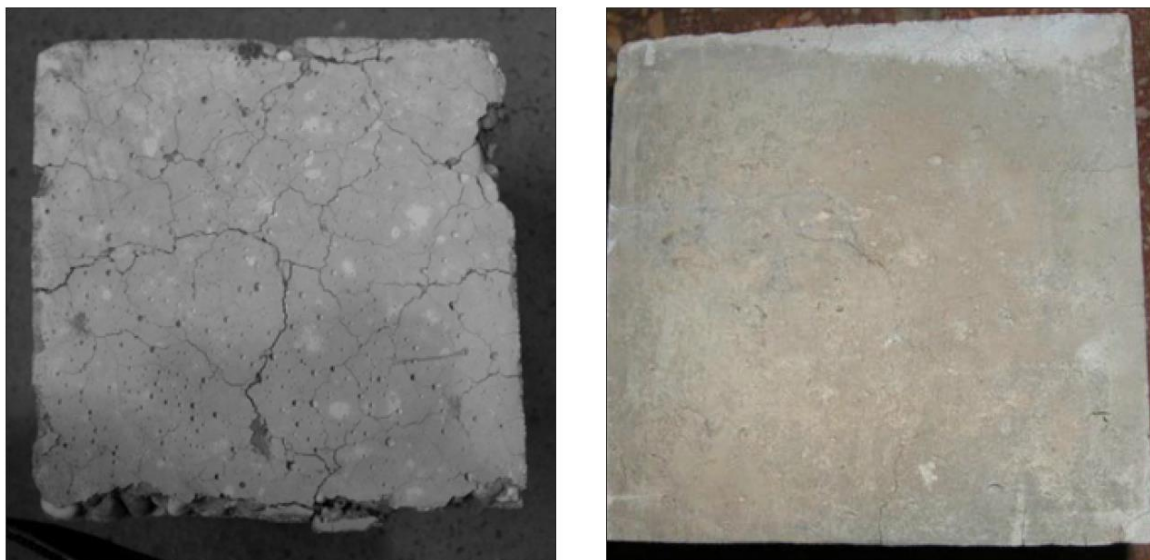
- portlandcement (CEM I 42,5 N),
- kohósalak-portlandcement (CEM II/A-S 42,5 N),
- kohósalak cement (CEM III/A 32,5 N; CEM III/B 32,5 N-S).

A hőterhelést az alábbi hőfokokon végezték el: 50 °C, 150 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 800 °C.

A hőterhelést követően az első vizsgálati módszer a szemrevételezéses eljárás volt, amely során a próbatestek felületén keletkező repedéseket elemezték, melyből előzetesen lehet következtetéseket levonni a nyomószilárdság csökkenéséről. A szemrevételezés során az tapasztalható, hogy a portlandcementtel készült beton felületén sok repedés keletkezett, míg a kohósalak cementtel készülnél csak kevés hajszálrepedés volt látható [8]. Ezen tapasztalatok láthatók a 2.4. ábrán.

Ezt követően megvizsgálták a nyomószilárdság változását a hőmérséklet függvényében. A kapott eredményekről az alábbi következtetések vonhatók le [8]:

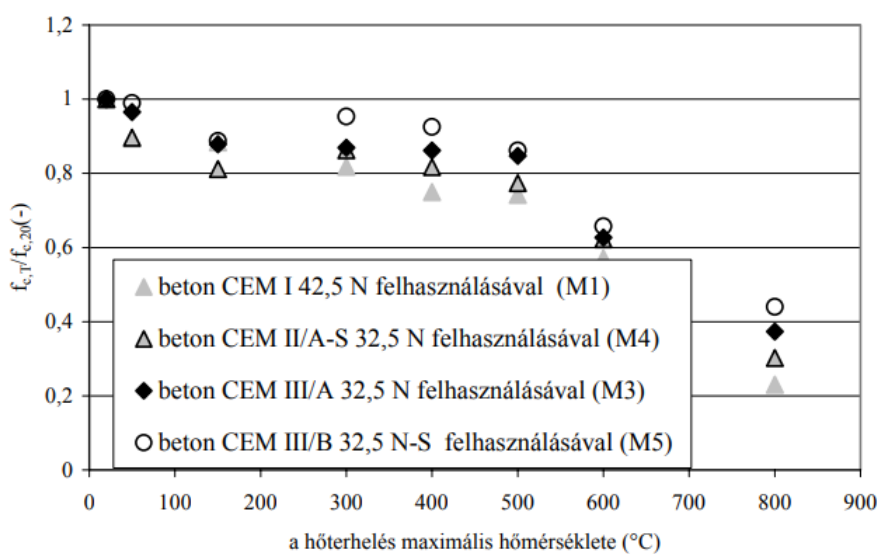
- 150 °C-ig a maradó nyomószilárdság egységesen csökken,
- 300 °C körül egységesen egy átmeneti szilárdság-növekedés figyelhető meg,
- 300 °C felett egységesen tovább csökken a maradó nyomószilárdság,
- a cement kohósalak tartalmának növelésével a hőterhelés utáni, relatív maradó nyomószilárdság értéke is nő,



2.4. ábra Eltérő cement típussal készített betonok felületi repedései 800 °C hőterhelés után (baloldalon portlandcementtel, jobboldalon kohósalak cementtel) [8]

→ 800 °C-os hőterhelés hatására a CEM I 52,5 N portlandcementből készült beton maradó relatív nyomószilárdsága 23%, míg a CEM III 32,5 N-S kohósalak cementből készült beton esetén ez az érték 44%.

Ezekből az adatokból leszűrhető, hogy a kohósalak cementből készült betonok jobban viselkednek magas hőmérséklet hatására, mint a portlandcementből készült társaik. Az utolsó pontban közölt eredményből látható, hogy közel kétszer akkora a maradó relatív nyomószilárdsága a kohósalak cement tartalmú betonnak, mint a portlandcement tartalmúnak. A vizsgálat eredményei megtekinthetők az alábbi, 2.5. ábrán.



2.5. ábra Maradó relatív nyomószilárdság a hőfok és a felhasznált cement típus függvényében [8]

A hőterhelés utáni szilárdsági változásokat a cement típus mellett az adalékanyag váza is befolyásolja [13, 14]. Eszerint minden adalékanyagvázhhoz rendre eltérő viselkedés tartozik [8].

A kvarc, valamint mészkő adalékanyagú betonoknál az tapasztalható, hogy enyhe hőmérsékletnövelés mellett detektálható szilárdságcsökkenést figyelhetünk meg, amelyet egy átmeneti szilárdságnövekedés követ [8]. Ennek oka lehet a cement, valamint a kvarc eltérő hőtágulási együtthatója, melyek következtében az eltérő mértékű elmozdulások miatt a két anyag határfelületén mikrorepedések jönnek létre [8,10].

Nagyjából 400 °C-ig a szilárdsági paraméterek rendre csökkenő értékeket mutatnak, melynek oka a cementkő repedezése. Efelett a hőmérséklet felett azonban lényegesen eltérő tendenciát mutatnak a különböző adalékanyagvázú betonok [8]. Az tapasztalható, hogy megközelítőleg 550 °C-ig a kvarcvázú betonok szilárdságcsökkenésének mértéke nagyjából 40%, míg a duzzasztott agyagkavicsal készülő betonoknál ugyanezen érték jelentősen kisebb, 20% körüli [8].

Ahogy már ebben a fejezetben fentebb említettem, 573 °C-on az α -kvarc módosulat β -kvarc módosulatba változik, mely további szilárdsági csökkenéseket okoz. 700 °C felett egységesen, minden betonnál további szignifikáns szilárdságcsökkenés tapasztalható, a már szintén említett kalcium-szilikát-hidrát (CSH) átalakulása miatt [8].

Az adalékanyagváz mellett a víz-cement aránya is fontos (mondhatni fontosabb) tényezője a beton viselkedésének magas hőmérséklet hatására. Az alább közölt kutatás során több eltérő víz-cement aránnyal kialakított betont vizsgáltak [15].

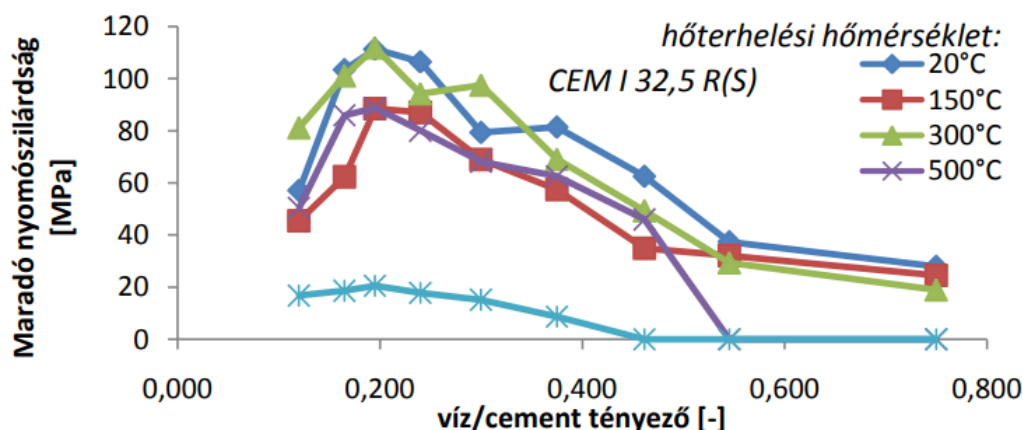
A vizsgálatok során két eltérő cement típust alkalmaztak:

→ CEM I 32,5 R(S),

→ CEM I 42,5 R.

A cement és a keverővíz arányát széleskörben, kilenc eltérő értékre állították be, így 0,120; 0,165; 0,195; 0,240; 0,300; 0,375; 0,462; 0,575 és 0,750 arányú víz-cement tényezőjű beton készült. A kutatás során 18 sorozat készült, sorozatonként 60 próbatesttel. A próbatesteket három hőfokon terhelték a szobahőmérsékleten kívül: 150 °C, 300 °C illetve 500 °C. A

hőterhelést követően szobahőmérsékleten (~20 °C) történt a nyomószilárdság mérése [15]. A kapott eredményeket a 2.6. ábrán mutatom be.



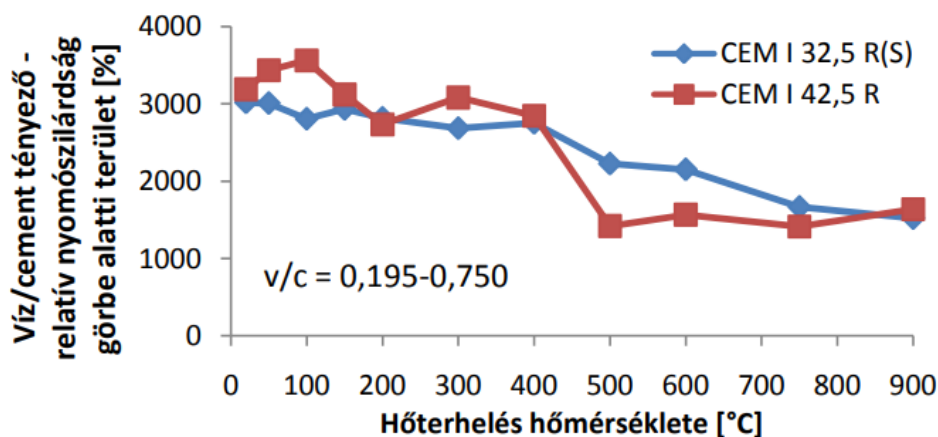
2.6. ábra Maradó nyomószilárdság alakulása a hőmérséklet és a víz-cement tényező függvényében CEM I 32,5 R(S) cement típus esetén [15]

Az ábrán szembejövő lehet, hogy az 500 °C-on terhelt, 0,575 víz-cement tényezőjű betonok esetén a maradó nyomófeszültség nullára csökken, majd további kutatási eredmények nincsenek. Ennek oka, hogy a nagy víz-cement tényezőjű betonok (0,575 felett) esetén nem lehetett elvégezni a visszahűlt próbatesteken nyomószilárdsági vizsgálatokat, mivel a próbatestek kézzel morzsolhatóvá váltak [15]. A másik oldalon a nagyon alacsony víz-cement arányú (0,195 alatti) betonok pedig szétrobbantak a kemencében hőterhelés közben [15]. Ezt a jelenséget az úgynevezett spalling jelenségnek hívjuk. A spalling során a beton robbanásszerűen megy tönkre, melynek legfőbb oka a pórus-gőznyomás. A zárt pórusokban lévő víz a hőmérséklet hatására elpárolog, gőz keletkezik belőle, amely a zárt pórusból nem tud kijutni, így szétfeszíti azt, előidézve a robbanásszerű tönkremenetelt. Ez a típusú, magas hőmérséklet hatására történő tönkremenetel jellemző a nagyszilárdságú betonokra, a kevés pórustartalom miatt [16].

Az ábrán látható, hogy a legkisebb víz-cement tényező, amihez van vizsgálati eredmény a 0,195. Hiába lett készítve 0,120 és 0,165 víz-cement arányú beton is, azokhoz nem tartozik maradó nyomószilárdsági, mért érték. Ennek oka, hogy ennél a két aránynál hidratációs és bedolgozhatósági problémák léptek fel [15].

Az eltérő cement típus alkalmazásának hatása a 2.7. ábrán jelenik meg. Az ábra konklúziója, hogy 400 °C-ig többé-kevésbé hasonlóan viselkednek a különböző cement típusból, de ugyanolyan víz-cement tényezővel készített betonok. Ezt követően 400-750 °C

között leolvasható az ábráról, hogy a CEM I 32,5 R(S) típusú cementből készült betonok jobban viselkedtek magas hőmérséklet hatására, ugyanolyan víz-cement arányban használva [15].



2.7. ábra Eltérő cement típusú, ugyanolyan víz-cement tényezőjű betonok viselkedése a hőmérséklet függvényében [15]

2.3 Újrahasznosított adalékanyagú betonok viselkedése magas hőmérséklet hatására

Az újrahasznosított adalékanyagú betonok nyomószilárdsága magas hőmérséklet hatására is megfelelő lehet. 2 módszer ismert a hőterhelt betonok nyomószilárdságának meghatározására a lehűlés folyamatának függvényében [17]:

- természetes hűlés
- vízzel történő hűtés

A két eljárás eredményei eltérnek egymástól. Ez a rész a 2 különböző módszerrel mért nyomószilárdság változását hasonlítja össze, és vizsgálja a jelenség okait.

Természetes hűtés:

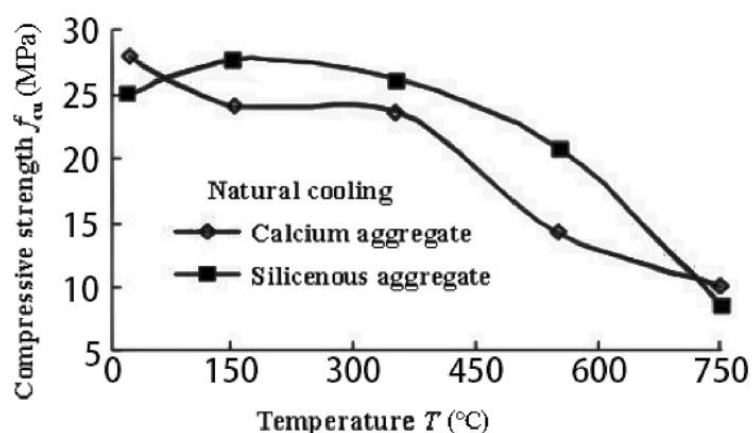
Mivel az újrahasznosított adalékanyagú beton (UAB) több vizet tartalmaznak, mint a természetes adalékanyagú beton (TAB) így a CSH vegyület nagyobb mennyiségben alakulhat ki az adalékanyag kapilláris pórusaiban. Ennek következménye, hogy így kisebbek lesznek a megszilárdult beton pórusai, így szobahőmérsékleten meglehetősen magas a nyomószilárdsága. Azonban fontos megemlíteni, hogy a kisebb szemnagyságú újrahasznosított adalékanyag alkalmazása repedéseket okozhat, a cement-mátrix és az adalékanyag eltérő hőtágulása miatt. Az UAB-ok nyomószilárdságának főbb befolyásoló tényezői a következők [17]:

- adalékanyag fajtája,
- adalékanyag mérete,

- adalékanyag formája,
- próbatest feszültségállapota.

Az adalékanyag fajtáját tekintve az tapasztalható, hogy 550 °C fok alatti hőterhelés esetén a szilícium-dioxid tartalmú újrahasznosított adalékanyagból készült betonok nyomószilárdsága magasabb, mint a mészkő tartalmú újrahasznosított adalékanyagból készültek [17].

A kvarc 573 °C-on történő módosulása (α -kvarc módosulatból β -kvarc módosulatba) erősen befolyásolja a nyomószilárdságának csökkenését a hőmérséklet függvényében. Ez látható az alábbi, 2.8 ábrán.



2.8. ábra Kvarc és kalcium adalékanyagú betonok nyomószilárdságának változása a hőmérséklet függvényében [17]

A természetes hűlésű nyomószilárdság vizsgálat két részre osztható a próbatest feszültségállapota szerint [17]:

- egytengelyű feszültségállapot (uniaxial)
- háromtengelyű feszültségállapot (triaxial)

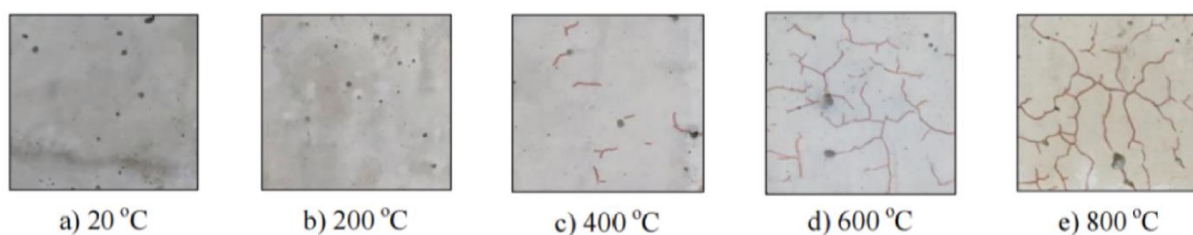
Egytengelyű feszültségállapotban lévő próbatestek esetén az UAB-ok nyomószilárdságának változása különbözik három elkülöníthető hőmérséklet tartományban: 20-200, 200-400 és 400-800 °C [17].

Az UAB-ok nyomószilárdsága 20-200 °C közötti tartományban magasabbak, mint az eredeti, hőterheletlen próbatesteknek. Ennek oka a hidratációs folyamat ismételt beindulása a dehidratált cementszemcsékben, amely növeli a nyomószilárdságot [17].

Az adalékanyag és a cement alakváltozása közötti eltérés 200-400 °C között válik erőteljesebbé, mivel a kémiai kötött víz elpárolgásával a cement dehidratált állapotba kerül, amely egy folyamatos nyomószilárdság csökkenéshez vezet [17].

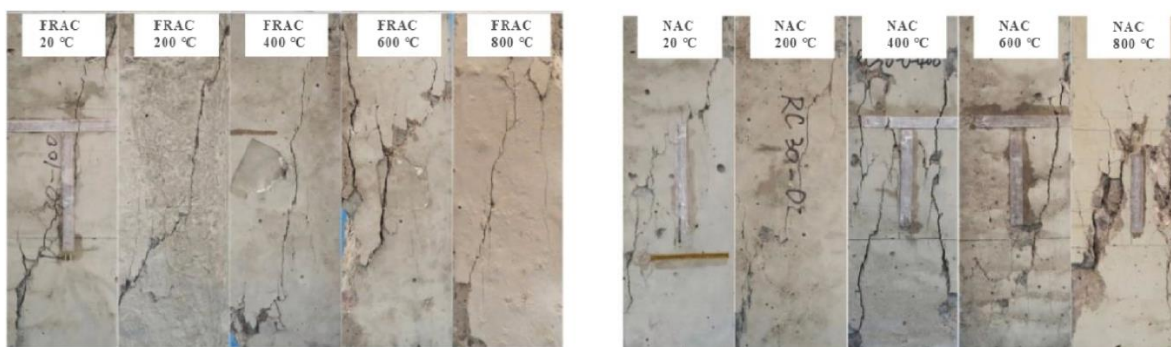
A 400-800 °C közötti tartományban a magas hőmérséklet repedésekhez vezet az UAB-ban, melynek okán 800 °C-on a nyomószilárdság 20-30%-al csökken az eredeti, atmoszférikus hőmérsékletű próbatestekhez képest [17].

Az alábbi, 2.9 ábrán látható az UAB felülete különböző hőfokon terhelve. Kikövetkeztethető, hogy robbanásszerű tönkremenetel (spalling) nem következett be a hőterhelés során. A kutatás során a kutatók azt tapasztalták, hogy UAB-ok esetén nem volt jellemző a robbanásszerű tönkremenetel, kielégítően viselkedtek a próbatestek a hőterhelés folyamán [17].



2.9. ábra UAB felülete különböző hőfokú hőterhelést követően [17]

A 2.10. ábrán megfigyelhető az UAB és a TAB felülete hőterhelés utáni nyomóvizsgálatot követően. Jól látható, hogy UAB esetén 400 °C-ig a töréskép nem tér el jelentősen a szobahőmérsékletű, 20 °C-os próbatest törésképétől, míg a TAB próbatesten már láthatóan megváltozott ugyanezen a hőmérsékleten. Terhelés hatására kisebb függőleges repedések keletkeznek, melyek fokozatosan szélesednek, míg végül átérik a teljes keresztmetszetet. A magas hőmérséklet hatására 400 °C felett már megjelennek a kezdeti repedések, melyek szélesebb repedésszínát fognak okozni külső terhelést követően [17].



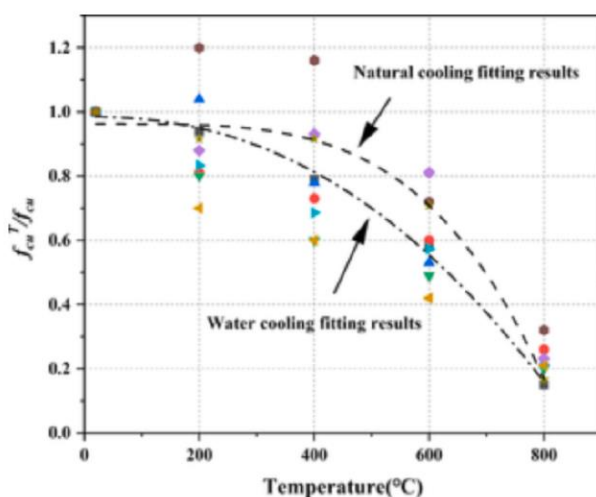
2.10. ábra Különböző hőfokon terhelt próbatestek törésképe nyomóvizsgálat után (balra: UAB, jobbra: TAB) [17]

Ahogy azt fentebb említettem, a kutatók tanulmányozták az UAB próbatestek nyomószilárdságának változását triaxiális terhelés esetén is. Ennél az eljárásnál azt mutatták ki, hogy 300 °C alatt a nyomószilárdság csökkenése jelentéktelen, majd 400 °C felett fokozatosan

növekedett. Az mondható el, hogy a magas hőmérséklet triaxiális vizsgálat esetén kisebb hatással van az UAB nyomószilárdságára, mint uniaxiális terhelésnél [17].

Vízzel történő hűtés

A kutatók tanulmányozták a vízzel történő hűtés hatását a magas hőmérsékletnek kitett UAB esetén, szimulálva a vízzel való tűzoltást egy esetleges tűzesetnél. Egyértelműen kimutatható, hogy az ily módon történő hűtés erősen befolyásolja az UAB nyomószilárdságának változását. Ahogy az a 2.11. ábrán is látható, vízzel való hűtés hatására a szilárdságcsökkenés intenzitása erőteljesebb, mint természetes hűlés folyamán, valamint a mechanikai tulajdonságok nemlineárisak. A tanulmány során azt is sikerült felismerni, hogy a hűlés módjától függetlenül a magas hőmérséklet okozta szilárdságcsökkenés jelentősebb UAB esetén, mint TAB-nál [17].



2.11. ábra Természetes hűlésű (szaggatott vonal) és vízzel történő hűtésű (pontvonal) UAB nyomószilárdságának alakulása a hőmérséklet függvényében [17]

A vizes hűtés hatása a nyomószilárdság alakulására három hőmérséklettartományra bontható: 20-200, 200-600 és 600-800 °C [17].

20-200 °C között a felhevült betonfelületet érő víz hatására jelentős mennyiségű vízgőz keletkezik, mely magas légnyomást eredményez a felület környezetében. Ez a magas légnyomás igen romboló hatással van a beton belsejében keletkező repedésekre, aminek következtében a beton nyomószilárdsága csökkenni kezd [17].

A 200-600 °C-ig terjedő tartományban a víz elpárolog, így a légnyomás nem változik, tehát nincs hatással a betonelemre. 400 °C-ig a természetes hűlésű betonok felülete alapvetően repedésmentesek, míg a vízzel hűtött próbatestek felületén megfigyelhetők repedések. 400 °C felett a hűtősmód befolyása a repedésképre gyengül (a hidratáció hatására az UAB „bomlani”

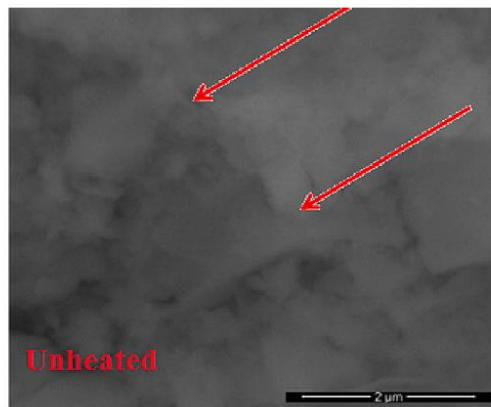
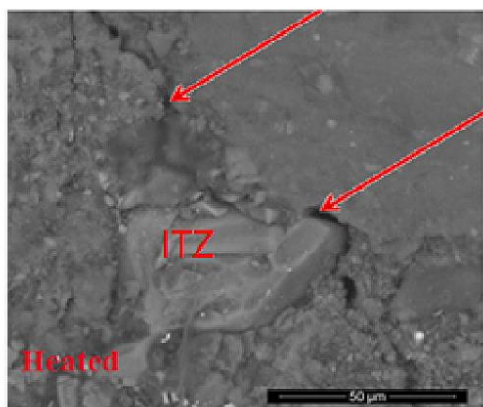
kezd, a repedések megnyílnak, így a felületen is megjelennek). Ezen a hőmérsékleten a próbatestre lőtt víz hatására a hidratált cementszemcsék elszeparálódnak a cement belsejében, melynek következtében egy enyhe szilárdság növekedés figyelhető meg az UAB esetén. Végül a tartomány végén (600 °C körül) a nyomószilárdság ismételt csökkenő tendenciát mutat [17].

Az utolsó, 600-800 °C hőmérséklettartományban betont felépítő anyagok erőteljes bomlása kezdődik, amely az UAB nyomószilárdságának további, rohamos csökkenéséhez vezet. 800 °C-on némely esetben megfigyelhető a nyomószilárdság teljes elvesztése [17].

A hűtési módszer hatását a nyomószilárdság alakulására több kutató is vizsgálta, akik eltérő eredményekre jutottak. Az egyik kutatás során kimutatták, hogy a vízzel történő hűtés intenzívebben redukálja a beton nyomószilárdságát, mint a természetes hűtés, azonban a hőmérséklet emelkedésével a két módszer közötti eltérés csökken. Ezzel szemben egy másik tanulmány szerint a vízzel történő hűtés 600-800 °C közötti hőfokon növeli a próbatest nyomószilárdságát, a természetes hűtéssel ellentétben, valamint a hűtési módszer hatása fokozatosan erősödik a hőmérséklet emelkedésével. Ezek az eltérések arra vezethetők vissza, hogy a két vizsgálat során eltérő típusú adalékanyagot és próbatest méretet alkalmaztak, illetve különbözőek voltak a vizsgálat körülményei (fűtés intenzitás, hűtés intenzitás, és ezen vizsgálatok ideje) [17].

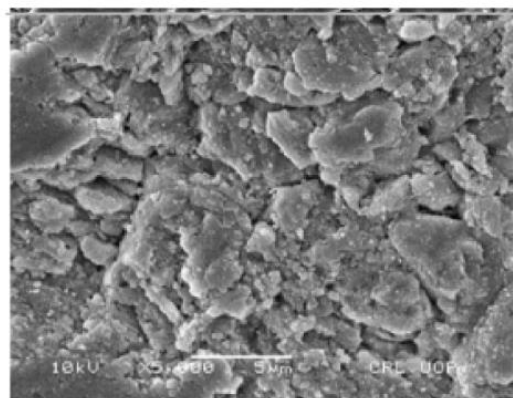
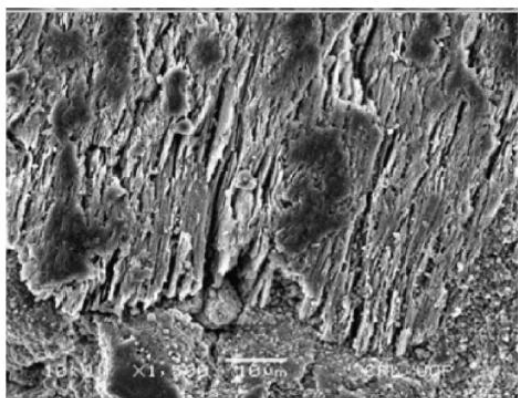
Konklúzió

Mivel az UAB jelentős mennyiségű megszilárdult cementkővet tartalmaz a zúzott beton adalékanyag miatt, így a porozitása nagyobb, tehát a sűrűsége kisebb, mint a TAB-nak. Terhelés esetén az UAB-ban először az adalékanyag, illetve a cementkő határfelületén jönnek létre repedések, ahogy az a 2.12. ábrán is látható, majd a cementkőben jelennek meg a további repedések [17].



2.12. ábra Hőterhelt (balra) és hőterhelés nélküli (jobbra) UAB-ban kialakuló mikrorepedések nyomóvizsgálat hatására [17]

Ahogy az lentebb, a 2.13. ábrán látható, az UAB adalékanyagvázában tágabb mikrorepedések figyelhetők meg, mint TAB esetén 800 °C-on. Ez azt eredményezi, hogy a TAB jobban viselkedik magas hőmérséklet hatására, mint az UAB. Szintén leírható, hogy UAB esetén a pórusokból elpárolgó víz hatására az adalékanyag és a cementmátrix eltérő hőtágulásából, valamint a pórusok nagyságából fakadóan további mikrorepedések alakulnak ki, aminek következtében tovább csökken az UAB nyomószilárdsága [17].



2.13. ábra UAB (balra) és TAB (jobbra) mikrorepedései 800 °C-on [17]

Kijelenthető tehát, hogy az UAB nyomószilárdság tekintetében kedvezőtlenebbül viselkedik magas hőmérsékletnek kitéve, mint a TAB. Ennek oka az adalékanyagban keresendő. A zúzott adalékanyagokról általánosságban elmondható, hogy a zúzási eljárás következtében több mikrorepedéseket tartalmaznak, így a porozitásuk nagyobb lesz, mint a természetes adalékanyagok (például kvarckavics). Emellett ahogy fentebb említettem, a zúzott beton adalékanyag megszilárdult cementkővet is tartalmaz, amely a hőterhelés hatására kialakuló dehidratációs állapot következtében erőteljesen veszít szilárdságából.

3. KUTATÁS CÉLKITŰZÉSE, MENETE

Dolgozatomban az újrahasznosított betonok szilárdsági paramétereinek megváltozását írom le magas hőmérséklet hatására.

Az újrahasznosított adalékanyagú betonokat (UAB) kutatásomban három különböző szilárdságú, természetes adalékanyagú (TAB), illetve egy duzzasztott agyagkavics adalékanyagú (későbbiekben erre is a TAB rövidítést használom, az egyszerűség kedvéért, viszont jelezni fogom, hogy duzzasztott agyagkavics az adalékanyag) megszilárdult beton zúzásával előállított zúzott beton adalékanyagból készítettem. A megszilárdult betonok receptúráit a lentebbi, *4.1 fejezetben* mutatom be.

A kutatás menetének megértésére készítettem egy folyamatábrát, amelyet a *3.1. ábrán* mutatok be. Az ábra értelmében az első fázisa a kutatásomnak a TAB-ok megkeverése. Ezt követően ezen betonokon végeztem el szilárdsági vizsgálatokat, melyekből el tudtam végezni a különböző típusok szilárdságiosztályba sorolását.

A mérések végeztével elkezdtem az újrahasznosított adalékanyagok előállítását, melyet zúzással vittem véghez. Az előállt adalékanyagokon vizsgálatokat végeztem, melyek az UAB-ok receptúrájának megtervezéséhez voltak szükségesek.

Az adalékanyagvizsgálatok befejeztével a folyamatábrán is láthatóan kétfelé ágazott a kutatásom. Az egyik ágon a szitálás utáni finom és durva frakció 100%-os felhasználásával elkészítettem az UAB keverékeket, míg a másik ágon a 0,063 mm alatti szemnagyságot kötőanyagkiegészítőként alkalmazva szeretném vizsgálni a jövőben. Azonban jelen tanulmányban csak az előbbi vizsgálatokat és azok eredményeit mutatom be.

Végezetül az UAB-okon szilárdulást követően hőterhelési, majd szilárdsági vizsgálatokat hajtottam végre. A fentebb említett négy különböző szilárdságú, TAB-ok lezúzásából négy típusú zúzott beton adalékanyag állt elő, ezekből egyesével, négy UAB készült. A hőterhelési és szilárdsági vizsgálatok eredményeit végül az egyik TAB-on elvégzett mérésekkel hasonlítottam össze. Erre a receptúrára a későbbiekben referencia receptúraként fogok hivatkozni.

A kutatásról készített folyamatábra az M1 számú mellékletben tekinthető meg, melyet csatoltam jelen tanulmányomhoz.

4. TAB ELŐKÉSZÍTÉSE

Jelen fejezetben a különböző vizsgálatokhoz szükséges előkészületi munkákat mutatom be, így a természetes adalékanyagú betonok receptúráit, illetve a mérésekhez szükséges próbatestek tulajdonságait.

4.1 Keverék receptúrák

Ahogy azt a fentebbi, 3. fejezetben említettem, négy különböző receptúrájú betonnal dolgoztam. Ezek megalkotásánál a fő szempont a szilárdságeltérések kialakítása, illetve egy esetben az adalékanyagváz megváltoztatása volt. A szilárdságeltéréseket a víz-cement tényező beállításával értem el. A receptúrákat az M2 számú mellékletben prezentálom.

Látható a receptúrákon, hogy a MIX_1, és MIX_2 esetében 45%-os a víz-cement tényező értéke, míg a MIX_3 esetén 35%, MIX_4 esetén pedig 55%. Ezekkel az érték különbségekkel tudtam elérni a szilárdságbeli eltérést. A keverékek pontos szilárdságosztályát a későbbiekben fogom bemutatni.

Szintén látható, hogy a MIX_1, MIX_3 és MIX_4 esetén az adalékanyag frakciójánál a 4/8 mm szerepel. Ez a szemnagyság a természetes kvarckavics szemátmérőjére utal. Ezzel szemben a MIX_2 táblázatában LECA 4/8 mm látható. Ez az adalékanyag fajtájára utal, ugyanis ez a receptúra a könnyűbeton receptúrája, amelynél duzzasztott agyagkavicsot alkalmaztam adalékanyagként.

A táblázatok utolsó oszlopaiban korrekciók láthatóak. Ennek oka, hogy a TAB adalékanyagjának volt kezdeti víztartalma, amelyet víztartalom méréssel meghatároztam, majd ennek fényében korrigáltam a receptúrát – a keverővíz mennyiségéből levontam ezen mennyiséget, míg az adalékanyag mennyiségéhez hozzáadtam. Duzzasztott agyagkavics esetén az adalékanyag sajátossága, hogy magas vízfelszívóképessége van, emiatt ott a keverővíz mennyiségét növeltem a könnyű adalékanyag 30 perces vízfelvételének figyelembevételével.

Szintén látható, hogy az összes keveréknél egységesen CEM I 52,5 N típusú kötőanyagot alkalmaztam. Ennek oka esetemben a rendkívül gyors kötési idő. Az ilyen portlandcementből készült próbatesteket már huszonnégy óra elteltével kivehettem a sablonból, és megkezdhettem az utókezelést.

4.2 Próbatetek előkészítése

A próbatetek elkészítésénél figyelembe kellett vennem az elvégzendő vizsgálatokat, azokhoz mérten kellett kiválasztanom a szükséges próbatest geometriát. Az elvégzendő mérések (amelyeket a dolgozatom későbbi részében részletesen ismertetni fogok):

- nyomószilárdság vizsgálat,
- hajlító-húzószilárdság vizsgálat,
- testsűrűség mérés,
- látszólagos porozitás mérés.

A nyomószilárdság vizsgálatot 150x150x150 mm élhosszúságú kockán végeztem el. TAB esetén négy mérés átlagából számítottam ki a nyomószilárdság értékét, majd ebből a szilárdságosztályba sorolást, valamint további négy méréssel vizsgáltam az utószilárdulás mértékét. Ebből adódóan összesen nyolc sablon kockára volt szükségem egy keverék esetén.

A hajlító-húzószilárdságot 70x70x250 mm élhosszúságú hasáb próbatesten mértem. A hajlító-húzószilárdság értékét hat mérés átlagaként határoztam meg. A vizsgálat után keletkezett két félhasáb egyikén nyomószilárdság mérést végeztem, míg a másikon látszólagos porozitás vizsgáltam.

A testsűrűség vizsgálatot praktikusán a hajlító-húzószilárdság méréshez felhasznált próbatesteken végeztem. A hajlító-húzóvizsgálat során ketté tört próbatesteken egyik felén végeztem el a testsűrűség meghatározását.

A hőterheléses vizsgálatokat ahogy már említettem a TAB-ok estén nem végeztem el, azonban röviden közlöm ebben a fejezetben is a menetét. A hőterheléses méréseket öt hőfokon végeztem el: 20 °C, 150 °C, 300 °C, 450 °C és 600 °C. Hőfokonként 3 hasáb próbatestet használtam fel, ezek átlagából határoztam meg a különböző paramétereket. Ez azt jelenti, hogy az UAB-ok és a referencia beton esetén 15 hasábra volt szükségem.

A keveréseknél fel nem használt betonból kisebb élhosszúságú, 100x100x100 mm-es kockákat készítettem. Ezt később az újrahasznosított adalékanyag előállításához fel tudtam használni, így a teljes megkevert betonmennyiséget felhasználtam, nem keletkezett hulladék.

Az M3 számú mellékletben összegyűjtöttem, hogy keverékenként milyen típusú próbatetekre volt szükségem.

A keverékeket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés tanszékének anyagvizsgáló laborjában készítettem el. A mixeket az előre összeállított receptúrák alapján készítettem el. A keveréshez a laborban található kényszerkeverőt alkalmaztam, amely az alábbi, 4.1. ábrán tekinthető meg.



4.1. ábra Kényszerkeverő, benne friss betonnal

A frissbeton konzisztenciáját Glénium C300 nevű folyósító adalékszerrel állítottam be. A konzisztenciaosztályba sorolást a területi mérték alapján határoztam meg, az *MSZ EN 12350-5:2019* szabványt követve. A vizsgálatot szabványos területmérő ejtőasztalon végeztem el. A keverékek kialakításánál törekedtem az F3 konzisztenciaosztály kialakítására.

A kívánt bedolgozhatóság elérését követően a sablonok megtöltését kezdtem meg. A 4.2. ábrán látható egy kockasablon, bedolgozva és tömörítve. A sablonok bedolgozását két rétegben végeztem el, rétegenként tömörítve. A tömörítést vibroasztalon végeztem, mely szintén megtekinthető a 4.3. ábrán.



4.2. ábra Kockasablon



4.3. ábra Vibroasztal

Ahogy azt a 4.1 fejezetben is taglaltam a keverékeknél egységesen CEM I 52,5 N kötőanyagot alkalmaztam.

Utókezelés alatt a beton hidratációs folyamataihoz szükséges víz pótlását értjük. Ez történhet több módszerrel, többek között [18]:

- permetezéssel, locsolással,
- árasztásos eljárással,
- vegyestárolással,
- nedves juta- vagy terfilszövettel történő letakarással,
- adalékszer alkalmazásával, stb.

A kutatásomban én vegyestárolásos eljárást alkalmaztam. Ennek értelmében a huszonnyolc napos szilárdulásból az első hét napot teljesen víz alatt töltötték a próbatestek (melyről látható kép a 4.4. ábrán), majd a további huszonegy nap tovább folytatódott a laboratóriumi levegőn (szobahőmérsékleten) a szilárdulás.



4.2. ábra Víz alatti tárolásra szolgáló láda

A vizsgálatokat huszonnyolc nap szilárdulási idő elteltével végeztem el a próbatesteken, a szabványos eljárásoknak megfelelően.

5. TAB VIZSGÁLATA

Ebben a fejezetben a TAB-okon – beleértve a duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonokat – elvégzett vizsgálatok menetét, és a kapott eredményeket fogom ismertetni. A vizsgálatokat nem időrendi sorrendben fogom bemutatni. A vizsgálatoknál jelezni fogom, hogy a próbatest hány napos korában végeztem el.

A vizsgálatok mindegyikét a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés tanszékének anyagvizsgáló laboratóriumában végeztem.

5.1 Nyomószilárdság vizsgálat

A nyomószilárdsági vizsgálatokat egységesen, a hatályos szabványnak, az MSZ EN 12390-3:2019-nek megfelelően 150x150x150 mm élhosszúságú próbatesteken, 28 napos korban végeztem el. A receptúrák kialakításánál, mint ahogy azt említettem is legtöbbször a fő szempont a szilárdsági eltérések kialakítása volt, ebből adódóan előzetesen tudtam következtetni a TAB-ok közti nyomószilárdság eltérésre. A vizsgálatához minden típusnál négy próbatestet használtam, ezek átlagából számítottam ki a nyomószilárdságok értékeit.

A mérések során először a próbatestek befoglaló méreteit határoztam meg tolómérő segítségével, majd a tömegüket is lemértem. Ezeket a paramétereket leginkább praktikussági megfontolásból mértem le, egy lejjebb részletezett mérésnél használtam fel.

Ezt követően a maximális nyomóerőt mértem meg hidraulikus nyomógéppel. A nyomógép erővezérelt (konstans terhelési sebesség), a terhelési sebesség értéke (próbakocka esetén) 11,45 kN/s. A nyomógépről az 5.1. ábrán látható kép. A gép kijelzője közvetlen kN mértékegységben jelenítette meg a nyomóerőt.

A nyomóerőből végül az MSZ 4798:2016 szabvány szerinti számítással meghatároztam a nyomószilárdság karakterisztikus értékét, mellyel szilárdságiosztályba tudtam sorolni a keverékeket. A számítás során az alábbi egyenletet alkalmaztam:

$$f_{ck} = f_{cm} - t \cdot s$$

Ahol:

- f_{ck} – a beton nyomószilárdság karakterisztikus értéke [MPa],
- f_{cm} – a beton nyomószilárdság átlagértéke [MPa],
- t – Student tényező (a minták számától függő szorzótényező, 4 mérés esetén $t = 2,353$),
- s – tapasztalati szórás.



5.1. ábra Hidraulikus nyomógép, vizsgálatra előkészítve

Az alábbi, 5.1. táblázatban összefoglaltam a négy különböző receptúra számított nyomószilárdságait, valamint az így elért szilárdságiosztályokat.

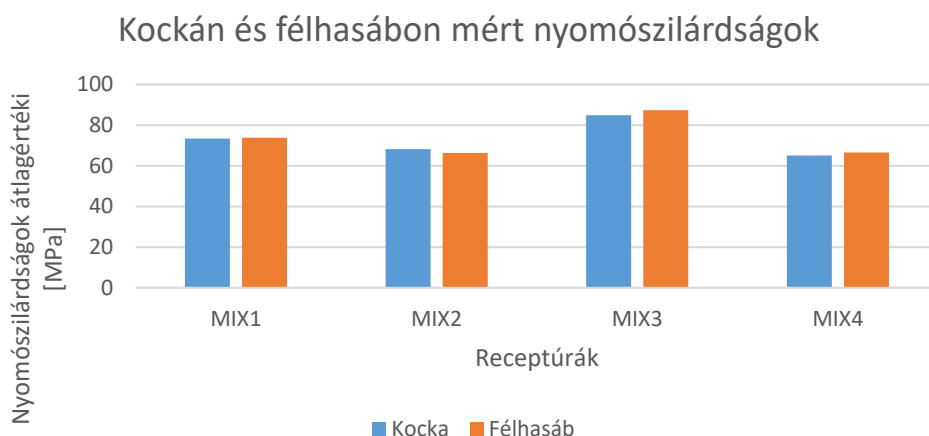
5.1. táblázat Keverékek nyomófeszültségeinek karakterisztikus értékei és szilárdságiosztályai

Keverék	Nyomószilárdság karakterisztikus értéke [MPa]	Szilárdságiosztály
MIX_1	73	C55/67
MIX_2	68	LC60/66
MIX_3	85	C60/75
MIX_4	65	C50/60

A szilárdságiosztályba történő sorolást a már fentebb említett szabvány alapján végeztem el. Észrevehető, hogy a MIX_2 esetén a szilárdságiosztály jelölése „LC”, tehát könnyűbeton osztályba tartozik. Ennek oka, hogy a későbbiekben ismertetésre kerülő testsűrűségmérés alapján a duzzasztott agyagkavics adalékanyagú TAB keverék testsűrűsége nem éri el a 2000 kg/m^3 értéket, tehát könnyűbetonnak titulálható.

Látható, hogy igen magas átlag nyomószilárdság értékeket értem el a keverékekkel. Mint azt már korábban is említettem, ismét szeretném megjegyezni, hogy mindez annak köszönhető, hogy laboratóriumi körülmények között végeztem a keverékek készítését, így nagy pontosságot tudtam elérni.

A nyomószilárdsági vizsgálatokat azonban nem csak kocka próbatesteken végeztem el, hanem a hajlító-húzószilárdságból visszamaradt félhasábokon is. Ebben az esetben a teherátadás 70x70 mm alapterületű acél lemezeken keresztül történt, ami megfelelt a félhasáb szélességének. Lentebb, az 5.2. ábrán látható diagramon összehasonlítottam a négy keverék kockán és félhasábon mért nyomószilárdságának értékeit. A félhasábon végzett vizsgálatokból kapott eredmények keverékenként hat mérés átlagaként értelmezhető.



5.2. ábra Kockán és félhasábon mért nyomószilárdságok összehasonlítása

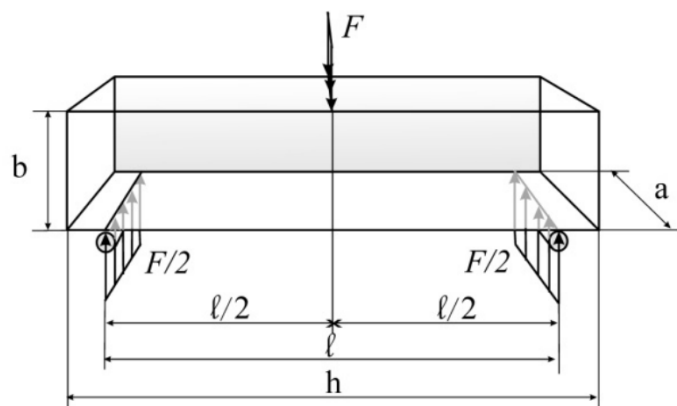
Látható a diagramon, hogy nagyon minimális, szinte jelentéktelen eltérés van a két különböző méretű próbatesten mért nyomószilárdságok között, tehát valós, reprezentatív eredményeket kaptam.

5.2 Hajlító-húzószilárdság vizsgálat

A nyomószilárdság mellett a próbatestek hajlító-húzószilárdságát is mértem. Habár ismert, hogy beton esetén a nagyobb nyomószilárdság mellett a húzószilárdság nem számít releváns paraméternek, a kutatás tekintetében összehasonlítás miatt érdemesnek láttam elvégezni.

A méréseket 70x70x250 mm élhosszúságú hasábokon vittem véghez, a próbatestek 28 napos korában. Mindegyik receptúránál hat próbatesten végeztem el mérést, az eredmény tehát a hat mérés átlagaként értelmezendő. A vizsgálatot a mérés idején hatályban lévő MSZ EN 12390-5:2019 szabvány szerint végeztem

A vizsgálatot középpontos terheléssel végeztem el, amelynek menetéről egy axonometrikus ábra látható az 5.3 ábrán.



5.3. ábra Hajlító-húzószilárdság mérésének ábrája [19]

Az én esetemben $b = a = 70$ mm, ez a terhelt keresztmetszet oldalhosszai, $h = 250$ mm pedig a próbatestem hossza. Az „ l ” a feltámaszkodási hossz, melyet 200 mm-re állítottam be.

A törés pillanatában a mérőgép elmentette a terhelés maximális mértékét, így abból egyszerű mechanikai összefüggéssel ki tudtam számítani a hajlító-húzószilárdságot:

$$\sigma_z = \frac{M}{I} \cdot z$$

Ahol:

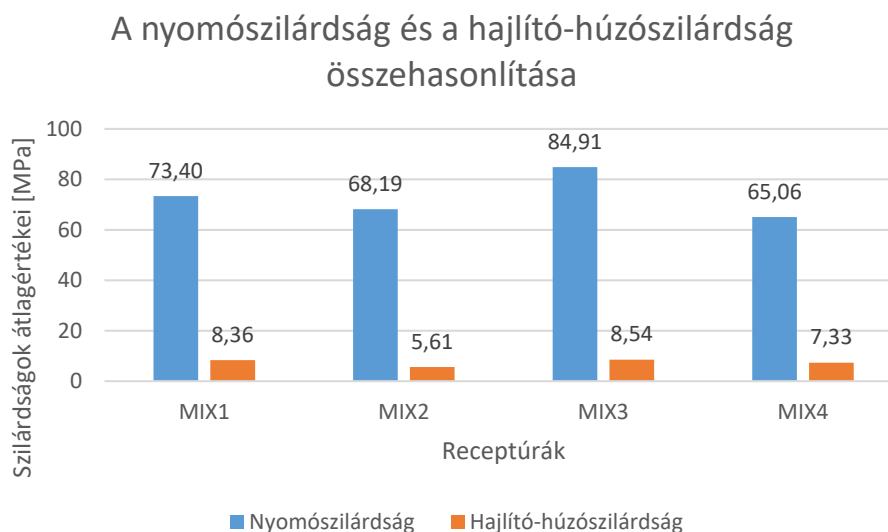
- σ_z – hajlító-húzószilárdság [MPa],
- M – a terhelés által létrejövő nyomaték (középpontosan terhelt tartónál $M = \frac{F \cdot l}{4}$) [kNcm],
- I – a terhelt keresztmetszet inerciája (jelen példában: $I = \frac{a \cdot b^3}{12}$) [cm⁴],
- z – a szélsőszál távolság (jelen példában: $z = \frac{b}{2}$) [cm].

Az alábbi, 5.2. táblázatban összefoglaltam a méréssel kapott eredményeket receptúrák szerint. Mint feljebb említettem, az eredményeket hat mérés átlagaként kell értelmezni.

5.2. táblázat Hajlító-húzószilárdságok átlagértékei

Keverék	Hajlító-húzószilárdság [MPa]
MIX_1	8,36
MIX_2	5,61
MIX_3	8,54
MIX_4	7,33

A lentebbi, 5.4. ábrán diagram segítségével összehasonlítottam a keverékek átlag nyomószilárdságait az átlag hajlító-húzószilárdságaikkal.



5.4. ábra Nyomó- és hajlító-húzószilárdság alakulása

Látható, hogy a hajlító-húzószilárdságok nagyságrendileg kisebbek, mint a nyomószilárdságok. Ez megfelel az elvártaknak, hiszen a normálbetonok hajlító-húzószilárdsági paraméterei messze nem érik el a nyomószilárdsági értékeket, húzásra tehát nem jól viselkedik a normálbeton.

5.3 Testsűrűség mérés

A testsűrűség vizsgálatot egyrészt ellenőrzés gyanánt végeztem el a receptúrákon, hogy a várható testsűrűségnek megfelel-e az adott próbatest, másrészt későbbi vizsgálathoz nyújt plusz információt. A 4.1 alfejezetben részleteztem a receptúrák alkotóit, mennyiségeiket. A részletes leírás tartalmazta a várható testsűrűséget.

Legegyszerűbben a megszilárdult, 150x150x150 mm élhosszúságú kocka próbatesteken tudtam meghatározni a próbatestek testsűrűségét. Ez gyakorlatilag nem minősül külön mérésnek, hiszen ahogy az 5.1 Nyomószilárdsági vizsgálat fejezetben is említettem, első lépésként lemértem a próbatestek befoglaló méreteit, majd a tömegüket. Ezekből az adatokból egyszerűen meg tudtam határozni a kívánt paramétert:

$$\rho_T = (a \cdot b \cdot h) \cdot m$$

Ahol:

- ρ_T – testsűrűség [kg/m³],
- a, b, h – a próbakocka befoglaló méretei [m],
- m – a próbakocka tömege [kg].

A számítást azokon a próbakockákon végeztem el, amelyeket később nyomószilárdsági vizsgálat alá vetettem, így receptúránként négy eredményt kaptam, amelyek átlagaként értelmeztem az adott receptúra mért testsűrűségét. A számítás elvégzésekor – mivel egyidejűleg végeztem a nyomóvizsgálattal – 28 napos korúak voltak a próbatestek.

Az itt látható, 5.3 táblázatban foglaltam össze a receptúrák mért testsűrűségeiket.

5.3. táblázat Receptúrák mért testsűrűségeik

Keverék	Mért testsűrűség [kg/m ³]
MIX_1	2338,40
MIX_2	1928,77
MIX_3	2372,75
MIX_4	2344,99

A MIX_2 esetén látható, hogy ez az érték 2000 kg/m³ alatti, ennek értelmében az MSZ 4798:2016 szabvány alapján könnyűbetonnak tekinthető.

5.4 Látszólagos porozitás mérés

Az előző alfejezetben bemutatott testsűrűség paraméterrel szoros összefüggésben áll az ebben a részben részletezni kívánt látszólagos porozitás. Az összefüggés abban nyilvánul meg, hogy minél nagyobb egy adott próbatest sűrűsége, annál kisebb a porozitása.

A mérést az MSZ EN 1936:2007 szabvány alapján végeztem el. A vizsgálat során első lépésként tömegállandóságig szárítottam a próbatesteket. Ehhez a már fentebb említett laboratórium szárítószekrényeit vettem igénybe, ahol nagyjából hét nap után elértem a tömegállandóságot. A szárítást egységesen 60 °C-on végeztem.

Ezt követően a száraz állapotban lévő próbatesteket víz alá helyeztem, és szintén tömegállandóságig tartottam ott őket. Ezzel elértem a telített állapotot, amikor minden nyílt pórus megtelt vízzel. Ez nagyjából öt napot vett igénybe.

Végül lépésként a telített állapotban lévő próbatesteket vízbe mártva lemértem azok tömegét. Ezzel meg tudtam határozni a térfogatukat Arkhimédész törvénye alapján.

Számításaimat az imént említett Arkhimédész törvény alapján kezdtem, mellyel kiszámoltam a próbatest által kiszorított víz tömegét. Ezt követően kiszámítottam a felvett víz tömegét a száraz és a telített állapotú tömegek alapján. Végül ezen két tömeget átváltottam térfogatba a víz ismert sűrűségének segítségével. Végül a két térfogat hányadosaként megkaptam a látszólagos porozitást. A számítás menetét lentebb közlöm.

$$V_1 = (m_{sat} - m_{va}) \cdot 1$$

$$V_2 = (m_{sat} - m_{sz}) \cdot 1$$

$$p = \frac{V_2}{V_1}$$

Ahol:

- V_1 – a próbatest által kiszorított víz térfogata [dm^3],
- V_2 – a próbatest által felvett víz térfogata [dm^3],
- m_{sat} – telített állapotban lévő próbatest tömege [kg],
- m_{va} – víz alatt lévő próbatest tömege [kg],
- m_{sz} – száraz állapotban lévő próbatest tömege [kg],
- p – látszólagos porozitás [V%].

A számításaim során kihasználtam a víz ismert és számítás szempontjából kedvező sűrűségét, melyből egyszerűen tudtam átváltani kg és dm^3 között.

A kapott eredményeket ennél az alfejezetnél is táblázatosan összefoglaltam, melyet a lentebbi, 5.4 táblázatban tekinthetnek meg.

5.4. táblázat Receptúrák látszólagos porozitása

Keverék	Látszólagos porozitás [V%]
MIX_1	10,03
MIX_2	10,97
MIX_3	8,00
MIX_4	8,45

5.5 Összefoglaló

A fentebbi alfejezetekben részleteztem azon vizsgálatokat, méréseket, melyeket a TAB próbatesteken végeztem el.

Eddig nem ejtettem szót arról, hogy miért voltak szükségesek ezen vizsgálatok. Ahogy az olvasható, leginkább szilárdsági és sűrűséghez köthető méréseket hajtottam végre, aminek egyik oka, hogy így szilárdsági osztályba tudtam sorolni a keverékeket (lásd: 5.1 táblázat), másik oka pedig az újrahasznosított adalékanyag előkészítéséhez köthető. Az ezekből a próbatestekből előállítandó zúzott beton adalékanyagról így ismert lesz szilárdsága mellett a porozitása is.

Ebben a fejezetben szeretném összegyűjteni táblázat formájában a TAB-ok különböző vizsgálatainak eredményeit. Ezen információkat lejjebb, az 5.5. táblázatban találják.

5.5. táblázat TAB vizsgálati összefoglaló

Keverék	Testsűrűség [kg/m ³]	Látszólagos porozitás [V%]	Nyomószilárdság [MPa]		Hajlító-húzószilárdság [MPa]
			Kocka	Félhasáb	
MIX_1	2338,40	10,03	73,4	73,8	8,36
MIX_2	1928,77	10,97	68,2	66,2	5,61
MIX_3	2372,75	8,00	84,9	87,3	8,54
MIX_4	2344,99	8,45	65,1	66,6	7,33

6. UAB ELŐKÉSZÍTÉSE

Jelen fejezetben az UAB receptúrák megalkotásának előkészítő munkáit fogom részletezni. Így a fejezet fő témái a következők lesznek:

- Adalékanyag elkészítése,
- Adalékanyag vizsgálata,
- UAB receptúrák megalkotása.

Ezen témákat az alábbi alfejezetekben részletesen ismertetni kívánom.

6.1 Adalékanyag elkészítése

Ahogy a dolgozatomban is jeleztem, az UAB-ok zúzott beton adalékanyaggal készültek. A TAB próbatestekből tehát zúzással állítottam elő az UAB-ok adalékanyagát.

Ehhez először hasító berendezés segítségével kisebb darabokra aprítottam a nagyobb próbatesteket a könnyebb zúzhatóság érdekében.

Ezt követően az aprított próbatestek zúzásának láttam neki. Ehhez a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének geológia laboratóriumában található pofás törőgépet használtam. A gépről látható egy kép a lentebbi, 6.1. ábrán.



6.1. ábra Pofás törőgép

A törőgép beállítása szerint a kifolyó nyíláson távozó őrlemény maximális szemnagysága ($d_{\max}$) 16 mm volt.

A zúzást követően a zúzalékot frakciókra szitáltam. Eszerint az alábbi frakciókat különböztettem meg:

- tálca (0,063 mm alatti),
- finom frakció (0,063 – 4 mm),
- durva frakció (4 – 11 mm),
- 11 mm feletti frakció.

A frakciókra szitálás végeztével neki láttam az adalékanyag vizsgálatok elvégzéséhez, melyek a receptúrák megalkotásához voltak szükségesek.

6.2 Adalékanyag vizsgálatok

Az UAB receptúrák megtervezéséhez elengedhetetlen a zúzott beton adalékanyag vizsgálatainak elvégzése. Ezen vizsgálatok az adalékanyag tömegeloszlási-, illetve hidrotechnikai jellemzőit kívánják bemutatni.

A következő alfejezetekben az alábbi adalékanyag vizsgálatokat fogom ismertetni:

- szemeloszlási vizsgálat,
- vízfelvétel mérés,
- testsűrűség mérés.

6.2.1 Adalékanyag szemeloszlási vizsgálata

Már az előbbi alfejezet végén is utalást tettem az UAB receptúrákra, pontosabban az adalékanyagváz szemnagyságaira. Eszerint észrevehető, hogy a felhasznált adalékanyag szemnagyság 0,063 – 11 mm közötti. A szemeloszlási vizsgálatot azonban csak a finom frakción, azaz a 0,063 – 4 mm szemnagyságú adalékanyagon végeztem el.

Ehhez a már említett anyagvizsgáló laboratóriumban található vibrációs szita berendezést alkalmaztam, melyekre az alábbi lyukbőségű szitákat állítottam fel: (tálca); 0,063 mm; 0,125 mm; 0,25 mm; 0,5 mm; 1 mm; 2 mm; 4 mm

A szita lentebb, a 6.2. ábrán tekinthető meg.



6.2. ábra Vibrációs szita

A vizsgálatot minden receptúrájú örléménynél kétszer végeztem el, egyenként mintegy 2500 g tömegű zúzalékkal. A zúzalékot először alaposan összekevertem, hogy minél jobban egységessé váljon, így kisebb szórást érjek el a kapott értékek között. A szitálás minden mérés esetén öt percig tartott. A mérés az MSZ EN 933-1:2012 szabványt követi. Az M4 számú mellékletben mutatom be a MIX_1 keverék zúzalékának szemeloszlási vizsgálatát.

A többi mérést elvégezve azt tapasztaltam, hogy nagyon minimális eltérést mutattak a szemeloszlások. Ennek az oka, hogy ugyanazon a gépen végeztem a mérést. Ennek értelmében a szemeloszlásban sem számítottam jelentős eltérésre. Az eltérés érzékeltetésére a MIX_1

receptúra két mérésének szemeloszlási görbáját ábrázoltam egy diagramban, ami szintén az M4 számú mellékletben található.

Ennek okán elkészítettem az átlag szemeloszlási diagramot, amely a receptúrák méréseinek átlagaként állt elő. Ez tekinthető az UAB-ok finom frakciójának szemeloszlásának. A szemeloszlási görbe a 6.4 ábrán tekinthető meg.



6.3. ábra Finom frakció átlag szemeloszlási görbéje

6.2.2 Adalékanyag vízfelvételi vizsgálata

Az UAB receptúrák megalkotásához nélkülözhetetlen információ a zúzott beton adalékanyag vízfelszívása. Ennek a paraméternek a tudatában tudtam csak kiszámítani a szükséges keverővíz mennyiségét. A receptúrák keverésének szempontjából számomra a félórás vízfelszívás volt a mértékadó.

A vizsgálatot szabványos piknométerrel hajtottam végre, mellyel nem csak a vízfelvételt, hanem a pontos testsűrűséget is meg tudtam határozni – amelyet a következő alfejezetben fogok részletezni. A műszerről lejjebb, a 6.5. ábrán látható fotó.

A méréshez a durva frakcióból (4 – 11 mm szemnagyság) vettem mintát. A mintát először alaposan átmostam, így a szemekhez tapadt portól megszabadultam. Ezt követően az átmosott anyagot tömegállandóságig szárítottam 60 °C-on. Ezzel előkészítettem a vizsgálatot.

A vizsgálathoz a már fentebb is említett piknométert használtam. A mérés során először lemértem a piknométer tömegét üresen, majd a tömegállandóságig szárított mintával feltöltött műszer tömegét. Ezt követően a megadott jelig töltöttem vízzel. Félóra elteltével az adalékanyag által felszívott vizet pótoltam – ismét a jelig töltve a műszert – majd tömegmérést végeztem. Végül 24 óra elteltével megismételtem az imént közölt lépést, majd a telített anyag

felületéről eltávolítottam a nedvességet, és lemértem a minta tömegét. Ez a tömeg tekinthető a telített adalékanyag tömegének. Így minden bemenő adat előállt ahhoz, hogy meghatározzam a fél órás vízfelvételt.



6.4. ábra Piknométer mérés közben

A vízfelvétel meghatározását az alábbi lépésekben és egyenletekkel végeztem el:

$$m_{v2} = m_{sat+víz} - m_{sat} - m_e$$

$$m_{sz} = m_{sz+e} - m_e$$

$$m_n = m_{n+víz+e} - m_{v2} - m_e$$

$$n_{30} = \frac{m_n - m_{sz}}{m_{sz}} \cdot 100$$

Ahol:

- m_{v2} – víz tömege (nem teli piknométerrel) [g],
- $m_{sat+víz}$ – telített állapotú minta és a víz együttes tömege (mért adat) [g],
- m_{sat} – telített állapotú minta tömege (mért adat) [g],
- m_e – műszer tömege (mért adat) [g],
- m_{sz} – száraz minta tömege [g],
- m_{sz+e} – száraz minta és a víz együttes tömege (mért adat) [g],
- m_n – nedves minta tömege (félórás) [g],
- $m_{n+víz+e}$ – a nedves minta, a víz és a műszer együttes tömege (félórás mért adat) [g],
- n_{30} – félórás vízfelvétel [m%].

Emellett szintén meghatároztam a teljes vízfelvétel mértékét is. Az egyenlet ilyen formában írható fel ebben az esetben:

$$n_{tot} = \frac{m_{sat} - m_{sz}}{m_{sz}} \cdot 100$$

Ahol:

→ n_{tot} – teljes vízfelvétel [m%].

A kapott értékeket az alábbi, 6.2 táblázatban foglaltam össze néhány egyéb paraméterrel együtt.

6.1. táblázat Adalékanyagok

Keverék	Keverék testsűrűsége [kg/m ³]	Keverék látszólagos porozitása [V%]	Adalékanyag félórás vízfelvétele [m%]
MIX_1	2338,40	10,03	2,23
MIX_2	1928,77	10,97	4,50
MIX_3	2372,75	8,00	2,33
MIX_4	2344,99	8,45	3,97

Látható, hogy minél nagyobb az anyag testsűrűsége, annál kisebb a porozitása, ezzel együtt pedig annál kisebb a belőle előállított adalékanyag vízfelvétele.

6.2.3 Adalékanyag testsűrűség mérése

Az előző alfejezetben már utaltam arra, hogy az adalékanyag testsűrűségének meghatározását is szabványos piknométerrel végeztem. A vizsgálat menete a vízfelvétel méréséig teljesen megegyezik, ezért a kiinduló adatokat, lépéseket, és a kapott eredményeket nem ismertetem ismét, azok megegyeznek a fentebbi alfejezetben részletezettekkel.

A testsűrűség meghatározásához szükséges számítások a következők:

$$m_{v1} = m_{e+víz} - m_e$$

$$V_p = \frac{m_{v1}}{\rho_v}$$

$$V_v = \frac{m_{v2}}{\rho_v}$$

$$V_a = V_p - V_v$$

$$\rho_T = \frac{m_{sz}}{V_a}$$

Ahol:

- m_{v1} – víz tömege (teli piknométerrel) [g],
- V_p – piknométer térfogata [dm^3],
- ρ_v – víz sűrűsége [g/dm^3],
- V_v – víz térfogata (telített állapotú mintával megtöltött piknométer esetén) [dm^3],
- V_a – adalékanyag térfogata [dm^3],
- ρ_T – adalékanyag testsűrűsége [kg/dm^3].

Az alábbi, 6.3. táblázatban összefoglaltam a keverékek mért-, és a keverékekből zúzott adalékanyag testsűrűségét.

Keverék	Keverék testsűrűsége [kg/dm^3]	Zúzott adalékanyag testsűrűsége [kg/dm^3]
MIX_1	2,338	2,374
MIX_2	1,929	1,915
MIX_3	2,373	2,371
MIX_4	2,345	2,324

6.2.4 Adalékanyag vizsgálati összefoglaló

Az UAB receptúrákhoz szükséges minden információt megmértem, kiszámítottam. Az adalékanyag vízfelvételének vizsgálatával meghatározhatom a keverővíz mennyiségét, figyelembe véve az adalékanyag pórusaiba felszívódó víz mennyiségét. Az adalékanyag testsűrűségének kiszámításával pedig megtervezhetem a keverék kívánt testsűrűségéhez szükséges adalékanyag mennyiségét.

A lentebb látható, 6.3 táblázatban összesítettem az adalékanyag vizsgálatokkal kapott eredményeket.

6.2. táblázat Adalékanyag vizsgálati összefoglaló táblázat

Keverék	Vízfelvétel (félórás) [m%]	Adalékanyag testsűrűsége [kg/dm^3]
MIX_1	2,23	2,374
MIX_2	4,50	1,915
MIX_3	2,33	2,371
MIX_4	3,97	2,324

6.3 UAB és referencia receptúrák

Az UAB receptúrák tervezése az alap, vagyis az úgynevezett referencia receptúra kiválasztásával kezdődött. Ennek értelmében témavezetőmmel kiválasztottuk azon TAB receptúrát, amely mintájára kiszámítjuk az UAB receptúrákat. Megbeszélés alapján a választásunk a MIX_4 keverék receptúrájára esett. A receptúra megtekinthető a 4.4. táblázat *MIX_4 receptúra* című táblázatban. **A referencia receptúra tehát a MIX_4 receptúrájával egyezik meg. A receptúra megnevezése MIX_40.**

Ez a keverék rendelkezik a legmagasabb víz-cement tényezővel ($v/c = 0,55$), tehát a legkisebb nyomószilárdsággal (a pontos szilárdsági paraméterek megtalálható az 5.6. táblázat *TAB vizsgálati összefoglaló* című táblázatban). Ennek értelmében az UAB receptúrák esetén egy esetben megegyező receptúrájú keverékből előállított zúzott beton adalékanyagból áll az adalékanyagváz, két esetben magasabb szilárdsági paraméterekkel bíró keverékből zúzott adalékanyagból épül fel az adalékanyagváz, egy esetben pedig könnyű adalékanyagból (duzzasztott agyagkavics) készült keverékből előállított adalékanyagból áll az UAB adalékanyagváza. Az UAB keverékek adalékanyagvázánál mind a finom (0 – 4 mm), mind a durva (4 – 11 mm) frakció **100%-ban a fentebb említett zúzott beton adalékanyagból áll.**

A receptúrák tervezése során figyelembe kellett vennem a zúzott adalékanyagok vízfelvételét, illetve a mennyiség megtervezésekor az adalékanyag testsűrűségét. Az ezen információkkal megtervezett receptúrák az M2 számú mellékletben találhatók.

A receptúrák elnevezésében a két szám index közül az első a referencia receptúra számára utal (egységesen a MIX_4 receptúra a referencia mindegyik UAB esetén), a második szám pedig arra a receptúrára utal, amelyikből előállítottam az adalékanyagot az UAB adalékanyagvázához (MIX_42 esetén tehát az adalékanyagváz a MIX_2 zúzalékából épül fel).

A korrekció föl alatt látható a keverővíz mennyiségénél korrigálás. Ez a már többször említett adalékanyag vízfelvételi paramétere miatt volt szükséges. A keverővíz mennyiségét annyival növeltem meg, amennyit az adott mennyiségű adalékanyag 30 perc alatt szív fel a hidrotechnikai tulajdonságából adódóan.

Az adalékanyag mennyiségét nem kellett pontosítanom az UAB keverékek esetén, mint ahogy azt a TAB-oknál tettem, hiszen a zúzott adalékanyagot száraz, páramentes körülmények közt tartottam, így nedvességtartalma jelentéktelen volt.

6.4 *Próbatestek előkészítése*

Az UAB receptúrákat hőterhelésnek tettem ki, majd visszahűlt állapotban mértem a szilárdsági paraméterek megváltozását.

Az UAB keverékeken három különböző szilárdsági vizsgálatot, illetve két tömegeloszlási jellemzőre utaló mérést végeztem el. A vizsgálatok egy kivétellel megegyeznek a TAB keverékeken elvégzett vizsgálatokkal. A mérések a következők:

- nyomószilárdsági vizsgálat,
- hőterhelés,
- hajlító-húzószilárdsági vizsgálat,
- CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) vizsgálat,
- testsűrűség mérés,
- látszólagos porozitás mérés.

A nyomószilárdsági mérést elvégeztem 150x150x150 mm élhosszúságú kocka próbatesteken, illetve megelőző vizsgálat során kettétört 70x70x250 mm élhosszúságú hasábok egyik felén is. A szabványos nyomószilárdság vizsgálat az első méretű próbatesten történik, félhasábokon csak ellenőrzés gyanánt mértem meg ezen szilárdsági paramétert. A nyomószilárdsági értéket három mérés átlagaként értelmeztem, majd szintén három méréssel vizsgáltam az utószilárdulás mértékét, így keverékenként hat próbakockára volt szükségem.

Hőterheléses vizsgálatot 70x70x250 mm élhosszúságú hasábon, több hőfokon végeztem el, ahogy azt a *4.2. Próbatestek előkészítése* című alfejezetben említettem és részleteztem. Ahogy írtam, hőfokként három próbatestet terheltem magas hőmérséklettel, összesen 12+3 próbatestre volt szükségem (a plusz három próbatest a szobahőmérsékletet jelezné, hiszen ezen a hőfokon nem történt tényleges hőterhelés).

A húzó-hajlítószilárdságot a CMOD vizsgálat adataiból határoztam meg. A műszer, mellyel a vizsgálatot végeztem egyidőben mérte a hajlító-húzóerőt, illetve a CMOD görbét. A vizsgálatokat a fentebb említett 12+3 hasáb próbatesten végeztem.

A testsűrűség és a látszólagos porozitás mérés teljesen megegyezik a TAB keverékeknél leírt eljárással, amely megtekinthető a fentebb említett fejezetben.

A keverékek elkészítési helye, módja megegyezik a TAB receptúrák elkészítésével, melyet részletesen bemutattam a már fentebb többször említett *4.2. Próbatestek előkészítése* című alfejezetben.

Eltérés a TAB keverékekkel szemben, hogy a 28 napos szilárdulási idő utolsó 7 napját a próbatestek a szárítószekrényben töltötték, 60 °C-on. Ennek oka a *2.2. Betonok viselkedése*

magas hőmérséklet hatására című alfejezetben ismertetett és részletezett spalling effekt elkerülése volt. Ennek értelmében a próbatestek nedvességtartalmát csökkenteni szerettem volna, a magas hőmérsékleten (~600 °C) bekövetkező robbanásszerű tönkremenetel elkerülése érdekében.

7. UAB VIZSGÁLATA

Jelen a fejezetben a UAB-okon elvégzett vizsgálatok menetét, és a kapott eredményeket fogom ismertetni. A vizsgálatokat nem időrendi sorrendben fogom bemutatni. A vizsgálatoknál jelezni fogom, hogy a próbatest hány napos korában végeztem el, illetve hogy történt-e hőterhelés az adott próbatesten, és ha igen, akkor milyen hőmérsékleten.

A vizsgálatok mindegyikét a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés tanszékének anyagvizsgáló laboratóriumában végeztem.

7.1 Nyomószilárdság vizsgálat

Az UAB keverékek nyomószilárdság vizsgálata annyiban különbözik a TAB receptúrákon bemutatott méréstől, hogy meg kell különböztetni a hőterhelt és a hőterhelés nélküli próbatestek nyomószilárdságvizsgálatát. A következő alfejezetekben ezen méréseket fogom részletezni

7.1.1 Hőterhelés nélküli próbatestek

A hőterhelés nélküli próbatesteken végzett nyomószilárdság vizsgálat menete rendre megegyezik a TAB keverékeknél részletezett vizsgálattal, amely megtekinthető az *5.1 Nyomószilárdság vizsgálat* című alfejezetben. Éppen emiatt az egyezés miatt ebben az alfejezetben nem kívánom részletezni a mérés folyamatát, csak az eredményeket kívánom összefoglalni.

A vizsgálatot három-három 150x150x150 mm élhosszúságú próbakockán, illetve 70x70x250 mm befoglaló méretű hasáb felén is elvégeztem. Mind a két méretű próbatest esetén a vizsgálatot a keverék 28 napos korában végeztem el.

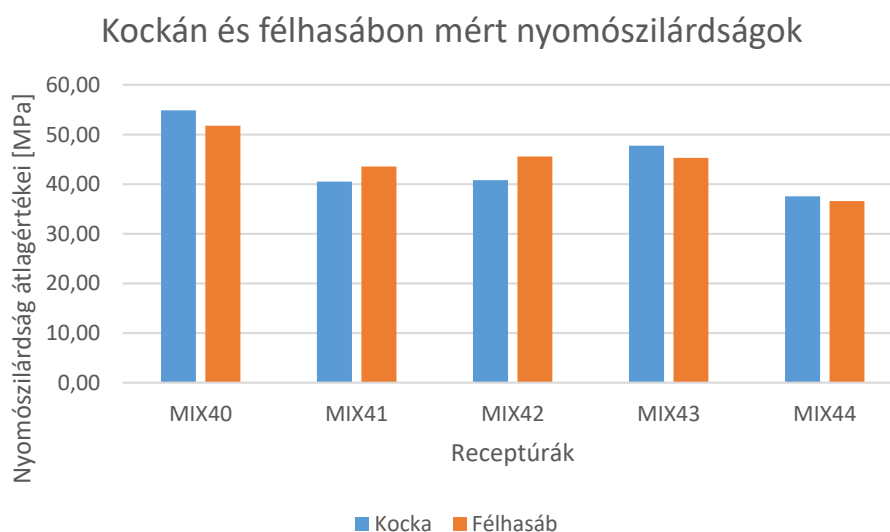
Az alábbi, 7.1. táblázatban összefoglaltam a mérések eredményeit, illetve az így kialakult szilárdságiosztályokat. A táblázatban látható, hogy a MIX_42 esetén a szilárdsági osztály LC35/38. Ebben egyezés léphet fel a TAB keveréknél bemutatott MIX_2-vel, hiszen ahogy azt említettem, a MIX_2 keverék könnyűbetonok közé sorolható, a 2000 kg/m³ alatti

testsűrűsége miatt. A későbbiekben be fogom mutatni, hogy a MIX_42-re is igaz ez, tehát ez is a könnyűbetonok osztályába tartozik.

7.1. táblázat Nyomószilárdság átlagértékei kockán és félhasábon mérve, szilárdsági osztályok

Keverék	Kockán mért nyomószilárdság [MPa]	Félhasábon mért nyomószilárdság [MPa]	Szilárdsági osztály
MIX_40	54,9	51,8	C40/50
MIX_41	40,5	43,5	C30/37
MIX_42	40,8	45,6	LC35/38
MIX_43	47,8	45,3	C40/50
MIX_44	37,6	36,6	C25/30

A lentebbi, 7.1. ábrán látható a kockán és a félhasábon mért nyomószilárdságok átlagértékeinek összehasonlítása.



7.1. ábra Kockán és félhasábon mért nyomószilárdságok átlagértékei

Ahogy az látható volt a TAB keverékeknél, itt is elmondható, hogy a félhasábon és a kockán mért nyomószilárdságok között kicsiny a különbség, tehát a mérések egymást igazolják.

A kocka alakú próbatesteken elvégzett mérések ahhoz voltak szükségesek, hogy a keverékeket szilárdsági osztályokba tudjam sorolni, hiszen az MSZ 4798:2016 szabvány szerint csak 150 mm átmérőjű és 300 mm magasságú hengeren, vagy 150x150x150 mm élhosszúságú próbakockán végzett nyomószilárdsági vizsgálat alapján sorolhatjuk (az általam is használt) szilárdsági osztályba a keveréket.

7.1.2 Hőterhelt próbatestek

Ahogy azt már a dolgozatomban többször részleteztem, a próbatesteket több hőfokon terheltem: (20 °C); 150 °C; 300 °C; 450 °C; 600 °C. A hőterhelés során a hőntartás minden hőfokon két óra volt, amit természetes – lassú – lehűlés követett (a próbatestek a kemencével együtt hűltek le). A kemence felfűtésével és hőntartásával kapcsolatos diagram az M5 számú mellékletben található.

Az előző alfejezetben ismertettem a hőterhelés nélküli, azaz a 20 °C-on (laboratóriumi hőmérsékleten) „terhelt” betonok nyomószilárdsági vizsgálatának eredményeit. Ebben a fejezetben a kemencékben, magas hőmérsékletnek kitett próbatestek nyomószilárdságának alakulását kívánom részletezni.

A hőterhelést 70x70x250 mm élhosszúságú hasábokon végeztem, hőlépcsőnként három-három próbatesten. Ennek okán a lentebb közlendő nyomószilárdsági értékek is három mérés átlagaként értelmezendő. A hőterhelt hasábokon több vizsgálatot is végeztem – egyik során törtek ketté a próbatestek, így keletkeztek azon félhasábok, amelyeken jelen méréseket végeztem.

A vizsgálatot szintén ugyanolyan módon végeztem, mint a TAB keverékeknél ezen mérést, tehát a részletes leírás megtalálható az 5.1 *Nyomószilárdság vizsgálat* című alfejezetben.

A 150, 300 illetve 450 °C-on hőterhelt próbatesteket 28 napos korukban, míg a 600 °C-on kezeltet 29 naposan hőterheltem, majd a szilárdsági vizsgálatokat minden esetben a visszahűlt állapotban, a hőterhelést követő napon végeztem el. Az alább látható, 7.2. táblázatban foglaltam össze a mérések eredményeit.

7.2. táblázat Nyomószilárdság átlagértékei a hőmérséklet függvényében

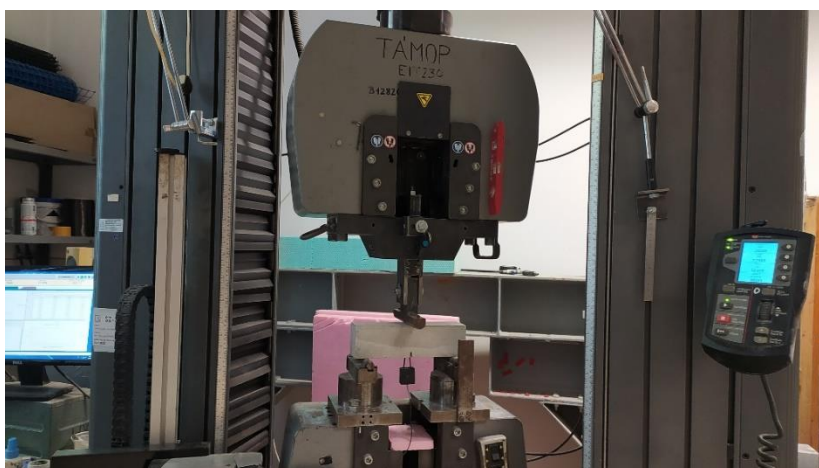
Hőfok [°C]	Félhasábon mért nyomószilárdság [MPa]				
	MIX_40	MIX_41	MIX_42	MIX_43	MIX_44
150	50,0	38,4	43,1	38,5	31,3
300	49,3	40,9	41,8	42,9	32,8
450	42,5	28,0	25,9	35,6	23,9
600	26,9	18,0	23,0	23,4	14,1

7.2 Hajlító-húzószilárdság vizsgálat

Habár a hajlító-húzószilárdság vizsgálatát is elvégeztem hőterhelt és hőterhelés nélküli próbatesteken is, ebben az alfejezetben mégsem fogom két részre bontani a mérés taglalását. A nyomószilárdság vizsgálatánál erre azért volt szükség, mert nem csak a hőterhelésben különböztek a mérések, hanem a próbatestek formáiban is (hőterhelés nélkül vizsgáltam kockát, míg hőterhelve nem). Hajlító-húzószilárdság vizsgálat esetén csak 70x70x250 mm élhosszúságú hasábokon végeztem méréseket.

A hőterhelés hőmérsékleti lépcsőit már többször említettem, ezek jelen vizsgálatban is triviálisan ugyan azok. Jelen vizsgálatra is érvényes, hogy a 150, 300 és 450 °C-on terhelt próbatesteket 29 napos korukban vizsgáltam, míg a 600 °C-nak kitett darabokat 30 naposan.

Az UAB keverékeknél a mérést szintén középpontos terheléssel végeztem el, azonban egy másik, univerzális anyagvizsgáló géppel – amellyel a későbbiekben részletezni kívánt CMOD vizsgálatot is végeztem. A berendezésről a 7.3. ábrán látható fotó.



7.2. ábra Univerzális anyagvizsgáló

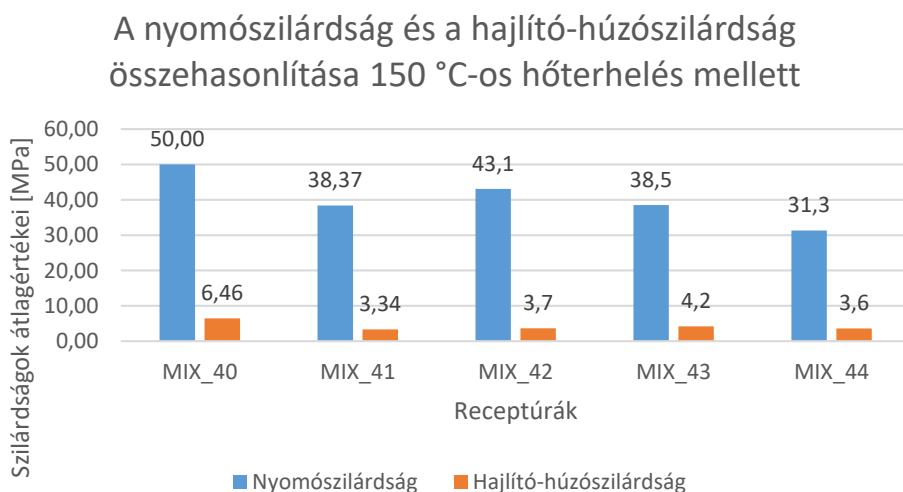
A gép ún. repedés megnyílás vezérelt, azaz a repedésmegnyílásának sebessége konstans. A gép úgy mozgatja a keresztfejet, hogy a repedésmegnyílás sebessége 0,005 mm/s legyen, miközben az ehhez a sebességhez szükséges erőt méri.

A számításhoz használt képletek megegyeznek az 5.2 *Hajlító-húzószilárdság vizsgálat* című alfejezetben közölt képletekkel. A számított eredmények megtekinthetők a lentebbi, 7.3. táblázatban.

7.3. táblázat Hajlító-húzószilárdság átlagértékei a hőmérséklet függvényében

Hőfok [°C]	Hajlító-húzószilárdság [MPa]				
	MIX_40	MIX_41	MIX_42	MIX_43	MIX_44
20	7,28	5,59	5,07	4,90	4,05
150	6,46	3,34	3,67	4,21	3,61
300	5,03	3,57	3,44	4,47	3,48
450	3,76	2,65	2,15	2,97	2,01
600	0,60	0,65	1,59	1,06	0,46

A hajlító-húzószilárdsági paramétereket nem kívánom minden hőfokon összehasonlítani a nyomószilárdsági értékekkel, azonban hőterhelt esetben, **150 °C** terhelés mellett összehasonlítottam a két szilárdsági paramétert. Az erről készült oszlopdiagram megtekinthető a 7.3. ábrán.



7.3. ábra 150 °C-on terhelt próbatestek nyomószilárdságának és hajlító-húzószilárdságának összehasonlítása

Azért esett a választásom a 150 °C-on terhelt próbatesteken mért paraméterek összehasonlítására, mert ebből már levonható a következtetés a tendencia alakulására. Ahogy az 5.4. táblázatban is látható, TAB keverékeknél, hőterhelés nélküli esetben egy nagyságrenddel kisebb a hajlító-húzószilárdság értéke, mint a nyomószilárdságé. Most, UAB keverékeknél 150 °C-on hőterhelt esetben is látható ez az összefüggés.

7.3 CMOD vizsgálat

Ebben az alfejezetben szeretném részletezni az UAB keverékek legösszetettebb vizsgálati eljárásának minősülő, CMOD (Crack Mouth Opening Displacement), azaz irányított repedéstágasság mérést.

A mérési eredményekből a JCI-S-001-2003 szabvány követésével a törési energia értékét számítottam ki. A törési energiát úgy kell értelmezni, mint a repedés megnyitáshoz és a repedés terjedéséhez szükséges energiát.

A fentebb említett szabvány egy japán szabvány. Az ok, amiért nem az európai szabványt (MSZ EN 14651:2005+A1:2008) használtam, mert az európai szabvány a törési energia meghatározásához az erő-lehajlás összefüggését veszi alapul. A vizsgálat mind a két szabvány esetén repedéstágasság vezérelt, azonban a japán szabvány esetén a kiértékelés az erő-CMOD összefüggés alapján történik. Esetünkben nem mértünk külön lehajlást. A lehajlásra csupán a keresztfej elmozdulásából tudnánk következtetni, azonban ez pontatlan, mivel ez magába foglalja a beton feltámaszkodások és erőbevezetés környéki összemorzsolódások és egyéb elmozdulások, amik a próbatest elhelyezkedéséből adódnak

A vizsgálatot 70x70x250 mm befoglaló méretű hasábokon vizsgáltam, hőlépcsőnként három-három próbatesttel. A próbatestek kora megegyezik az előző alfejezetben részletezett korokkal, hiszen – ahogy majd azt részletezni fogom a későbbiekben – a húzószilárdság értékét ezen méréssel kaptam meg. Eszerint a 20, 150, 300 és 450 °C-on terhelt próbatesteket 29 naposan, a 600 °C-on terhelteket pedig 30 napos korukban vizsgáltam.

A magyar elnevezésből (irányított repedéstágasság) következtetni lehet arra, hogy a próbatesteket előre bevágtam, így vált irányítottá a repedésmegnyílás. A bevágásokat betonvágó koronggal végeztem, amely a beton koptatásával vágja be a próbatesteket. A beton hasábok hosszabbik oldallapjuk oldalfelezőjében végeztem el a bevágásokat úgy, hogy a bedolgozási felülettel szomszédos oldallapra kerüljön a bevágás – így elkerülve a mérés közbeni felfekvéssel kapcsolatos problémákat. A bevágások mélysége 11 mm. Fontos megemlíteni, hogy a bevágásokat a hőterhelés előtt végeztem el. A betonvágóról és a bevágott hasábról 7.5. ábrán látható fotó.

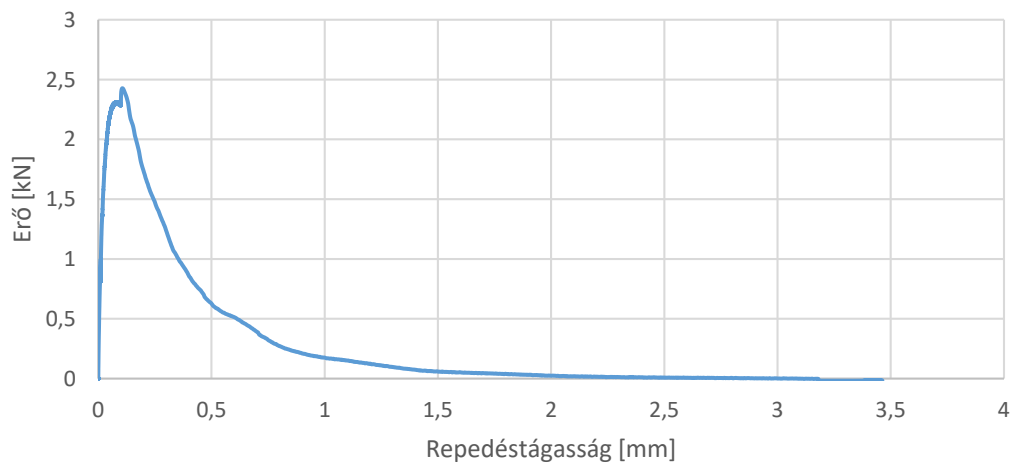
A vizsgálatot az előző alfejezetben, a 7.3. ábrán bemutatott, univerzális anyagvizsgáló berendezéssel végeztem. A vizsgálati összeállítás hasonlít az előző alfejezetben részletezett középpontos terhelési vizsgálat menetével.



7.4. ábra Betonvágó és bevágott próbatest

A mérés során a berendezés mérte a repedéstágasság értékét, és az adott repedéstágasság eléréséhez szükséges erő értékét. Az alábbi, 7.6. ábrán látható egy erő-repedéstágasság diagram, azaz erő-CMOD görbe.

MIX_41_14 CMOD görbéje



7.5. ábra MIX_41 keverék 14-es próbatestének CMOD görbéje

Látható a görbén, hogy a repedés megnyitásához szükséges a legtöbb erő, majd ahogy nyílik a repedés, úgy csökken a szükséges erő.

A törésienergia meghatározásához a már fentebb is említett szabványt használtam segítségül. Eszerint a törési energia képlete:

$$G_F = \frac{0,75 \cdot W_0 + W_1}{A_{lig}}$$

Ahol:

- G_F – törési energia [N/mm],
- W_0 – CMOD görbe alatti terület [Nmm],
- W_1 – önsúlyból származó igénybevétel [Nmm],
- A_{lig} – próbatest keresztmetszeti területe (bevágott részen felül) [mm²].

A W_1 értékét az alábbi összefüggés alapján számítottam:

$$W_1 = 0,75 \cdot \left(\frac{S}{L} \cdot m_1 + 2 \cdot m_2 \right) \cdot g \cdot CMOD_C$$

Ahol:

- S – feltámaszkodások közötti hossz (egységesen 200 mm) [mm],
- L – próbatest teljes hossza [mm],
- m_1 – próbatest tömege [kg],
- m_2 – vizsgálathoz szükséges, próbatesthez felszerelt erőelosztató elem tömege (jelen vizsgálati összeállítás során erre nem volt szükség) [kg],
- g – földi nehézségi gyorsulás ($g = 9,807 \text{ m/s}^2$) [m/s²],
- $CMOD_C$ – repedéstágasság a törés pillanatában [mm].

A számítások eredményeit összefoglaltam hőfokkonként az alábbi, 7.4. táblázatban. Az eredményeket három mérés átlagaként kell értelmezni.

7.4. táblázat Keverékek átlag törésienergiái hőmérséklet szerint

Hőfok [°C]	Törésienergia [N/mm]				
	MIX_40	MIX_41	MIX_42	MIX_43	MIX_44
20	166,2	109,1	83,2	108,5	113,3
150	163,4	89,5	81,2	127,4	99,4
300	167,7	158,2	128,4	186,2	139,6
450	171,8	162,9	143,8	172,2	153,4
600	89,0	92,2	108,8	150,3	82,3

Az látható, hogy jellemzően 300 °C-on terhelte próbatestek értékei jóval meghaladják a 20 °C-on terheltekét.

7.4 Testsűrűség mérés

Az UAB keverékeken végzett testsűrűségmérés szintén egy olyan mérési eljárás, amely megegyezik a TAB keverékeknél bemutatottal, az 5.3 Testsűrűség mérés alfejezetben. Ennek

értelmében nem kívánom ismétel részletezni az eljárást, illetve a felhasznált képleteket, csupán az eredményeket szeretném közölni.

Fontosnak tartom azonban megemlíteni, hogy a mérést mindegyik UAB keveréknél 28 napos korban végeztem el, a kockán mért nyomószilárdság vizsgálattal együtt (TAB keverékekhez hasonlóan)

Az alábbi, 7.5. táblázatban összefoglaltam az UAB keverékek mért testsűrűségeit.

7.5. táblázat UAB és TAB keverékek mért testsűrűségei

Keverék	Mért testsűrűség [kg/m ³]
MIX_40	2292,3
MIX_41	2092,0
MIX_42	1834,6
MIX_43	2164,0
MIX_44	2072,8

7.5 Látszólagos porozitás mérés

A látszólagos porozitás mérésre is elmondható, hogy a mérés menete és a felhasznált képletek megegyeznek az 5.4 Látszólagos porozitás mérés alfejezetben bemutatott, TAB keverékeken végzett vizsgálattal.

Emiatt ebben az alfejezetben is csak az eredményeket szeretném közölni és össze kívánom hasonlítani a TAB keverékekénél mért látszólagos porozitással. Erről látható egy összefoglalás a következő, 7.6. táblázatban (az „eredeti látszólagos porozitás” oszlopban az adott UAB keverék adalékanyagjának előállításához használt TAB keveréknél mért érték látható: például MIX_43 esetén a harmadik oszlopban a MIX_3 mért értéke látható).

7.6. táblázat UAB és TAB látszólagos porozításai

Keverék	Látszólagos porozitás (V%)	Eredeti látszólagos porozitás (V%)
MIX_40	11,86	-
MIX_41	18,10	10,03
MIX_42	19,82	10,97
MIX_43	16,05	8,00
MIX_44	20,30	8,45

Látható, hogy az UAB keverékek látszólagos porozitásai jóval felülmúlják (nagyjából kétszeres értékek) a TAB keverékeken mért értékeket. Ez előzetesen is várható volt, hiszen a zúzott beton adalékanyag jóval nagyobb pórustartalommal rendelkezik, mint a kvarckavics.

8. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

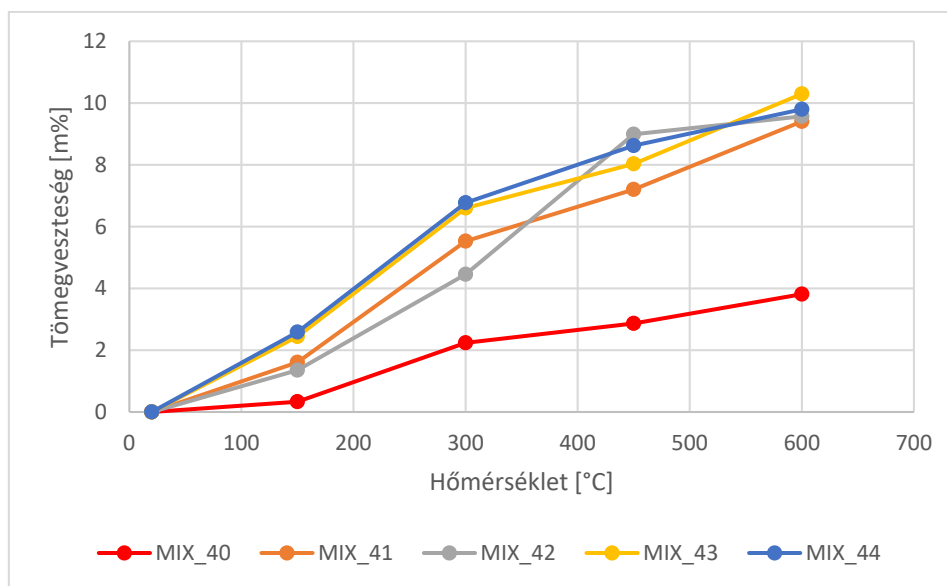
Jelen fejezetben szeretném összefoglalni az UAB keverékek vizsgálatait és kiértékelni azokat, konklúziókat levonni. Célom a magas hőmérséklet hatásának bemutatása és összehasonlítása a referencia (TAB) és az UAB keverékekénél.

8.1 Tömegveszteségek alakulása

A 7. *UAB vizsgálata* című fejezetben nem ejtettem szót a hőterhelt próbatestek tömegveszteségeiről. Ahhoz azonban, hogy a magas hőmérséklet hatására kialakuló megváltozott viselkedését a betonnak értelmezhesük, szükségesek a tömegveszteségek alakulásának ismerete – ugyanis szoros összefüggés van a tömegveszteség és a szilárdsági paraméterek megváltozása között.

Tömegveszteségről hőterhelt próbatestek esetén beszélhetünk, amely a betonban magas hőmérsékelt hatására végbemenő fizikai-kémiai folyamatok végett következik be. A tömegveszteség mindig az adott hőfokon terhelt próbatest tömegének az eredeti, 20 °C-on lemerített tömegéhez arányosítva számítható ki.

Az alábbi, 8.1 ábrán látható a keverékek tömegveszteségei a hőmérséklet függvényében.



8.1. ábra Tömegveszteségek a hőmérséklet függvényében

Látható az ábrán, hogy az UAB keverékek tömegvesztesége jelentősebb, mint a referencia keveréknek.

Ennek egyik oka a víztartalom. Az UAB keverékek látszólagos porozitása közel duplája, mint a referencia keveréknek, ahogy az a 7.6. táblázatban is látható. Emiatt a víztartalma is nagyobb a próbatesteknek. A porozitáson kívül az UAB keverékek magasabb víztartalmában a zúzott adalékanyag hidrotechnikai tulajdonsága is szerepet játszik. Az UAB receptúrák megalkotásakor figyelembe vettem az adalékanyag vízfelszívását, - amelyről a 6.2.2 *Adalékanyag vízfelszívás vizsgálat* című fejezetben írtam részletesen – melynek következtében az UAB esetén az adalékanyag víztartalma is nagyobb volt, mint a referencia keveréknél. Így a hőterhelés kezdeti szakaszában, 150 °C-on jóval magasabb a tömegveszteség UAB esetén.

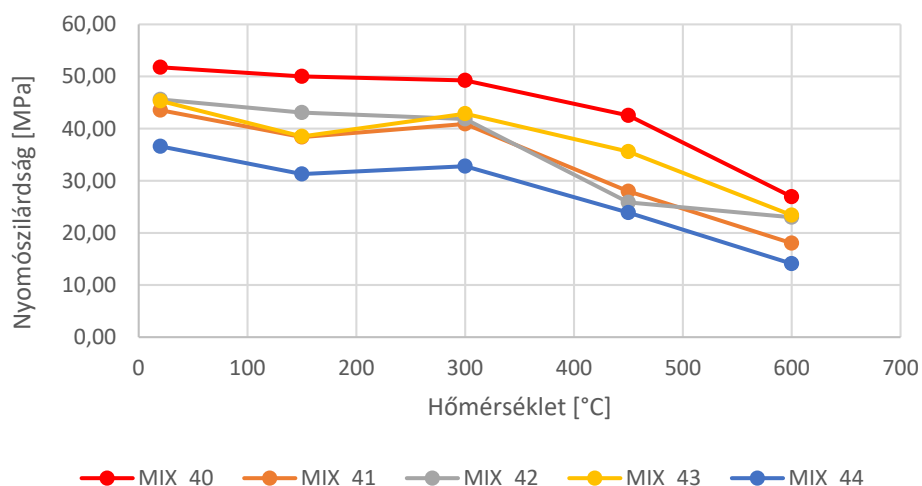
A másik ok az adalékanyagvázbán rejlik. Az UAB adalékanyagváza zúzott beton, amely tartalmaz cementkövet – mivel megszilárdult betonból zúzással állítottam elő. Magas hőmérsékleten a cementkőben végbemenő kémiai folyamatok hatására veszít tömegéből a próbatest, így mivel több cementkövet tartalmaznak az UAB keverékek, így a tömegveszteségek is magasabbak.

Fontosnak tartom megjegyezni, hogy a fentebb közölt adatok a betonok tömegeit rendelik ahhoz a hőfokhoz, amelyen a terhelés történt. Így tehát az adatok nem azt prezentálják, hogy konkrétan az adott hőfokon mennyi volt a tömegveszteség, hanem hogy a hőlépcsők között, hogy alakult a tömeg változása. Ezt azért tartottam fontosnak megemlíteni, mivel 150-300 °C között történik tömegveszteség, azonban ez a folyamat nagyjából 100-200 °C között végbemegy különböző fizikai folyamatok révén, 300 °C körül a tömegveszteség üteme lelassul – ez az információ a következő alfejezethez lesz kulcsfontosságú.

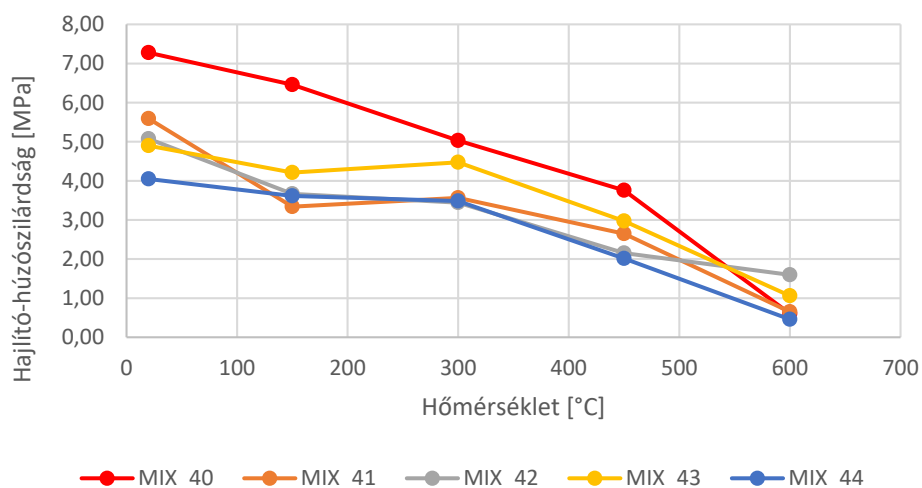
8.2 Szilárdsági paraméterek alakulása

Elsősorban a szilárdsági paraméterek, azaz a nyomószilárdság és a hajlító-húzószilárdság alakulását szeretném bemutatni.

Ezt az UAB keverékek átlag szilárdsági értékeinek bemutatásával szeretném kezdeni. az alábbi két ábrán, a 8.2. és 8.3. diagram formájában szeretném szemléltetni ezen paraméterek alakulását a keverék és a hőmérséklet függvényében.



8.2. ábra Nyomószilárdságok átlagértékei a hőmérséklet függvényében



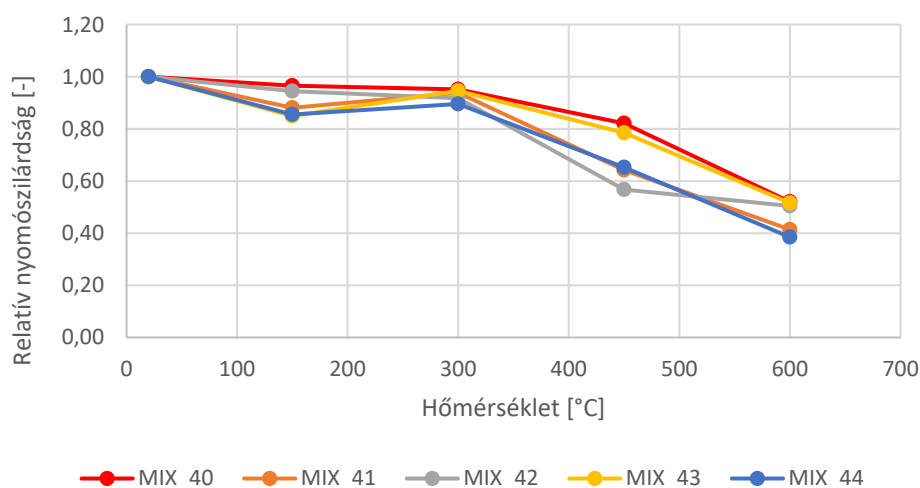
8.3. ábra Hajlító-húzószilárdságok átlagértékei a hőmérséklet függvényében

Mind a nyomószilárdság, mind a hajlító-húzószilárdság alakulásánál látható, hogy a referencia (MIX_40) keverék produkálta a legjobb értékeket szoba (laboratóriumi) hőmérsékleten, majd a hőmérséklet emelkedésével is ennek a keveréknek maradt a legmagasabb szilárdsága.

A görbékről leolvasható, hogy 300 °C-on egységesen megfigyelhető egy szilárdságemelkedés. Ez nagyon jól prezentálja a 2.3 Újrahasznosított adalékanyagú betonok viselkedése magas hőmérséklet hatására című alfejezetben említett viselkedési módot, miszerint a hidratációs folyamat ismételt beindulása a dehidratált cementszemcséken előidéz egy kisebb szilárdság növekedést.

Végül 450 és 600 °C-on erőteljesen csökken a szilárdság, hiszen – ahogy az előző alfejezetben említettem – 450 °C-on további tömegvesztés figyelhető meg, majd a kvarc módosulat váltása járul hozzá a csökkenéshez.

Az alábbi 8.4. és 8.5. ábrán relatív szilárdsági görbék láthatók, mely során egységesen a 20 °C-on mért szilárdsági értékekhez viszonyítottam a különböző hőmérsékleteken mért értékeket.

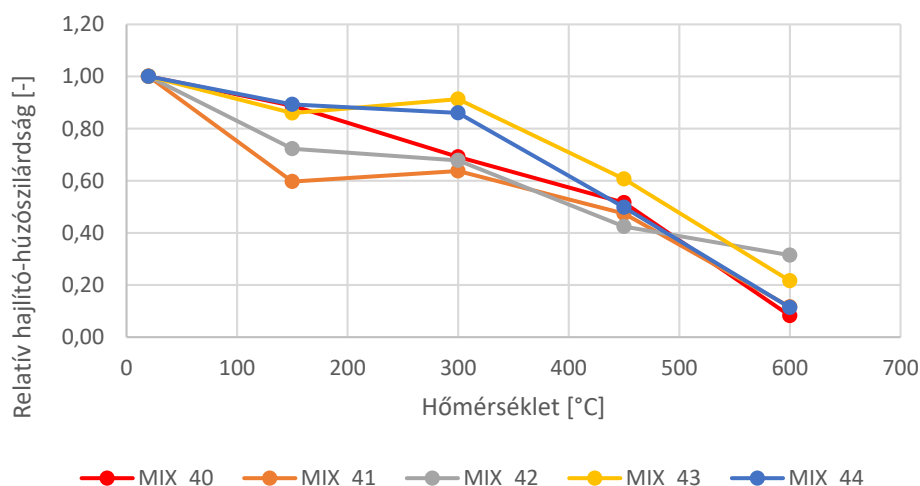


8.4. ábra Relatív nyomószilárdságok a hőmérséklet függvényében

Mind a nyomószilárdságot, mind a hajlító-húzószilárdságot tekintve itt is megfigyelhető a 300 °C-on bekövetkező enyhe szilárdságnövekedés.

Nyomószilárdságnál látható, hogy UAB keverékeknél szinte kivétel nélkül drasztikusabb a szilárdságcsökkenés intenzitása, mint a referencia, TAB-nál megfigyelhető. Ennek oka, hogy a szilárdságcsökkenés leginkább a cementkőben lezajló kémiai-fizikai folyamatok által jön létre. Mivel az UAB keverékek a zúzott beton adalékanyag révén több cementkövet tartalmaz, mint a referencia, TAB. Emiatt az UAB keverékek intenzívebben reagálnak magas hőmérséklet hatására, jelentősebb a szilárdságcsökkenés üteme 300 °C felett. Az ábráról leolvasható, hogy konkrétan a MIX_42, azaz a zúzott könnyűbeton tartalmú UAB keveréknek volt a leggyorsabb szilárdságvesztése az említett hőfok felett.

Szintén megfigyelhető, hogy minél nagyobb az UAB adalékanyagjának a szilárdsága, annál jobban hasonlít a viselkedése a referencia keverékhez.



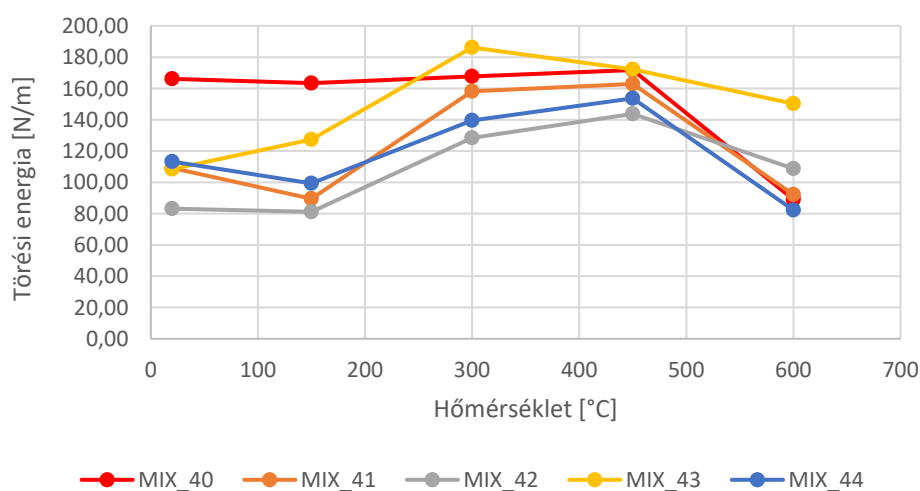
8.5. ábra Relatív hajlító-húzószilárdság a hőmérséklet függvényében

Hajlító-húzószilárdság esetén az eredmények nagyobb szórást mutatnak, azonban egységesen itt is elmondható, hogy a hőmérséklet növekedésével arányosan csökken a szilárdság.

300 °C felett a referencia keverék szilárdságvesztése tűnik a leggyorsabbnak a vizsgált keverékek közül. Ennek lehetséges oka, hogy a zúzott adalékanyag tartalmú betonok hajlító-húzószilárdságra gyakorolt hatása mindig kedvezőbb (repedésátívelés), mint a lekerekített szemcséjű adalékanyagoknak.

8.3 Törési energia alakulása

Az UAB keverékeknél a szilárdsági paraméterek mellett nagy hangsúlyt fektettem a CMOD vizsgálatra, azaz a törési energia meghatározására. A lentebbi, 8.6. ábrán szeretném bemutatni a vizsgálat eredményeit.

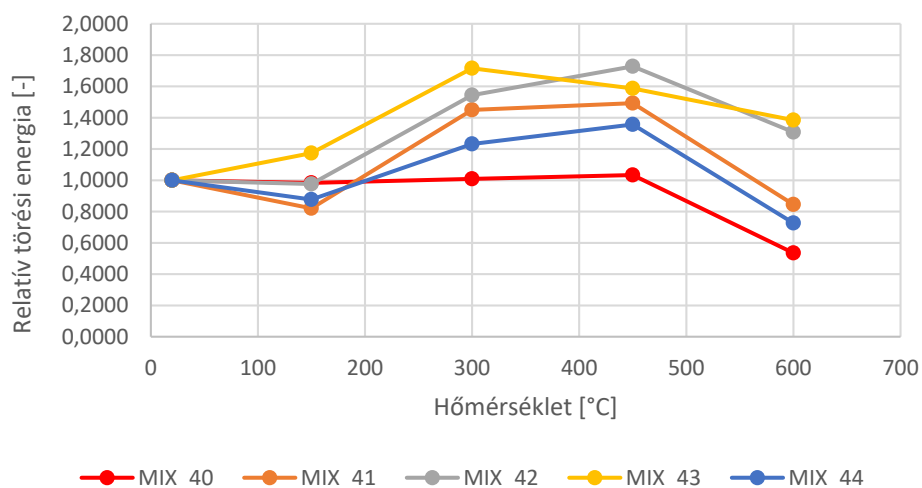


8.6. ábra Törési energia a hőmérséklet függvényében

Egységesen elmondható a keverékekre, hogy 300-450 °C-ig növekszik a törési energia. 20 °C-on a referencia keverék érte el a legmagasabb értéket, minden UAB keverék jóval ezen aluli.

Szintén megfigyelhető, hogy a görbék egészét figyelembe véve, UAB keverékek esetén minél magasabb az adalékanyag szilárdsága, annál magasabbak a törési energia értékei.

A lentebbi, 8.7. ábrán a keverékek relatív törési energia görbéi láthatók, hasonló kialakítással, mint a szilárdsági görbék (a 20°C-os értékek a referenciák).



8.7. ábra Relatív törési energia a hőmérséklet függvényében

Látható a görbéken, hogy az UAB keverékek esetén 150 °C-tól kezdődően növekszik a törési energia 300-450 °C-ig. Ez a referencia keveréknél nem figyelhető meg. UAB keverékek esetén minél nagyobb az adalékanyag szilárdsága, annál gyorsabb a törési energia növekedése. 450 °C felett mind a referencia, mind az UAB keverékek törési energiája egységesen csökken.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom célja a 100%-ban zúzott adalékanyagból újrahasznosított betonok magas hőmérsékleten történő terhelés utáni szilárdsági paramétereinek vizsgálata volt. Vizsgálataim során négy különböző adalékanyagvázú, de ugyanolyan receptúrájú újrahasznosított beton eredményeit vetettem össze egy természetes adalékanyagú referencia keverékkel, melynek szintén ugyanaz volt a receptúrája.

A vizsgálatok során az alábbi tulajdonságokat mértem, és hasonlítottam össze:

- nyomószilárdság,
- hajlító-húzószilárdság,
- törési energia,

Szilárdsági paraméterek (nyomó- és hajlító-húzószilárdság) tekintetében a kezdeti, 20 °C-on mért szilárdság értékek a referencia keveréknek valamivel magasabbak, mint az újrahasznosított betonoknak, azonban meglehetősen jól megközelítették az újrahasznosított betonok szilárdságai a referencia keverékét.

A hőmérséklet növekedésével a szilárdságok mind a referencia, mind az újrahasznosított keverékeknél egyöntetűen csökken. Itt azonban a nyomószilárdság és a hajlító-húzószilárdság alakulása között van eltérés. Nyomószilárdságnál az tapasztalható, hogy az újrahasznosított betonok szilárdságcsökkenés végig jelentősebb és gyorsabb, mint a referencia keveréknek. Ezzel ellentétben hajlító-húzószilárdság esetén 300 °C felett a referencia keverék szilárdságvesztése volt intenzívebb és a 600 °C-on mért hajlító-húzószilárdságok tekintetében az újrahasznosított betonok megelőzik a referencia keveréket.

A törési energiát nézve az mondható el, hogy a hőmérséklet függvényében kialakult görbék jellege 150-450 °C között eltér az újrahasznosított beton és a referencia keverék esetén, viszont 450-600 °C intervallumban hasonló viselkedés figyelhető meg. Újrahasznosított betonoknál a szilárdság és a törési energia között figyelhető meg összefüggés, miszerint minél magasabb a beton szilárdsága, annál magasabb a törési energia értéke.

Összességében az mondható el, hogy a 100%-ban újrahasznosított beton kezdeti szilárdsága ugyan nem éri el a referencia keverékét, azonban jól megközelíti azt. A magas hőmérsékletnek kitett próbatestek vizsgálata során azt a következtetést vontam le, hogy az újrahasznosított keverékek nyomószilárdság szempontjából drasztikusabban reagálnak a magas hőmérsékletre, míg hajlító-húzószilárdság esetén kedvezőbb értékeket produkáltak, mint a referencia keverék.

Vizsgálataimmal szerettem volna bizonyítani, hogy szilárdság szempontjából lehetséges jó minőségű betont készíteni, akár 100%-ban újrahasznosított, zúzott beton adalékanyagból is. Úgy gondolom, hogy ez sikerült és látható, hogy habár az újrahasznosított betonok tulajdonságai nem érik el a természetes adalékanyagú beton tulajdonságait, de az újrahasznosított beton tulajdonságainak figyelembevételével és megfelelő tervezéssel lehetséges elérni a kívánt szilárdságot. Kutatásom eredményeivel szeretnék rámutatni egy lehetséges alternatívára, amellyel fenttarthatóbb beton készíthető, tekintve a világunkban zajló túltermelést, illetve a különböző katasztrófák miatt keletkező építési hulladékot.

10. SUMMARY

The aim of my research was to examine the strength parameters of concretes made from 100% recycled concrete aggregate (RCA) after high temperatures. During my tests, I compared the results of four recycled aggregate concretes (RACs) with different RCA, but with the same water/cement ratio, with a reference mixture with natural aggregate.

During the tests, I measured and compared the following properties:

- compressive strength,
- flexural-tensile strength,
- fracture energy.

In terms of strength parameters (compressive and flexural-tensile strength), the initial strength values measured at 20 °C for the reference mixture are slightly higher than for the RACs, however, the strengths of the RACs were quite close to those of the reference mixture.

As the temperature increases, the strengths of the reference and RAC mixtures decrease uniformly. Here, however, there is a difference between the development of the compressive strength and the flexural-tensile strength. In terms of compressive strength, it can be seen that the strength reduction of the RAC is more significant and faster than that of the reference mix. In contrast, in the case of flexural-tensile strength above 300 °C, the loss of strength of the reference mixture was more intense as in the case of RACs.

Looking at the fracture energy, it can be said that the nature of the curves formed as a function of temperature differs between 150-450 °C in the case of the RAC and the reference mixture, but a similar behavior can be observed in the 450-600 °C interval.

Overall, it can be said that the initial strength of the 100% RAC does not reach that of the reference mix, but it is close to it. During the examination of the test specimens exposed to high temperatures, I concluded that the RAC react more drastically to high temperatures in

terms of compressive strength, while in terms of flexural-tensile strength they produced more favorable values than the reference mixture.

With my tests, I wanted to prove that it is possible to make high-quality concrete from even from 100% RCA. I think that this has been achieved and it can be seen that, although the properties of RAC do not match those of natural aggregate concrete, it is possible to achieve the desired strength by taking into account the properties of RCA and by proper design. With the results of my research, I would like to point out a possible alternative that can be used to make more sustainable concrete.

11. FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

11.1 Irodalom jegyzék

- [1] Global Cement and Concrete Association, „CEMENT AND CONCRETE AROUND THE WORLD”. Elérés: 2023. április 10. [Online]. Elérhető: <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>
- [2] European Aggregates Association, “Annual Review 2020-2021.” Elérés: 2023. április 10. [Online]. Elérhető: https://uepg.eu/mediatheque/media/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf
- [3] Beton, „BETON FESZTIVÁL 2022”. Elérés: 2023. április 16. [ONLINE]. Elérhető: BETON FESZTIVÁL 2022 - YouTube
- [4] A tudatos műanyag-felhasználó, „A HULLADÉKKEZELÉSI PIRAMIS, AVAGY LEHETŐSÉGEINK A HULLADÉK HASZNOSÍTÁSÁRA” Elérés: 2023. szeptember 10. [ONLINE]. Elérhető: A hulladékkezelési piramis, avagy lehetőségeink a hulladék hasznosítására - A tudatos műanyag-felhasználó (blog.hu)
- [5] Czoboly O., „A beton újrahasznosíthatósága adalékanyagként”. Elérés: 2023. április 16. [ONLINE]. Elérhető: A beton újrahasznosíthatósága adalékanyagként | Beton Technológia Centrum (btclabor.hu)
- [6] Kausay T., „Betonok újrahasznosítása, újrahasznosított beton, újrahasznosított és visszanyert adalékanyagú beton” Elérés: 2023. szeptember 13. [ONLINE]. Elérhető: 1. dia (betonopus.hu)
- [7] Balázs L. Gy., Lublóy É., Kopecskó K. és társaik (2017), „Tűz hatásai a beton szerkezetére – helyzetfelmérő jelentése”, Vasbetonépítés, XIX. évfolyam, 2. szám, pp. 26-32.
- [8] Balázs L. Gy., Lublóy É. (2009), ”Magas hőmérséklet hatása a vasbeton szerkezet anyagaira” Vasbetonépítés 2009/2, pp. 48-54.
- [9] Hager, I., Pimienta, P. (2004): „Mechanical properties of HPC at high temperatures”, Proceedings for Fire Design of Concrete Structures: What now?, What next?, edited by: P.G., Gambarova, R., Felicetti, A., Meda, P., Riva, December 2-3, 2004
- [10] Hinrichsmeyer, K. (1987): Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Heft 74 IBMB, Braunschweig

- [11] Høj, N., P. (2005): Fire Design of Concrete Structures, Proceedings of fib Symposium on Keep Concrete Attractive, (edited by Balázs, G.L., Borosnyói, A.) 23-25 May 2005 Budapest, pp.: 1097-1105.
- [12] I. G. Raftoyiannis, R. Kacianauskas, J. Wang (2014), „Properties of Concrete Elevated Temperatures” Elérés: 2023. szeptember 20. [ONLINE]. Elérhető: Properties of Concrete at Elevated Temperatures (hindawi.com)
- [13] Schneider, U. (1986), „Properties of Materials at High Temperatures of Concrete”, RILEM Publ., 2nd Edition, Gesamthochschule Kassel, Universität Kassel
- [14] Khoury, G. A., et al. (2001), “Fire Design of Concrete Materials structures and modelling”, Proceeding of the 1st fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001
- [15] Fehérvári, S. (2009): „Beton összetevők hatása az alagútfalazatok hőtűrésére”, Doktori értekezés, BME
- [16] fib bulletin 38, (2007): „Fire design of concrete structures- materials, structures and modelling”, Lausanne, ISBN: 978-2-88394-078-9
- [17] Yuanxun Zheng , Xinyue Xi , Yu Zhang and co. (2023), „Review of mechanical properties and strengthening mechanism of fully recycled aggregate concrete under high temperature” Construction and Building Materials, 394, 132221, pp. 5-8.
- [18] Baráti I., „Beton utókezelése” Elérhető: 2023. október 5. [ONLINE]. Elérés: Microsoft Word - 9_0482_boritolap_011_munkaanyag_100228BV.doc (nive.hu)
- [19] Betonopus, „Betonszilárdság” Elérhető: 2023. október 7. [ONLINE]. Elérés: betonszilardsag.pdf (betonopus.hu)

11.2 Szabvány jegyzék

MSZ EN 12350-5:2019 – A friss beton vizsgálata. 5. rész: Terülmérés

MSZ EN 12390-3:2019 - A megszilárdult beton vizsgálata. 3. rész: A próbatestek nyomószilárdsága

MSZ 4798:2016 - Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon

MSZ EN 12390-5:2019 - A megszilárdult beton vizsgálata. 5. rész: A próbatestek hajlító-húzó szilárdsága

MSZ EN 1936:2007 - Természetes építőkövek vizsgálati módszerei. Az anyagsűrűség és a testsűrűség, valamint a teljes és a nyílt porozitás meghatározása

MSZ EN 933-1:2012 - Kőanyagalmazatok geometriai tulajdonságainak vizsgálata. 1. rész: A szemmegoszlás meghatározása. Szitavizsgálat

JCI-S-001-2003 - Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam 2003.