

Pécsi Tudományegyetem
Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar
Építőmérnök Tanszék

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag
felhasználásával

Készítette: Bányai Kitti
Évfolyam: Szerkezet-építőmérnöki Msc, 2. évfolyam

Belső konzulens: Dr. Orbán Zoltán
Beosztása: egyetemi docens, intézetigazgató
Mérnöki és Smart Technológiák Intézet

Külső konzulens: Dr. Czoboly Olivér
Beosztása: termék portfólió vezető,
Beton Technológia Centrum Kft.

Pécs

2022

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával**Tartalom**

1. Bevezetés és célkitűzés.....	3
Témaválasztás jelentősége	3
Célkitűzés.....	4
2. Szakirodalmi áttekintés.....	6
2.1. Újrahasznosított betonok	6
2.2. Karbonlábnyom	13
3. Módszerek.....	15
3.1. Felhasznált anyagok	17
Cement.....	17
Adalékanyagok.....	17
Adalékszerek, kiegészítő anyagok	18
Víz	18
Betonösszetételek	19
3.2. Kísérleti terv, elvégzett vizsgálatok.....	21
Első szakasz: Adalékanyag vizsgálata.....	22
Második szakasz: Újrahasznosított betonok	25
Harmadik szakasz: Konzisztencia eltarthatósággal kapcsolatos összefüggések	28
4. Eredmények és értékelések.....	30
Első szakasz adalékanyag vizsgálati eredményei:	30
Második szakasz vizsgálati eredményei:	35
Harmadik szakasz: Konzisztencia eltarthatósággal kapcsolatos összefüggések	43
5. Újrahasznosított betonból készült szerkezet karbon lábnyom számítása.....	49
Karbonegyenérték számítás részletei	49
Költségbecslés.....	55
6. Összefoglalás	57

1. Bevezetés és célkitűzés

„A beton tervezésében és megvalósításában az emberi kreativitásnak köszönhetően szinte végtelen formái alakultak ki napjainkra. Tudatosan állítjuk elő, és tőlünk függ, hogy mit alkotunk belőle. Amikor pedig egy betonból készített építmény végül eléri életciklusa végét, a ma elérhető korszerű technológiák segítségével már teljes egészében újrahasznosítható...”
[beton.hu - Fenntartható építés alapja kiadvány]

Fenti sorok tekinthetők gondolatébresztőnek, ugyanis ezt az elképzelést olvasva akaratlanul is felmerül a kérdés, hogy ez a körforgásos szemlélet valóban életképesen működik-e a hétköznapiakban, vagy inkább tekinthető pozitív derűlátásnak.

Meggyőződésem, hogy feladatunk természeti kincseinkkel a lehető legjobban gazdálkodni, illetve, hogy egy szerkezeti anyag életciklusa a bontással nem ér véget, hanem újraindítható, amennyiben egy új szerkezetben építőanyagaként él tovább. Dolgozatom célja megmutatni egy létező projekt keretein belül, hogy egy vasbeton szerkezet bontásával kapott építőanyagból –esetemben darált betonból- olyan szerkezeti beton készíthető, amelyre nem egy gyengébben teljesítő anyagként tekintenünk, hanem úgy, mint a jövőképeinkre. Továbbá legalább olyan jól funkcionálhat, mint egy hagyományos osztályozott kavicsból készült transzportbeton.

Dolgozatomban ennek körforgásnak a témakörét járom körbe, az újrahasznosított adalékanyag előkészítésén, az abból elkészített beton vizsgálatán, a gyártott beton és szerkezet környezetterhelésének (beépített karbon egyenérték-CO₂et) vizsgálatán keresztül, annak költségelemzéséig.

Témaválasztás jelentősége

Az újrahasznosítás fogalma napjainkban gyakran kimerül abban, hogy az épület anyaga a bontási folyamat során egy esetleges osztályozást követően jó esetben valamilyen alsóbbrendű szerkezetbe, például ágyazati réteggként kerül beépítésre, holott az sokkal értékesebb helyre is kerülhetne, mint például egy új teherviselő szerkezetbe.

A magyarországi adottságok egyelőre kedvezőnek mondhatók, becslések szerint még 30 évre elegendő adalékanyaggal. Ugyanakkor tudni kell, hogy a lelőhelyek jó része Natura 2000-res területen helyezkedik el. Elmondható továbbá, hogy a betongyártásba visszaforgatott másodlagos adalékanyagok aránya világszinten nézve is 60% alatt marad, és a felhasználási terület is az alacsony szintű és minőségű betonokra korlátozódik.

A „*Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával*” című BV-MI 01:2005 (H) számú műszaki irányelv ajánlása alapján az elsődleges adalékanyag mintegy 30%-a hasznosítható másodlagos adalékanyaggal.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Felmérések alapján az öt legnagyobb Uniós ország nagyjából 300 millió tonna bontott betont produkál évente. Ezen mennyiség teljes visszaforgatásával 15 millió tonna CO₂-kibocsátás előzhető meg azonos időszak alatt. Tehát ez az eljárás potenciális haszonnal bír mind a leendő felhasználók, mind a környezet számára.

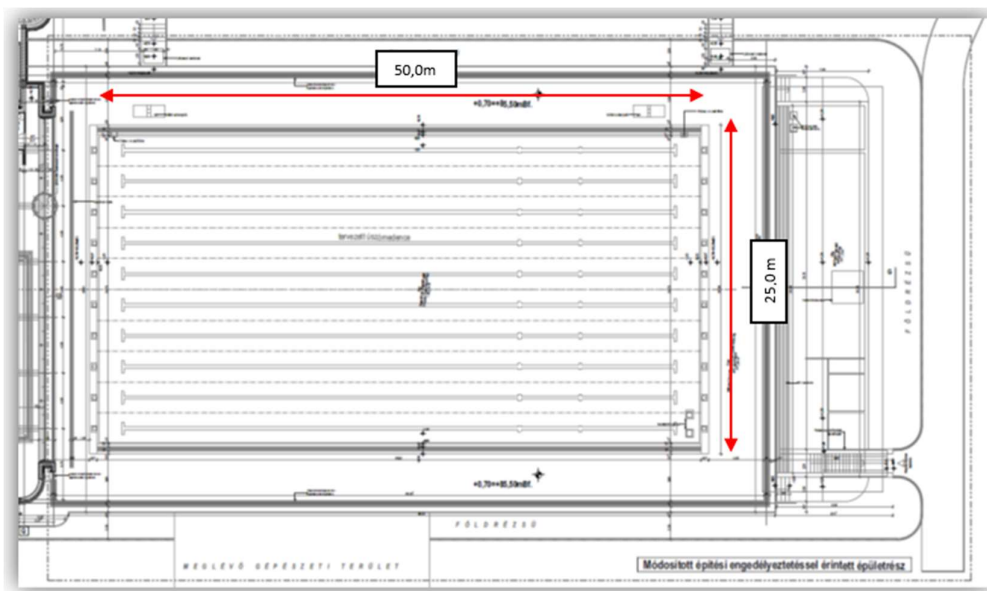
Mindenhol azt halljuk, hogy a Föld erőforrásai végesek. Talán kevesen tudják, de ma már ott tartunk, hogy a „World Overshoot” (egy éven belül meghatározott dátum, amikor a Föld regenerációs képességén túl használjuk ki a természeti erőforrásokat) egyre korábbra tolódik (2022-ben július 28. volt), vagyis ezt a dátumot meghaladó időszakban a jövő generáció természeti nyersanyagait vesszük igénybe.

Az elmúlt évtizedek folyamatos fejlesztéseinek köszönhetően a fenntarthatóság, a körforgásos gazdasági modell irányába ható rengeteg fejlesztés valósult meg, van folyamatban, illetve áll kísérleti fejlesztés alatt. Ennélfogva az iparág támogatása nélkül a körforgásos gazdaság megvalósítása elképzelhetetlen.

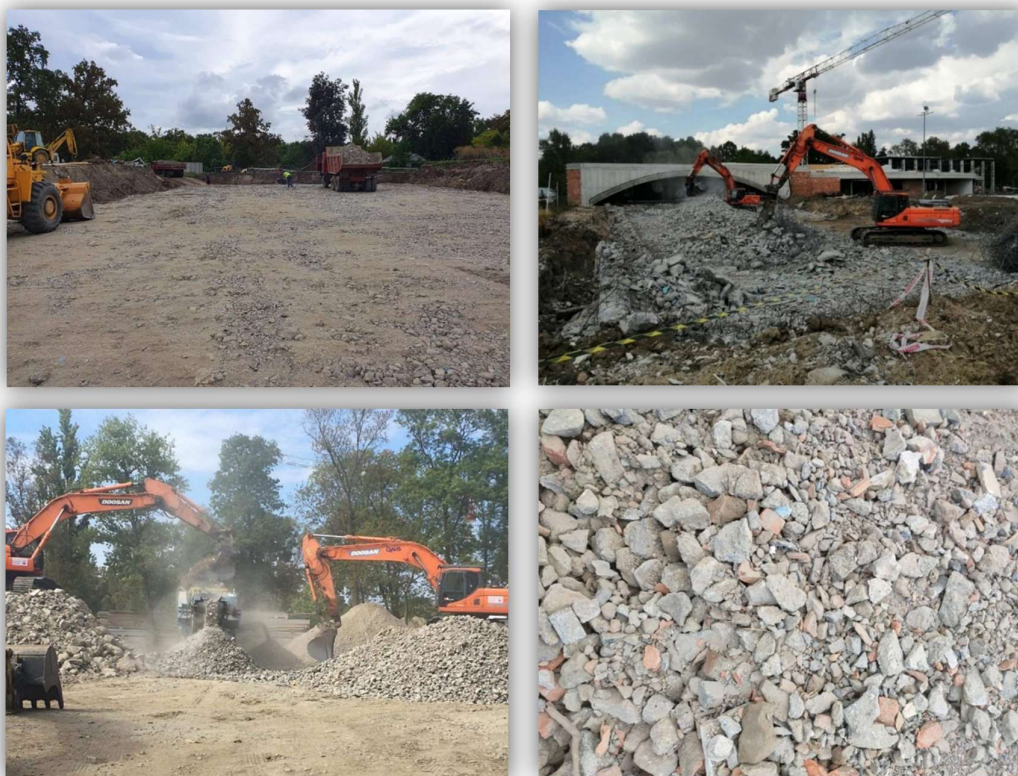
A cement- és betonipar szerepe jól meghatározható a termék életciklusának körforgásos gazdasági modellben való leírásával (lásd körforgásos modell 42. sz. melléklet).

Célkitűzés

Dolgozatom bevetésében már utaltam rá, hogy célom egy létező projekt keretein belül bontásra került vasbeton szerkezet – pontosan egy vasbeton versenymedence – saját bontott anyagát visszaforgatni a helyére épülő új medence szerkezetébe szerkezeti betonként. Egy strandfürdő fejlesztése kapcsán felmerült, hogy a meglévő 50 m-es úszómedence új szerkezettel és technológiákkal kerül megvalósításra ugyanis annak vízgépészete elavulttá vált az elmúlt 25 évben, továbbá számos tartószerkezeti probléma jelentkezett az évek alatt a medencetesten. Az elbontott medence nagy alapterületi kiterjedése miatt és a talajvízszint magassági változásait figyelmen kívül hagyó alapozása miatt a szerkezetben olyan repedések alakultak ki, amelyek a burkolat egyszerű felújításával már nem voltak orvosolhatók. Így egy új tervezési projekt keretein belül a korábbi 50m-es medence helyére egy új-, korszerű hidegvizes medence készül. A 1.1. számú ábrán már az új medence építészeti terve látható. A tervezett medence 30 cm-es alaplemezzel és 30 cm-es vasbeton falakkal került megtervezésre. Az új medencének az anyagigénye durva mennyiségszámítása alapján 480 m³ beton és 44 tonna betonacél. Megemlítendő, hogy elképzelésem szerint az újrahasznosított betonba nem hasznosítható frakciókat a medence alaplemeze alatti ágyazati rétegbe terveztem beépíteni. [1.2. ábra]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

1.1. ábra: Tervezett medence alaprajza [Tervező: Archai Kft.; Vezető tervező: Kövér I.]



1.2. ábra: Medence bontása; Zúzott beton ágyazatként való felhasználása, Vasbeton medence - darált beton [saját fénykép]

Érdekesség megjegyezni, hogy a medence bontása során derült fény arra, hogy a meglévő medence majd 1 méteres alaplemezzel készült, amely nagyban megnehezítette a bontási munkákat, és megnövelte az időtartamát. A medence szerkezete közel 3 hét alatt került

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

elbontásra és további 1 hétig darálták és válogatták szét az elbontott betonhulladékot. A medencéből geodéziai térfogatszámítás alapján közel 1500 m³ (cca. 900 tonna) zúzott beton került ki.

Dolgozatom célkitűzései a következők voltak:

1. Zúzott beton adalékanyagként történő vizsgálata, összehasonlítása
2. Különböző százalékban alkalmazott újrahasznosított adalékanyagú beton nyomószilárdsági és vízzárósági vizsgálata
3. Konzisztencia eltarthatóság vizsgálata az eltérő adagolási arányú újrahasznosított adalékanyaggal készített keverékeken
4. Vízzáróság fokozásának vizsgálata
5. Újrahasznosított beton készítésének karbonlábnyom számítása, alkalmazásának költségelemzése

2. Szakirodalmi áttekintés

A dolgozatban és kísérleti tervben felhasznált szabványok és szakirodalmak, források, ábrák jegyzékét a „Melléklet” dokumentum tartalmazza. [46. sz. melléklet]

2.1. Újrahasznosított betonok

A dolgozatomban megfogalmazott motiváció alapján különböző hazai és külföldi szakirodalmat kutattam, hogy átfogóbb képet kapjak a „hulladék betonok” felhasználhatóságának lehetőségeiről. Igyekeztem kitekinteni a szabvány szerinti szabályozásokra és megjelent műszaki irányelvekre, melyekből kiindulva állítottam össze a kutatási tervet és a főbb célkitűzéseket.

2007-ben *Balázs és Kausay* 20 fős munkabizottsággal –több társulás és szövetség támogatásával és együttműködésével- dolgozta ki a *fib Magyar Tagozata a Beton- és Vasbetonépítési Műszaki Irányelvet „Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával” című BV-MI 01:2005 (H)* számú műszaki irányelvet 2005. augusztusában. A műszaki irányelv az újrahasznosított adalékanyagú betonok és betontermékek gyártásának és alkalmazásának műszaki feltételeivel foglalkozik, szigorú feltételeket szabva alkalmazhatóságának.

Az *MSZ 4798-1:2004* még nem foglalkozott az újrahasznosítás kérdéskörével. A szabványok ugyan támogatták, de a feltételekkel a műszaki irányelv megjelenéséig nem foglalkoztak.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

A néhány évvel később megjelent *MSZ 4798:2016* - kiegészítése az *MSZ 4798:2016/2M:2018*-szabvány új témakörei között helyett kapott az újrahasznosítás –mely mai napig alapjaiban szabályozza az újrahasznosított betonok használhatóságát.

Az útügyi előírások bizonyos szinten megengedőbbek – gondolok itt az aszfalt és bitumen származékok jelenlétére az újrahasznosított anyagban.

A 2017-ben közzétett *e-UT 05.02.31 (ÚT 2-3.710 2008)* útbeton betonhulladék újrahasznosításával és 2019-ben megjelent *e-UT 05.01.54* a betonburkolatból visszanyert beton adalékanyagként történő újrafelhasználásával foglalkozik.

A szabvány kimondja, hogy akkor beszélünk újrahasznosított betonról, ha újrahasznosított adalékanyagot vagy az adalékanyag mennyiségre vonatkoztatva több, mint 5 tömegszázalék visszanyert adalékanyagot tartalmaz.

Az újrahasznosított adalékanyag, olyan anyag, amelyet építési folyamatban már előzőleg felhasznált szervesetlen anyagok feldolgozásával nyernek ki.

Bevezeti a „visszanyert, mosott” (Adalékanyag, amit a friss betonból mosás révén nyernek ki) és a „visszanyert, tört adalékanyag” fogalmát (Adalékanyag, amelyet építési folyamatban még fel nem használt megszilárdult beton törése révén kapnak – ez keletkezhet még be nem épített előregyártott elemekből, vagy építés közben az építéshelyen is). [*MSZ 4798:2016*]

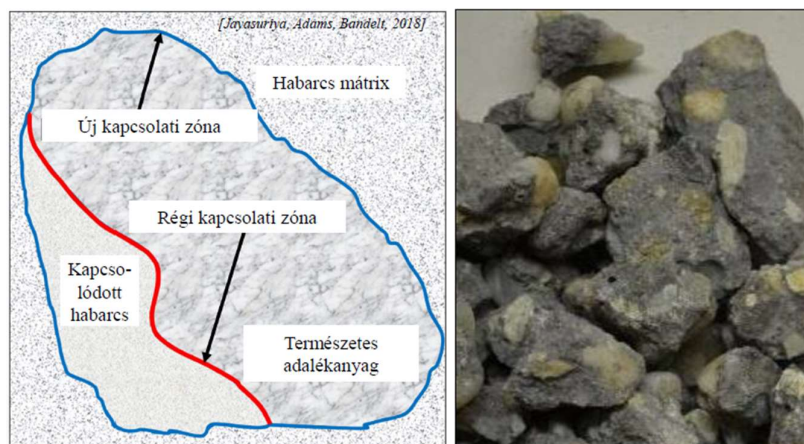
A betonösszetételre vonatkozó alapkövetelmények között szerepel a következő előírás: amennyiben visszanyert tört adalékanyag mennyisége az összes adalékanyag-mennyiség több, mint 5 tömegszázaléka, akkor ezt osztályozni kell, és újrahasznosított adalékanyagként kell kezelni.

Továbbá a szabvány kimondja, hogy ismert eredetű, újrahasznosított és visszanyert **A típusú** adalékanyag használható azokban a környezeti osztályokban, amelyekre az eredeti betont tervezték, legfeljebb 30%-os helyettesítéssel. [*2.1. táblázat: MSZ 4798:2016: E2. táblázat*]

A szabvány *E és F melléklete* korlátozza a finom újrahasznosított és visszanyert adalékanyag felhasználását. Ez olyan finomabb frakciók megnevezése, amelyeknek a D szemnagysága legfeljebb 4 mm [*MSZ EN 12620*]. Kutatásomban fenti előírásokat alkalmazva készítettem elő és használtam fel az adalékanyagokat. Fontos megjegyzés, hogy az *e-UT 05.02.54:2019* alapján az újrahasznosított beton-adalékanyagot építési terméké kell nyilvánítani.

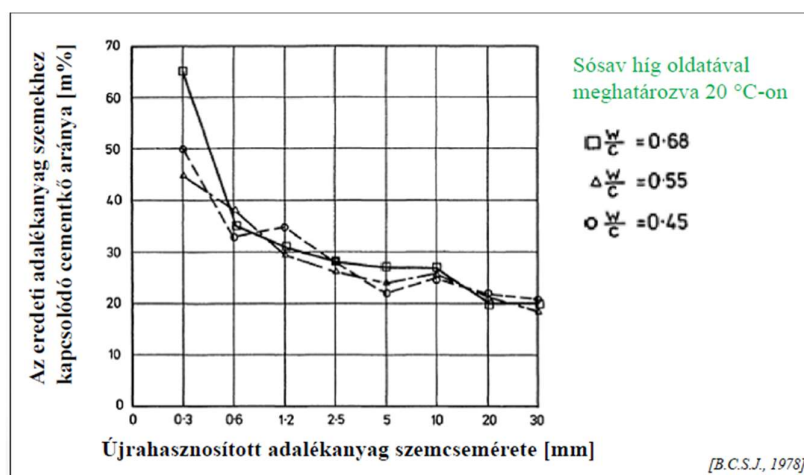
Kausay és Somogyi 2001-ben publikált eredményei szemléltetik a törmelékek jelentős vízfelvételét. A hagyományos értelemben vett természetes adalékanyagok tapasztalati értékeivel szemben jelentősnek tekinthető, ezért kutatásomban vizsgálattal igazoltam az alkalmazni kívánt adalékanyag vízfelvételét.

Az újrahasznosított beton határfelületei:

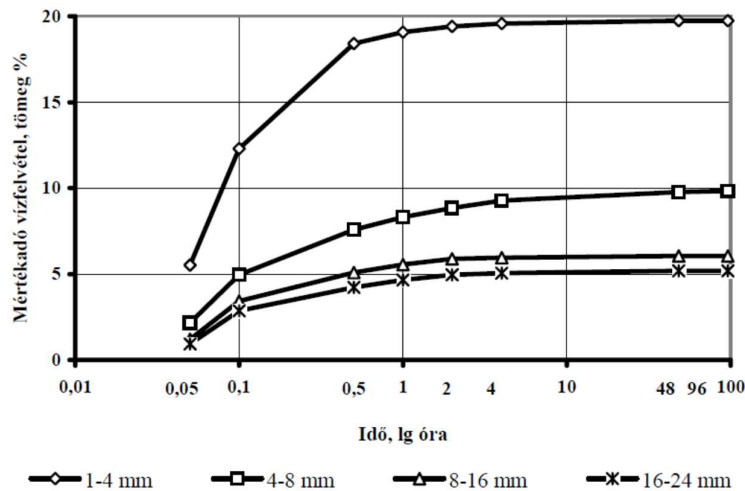


2.1.ábra: Újrahasznosított beton határfelületei [Jayasuriya, Adams, Bandelt, 2018]

Building Contractors Society of Japan egyesülete folytatott kutatást és foglalkozott 1978-ban az újrahasznosított betonok cementkő tartalmával. [2.2. ábra]



2.2.ábra: Cementkő tartalma az újrahasznosított adalékanyagoknak [B.C.S.J 1978]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

2.3. ábra: Betontörmelékek vízfelvétele [Kausay, Somogyi, 2001]

Ugyancsak Balázs és Kausay (2007) foglalkozott az újrahasznosított adalékanyagú beton tervezésének és az abból gyártott termékek minősítésének kérdéseivel, mely alapján a betonhulladék tulajdonságai folytán jobban hasonlít a zúzottkőhöz, mint a homokos kavicsához. Figyelembe véve jelentős vízfelvételét és jellemző szemalakját.

Balázs és Kausay (2007) kutatásai alapján a bontási, építési, építőanyag-gyártási hulladékból készített újrahasznosított beton és könnyűbeton rugalmassági modulusa elmarad a kavicsbeton rugalmassági modulusától.

Irodalmi adatok szerint a rugalmassági modulus csökkenésének mértékét az is befolyásolja, hogy a betonhulladék adalékanyagot mekkora nyomószilárdságú betonból állították elő. A kisebb saját nyomószilárdságú betonhulladék jobban csökkenti az újrahasznosított beton rugalmassági modulusát, mint a nagyobb saját nyomószilárdságú betonhulladék adalékanyag (Siebel- Kerkhoff, 1998).

Meißner (2000) szerint a betonhulladék adalékanyagú beton rugalmassági modulusa mintegy (10-40) százalékkal kisebb, törési alakváltozása mintegy 13 százalékkal nagyobb, mint a kavicsbetoné. Az újrahasznosított beton rugalmassági modulusát indokolt a kavicsbeton rugalmassági modulusánál 20 százalékkal kisebb értékre felvenni.

Zilch és Roos (2000) kísérletei szerint a referencia kavicsbeton, a 4 mm felett betonhulladék adalékanyagú beton, és a 100 százaléban betonhulladék adalékanyagú beton rugalmassági modulusa rendre 33 000 (100 százalék), 26 800 (81 százalék), 18 200 (55 százalék) N/mm². Az MSZ EN 1992-1-1:2005 (Eurocode 2) szabvány szerint a kavicsbeton zsugorodásának végértéke $\epsilon_{cs,\infty} = 0,4 \text{ ‰}$.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Zilch és Roos (2000) mérései szerint 7 - 50 napos kor között a kavicsbeton gyorsabban szárad, mint az újrahasznosított beton, ezért ebben az időszakban az újrahasznosított beton zsugorodása kisebb, mint a kavicsbetoné, 50 napos korban pedig vele azonos (mintegy 0,3 ‰). Ezt követően az újrahasznosított beton gyorsabban zsugorodik, és a 100 százalékból betonhulladék adalékanyagú újrahasznosított beton zsugorodása 170 napos korban a kavicsbeton zsugorodásánál (0,43‰) mintegy 58 százalékkal nagyobb (0,68 ‰).

A beton kúszása a tartós terhelés következménye, amelyet a méretezés során úgy veszünk figyelembe, hogy a kezdeti rugalmassági modulus (E_o) helyett az "ideális" rugalmassági modulussal (E_i) számolunk: *Siebel és Kerkhoff (1998)* mérései szerint a referencia kavicsbeton kúszásához képest 120 százalékkal nagyobb kúszása van a 100 százalékból betonhulladék adalékanyagú betonnak.

Grübl és Rühl (1998) kísérletei szerint a terhelés után 38 nappal a 100 százalékból betonhulladék adalékanyagú beton kúszási tényezője 43 százalékkal nagyobb (0,97), a 100 százalékból téglahulladék adalékanyagú beton kúszási tényezője 65 százalékkal nagyobb (1,12), mint a referencia kavicsbeton kúszási tényezője (0,68).

Grübl és Rühl (1998) kutatásaira hivatkozva *Meißner (2000)* megállapítja, hogy az újrahasznosított beton nagyobb kúszása a nagyobb habarcstartalomnak, a kisebb rugalmassági modulusnak, a bontási hulladék nagyobb víztartalmának tudható be. Ezzel függ össze, hogy az újrahasznosított beton tartós szilárdsága a kavicsbetonénak csak 80 százaléka.

Ismail és Ramli 2012-ben tanulmányban foglalkozott egy lehetséges eljárás kidolgozásáról, amelyben alacsony koncentrációjú savas oldatok alkalmazásával a cementkő leoldását és annak betonra gyakorolt hatásáról. Az eredményeik azt mutatják, hogy a laza habarcsszemcsék eltávolítása jelentősen javítja a újrahasznosított adalékanyag és abból készülő beton fizikai és mechanikai tulajdonságait. Ez annak tudható be, hogy a laza cementkő mennyiségének csökkentése javítja az új cementpép és adalékanyag közötti kohéziót.

Delobel et al (2016) munkája alapján a cementkő jelenléte magasabb lúgtartalomhoz vezet, amely az aggregátumokban növelheti az alkáli-szilika reakció (ASR) jelenlétének kockázatát. Két fő témát vizsgáltak az ACR és ASR kockázatának megfigyelésére. A tanulmány szerint az abszorpciós víz nem elhanyagolható, mivel jelentősen megváltoztathatja az effektív víz/cement tényezőt. Kimutatták, hogy az RCA által felvett víz, nagymértékben befolyásolja az elkészített keverékek expanzióját tágulását. Bevezették az ún. vízfelvételi együttható fogalmát.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Yoda és Shintani 2014-ben foglalkozott egy Japánban történő kutatással, mely áttörést jelentett az újrahasznosított 0/4 frakciók közötti finomrész alkalmazására. Az újrahasznosított finom adalékanyag használata a felmenő szerkezeteknél csekély mértékű. Tanulmányukban ezért is kiemelkedő fontosságú a Kajima Technical Research kutatólaboratórium épületének építéséhez előállított és felhasznált újrahasznosított finomrész (homok).

Tiznobaik et al 2020-ban foglalkoztak az újrahasznosított beton nagyüzemi gyártásával és fenntartható telepi alkalmazásával két teljes körű tereptanulmány keretein belül.

Ez a tanulmány arról tesz tanúbizonyságot, hogy az RCA jelentős felhasználási potenciállal rendelkezik a természetes adalékanyag helyettesítésére C20/25 és C30/37 nyomószilárdsági osztályú beton gyártásánál. Továbbá egyes tanulmányok szerint a RCA nagyobb nyomószilárdság-növekményt mutat 28 napos kor után. Kanadában ezen tanulmány volt az alapja az akkor érvényben lévő szabványok frissítéséhez.

Li X. 2008-as kutatásának témája a hulladékbeton újrahasznosítása és újrafelhasználása Kínában. Kísérleti eredményekkel igazolta az újrahasznosított betonból készült gerendák hajlítási és nyírási tulajdonságait, az oszlopok nyomószilárdsági viselkedését.

Ibrahim et al 2019-es tanulmányában újrahasznosított beton adalékanyagok alkalmazhatóságát kutatta a fenntartható autópályák burkolatai kapcsán. Tanulmányuk feltárta, hogy az RCA minden burkolati rétegben alkalmazható; aljzat, burkolat, ágyazat, útalap tekintetében egyaránt. Vizsgálták az RCA fizikai és mechanikai tulajdonságait, és azt, hogy ezek hogyan befolyásolják a teljesítőképességét, majd összehasonlították a természetes aggregátumokéval (NA), ezeket a szakirodalomban elvégzett életciklus-értékelésekből összegezték. Az újrahasznosított adalékanyagot a természetes adalékanyagok jó alternatívájának tekintik autópálya-burkolatoknál történő alkalmazhatóság tekintetében.

Guo 2013-ban acélszál erősítésű, gumi őrleménnyel készített újrahasznosított adalékanyagú betonok mechanikai viselkedését vizsgálta. A gumitartalom hatását a törési viselkedésre különböző hőmérsékleteknek kitett RSRAC-n (Recycled Aggregate Concrete which consists of crumb Rubber) elemezték. Az RSRAC-ban az acélszálat arra alkalmazták, hogy javítsa a beton repedésállóságát, a gumiőrlemény beépítése elsősorban az energiaelvezetést és a magas hőmérsékletnek való kitettség során fellépő károsodás elleni védelmét növelte. Az eredmények szerint mind a szívósság, mind a nyomószilárdság először növekszik, majd a gumitartalom növekedésével csökkennek a mért értékek. A magas hőmérsékletnek való kitettség minden

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

vizsgált próbakeveréket lényegesen képlékenyebbé tette, azonban kevésbé ellenállóvá vált a repedések terjedésével szemben.

A *Kormány Országos Hulladékgazdálkodási Tervet (2021-2027)* a 1704/2021. Korm. határozattal fogadta el, mely *Cselekvési és Országos Megelőzési Programjában* a középtávú stratégia célkitűzése, hogy a magyar hulladékgazdálkodási ágazat a körforgásos gazdaság egyik mintaértékű modellje legyen Európában. Az építőipar a teljesítményét tekintve a 2018. évben is kiemelkedően teljesített, az ágazat termelése 2017-ben 29,7 %-os, 2018-ban 21,3 %-os bővülést ért el. A fentiekben túlmenően a szabályozási oldalhoz kapcsolódóan meg kell említeni az építési termék építménybe történő betervezésének és beépítésének, ennek során a teljesítmény igazolásának részletes szabályairól szóló 275/2013. (VII. 16.) Korm. rendeletet is, mely az építési-bontási hulladék feldolgozásával előállított másodlagos építőanyagok felhasználását érinti.

Az európai adalékanyag szövetség (UEPG) éves statisztikát készít 39 ország különféle eredetű adalékanyag - előállításáról. [2.1. táblázat]

Ország	2017-ben előállított adalékanyag becsült mennyisége [millió tonna]							Újrahasznosított / Összes
	Homok és kavics	Zúzottkő	Tengeri	Újrahasznosított	Helyszínen újrahasznált	Gyártott	Összesen	
Anglia	52	135	14	65	0	11	276	23,5%
Ausztria	63	33	0	4	0	3	103	3,9%
Belgium	13	46	6	15	0	1	82	18,3%
Hollandia	44	0	16	18	0	0	78	23,1%
Horvátország	4	13	0	0	0	0	17	0,0%
Magyarország	41	17	0	1	0	0	59	1,7%
Németország	256	223	10	72	0	30	591	12,2%
Románia	60	30	0	0	1	0	91	0,0%
Szlovákia	10	18	0	0	1	0	29	1,0%
Szlovénia	2	9	0	0	0	0	11	0,0%

2.1. táblázat: Újrahasznosított adalékanyag előállítása 2017-ben [UEPG statisztikái alapján]

A legkorszerűbb betonüzemek mindegyike rendelkezik mixermosó vagy újrahasznosító berendezésekkel, melyek segítségével szétválasztható és újra alapanyagra váltható a kavicsváz és a cementes víz. Követendő és megemlítenő példa a *Holcim Hungaria Zrt.* ILLEGO projektje, mely során a vállalat legyártatott öt darab, saját tervezésű zsaluzatot, melyeket egy budapesti betonüzemében helyezett el. A munkahelyekről érkező, felhasználatlan betonkeveréket közvetlenül ebbe a zsaluzatba töltik bele. (Takács S. 2011)

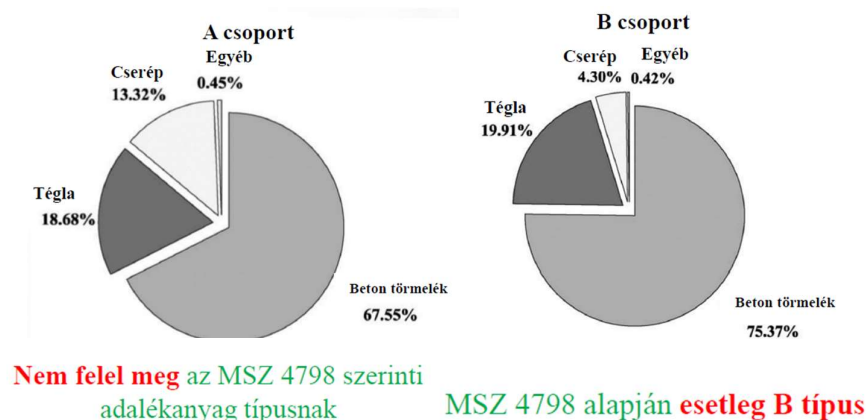
Fontosnak tartom megemlíteni Sika **reCO₂ver** márkanév alatt újtára indított hatékony újrahasznosítási eljárását. Az eljárás lényege, hogy a bontott betontörmeléket fokozatosan alkotóira szedi szét, ezáltal különválasztva a cementkövet a közettől, mindezt granulált

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

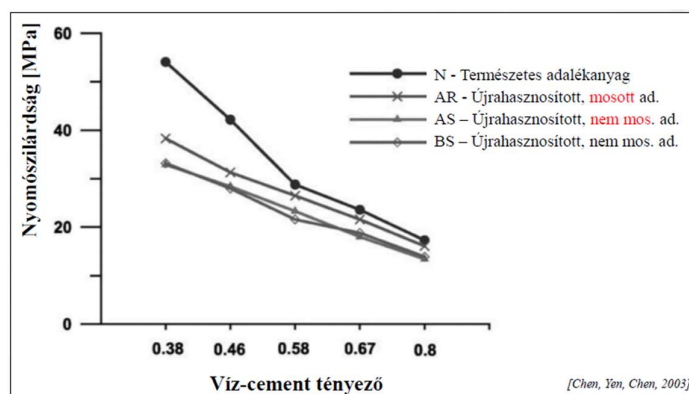
formában – adalékanyagként, homokként és finom porként. Az eljárás velejárója, ha a teljes ciklusra nézzük, hogy jelentős mennyiségű CO₂ köthető le. [Sika reCO₂ver Project (2022), Betonújság]

Powers szerint azonos, vagy csak kissé csökkenő levegőtartalom mellett hiába növekszik a testsűrűség, azt olyan körülmény okozza, hogy a szilárdság csökkenni, vagy stagnálni fog. Ennek a magyarázata, hogy a pórustartalom csökkenés nélküli testsűrűség növekedés a kisebb cementtartalom, kisebb cementpép-, cementkő-tartalom következménye, ami a szilárdság alakulására kedvezőtlenül hat. Tehát ez azt jelenti, hogy ha változatlan beton pórustartalom mellett a cementkő:adalékanyag arányt csökkentjük, akkor a beton testsűrűsége növekedni fog. [www.betonopus.hu/levegotartalom_testsuruseg, 2015]

Tömeg szerinti megoszlás az egyes alkotóknak: 2 eltérő származási helyű újrahasznosított adalékanyag (A és B). [Czoboly: Beton újrahasznosítása [2016] előadás]



2.4.ábra: újrahasznosított adalékanyag jellemzők Tajvan [Chen, Yen, Chen 2003]



2.5.ábra: Mosás hatása a nyomószilárdságra [Chen, Yen, Chen 2003]

2.2. Karbonlábnyom

A beépített karbon csökkentésének nincs látványos eredménye, nehezebben mérhető, illetve kommunikálható, nem jelent közvetlen anyagi megtakarítást, így nem ösztönzi az

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

építőipari szereplőket. Az életciklus-elemzés szabványosítása, az iparági EPD-k (környezetvédelmi terméknnyilatkozatok) egyre növekvő száma, egyes országok építési szabályozási környezetének átalakulása a teljes karbon figyelembevételének irányába tereli az ipar résztvevőit. (www.dezeen.com/2021/11/04/norman-foster-cop26-embodied-carbon). [V. Nagy Zoltán; 2022]

Jelenleg a kifejlesztett eszközök/rendszerek egyike sem elfogadott széles körökben. Ennek egyik oka a fenntarthatóság fogalmának szubjektivitásával függ össze.

Fontos megemlíteni, mert a legnagyobb karbon lábnyom-részesedéssel rendelkező nemzetgazdasági ágazat 2014-ben az építőipar volt, maga mögé utasítva az addig élen járó energiaellátást. [43. sz. melléklet]

Szakirodalmi kutatásaim alapján kijelenthetem, hogy évekkel ezelőtt még kiábrándítóan adat- és módszerhiányos terület volt és a mindennapi mérnöki tervezési gyakorlatba integrálása megvalósíthatatlannak látszódott. [Beleznai (2021)]

Az elemzési módszerek jelentősen egyszerűsödtek, átláthatóbbá, szabványosabbá váltak. Magyarországon jobban arra van ma lehetőség, hogy az EU-s adatbázisok különböző országokban elérhető EPD-it a hazai energiamix szerint korrigálva felhasználjuk az itthoni elemzésekben. [V. Nagy Zoltán: Karbonlábnyom-számítás épületekben; Mérnök újság 2022]

Hazai gyakorlatban a tartószerkezet tervező mérnökök között abszolút egyedülállónak mondható a Lapidárium Mérnöki Kft. tulajdonosa V. Nagy Zoltán munkássága, már az általa tervezett épületek beépített karbon lábnyomát a tervezés fázisában monitorozza.

A beépített karbonlábnyom számítás, bruttó szintterületre számítódik. (GIA Gross Internal Area - A külső falainak belső határoló kontúrján belülről számítandó).

A különböző szerkezetek beépített CO₂ mértékének megítélésében segít a **LETI (London Energy Transformation Initiative)**, amely segédleteket bocsájtott ki ezzel kapcsolatban.

Egy hasonlóan széleskörű és jól használható adatbázis az **ICE /The Inventory of Carbon and Energy/** adatbázisa, amely tartalmazza a határokat. Az ICE adatai jól alkalmazhatóak az iparban, és értékelhető eszközt kínál a kialakuló szén- és szénlábnyom értékeléséhez. Ezt az adatbázist alkalmaztam az általam elemzett szerkezet karbonlábnyom számításához.

A legfenntarthatóbb építkezési megoldások kidolgozásában, több intézményben is, különféle rendszereket fejlesztenek ki az épületek életciklusában kialakuló fenntartható teljesítményének értékelésére.

A meglévő fenntarthatósági értékelési eszközök és rendszerek közül kiemelkedik az **Building Research Establishment Environmental Assessment Method - BREEAM (BREEAM 2012)**, a

Leadership in Energy & Environmental Design - LEED (LEED 2013) és a Sustainable Building Tool - SBTool (iiSBE 2012).

Ezek a rendszerek különböző paramétereket vesznek figyelembe, amelyek értékelését egy épület teljesítménye alapján végzik, összehasonlítva a referencia épülettel.

A fenntarthatóság három dimenziójának szintjén szereplő paraméterek bevonásával el lehet kerülni azt a gyakori hibát, hogy a fenntartható építést kizárólag a környezeti kérdésekkel társítják. [BSRIA GUIDE 2011]

3. Módszerek

Kutatásom fő célja, hogy a darált betonból visszanyert másodlagos adalékanyag hatását és viselkedését vizsgáljam különböző betonkeverékekben, eltérő adagolási mennyiségekkel. A laboratóriumi adalékanyag, frissbeton és megszilárdult beton vizsgálatokat három szakaszban végeztem el. [3.1. táblázat]

Kísérlet helyszíne: Beton Technológiai Centrum Kft. központi laboratóriuma (Budapest)

(1) Adalékanyag: Az *első szakaszban* az általam beszerzett újrahasznosított adalékanyagnak szánt zúzott beton adalékanyagként történő vizsgálatait és előkészítését végeztem el, majd hasonlítottam össze más zúzalékkal.

(2) Beton: újrahasznosított adalékanyag adagolási mennyiségének hatása a frissbeton és a megszilárdult beton tulajdonságokra.

A *második szakaszban* az újonnan tervezett vasbeton medence szilárdságát és környezeti osztály előírásainak megfelelő referencia betonkeverék (REF-1) frissbeton (konzisztencia, légtartalom, testsűrűség) és megszilárdult beton (nyomószilárdság, vízzáróság, testsűrűség) tulajdonságait igyekeztem összehasonlítani a 15%-ban és 30%-ban adagolt újrahasznosított (másodlagos) adalékanyaggal készített keverékkel. Kísérlettel igazoltam a mikroszilika por adagolásának hatását.

A vizsgálat állandó paramétereit a következők voltak:

- cement típusa: CEM II/B-S 42,5 N (DDC)
- folyósító adalékszer típusa:
 - o hagyományos adalékanyag esetén: Sika ViscoCrete 7710
 - o újrahasznosított adalékanyag esetén: Sika ViscoCrete 7710

A vizsgálat változó paramétereit a következők voltak:

- cement mennyisége
- adalékanyag mennyisége: 0/4, 4/8, 8/16 mm átmérőjű adalékanyagokat és 4/8, 8/16 mm átmérőjű újrahasznosított adalékanyagokat alkalmazva

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

- keverővíz mennyisége
- adalékszer mennyisége
- adalékszer újrahasznosított adalékanyag esetén: Sika Stabilizer 900
- vízzáróság fokozására szilikapor: SikaFume HR/TU szilikapor: 7 %

Vizsgált paraméterek	Cél
1. Adalékanyag: - hagyományos adalékanyag (osztályozott kavics)-elsődleges - újrahasznosított adalékanyag (zúzott beton)-másodlagos Mért jellemzők: - kőanyaghalmoz kopásállóságának vizsgálata mikro-Deval MSZ EN 1097-1:2012 - kőanyaghalmoz aprózódással szembeni ellenállása Los Angeles MSZ EN 1097-2:2020 5. szakasz - szitavizsgálat MSZ EN 933-1:2012 - testsűrűség és vízfelvétel meghatározás MSZ EN 1097-6:2022	- hagyományos és újrahasznosított adalékanyag tulajdonságainak vizsgálata, összehasonlítása
2. Beton vizsgálatok kísérleti paraméter: - betonösszetétel (cementtípus, adalékanyag (elsődleges-másodlagos), adalékszer, víz/cement tényező) (8 féle keverékterv) 2.1. frissbeton vizsgálat mért jellemzők: - terülés MSZ 4798:2016 - levegőtartalom MSZ EN 12350-7:2019 - testsűrűség MSZ EN 12350-6 2.2. szilárdbeton vizsgálat - nyomószilárdság (3-3 próbatest; 7 és 28 napos korban) MSZ EN 12390-3:2019 - vízzáróság (3 próbatest) MSZ EN 12390-8:2019 - testsűrűség	- 2 féle másodlagos adalékanyag adagolási mennyiség (15% és 30%) hatása a friss- és szilárdbeton tulajdonságokra
3. Konzisztencia eltarthatóság vizsgálat kísérleti paraméter: - betonösszetétel (cementtípus, adalékanyag (elsődleges-másodlagos (beáztatott)), adalékszer) (8 féle keverékterv) 2.1. frissbeton vizsgálat mért jellemzők: - terülés MSZ 4798:2016 (5, 30, 60, 90 perces korban) - víztartalom - testsűrűség MSZ EN 12350-6 2.2. szilárdbeton vizsgálat - nyomószilárdság (1-1 próbatest; 7 és 28 napos korban) MSZ EN 12390-3:2019 - vízzáróság (1 próbatest) MSZ EN 12390-8:2019 - testsűrűség	- 2 féle másodlagos adalékanyag adagolási mennyiség (15% és 30%) és a beáztatott zúzott betonnal bevitt víz hatása a friss- és szilárdbeton tulajdonságokra, adalékszer adagolásra

3.1.táblázat: Kísérleti terv összefoglalása [saját táblázat]

Céлом, hogy az újrahasznosított adalékanyaggal készített betonkeverékek szilárdsága és vízzárósága elérje vagy meghaladja a referencia beton értékeit. A keverékekbe a zúzott beton 15%-os és 30%-os adagolással került hozzáadásra a durva frakciókra vonatkoztatva, illetve a vízzáróság fokozásának vizsgálata érdekében szilikapor adagolású keverékeket is készítettem.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Kiemelten fontosnak tartom, hogy olyan keverékeket tervezzek és készítsék, melyek a mindennapi építőiparban is használhatóak bedolgozhatóság, konzisztencia eltarthatóság szempontjából.

(3) Konzisztencia eltarthatóság: Ezért kísérleteim *harmadik szakaszában* a-második szakaszban készített- keverékek konzisztencia eltarthatóságát vizsgáltam a következő paraméterek figyelembevételével:

- újrahasznosított adalékanyag mennyisége
- adalékszer mennyisége
- keverővíz mennyisége

A harmadik szakaszban az újrahasznosított adalékanyag 5 percre beáztatásra került, majd 5 percig labor levegőn száradt, ezután került a keverékbe.

Megfigyeltem a 15%-os és 30%-os újrahasznosított adalékanyag adagolási mennyiségének és a beáztatott adalékanyaggal bevitt víz hatását a frissbeton (konzisztencia, testsűrűség, víztartalom) és a megszilárdult beton (nyomószilárdság, vízzáróság, testsűrűség) tulajdonságokra, kiemelten vizsgálva a beton konzisztencia eltarthatóságát az eltelt idő függvényében.

3.1. Felhasznált anyagok

Az egyes kísérleti blokkokon belül azonos szállítmányokból származó anyagokkal dolgoztam (cement, adalékanyag (hagyományos és újrahasznosított), adalékszer), hogy a változók minimalizálásával az újrahasznosított adalékanyag hatását vizsgáljam.

Cement

Kísérletekhez használt cement

A próbakeverések alkalmával és a próbatestek készítéséhez minden esetben a következő típusú cementet használtam.

- kohósalak portlandcement: CEM II/B-S 42,5 N (DDC, Vác) (MSZ EN 197-1:2011).

Adalékanyagok

Természetes eredetű, osztályozott homok és kavics

A természetes eredetű osztályozott homok és kavics a Duna-Dráva Cement Kft. bugyi bányájából származott ismert anyagjellemzőkkel. A szitagörbét a BTC Kft. bocsájtotta rendelkezésemre, valamint az anyag hivatalos teljesítmény nyilatkozatát vettem irányadónak egyéb paraméterek tekintetében (pl.: vízfelvétel, aprózódással szembeni ellenállás, stb..) A beszállított anyag 3 frakcióban került felhasználásra (0/4 mm; 4/8 mm és 8/16 mm). [9.-10.-11. sz. melléklet]

Újrahasznosított beton adalékanyag

Az újrahasznosított beton adalékanyagot egy ismeretlen szilárdsági osztályú vasbeton versenymedence bontási anyagából nyertem vissza. A bontott beton pofás törőgéppel 0-150 mm frakcióra került lezúzásra. Az adalékanyag vizsgátoakat a rendelkezésre álló darált beton leszítálása és átmosása előzte meg, szétválasztva 4/8 és 8/16 frakciókra. [12.-13. sz. melléklet]

Adalékszeretek, kiegészítő anyagok**Adalékszeretek**

A keverékekhez minden esetben Sika ViscoCrete 7710 típusú PCE technológián alapuló nagyteljesítményű folyósító adalékszeret használtam. Az újrahasznosított adalékanyaggal kevert betonok esetén SIKA Stabilizer-900 nevű stabilizáló szeret is használtam mellett a SIKA Stabilizer-900 egy Magyarországon még nem forgalomban lévő adalékszer. Az adalékszeretek műszaki jellemzőit a 25.-26. számú melléklet tartalmazza. Adagolását a különböző keverékek viselkedését figyelemmel követve változtattam a kívánt folyósító hatás függvényében a gyártó előírásai alapján a cement tömegére vonatkoztatva.

Vízzáróságot fokozó anyag (mikroszilikapor)

A vízzáróság fokozására SikaFume HR/TU mikroszilikapor alkalmaztam, amely egy nagy szilárdságú, puccolános szilícium-dioxid tartalmú, kloridmentes kiegészítő anyag. A frissbetonban erős belső kohéziót és jó vízmegtartó képességet idéz elő. Érdemes megjegyezni, hogy a megszilárdult betonban a látens reakcióképes szilikapor a szabad mésszel ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kémiai kötésbe lép. A szilárd hidrát termékek további kötése következtében a cementkő lényegesen tömörebb és ez szilárdulás növekedést eredményez. [Miklós (2019)]

Adagolása a cement tömegegységére vonatkoztatva 5-10 %, keverékeimben egységesen 7%-os adagolást alkalmaztam.

A kiegészítő anyag vizsgálatok az elméleti víz-cement tényező szintén 0,5 volt.

Víz

A keverékhez ivóvíz minőségű, vezetékes vizet használtam. A víz hőmérséklete hozzávetőlegesen 8-12 C volt, előmelegítés nélkül. Megemlíteném az irányelv alapján említett keverővíz értékének számítását illetve a rövididejű mértékadó vízfelvétel fogalmát, melyet a kísérleti munkarészben magam is használni fogok. Ezen feltételezés alapján két részletből tevődik össze: alap- és többlet keverővízből. Az adagolandó keverővíz az alap- és többlet keverővíz összege.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Az elméleti víz-cement tényező minden esetben 0,5 volt, az XV2(H) környezeti osztály szabványban előírt értéke miatt. Megjegyzendő, hogy a harmadik szakaszban kevert betonok esetén az adalékanyag beáztatásával többlet víz került hozzáadásra.

Betonösszetételek

Recept neve [Keverék]	Durva adalékanyag összetétele	
	Természetes	Újrahasznosított
MIX REF-1	100%	0%
MIX REF-2 (+D)	100%	0%
MIX REC-1 (15)	85%	15%
MIX REC-2 (30)	70%	30%
MIX REC-3 (15m)	85%	15%
MIX REC-4 (30m)	70%	30%
MIX REC-5 (15m+D)	85%	15%
MIX REC-6 (30m+D)	70%	30%

3.2. táblázat: Kísérletben alkalmazott betonkeverékek jelölése és összetétele [saját táblázat]

Műszaki ajánlás szerint a betontervezés módszere szabadon választható, azonban az eredményeket laboratóriumi kísérlettel ellenőrizni, igazolni kell. Az újrahasznosított adalékanyaggal készülő betonok tervezésére nincs kidolgozott szabvány vagy módszer. *[fib BV-MI 01:2005 (H)]*

A betontervezés elméleti víz-cement tényező minden esetben 0,5 volt, ezt az XV2 (H) környezeti osztály szabványban előírt értéke indokolta.

A beton készítése során a konzisztenciát folyósító szerrel, illetve az újrahasznosított adalékanyag használata során stabilizáló szerrel oly módon állítottam be, hogy az 5 perces terülés vizsgálat eredménye 500-540 mm között legyen.

A dolgozatomban „osztályozott kavics adalékanyaggal készült beton”-nak definiáltam azokat a keverékeket, melyekben természetes eredetű, osztályozott homokot (0/4 frakció) és természetes eredetű osztályozott kavicsot (4/8 és 8/16 frakciók) alkalmaztam. „Újrahasznosított adalékanyaggal készült beton”-nak azokat a keverékeket nevezem, melyekben természetes eredetű osztályozott homokot, osztályozott kavicsot (OH 0/4, OK 4/8 és OK 8/16) és zúzott, újrahasznosított beton adalékanyagot (4/8, 8/16 frakciók) használtam. Az újrahasznosított adalékanyag a hasonló geometriai tulajdonságokkal rendelkezik, mint a zúzottkövek, ugyanis a zúzás hatására élesebb, érdesebb felületű, mint a természetes eredetű homokos kavics.

Célom, hogy a tervezett betonösszetételek, olyan teljesítőképességű beton (okat) eredményezzenek, melyek újrahasznosított adalékanyag felhasználásával igazolhatóan elérik, esetleg meghaladják szilárdsági és vízzárósági szempontból is, a megépíteni kívánt vasbeton medence előírt betonjellemzőit.

Referencia beton

A próbakeverésekhez összesen 8 különböző keveréktervet használtam. A tényleges keverékterveket az összetételi arányok és alkotók megnevezésével a 1.-8. sz. mellékletek tartalmazzák. Elsők között egy referencia keveréket kevertem (REF-1), mely megegyezik az újonnan tervezett vasbeton medence tervező által meghatározott betonminőségével:

C30/37-XC3-XV2(H)-16-F4. [3.1. ábra]

A referencia keveréknél a tervezésénél 170 liter/m³ tervezési víztartalmat vettem alapul. A keverékben a cementtartalmat úgy választottam meg, hogy ezekkel a paraméterekkel tervezett betonok víz-cement tényezője megfelel a hatályos MSZ 4798:2016/2M:2018 szabvány XV2 (H) környezeti kitéti osztály követelményeinek. [MSZ 4798:2016 NAD 2 F1 táblázat.] Mivel egyik feltételezésem, hogy a vízzárósági kritériumoknak is megfelelő betont készítek újrahasznosított adalékanyag felhasználásával, ezért a referencia beton mikroszilika kiegészítő anyaggal tervezett keverékét is előállítottam. (REF-2 (D)).



3.1. ábra: Hagyományos, szilikapor adagolású és újrahasznosított betonok keverés közben
[saját fénykép]

Újrahasznosított adalékanyagú beton

Az újrahasznosított adalékanyaggal készített keverékekből 6 féle módozatot készítettem az alábbi megfontolásokkal:

MSZ 4798:2016 E3. ajánlásának E2. táblázata alapján XC környezeti osztály esetén a természetes elsődleges adalékanyag durva frakciójának maximum 30%-a helyettesíthető újrahasznosított adalékanyaggal. XV (H) környezeti osztályra újrahasznosított beton tekintetében nincs előírás, sem ajánlás.

REC-1 (15) összetétel: az referencia keverékben az eredeti adagoláshoz képest a durva adalékanyag (4/8 és 8/16) frakciók 15%-a került helyettesítésre újrahasznosított adalékanyaggal.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

REC-2 (30) összetétel: fenti adagoláshoz képest a durva frakciók 30%-a került helyettesítésre az újrahasznosított adalékanyaggal.

A referencia keverékekhez képest az újrahasznosított adalékanyaggal készített betonoknál az alap keveréknél alkalmazott folyósítószer mellett Sika Stabilizer-900 típusú adalékszer is használtam. Ennek oka, hogy a zúzott beton hasonlóan viselkedik a zúzottkő adalékanyagokhoz gondolva itt a nagyobb porozításra és magasabb vízfelvevő kapacításra. Ezt kompenzálni hivatott a stabilizáló adalékszer.

Érdemes azonban megjegyezni, hogy fenti két keverék (REC-1; REC-2) eltarthatósága messze elmaradt a referencia keverékekétől, gyakorlatilag 20 perc után a beton bedolgozhatatlanná vált. Ezen megfontolás alapján az eredeti újrahasznosított adalékanyaggal készített receptúrákon módosítani volt szükséges.

A két módosított újrahasznosított beton keverék: REC-3 (15m) és REC-4 (30m)

A REC-1 (15) és REC-2 (30) keverékek összetételének elsődleges problémája eltarthatóság és bedolgozhatóság szempontjából a keverővíz és az adalékanyag által felvett víz mennyiségével hozható összefüggésbe. Ezért az „m” jelű receptekben a keverővíz mennyiségét 170 l/m³-ről 180 l/m³-re emeltem (adalékanyag vízfelvétel vizsgálat eredményéből számítva). A vízzáróság megtartásához szükséges víz-cement tényező értéke a cement mennyiségének növelését vonta maga után, 350 kg/m³-ről 370 kg-ra.

Betonok mikroszilika adagolással

A vízzáróság fokozására a mikroszilika –mint másodlagos kötőanyag- adagolásával a víz-cement tényező javítható a víz mennyiségének növelése nélkül. Viszont a REC-1 és REC-2 keverékek viselkedésének ismeretében a szilikaport jobbnak találtam a módosított keverékekhez adagolni. Hozzáadásával a péptartalom és az induló konzisztencia csekély mértékben megnőtt.

MSZ 4798:2016 M melléklete 5.2.5.2.3. „A k-érték elve az MSZ EN 13263-1 szerinti I. osztályú szilikaporra” alapján:

MSZ EN 197-1 szerinti cementfajtákat tartalmazó betonra a következő k-értékek megengedettek: előírt víz/cement tényező > 0,45; k=1,00, ebben az esetben víz/(cement + 1 x szilikapor).

3.2. Kísérleti terv, elvégzett vizsgálatok

A vizsgálatok elvégzéséhez laboratóriumi körülmények között próbakeverés sorozatot végeztem.

Első szakasz: Adalékanyag vizsgálata**(1) Újrahasznosított adalékanyagnak szánt zúzott beton tulajdonságainak meghatározása.**

Feltétel: Az újrahasznosítani kívánt tört beton-adalékanyag az *MSZ 4798:2016* szabvány követelményeit elégítse ki. Zúzott betonhomok újrahasznosított betonhoz nem használható fel. A hiányzó frakciókat új adalékanyaggal kell pótolni. Az adalékanyagban jellemzően keveredett a zúzott betontörmelék a kerámia és a kohéziós anyagokkal, mint agyag vagy talaj. Ahhoz, hogy az adalékanyag megfelelően hasznosíthatóvá váljon szükséges volt a szennyezőanyagok leválasztása szitálással. [3.2.-3.3. ábra]



3.2. ábra: Felhasznált törtbeton adalékanyag, szitálása, átmosása [saját fényképek]



3.3. ábra: Felhasznált törtbeton adalékanyag, szitálása, átmosása [saját fényképek]

A laboratóriumi keretek között történő gépi szitálás előtt szükséges volt a 16 mm-es és 4 mm-es kézi szitán történő leválasztás. Újrahasznosított betonba a 4 mm alatti frakció szabvány szerint nem használható. A kúszási tényező változására a 4 mm alatti szemek jellegének van jelentős hatása. A minta erőteljesen keverésével a finomrészek teljes szétválasztódását és

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

szétiszapolódását lehetett érni. A mosást 3 mm átmérőjű perforált lemezen végeztem folyó víz alatt. [3.2.-3.3. ábra]



3.4. ábra: Szárítószekrény és gépi szita

Az állandó tömegűre történő szárítás hőmérséklet-szabályozós szárítószekrényben történt 105°C hőmérsékleten minimum 12 órán át. A vizsgálat az anyag, szitasorozat segítségével történő, különböző csökkenő szemnagyságú részalmazokra való felosztásából és szétválasztásából áll.

A választott vizsgálati eljárás mosásból és száraz szitálásból állt. [3.4. ábra]

Az egyes szitákon áthullott összesített mennyiséget szemmegoszlási görbén és táblázatosan ábrázoltam. [9.-10.-11. sz. melléklet]

Adalékanyag osztályba sorolása **fib** BV-MI 01:2005 (H) számú műszaki irányelv 1. táblázata alapján: Az újrahasznosított adalékanyag csoport beosztása összetétele:

Beton hulladék.

Újbóli felhasználáshoz, és az azt megelőző betontervezéshez **fib** BV-MI 01:2005 (H) *műszaki irányelv* szerint *többek között* az alábbi vizsgálatokkal szükséges meghatározni:

- építőanyag-fajták szerinti összetételét, idegen anyag tartalmát – szemrevételezéssel
- testsűrűséget (MSZ EN 1097-6:2022)
- vízfelvételt (MSZ EN 1097-6:2022)
- szemnagyság és szemmegoszlás (MSZ EN 933-1:2012)
- finomsági modulusát (MSZ 4798:2016)
- közetfizikai tulajdonságait (BV-MI 01:2005 (H) 3. táblázat)

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

- felhasználás előtt a rövid idejű mértékadó vízfelvételét (2.8. szakasz MSZ EN 13055-1:2003 A melléklet)



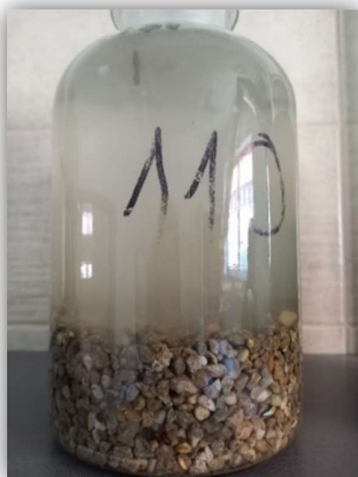
3.5. ábra: Los-Angeles aprózódás vizsgálat [saját fénykép]

Szükség esetén az aprózódási ellenállást az MSZ EN 1097-2:2020 5. fejezete szerinti Los Angeles-aprózódással kell megadni.

A **Los Angeles-vizsgálat** az aprózódási ellenállás meghatározásának referencia vizsgálata. A Los Angeles-aprózódást a tényleges felhasználásnak megfelelően az MSZ EN 1097-2:2020 12. táblázat megfelelő osztályai alapján kell megadni. [Árpás et al (2002)]. Esetemben közel 40 kg 4-es szitán áthullott anyagot választottam szét 10-14 mm közé eső frakcióra és ebből 5002 grammot vizsgáltam a Los-Angeles dobban. [3.5. ábra]

A durva kőanyagalmaz kopási ellenállását (**Mikro-Deval- aprózódás, MDE**) az MSZ EN 1097-1:2012 szerint kell meghatározni. [3.6. ábra]

A tesztnek alávetett anyag az elemek egymáson, a forgó gép hengerén és a golyókon történő súrlódásával fejlődik (koptatóterhelés). Az adalékanyag **vízfelvételét és testsűrűségét** szintén laboratóriumi körülmények között határoztam meg az MSZ EN 1097-6:2022 8. pontja alapján piknométeres módszerrel. [3.6. ábra]



3.6. *ábra: Mikro-Deval aprózódás és piknométeres vizsgálat [saját fénykép]***Második szakasz: Újrahasznosított betonok**

- (2) Beton: 15%-os és 30%-os újrahasznosított (másodlagos) adalékanyag adagolási mennyiségének hatása a frissbeton (konzisztencia, légtartalom, testsűrűség) és a megszilárdult beton (nyomószilárdság, vízzáróság, testsűrűség) tulajdonságokra. Mikroszilika por adagolásának hatása.**

A vizsgálatok második szakaszában Schwelm Zyklus ZK75HE0 típusú függőleges tengelyű kényszerkeverőgépet használtam. Minden esetben a beton keverési időt 1 percre állítottam be ahhoz, hogy homogén keveréket kapjak.

A vizsgált beton jele: **C30/37-XC3-XV2 (H)-16-F4 [3.7. ábra]**

A keverékek frissbeton tulajdonságai közül a konzisztenciát, levegőtartalmat és testsűrűség értékeit és összefüggéseit vizsgáltam az első próbakeverés alkalmával. A víztartalom meghatározását ebben a szakaszban nem végeztem el, mert a bevitt víz mennyisége ismert volt, ugyanis minden anyag légszáraz állapotban került a keverékbe.

Terület mérés az MSZ EN 12350-5:2019 szabvány szerint

Ejtőasztalos területméréssel határoztam meg a konzisztencia osztályokat.

Egy csonkakúpot, aminek alsó átmérője 200 mm, felső átmérője 130 mm, magassága 200 mm, térfogata pedig 4341 cm³, két rétegben, mind két réteget 40*40 mm keresztmetszetű farúddal csömöszölve (10-10-szer) tömörítve. Ezután lehúztam a kúpot, így a csömöszölt beton összeroskadt, majd az ejtőasztal segítségével megfelelő magasságból (4 cm) 15-szöri ejtés után mértem meg az ejtőasztal oldalélével párhuzamosan a területét mm-ben.



3.7. *ábra: REC-6 (30m+D) típusú keverék terület mérése*

Frissbeton testsűrűség MSZ EN 12390-6 és levegőtartalom MSZ EN 12390-7 szabványok szerinti meghatározása

Amennyiben az edény térfogata 8 liter a készülék manométerének skáláján közvetlenül a levegőtartalom leolvasható. A frissbeton testsűrűsége a légtartalom mérő készülék üres és megtöltött állapotában mért tömege, és a készülék ismert térfogata közötti összefüggés alapján került meghatározásra. [3.8. ábra]



3.8. ábra: Frissbeton levegőtartalom mérése [saját fénykép]

Nyomószilárdság vizsgálat MSZ EN 12390-3-2019 szerint

88 db próbatestet készítettem (minden keverékből 1-1 sorozat 7 napos, 28 napos nyomószilárdság és vízzáróság vizsgálatra) az MSZ 12390-2:2019 szabvány leírása alapján [3.9. ábra]



3.9. ábra: Elkészült próbatestek. Próbatestek vízben való tárolása [saját fénykép]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Az elkészült beton próbatesteket vegyes közegben tároltam, mely esetén a próbatestet a betonkeverés másnapján, a kiszaluzás után mészhidrát tartalmú vízbe 7 napos koráig, majd a továbbiakban 28 napos koráig szárazon, laboratóriumi hőmérsékleten ($20\pm 4^\circ\text{C}$) tároltam. [3.9. ábra] A beton osztályozásához az MSZ EN 12390-3:2019 szerint vizsgált 150 mm élhosszúságú kockák 28 napos nyomószilárdságának karakterisztikus (jellemző) értékét ($f_{ck,cube,test}$) kell használni. A terhelést egyenletesen kell növelni $0,6\pm 0,2\text{N/mm}^2/\text{s}$ sebességgel. A törőerőt számítás után $k\text{N}$ dimenzióban kapjuk meg, amiből a nyomószilárdságot a keresztmetszettel történő osztással számítjuk és N/mm^2 -ben határozzuk meg.

Vízzáróság vizsgálata MSZ EN 12390-8:2019 szerint

Abban az esetben, ha a betontól vízzáróságot követelünk meg, akkor a cementtartalom, a víz/cement tényező, a levegőtartalom, és a nyomószilárdsági osztály meg kell, hogy feleljen a szabvány szerinti előírásnak. [3.3. táblázat]

A vízbehatolás megengedett legnagyobb mélysége vízzáró beton esetén MSZ 4798:2016/2M:2018 NAD 5. táblázat alapján:

Környezeti osztály	A vízbehatolás megengedett legnagyobb egyedi mélysége, legalább három próbatest vizsgálatából $\bar{x}$, mm
XV1(H)	50
XV2(H)	35
XV3(H)	20

3.3. táblázat: MSZ 4798:2016/2M:2018 NAD 5. táblázat

A beton vízzáróságát szabvány szerint legalább 28 napos korú, kiszaluzástól végig víz alatt tárolt próbatesten, 75 mm átmérőjű körfelületen 72 órán át ható 5 bar állandó víznyomáson kell vizsgálni. [3.10. ábra]



3.10. ábra: Próbatestek vízzáróság vizsgálat közben és kiértékelés alatt [saját fénykép]

Harmadik szakasz: Konzisztencia eltarthatósággal kapcsolatos összefüggések

(3) Eltarthatóság: 15%-os és 30%-os újrahasznosított (másodlagos) adalékanyag adagolási mennyiségének és a beáztatott adalékanyaggal bevitt víz hatása a frissbeton (konzisztencia, testsűrűség, víztartalom) és a megszilárdult beton (nyomószilárdság, vízzáróság, testsűrűség) tulajdonságokra, kiemelten vizsgálva a beton konzisztencia eltarthatóságát az eltelt idő függvényében.

A konzisztencia eltarthatóság vizsgálatához kevert betonok elkészítéséhez Beckel Eimermischer típusú 8 literes keverőgépet használtam. [3.11. ábra] Gyakorló mérnökként a napi munkám során a szerkezetépítésben lépten-nyomon találkozom frissbeton átadás-átvételével, és az ezzel kapcsolatos helyszíni építéstechnológiai hibákkal, mint például a konzisztencia munkahelyen történő beállítása víz- vagy folyósítószer helytelen adagolásával.



3.11. ábra: Újrahasznosított adalékanyag beáztatása; REC-6 (30m+D) beton keverése

Ezért a kutatás egyik kiemelt témájának tartottam, hogy a gyakorlatban is működő keveréktípusok kerüljenek előállításra. Érdekes ugyanitt megemlíteni a tervezett és tényleges levegőtartalmat, testsűrűséget és víz-cement tényezőt, valamint a szabvány szerint megengedett eltérésének mértékét. Ennél fogva a vizsgálatok az MSZ 4798:2016 7.7. fejezete alapján és a 21. és 22. táblázat [3.4. táblázat] szerinti értékek figyelembevételével is történtek. A második szakasz próbakeverésének tapasztalatain okulva, megállapítható, hogy a kiszáritott állapotban a keverékhez adagolt zúzott beton a vízzel való érintkezést követően rövid időn belül olyan mértékben vonja el a keverővizet, hogy az nagyban befolyásolta a konzisztenciát. Kihasználva az adalékanyag rövid idejű mértékadó vízfelvételét, az újrahasznosított adalékanyagot keverés előtt 5 percre vízbe áztattam. Ezáltal többlet víz került be a keverékbe. [3.11. ábra] A 8 keverék mindegyikénél ellenőriztem a konzisztenciát 5, 30, 60 és 90 perces korában is, amennyiben még mérhető volt. A tervezett induló konzisztenciát 540 mm-ben határoztam meg.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Tömegállandóságig történő szárításos vizsgálati módszerrel ellenőrző mérést végeztem a frissbetonok víztartalmára vonatkozóan. Testsűrűséget a próbatest tömegéből számítottam vissza tájékoztató jelleggel. [3.12. ábra] Nyomószilárdsági, vízzárósági vizsgálatokat az MSZ EN 12390-3:2019 és az MSZ EN 12390-8:2019 szerint.

Tulajdonság	Vizsgálati vagy meghatározási módszer	A minták vagy a meghatározások legkisebb száma	Az egyedi vizsgálati eredmények megengedett legnagyobb eltérése ^{a)} a határértékektől vagy az előírt konzisztenciaosztály határaitól az átadás helyén	
			Alsó határ	Felső határ
Terület	MSZ EN 12350-5		-10 mm -20 mm ^{b)}	+10 mm +20 mm ^{b)}
Légbuborékképző adalékszer nem tartalmazó, szokványos friss beton levegőtartalma	Számítással az 5.4.3. szakasz szerint	Gyakoriság, amint a 17. táblázat megadja a nyomószilárdságra	–	+ 1,5 térfogatszázalék eltérés az F1 és a NAD F1. táblázat szerinti határértéktől
A friss beton testsűrűsége	MSZ EN 12350-6	A 17. táblázatban a nyomószilárdságra megadottak szerint	Lásd a 24. táblázatot	-1,5% Nincs határérték ^{a)}
A legnagyobb víz/cement tényező vagy a legnagyobb víz/(cement+kiegészítő anyag) tényező ^{b)} vagy a legnagyobb víz/(cement+k*kiegészítő anyag) tényező ^{b)}	Lásd az 5.4.2. szakaszt.	1 meghatározás naponta	Lásd a 24. táblázatot	Nincs határérték ^{a)} +0,02

3.12. táblázat: MSZ 4798:2016 21. és 22. táblázat részletek



3.13. ábra: Tömegállandóságig szárítás. Próbatest nyomószilárdság vizsgálat közben [saját fénykép]

4. Eredmények és értékelések

Első szakasz adalékanyag vizsgálati eredményei:

A zúzott adalékanyagot különböző laboratóriumi vizsgálatnak vetettem alá, melyek eredményei alapján az MSZ 4798:2016 és a „Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával” című BV-MI 01:2005 (H) számú **fib** műszaki irányelve szerint is igyekeztem legpontosabb módon osztályba sorolni.

A **Los-Angeles** együttható a vizsgálat alapján $LA=(5000-m)/50$ alapján 39-re adódott. [4.1. ábra]

	mért mennyiség (g)	Los Angeles-aprózódás (tömegszázalék)	Osztály LA
a vizsgálati minta tömege (5000 ± 5 g)	5002	≤ 15	LA ₁₅
az 1,6 mm-es szitán fennmaradt anyag tömege (m)	3053	≤ 20	LA ₂₀
		≤ 25	LA ₂₅
		≤ 30	LA ₃₀
		≤ 35	LA ₃₅
		≤ 40	LA ₄₀
		≤ 50	LA ₅₀
Los Angeles együttható $LA = (5000-m)/50$	39	> 50	LA _{megadott}
		Nincs követelmény	LA _{NR}

4.1. ábra: Mérési eredmény kőanyaghalmoz aprózódással szembeni ellenállása (Los Angeles)
MSZ EN 1097-2:2020 szabvány 5. szakasz (saját vizsgálat)

4.2. ábra: Los-Angeles aprózódási ellenállás értéke (MSZ EN 1097-2:2020)

Eszerint **LA₄₀** az újrahasznosított adalékanyag aprózódási ellenállásának besorolása MSZ EN 1097-2:2020 és 12620:2006 szerint. [4.2. ábra]

MSZ 4798:2016 NAD E2. előíró táblázata szerint az újrahasznosított adalékanyagok és a zúzott kavicsbeton adalékanyagok frakcióira vonatkozó követelmények jóval szigorúbbak, mint az osztályozott adalékanyagra vonatkozók. Ami javarészt lekorlátozza a szabvány szerinti használhatóságot.

Fenti vizsgálati érték alapján –ha a szabvány és ajánlás szerinti szigorú követelményeket veszem alapul, az általam alkalmazott szilárdsági és környezeti osztályok szerinti beton nem állítható el.

MSZ 4798:2016 NAD E2. alapján XC3 LA₂₅ aprózódási ellenállás alatt nem készíthető, vízzáró XV2(H) kitéti osztály szabvány szerint egyáltalán nem készíthető újrahasznosított adalékanyaggal.

Mikro-Deval- aprózódás (MDE) az MSZ EN 1097-1:2012 szerint kell meghatározni. A mikro-Deval vizsgálat eredménye a következőre adódott. [17. sz. melléklet][4.3. ábra]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Átlag M_{DE} 27, ami a táblázat szerint M_{DE30} -nak feleltethető meg szabvány alapján. MSZ 4798:2016 NAD E2 szerint kopásállóság alapján XC3 M_{DE20} alatt nem készíthető, XV2 (H)-ra nincs ajánlás. [4.3. és 4.4. ábra][4.5. ábra]

	Mért mennyiség (g)	
	I.	II.
A dobba bemért anyagmennyiség (500 ± 5 g)	501	500
Az 1,6 mm-es szitán fennmaradt és kiszáritott anyag tömege (110 ± 5 C°-on) (m_s)	350	380
mikro-Deval aprózódási érték $M_{DEn} = (500 - m_s) / 5$	30,0	24,0
Átlag M_{DE}	27	

Mikro-Deval-aprózódás	Osztály M_{DE}
≤ 10	M_{DE10}
≤ 15	M_{DE15}
≤ 20	M_{DE20}
≤ 25	M_{DE25}
≤ 35	M_{DE35}
> 35	M_{DE} megadott
Nincs követelmény	$M_{DE} NR$

4.3. ábra: Mérési eredmény kőanyagalmaz kopással szembeni ellenállása (mikro-Deval) MSZ EN 1097-1:2012 (saját vizsgálat)

4.4. ábra: Mikro-Deval vizsgálat eredménye és besorolása (MSZ EN 1097-1:2012)

NAD E2. táblázat: Zúzottkő, zúzottkavics és újrahasznosított adalékanyagok, valamint visszanyert tört adalékanyagok, továbbá zúzottbetonból, zúzottkavicsbetonból visszanyert mosott és osztályozott adalékanyagok frakcióira vonatkozó kiegészítő követelmények

Tulajdonság és a vizsgálati szabvány azonosító jelzete	Környezeti osztály											
	XN(H)	X0b(H)	X0v(H)	XC1	XC2 XC3 XC4	XD1 XS1	XD2 XD3 XS2 XS3	XF1	XF2 ^{*)}	XF2(H)	XF3 ^{*)}	XF3(H)
	Követelmény											
A szemhalmaz testsűrűsége, MSZ EN 1097-6	Megadott érték ± 1,5%											
Szemmegoszlás D ≤ 4 mm, MSZ EN 933-1	Gr85 az MSZ EN 12620:2002+A1:2008 C1. táblázata szerinti tűrésekkel											
Szemmegoszlás, D/d ≤ 2 és 4 < D ≤ 11,2 mm, MSZ EN 933-1	Gc80/20					Gc85/20						
Szemmegoszlás, D/d > 2 és D > 11,2 mm, MSZ EN 933-1	Gc90/15											
Szemmegoszlás, D ≤ 45 mm és d = 0 mm ^{*)} , MSZ EN 933-1	Ga85					Ga90						
Szemalak (szemalaktényező), > 4 mm ^{*)} , MSZ EN 933-3	F150					F155						
Kagylóhéjtartalom, MSZ EN 933-7	-					SC10						
Finomszem-tartalom a finom frakcióban (D ≤ 4 mm), MSZ EN 933-1	f15					f10		f3				
Finomszem-tartalom a durva frakcióban (D/d > 2 és D > 4 mm), MSZ EN 933-1	-					f4		f1,5				
Finomszem-tartalom a kevert adalékanyag-frakcióban (D ≤ 45 mm és d = 0), MSZ EN 933-1	-					f11		f3				
Los Angeles-aprózódási ellenállás ^{*)} , MSZ EN 1097-2	LA50	LA40	LA35	LA30	LA25				LA20			
Mikro-Deval-féle kopásállóság ^{*)} , MSZ EN 1097-1	Moe35		Moe30	Moe25	Moe20				Moe15			
Csiszolóadási ellenállás, MSZ EN 1097-8	-											
Kopási ellenállás, MSZ EN 1097-8	-											
Magnézium-szulfátos kristályosítás, > 4 mm, tömegszázalék ^{*)} , MSZ EN 1367-2	-					≤ 15,0	≤ 10,0	MS18	≤ 15,0		≤ 15,0	
Fagyállóság, > 4 mm ^{*)} , 28 ciklus után megengedett veszteség, tömegszázalék, MSZ EN 1367-1, MSZ EN 1367-6	-								7 ^{*)}	6 ^{*)}	6 ^{*)}	
Vízfelvétel, > 4 mm, tömegszázalék, MSZ EN 1097-6	-					Ha a vízfelvétel ≤ 1,0 tömegszázalék, akkor a magnézium-szulfátos kristályosítás, valamint a fagy-, illetve fagy- és olvasztó-állóság vizsgálat elhagyható						

4.5. ábra: MSZ 4798:2016 NAD E2. táblázat

A BV-MI 01:2005 (H) műszaki irányelv 3. táblázata alapján a beton hulladékok **kőzetfizikai csoportba** sorolhatóak az alábbiak szerint:

Az aprózódás és kopásállóság vizsgálat értékei alapján **Kfü-D1^{d/D}** kőzetfizikai csoportba sorolható. [4.6. ábra]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Tulajdonság és vizsgálati módszer	A vizsgálható szemmagyságtartomány ϕ mm	Közetfizikai csoportok alternatív-vizsgálatok esetén						
		$K_{fi}-0^{dD}$	$K_{fi}-A^{dD}$	$K_{fi}-B^{dD}$	$K_{fi}-C^{dD}$		$K_{fi}-D^{dD}$	
					$K_{fi}-C1^{dD}$	$K_{fi}-C2^{dD}$	$K_{fi}-D1^{dD}$	$K_{fi}-D2^{dD}$
Los Angeles aprózódás, M% MSZ 18287-1	3-80	$a_{LA15}^{d_1-d_2} \leq 15$	$15 < a_{LA20}^{d_1-d_2} \leq 20$	$20 < a_{LA25}^{d_1-d_2} \leq 25$	$25 < a_{LA30}^{d_1-d_2} \leq 30$	$30 < a_{LA35}^{d_1-d_2} \leq 35$	$35 < a_{LA40}^{d_1-d_2} \leq 40$	$40 < a_{LA45}^{d_1-d_2} \leq 45$
Mikro-Deval aprózódás, vizes eljárás, M% MSZ 18287-6	3-20	$a_{MD10}^{d_1-d_2} \leq 10$	$10 < a_{MD15}^{d_1-d_2} \leq 15$	$15 < a_{MD20}^{d_1-d_2} \leq 20$	$20 < a_{MD25}^{d_1-d_2} \leq 25$	$20 < a_{MD25}^{d_1-d_2} \leq 25$	$25 < a_{MD30}^{d_1-d_2} \leq 30$	$25 < a_{MD30}^{d_1-d_2} \leq 30$
Kristályosítási veszteség $MgSO_4$ oldatban, M% MSZ 18289-3	2-80	$a_{Mg5}^{d_1-d_2} \leq 5$	$5 < a_{Mg10}^{d_1-d_2} \leq 10$	$10 < a_{Mg15}^{d_1-d_2} \leq 15$	$15 < a_{Mg18}^{d_1-d_2} \leq 18$	$18 < a_{Mg21}^{d_1-d_2} \leq 21$	$21 < a_{Mg25}^{d_1-d_2} \leq 25$	$25 < a_{Mg30}^{d_1-d_2} \leq 30$

4.6. ábra: BV-MI 01:2005 (H) műszaki irányelv 3. táblázat

A **látszólagos testsűrűség** (ρ_a) és a **vízfelvétel** értékére a bemerítés után 24 órával (WA_{24}) a következő eredmény adódik: [14. sz. melléklet]/[4.7. ábra]

vizsgált paraméter	vizsgálati eredmény
ρ_a	2,594 Mg/m ³
WA_{24}	5,1%

4.7. ábra: Adalékanyag látszólagos testsűrűség (ρ_a) és vízfelvételének meghatározása az MSZ EN 1097-6:2013 szabvány szerint (saját vizsgálat)

A közönséges beton nyomószilárdsági osztálya víz alatti tárolás esetén, az MSZ 4798-1 szerint $f_{ck,cyl}/f_{ck,cube}$	A bontási és építési beton és beton/tégla vegyes hulladék adalékanyag megengedett tömegaránya a teljes adalékanyagban, tömeg%						
	A bontási és építési beton és beton/tégla vegyes hulladék adalékanyag mértékadó közetfizikai csoportja (lásd a 2.12. szakaszt)						
	$K_{fi}-0$	$K_{fi}-A$	$K_{fi}-B$	$K_{fi}-C1$	$K_{fi}-C2$	$K_{fi}-D1$	$K_{fi}-D2$
C8/10	100	100	100	100	100	100	100
C12/15	100	100	100	100	100	100	70
C16/20	100	100	100	100	100	70	30
C20/25	100	100	100	100	70	30	×
C25/30	100	100	100	70	30	×	×
C30/37	100	100	70	30	×	×	×
C35/45	100	70	30	×	×	×	×
C40/50	70	30	×	×	×	×	×
C45/55	30	×	×	×	×	×	×
C50/60	×	×	×	×	×	×	×
Jelmagyarázat: × Bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék alkalmazása nem ajánlott							

4.8. ábra: A bontási és építési beton hulladék, és esetleg beton/tégla vegyes hulladék adalékanyag megengedett részaránya a teljes adalékanyagban [BV-MI 01:2005 (H) műszaki irányelv 4. táblázat.]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

4.8. táblázat alapján **Kfü-D1^{d/D}** a kutatási alapanyagként szolgáló zúzott beton nem alkalmas C 20/25-nél magasabb szilárdsági osztályú betonhoz.

Fenti eredmények alapján akár véget is érhetett volna ennél a pontnál a kutatásom.

Azonban élve az MSZ 4798:2016 5.3 (1) pontjával, miszerint a környezeti hatásoknak ellenálló betonok összetételére vonatkozó követelményeket vagy a betonösszetétel határértékeivel és a megállapított betontulajdonságokkal adhatjuk meg vagy a követelményeket a tulajdonságokkal (teljesítménnyel) kapcsolatos módszerekből szabad levezetni. A szabvány MSZ 4798:2016 NAD E2 táblázata [4.5. ábra] megengedi az adalékanyag frakciókra vonatkozó kiegészítő követelményektől való eltérést nyomószilárdság esetében, ha a beton vizsgálatával igazolható a környezeti osztálynak való megfelelés. Erre a szabvány XV (H) osztály tekintetében nem tér ki.

Ezek alapján szándékom mind a szilárdsági, mind a környezeti osztályokhoz tartozó követelményeket a tartósságot meghatározó tulajdonságokkal (teljesítménnyel) kapcsolatos módszereket alkalmazva igazolni: Nyomószilárdság vizsgálat (7 napos és 28 napos korban) és vízzárósági vizsgálat.

MSZ 4798:2016 E2. táblázata szerint a felhasznált újrahasznosított adalékanyag **A típus**ba sorolható, ez alapján XC3 osztálynál előírás szerint a teljes mennyiségű durva adalékanyag 30%-a helyettesíthető újrahasznosított adalékanyagra a durva frakciók tömegszázalékára vonatkoztatva. XV2 (H) esetén az szabványos érték 0%. [MSZ 4798:2016 E2. táblázata]

Az újrahasznosított adalékanyag típusa	Környezeti osztály			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Minden más környezeti osztály ^{a)}
A típus: (RC _{en} , RC _{us} , Rb _{en} , R _{ak} , FL _s , XR _{ak})	50%	30%	30%	0%
B típus ^{b)} : (RC _{en} , RC _{us} , Rb _{en} , R _{ak} , FL _s , XR _{ak})	50%	20%	0%	0%

^{a)} Ismert eredetű, újrahasznosított A típusú adalékanyag használható azokban a környezeti osztályokban, amelyekre az eredeti betont tervezték, legfeljebb 30%-os helyettesítéssel. Az XF2, XF3 és XF4 környezeti osztályok esetén az 5.5.5. szakasz (13) bekezdését, az XF1, XF2(H), XF3(H) és XF4(H) környezeti osztályok esetén az 5.5.5. szakasz (14), (15) és (16) bekezdését célszerű figyelembe venni.

^{b)} Újrahasznosított B típusú adalékanyagot nem ajánlatos felhasználni olyan betonban, amelynek nyomószilárdsági osztálya > C30/37.

4.9. ábra: MSZ 4798:2016 E2. táblázat: A durva adalékanyag újrahasznosított, illetve visszanyert adalékanyaggal való helyettesítésének legnagyobb százalékos értékei

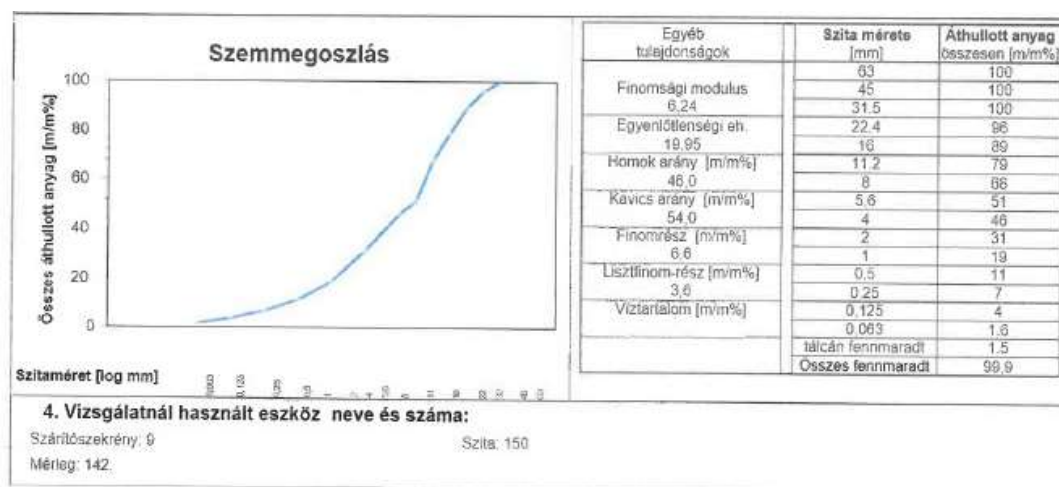
Szitagörbe, szemmegoszlás meghatározása MSZ EN 933-1:2012 szerint

A különböző szitákon fennmaradt szemek tömegét az anyag kiindulási tömegére kell vonatkoztatni. Az egyes szitákon áthullott összesített mennyiséget szemmegoszlási görbén és táblázatosan ábrázoltam.

Összehasonlítás fontossága miatt az első képen 8/16 frakciójú természetes adalékanyag szemeloszlási görbéje, a második képen pedig 8/16 frakciójú újrahasznosított adalékanyag szemeloszlási görbéje látható.[11.-13. sz. melléklet]

A szitagörbéről jól leolvasható, hogy a 4/8-as frakciók legnagyobb része 4 mm körüli, a 8/16 frakciónak 10 mm-es az átlagos szemnagysága. Ehhez mértem igyekeztem pótolni a hiányzó frakciókat és választottam kavicsvázat a tervezett keverékekhez.

Végeztem mérést arra vonatkozóan, hogy az osztályozatlan anyagból milyen arányban nyerhető ki a szabvány szerint is felhasználható frakció. Az alábbi táblázat és szitagörbe ennek eredményét szemlélteti.[4.10. ábra][18. sz. melléklet]



4.10. ábra: Adalékanyag 0/32 szitagörbéje [saját vizsgálat]

Ebből arra a következtetésre juthatunk, hogy az általam használt adalékanyag kb. 40%-a volt hasznosítható a tömegére vetítve. Tehát túlzás nélkül kijelenthető, hogy a 32 mm-es szitán átrostált anyagból közel a fele volt hasznosítható adalékanyagként a próbakeverésekbe. A próbakeverések alkalmával cca. 250 kg újrahasznosított adalékanyag került felhasználásra. Ehhez közel 1 tonna anyagot volt szükséges megmozgatni a 32 mm-es kézi rostán. Mivel az adalékanyag állandó tömegűre szárítása előtt indokoltá vált a zúzalék átmosása, és gépi szitálása is az adalékanyag felhasználható mennyisége durván lefeleződött a folyamat során.

Második szakasz vizsgálati eredményei:

A vizsgált beton jele: **C30/37-XC3-XV2 (H)-16-F4**

A 3.1.5. Újrahasznosított adalékanyagú beton fejezetben részleteztem a kutatás 2.

szakaszában használt keverékek betonösszetételét, és készítésük módját.

A keverékek frissbeton tulajdonságai közül a konzisztenciát, levegőtartalmat és testsűrűség értékeit és összefüggéseit vizsgáltam az első próbakeverés alkalmával. A víztartalom meghatározását ebben a szakaszban nem végeztem el, mert a bevitt víz mennyisége ismert volt, ugyanis minden anyag légszáraz állapotban került a keverékbe.

Terülés mérés az MSZ EN 12350-5:2019 szabvány szerint

Recept neve [Keverék]	Próbatest jele	Beton jele	Konzisztencia [T;mm] [R,mm]	Frissbeton Levegő [térf. %]	Frissbeton testsűrűség [kg/m ³]	Tervezett testsűrűség [kg/m ³]
MIX REF-1	1	C30/37-XC3-XV2(H)-16-F3	500/500	1,4	2335	2383
	2					
	3					
MIX REF-2 (+D)	1	C30/37-XC3-XV2(H)-16-F3	520/520	1,1	2393	2381
	2					
	3					
MIX REC-1 (15)	1	C30/37-XC3-XV2(H)-16-F3	510/520	1,1	2351	2377
	2					
	3					
MIX REC-2 (30)	1	C30/37-XC3-XV2(H)-16-F3	500/510	1,2	2347	2375
	2					
	3					
MIX REC-3 (15m)	1	C30/37-XC3-XV2(H)-16-F3	650+	1,1	2316	2365
	2					
	3					
MIX REC-4 (30m)	1	C30/37-XC3-XV2(H)-16-F3	650+	0,9	2324	2360
	2					
	3					
MIX REC-5 (15m+D)	1	C30/37-XC3-XV2(H)-16-F3	530/540	1,4	2335	2362
	2					
	3					
MIX REC-6 (30m+D)	1	C30/37-XC3-XV2(H)-16-F3	530/550	1,6	2334	2358
	2					
	3					

Recept neve [Keverék]	Induló konzisztencia [T;mm] [R,mm] 5 perces korban	Területi osztály (5 perces korban) MSZ EN 12350- 5:2000 szerint meghatározva
MIX REF-1	500/500	F4
MIX REF-2 (+D)	520/520	F4
MIX REC-1 (15)	510/520	F4
MIX REC-2 (30)	500/510	F4
MIX REC-3 (15m)	650+	F6
MIX REC-4 (30m)	650+	F6
MIX REC-5 (15m+D)	530/540	F4
MIX REC-6 (30m+D)	530/540	F4

4.13.ábra: 1. próbakeverés terület, légtartalom és testsűrűség értékei [saját vizsgálat]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

A REF-1 és REF-2 (+D) hagyományos osztályozott kavicsvázsal készült referencia betonok esetén a keverék teljesítette az elvárt értékeket. A konzisztencia 500/520 mm-es értékre adódott 5 perces korban, mely elfogadható induló érték F4 konzisztencia osztály esetén. Jelentősebb eltérést [4.13. ábra] a REC-3 és REC-4 receptek „m” jelű módosított változatainál állapítottam meg.

Az alap újrahasznosított keverékek eltarthatósága messze elmaradt a referencia keverékekétől, gyakorlatilag 15 perc után a beton bedolgozhatatlanná vált a porózus zúzalék vízfelvétele miatt. Ezen megfontolás alapján REC-1 és REC-2 receptúrákon módosítani volt szükséges az adalékszerek konstans szinten tartása mellett.

A bevitt többlet keverővíz eredménye, hogy az induló konzisztencia értékelhetetlen lett, a kiszáritott zúzott beton a keverési idő alatt nem vette fel a vizet, ami a táblázatban látható területi értékeket eredményezte. Viszont 20 perc után a beton bedolgozhatatlanná vált, teljesen összeesett. Tehát megállapítható, hogy az eltarthatóságot az emelt keverővíz mennyisége nem javítja, amennyiben az újrahasznosított adalékanyag kiszáritott állapotban kerül a keverékbe. Feltételezhető, hogy az adalékanyag az első 10-15 percben veszi fel a keverővíz nagy részét, ez eredményezi a gyors konzisztencia esést.

Frissbeton testsűrűség MSZ EN 12390-6:2019 és levegőtartalom MSZ EN 12390-7:2019 szabványok szerinti meghatározása

Recept neve [Keverék]	Levegő [térf. %]	Testsűrűség [kg/m ³]
MIX REF-1	1,4	2335
MIX REF-2 (+D)	1,1	2393
MIX REC-1 (15)	1,1	2351
MIX REC-2 (30)	1,2	2347
MIX REC-3 (15m)	1,1	2316
MIX REC-4 (30m)	0,9	2324
MIX REC-5 (15m+D)	1,4	2335
MIX REC-6 (30m+D)	1,6	2334

4.14. ábra: 1. próbakeverés levegő és testsűrűség értékei [saját vizsgálat]

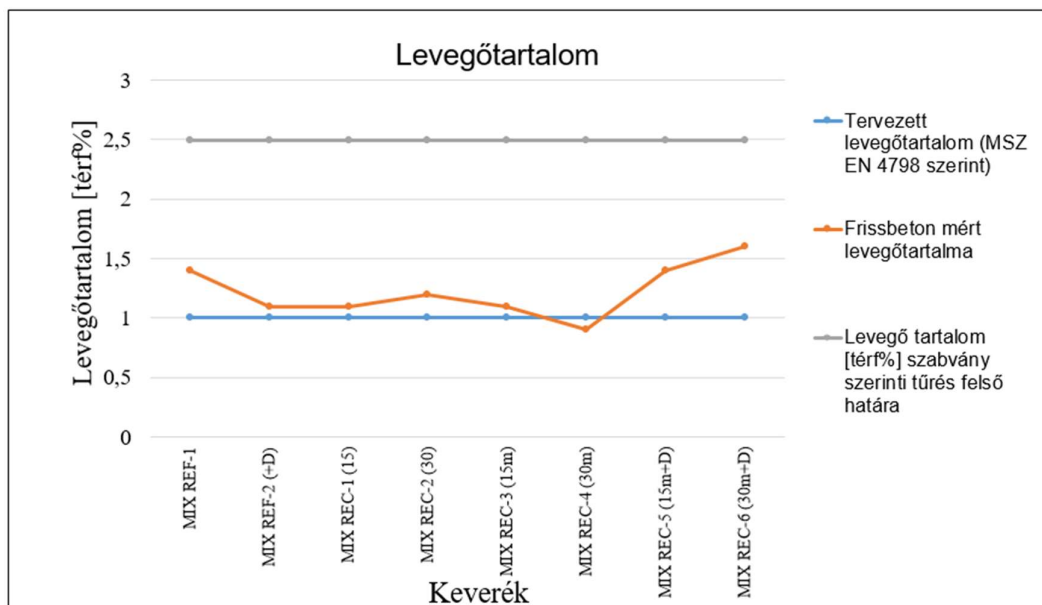
Alábbi 4.15. sz. diagram a levegőtartalmat hivatott szemléltetni. Kimutatható, hogy a készített frissbeton keverékek mért levegőtartalma a tervezetthez képest magasabbak, ugyanakkor a szabvány által megengedett felső határértéket nem lépik túl.

MSZ 4798:2016 NAD F2 táblázat alapján a légbuborékképző adalékszer nélkül készített friss beton tervezett levegőtartalma F4 konzisztencia osztály és C30/37 nyomószilárdság esetén nem haladhatja meg az 1,0 V%-ot, ezért a keverékek 1,0 %-os levegővel kerültek megtervezésre.

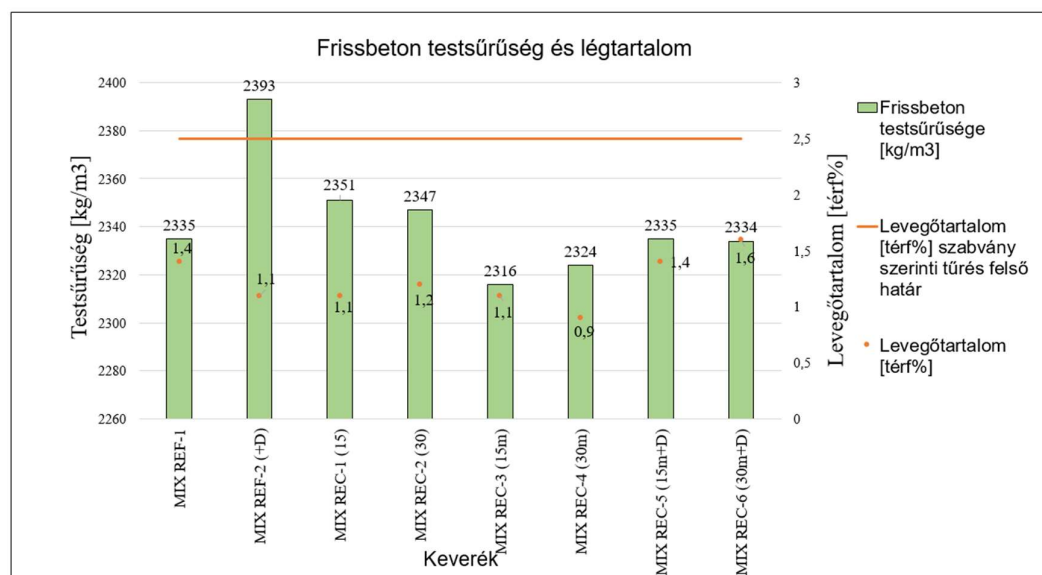
[4.16. ábra]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Ugyanakkor a 21. és 22. táblázatok alapján az átadás-átvételkor a felső határ +1,5 % - al magasabb is lehet, mely minden esetben teljesül a készített keverékek között.



4.15. ábra: Keverékek levegőtartalma [saját vizsgálat alapján]



4.16. ábra: Frissbeton keverékek testsűrűsége és levegőtartalma közötti összefüggés [saját vizsgálat alapján]

Igazolhatóak a szakirodalmi tapasztalatok, miszerint a nyomószilárdság és testsűrűség összefüggése, hogy a testsűrűség növekedésének általában vonzata a nyomószilárdság növekedés, miközben a trendvonal körüli ingadozások jelentősek. Az alábbi táblázat a különböző keverékek próbatestjeinek adatai tartalmazza 7 és 28 napos korban. [4.17.-4.18.-4.19. ábra]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

	7 nap								
Recept neve [Keverék]	Szilárd próbatest jellemzői				Törőteher [kN]	Testsűrűség [kg/m ³]	Egyedi szilárdság [N/mm ²]	Átlag szilárdság [N/mm ²]	Átlag testsűrűség [kg/m ³]
	Hosszúság	Szélesség	Magasság	Tömeg					
MIX REF-1	150,1	149,7	150,1	8037,0	765,3	2382,9	34,1	34,0	2375,8
	150,7	149,8	150,0	8060,0	768,2	2380,2	34,0		
	150,5	150,1	151,1	8070,0	763,3	2364,2	33,8		
MIX REF-2 (+D)	151,6	150,1	150,0	8002,0	882,3	2344,4	38,8	38,8	2347,2
	151,8	149,9	149,8	7995,0	874,4	2345,5	38,4		
	151,2	150,1	150,1	8011,0	887,8	2351,7	39,1		
MIX REC-1 (15)	151,5	149,7	150,2	8102,0	720,5	2378,4	31,8	32,7	2374,9
	151,1	150,1	150,0	8063,0	758,5	2370,1	33,4		
	151,0	149,9	149,8	8057,0	745,7	2376,2	32,9		
MIX REC-2 (30)	152,7	149,8	150,2	8117	843,4	2362,5	36,9	37,1	2362,3
	151	149,9	149,9	8021	861,0	2364,0	38,0		
	152,5	150,0	150,2	8110	831,6	2360,4	36,4		
MIX REC-3 (15m)	150,1	149,8	149,8	7977	744,2	2368,3	33,1	33,2	2373,4
	150,4	149,8	149,9	8034	736,9	2378,9	32,7		
	150,9	149,8	149,8	8036	765,2	2373,2	33,9		
MIX REC-4 (30m)	151,2	150,1	149,9	8009	786,1	2354,2	34,6	34,6	2357,8
	149,5	149,7	149,9	7938	786,5	2366,2	35,1		
	149,3	149,9	150,4	7920	762,5	2353,0	34,1		
MIX REC-5 (15m+D)	151,1	150,4	150,0	7936	788,4	2328,1	34,7	34,2	2329,7
	151,8	149,8	150,0	7943	769,4	2328,7	33,8		
	151,9	150,2	150,1	7987	777,8	2332,3	34,1		
MIX REC-6 (30m+D)	151,4	150,1	150,1	7907	832,6	2318,1	36,6	37,0	2328,1
	151,3	149,9	150,1	7922	823,4	2327,1	36,3		
	150,1	149,7	150,1	7889	854,5	2339,0	38,0		

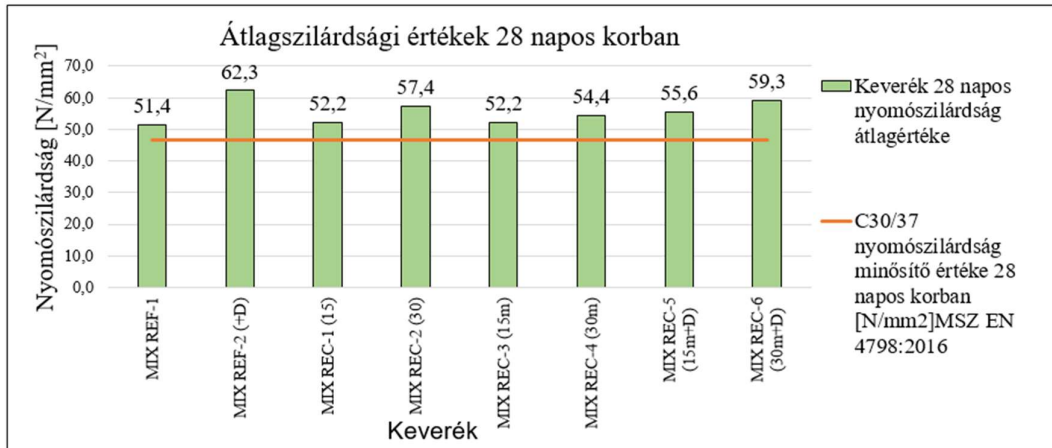
4.17.ábra: Próbatetek nyomószilárdság vizsgálatának eredményei 7 napos korban.

Megszilárdult beton testsűrűség értékei [saját vizsgálat]

	28 nap								
Recept neve [Keverék]	Szilárd próbatest jellemzői				Törőteher [kN]	Testsűrűség [kg/m³]	Egyedi szilárdság [N/mm²]	Átlag szilárdság [N/mm²]	Átlag testsűrűség [kg/m³]
	Hosszúság	Szélesség	Magasság	Tömeg					
MIX REF-1	149,6	149,9	150,1	7872,0	1165,0	2338,7	52,0	51,4	2339,7
	150,8	150,6	150,0	7963,0	1168,0	2337,5	51,4		
	151,0	150,0	150,2	7971,0	1149,0	2343,0	50,7		
MIX REF-2 (+D)	150,1	150,0	150,0	7891,0	1452,0	2336,5	64,5	62,3	2327,1
	151,2	150,1	150,3	7906,0	1385,0	2317,7	61,0		
	150,7	149,8	150,0	7880,0	1384,0	2327,1	61,3		
MIX REC-1 (15)	150,8	149,7	149,9	7970,0	1172,0	2355,2	51,9	52,2	2353,5
	150,7	149,8	150,0	7981,0	1193,0	2356,9	52,8		
	151,6	149,9	149,8	7994,0	1178,0	2348,3	51,8		
MIX REC-2 (30)	151,9	149,9	149,9	7997	1271,0	2343,0	55,8	57,4	2345,7
	150,1	150,2	149,9	7941	1315,0	2349,8	58,3		
	150,9	150,1	150	7965	1316,0	2344,4	58,1		
MIX REC-3 (15m)	150,9	149,9	149,9	7939	1197	2341,4	52,9	52,2	2338,8
	149,8	150,1	150,1	7892	1187	2338,4	52,8		
	150,5	149,8	149,9	7897	1145	2336,7	50,8		
MIX REC-4 (30m)	149,9	149,9	150	7876	1210	2336,7	53,8	54,4	2337,1
	150,1	149,7	149,9	7884	1237	2340,7	55,1		
	150,3	150,1	150,1	7903	1222	2333,8	54,2		
MIX REC-5 (15m+D)	152,0	149,6	149,6	7936	1252	2332,9	55,1	55,6	2330,4
	151,6	149,7	149,6	7943	1255	2339,5	55,3		
	151,7	149,7	149,9	7893	1282	2318,6	56,5		
MIX REC-6 (30m+D)	152,7	149,8	149,8	7959	1343	2322,7	58,7	59,3	2319,8
	150,9	149,9	150	7890	1345	2325,4	59,5		
	152,1	149,7	149,9	7889	1359	2311,4	59,7		

4.18.ábra: Próbatetek nyomószilárdság vizsgálatának eredményei 28 napos korban.

Megszilárdult beton testsűrűség értékei [saját vizsgálat]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

4.19. ábra: 1. próbakeverés: keverékek átlagszilárdsági értékei 28 napos korban [saját vizsgálat alapján]

Megállapítható, hogy nyomószilárdság tekintetében 7 és 28 korban is szilikaporrall kevert referencia beton teljesített a legjobban (REF-2 (+D)). Az újrahasznosított betonok esetén a szilikapor adagolású keverékek utószilárdulása jelentősebb.

Kijelenthető, hogy a kiegészítő anyag (szilikapor) nélkül kevert referenciakeverék (REF-1) nyomószilárdsága a legalacsonyabb a 8 összetétel közül, tehát az újrahasznosított adalékanyaggal készült betonok mindkét adagolási aránnyal (15 % és 30 %) magasabb átlagszilárdságot értek el 28 napos korukra, mint a hagyományos kavicsvázal készült keverék. Általánosságban megállapítható, hogy a szilikapor és a minél magasabb arányban használt újrahasznosított adalékanyag magasabb nyomószilárdsági osztályú betont eredményez 28 napos korra. Ehhez hozzájárulhat a szilikapor pórusméret csökkentő hatása. A szilikapor töltőanyagként is viselkedik finomsága miatt, ugyanis a nagyobb szemcsék közötti teret tölti ki. Továbbá szakirodalmi adatok alapján ismeretes a cementpép/adalékanyag határfelületi réteg reakciói tekintetében előidézett pozitív hatása. A betonban az adalékanyag szemcsék határfelületén, a cementpépben kialakuló átmeneti zóna jelentős szerepet játszik a cement-adalékanyag közötti kötésben. Szilikapor adagolás hatására a határfelületi átmeneti zóna vastagsága – összehasonlítva a normál portlandcementet tartalmazó mintákkal – csökken, és az ebben a rétegben található kalcium-hidroxid kristályok irányítottsága is változik. Ezért nő a határfelületi kötőerő. [Cembeton útmutató (2017)]

Felmerül a kérdés, hogy az adalékanyag által felvett víz mennyisége hogyan befolyásolja és ezzel megváltoztatja-e az tervezett víz-cement tényező értékét?

Kutatási eredményeim alapján a porózus zúzaléknak magasabb a vízfelvétele, mint a hagyományos osztályozott kavicsnak, ezáltal a keverővízből vonja el a víz mennyiségét, ami kedvezőbb v/c értéket eredményez és ezáltal magasabb nyomószilárdsági osztályt.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Kísérlettel igazoltam, hogy a próbakeverés első célkitűzése sikeresnek mondható, ugyanis a próbatestek 28 napos korukra elérték és meg is haladták a MSZ 4798:2016 szabvány szerinti C30/37-es szilárdsághoz tartozó minősítő értéket, melyet a következő alapján határoztam meg: MSZ 4798:2016 8.2.1.3.2. Az átlageredmények feltételei fejezet (2) kezdeti gyártás A módszer (8.2b)

- ha a beton nyomószilárdsági osztálya <C50/60 és a próbakockákat kizsaluzás után vegyesen tárolták, akkor

$$f_{cm,cube,test,H} > (f_{ck,cube} / 0,92 + 6,5) \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ck,cube} = 37 \text{ N/mm}^2$$

$$37 / 0,92 + 6,5 = 46,7 \text{ N/mm}^2$$

	Átlag szilárdság 28 napos korban [N/mm ²]
MIX REF-1	51,4
MIX REF-2 (+D)	62,3
MIX REC-1 (15)	52,2
MIX REC-2 (30)	57,4
MIX REC-3 (15m)	52,2
MIX REC-4 (30m)	54,4
MIX REC-5 (15m+D)	55,6
MIX REC-6 (30m+D)	59,3

4.20.ábra: Átlag szilárdsági értékek 28 napos korban összefoglaló táblázat [saját mérési eredmények alapján]

A legalacsonyabb szilárdsági értékkel bíró REC-1 és REC-3 (15%-os helyettesítési arányú) keverékek is 12 % -al magasabb értéket hoztak, mint a szabvány szerinti minősítő érték. Ezek az eredmények tulajdoníthatók a szilikapor adagolásnak, továbbá az újrahasznosított betonok esetén az adalékanyag vízfelvételének, mely a hatékony víz-cement tényező értékét kedvezően befolyásolta.

Érdekességgépp a műszaki irányelv alapján is besoroltam szilárdsági eredményeket, mely szigorúbban szabályoz, mint maga a szabvány.

Eszerint beton hulladék esetén a közetfizikai csoportja a betont nagyobb nyomószilárdságúra kell tervezni, mint amennyi az átlagos nyomószilárdság.

Az irányelv bevezette a ζ szorzó-tényező fogalmát, melyet az újrahasznosított adalékanyagú beton nyomószilárdságának tervezési értékének számításához használ fel. Az átlagos nyomószilárdságot a mértékadó közetfizikai csoportja függvényét képező ζ szorzóval szorozza meg. Jelen esetben a Kfü-D1 közetfizikai csoport C20/25-nél magasabb szilárdsági osztályú beton készítését nem ajánlja. Feltételezve, hogy vizsgálattal igazolható a C30/37 szilárdsági osztály, így $\zeta = 1,2$ szorzótényezővel az alábbi tervezési érték adódik:

$$f_{ck,cube,rec} = f_{ck,cube} * \zeta = 37 * 1,2 = 44 \text{ N/mm}^2$$

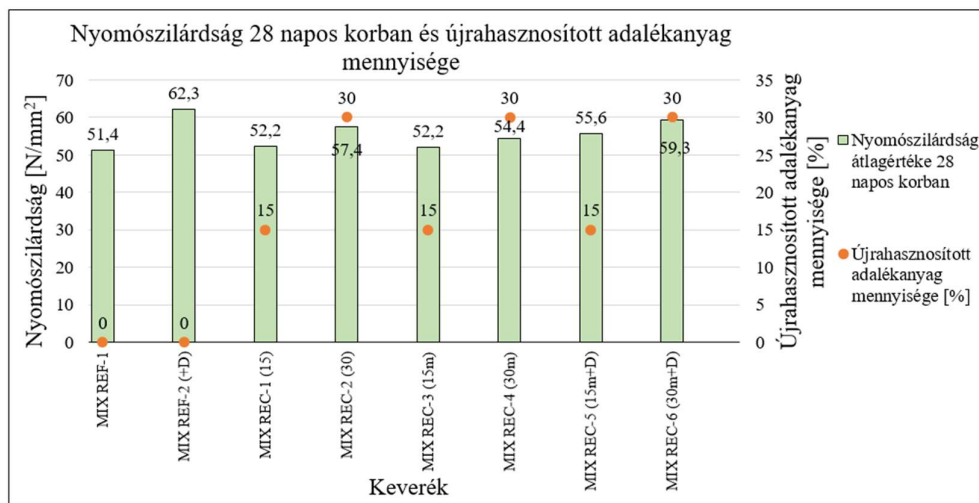
Ebből adódó minősítő érték: **54,3 N/mm²**

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Ezzel az elmélettel a 15%-os alap (REC-1) és módosított (REC-3) keverékeken kívül minden összetétel teljesítette a szigorúbb feltételezést is.

Az ajánlástól kísérleti eredmények alapján el lehet térni, ha a beton nagyobb nyomószilárdsági osztályúnak bizonyul, mint a tervezett nyomószilárdsági osztály.

Az újrahasznosított adalékanyagú betonok közül a 30%-os adalékanyag helyettesítéssel készített betonok (REC-6; REC2) alig 5%-al maradtak alul a referencia betonhoz képest. [4.19. ábra]

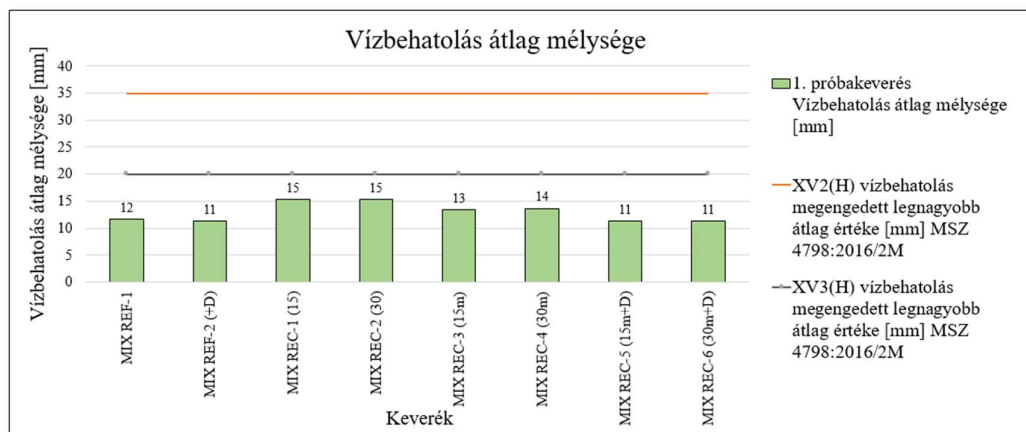


4.21. ábra: 1. próbakeverés: Nyomószilárdság 28 napos korban és újrahasznosított adalékanyag mennyisége közötti összefüggés [saját vizsgálat alapján]

MSZ 4798:2016/2M szerinti vízzárósság

Az előírt környezeti osztály teljesítéséhez vízzáróssági szempontból 2 kritériumnak szükséges megfelelni:

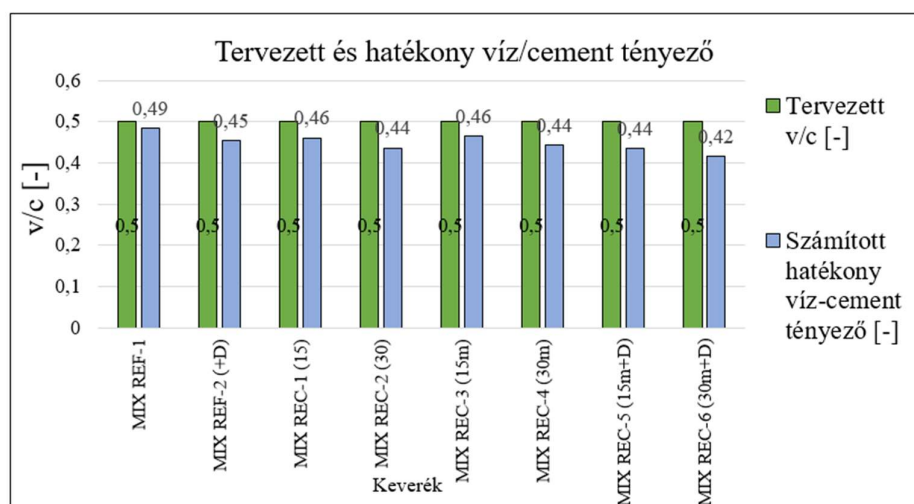
1. Vízbehatolás mélysége: Alábbi diagramon [4.22. ábra] a keverékek vízzáróssági vizsgálat során mért vízbehatolás mélységének átlag értékei szerepelnek. Kísérleti úton megállapítható, hogy a receptúrák kivétel nélkül teljesítik az előírt XV2 (H), sőt az XV3 (H) környezeti osztály előírt értékeit is. A vizsgálatok igazolták, hogy a vízzárósságot fokozó szilikaporrall készült keverékek jobb eredményeket hoztak, mint az anélkül készültek.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

4.22. ábra: 1. próbakeverés: Vízzárósági vizsgálat során mért átlagos vízbehatolási mélység [saját vizsgálat alapján]

2. Víz-cement tényező értéke: A víz-cement tényező értékét két szemszögből közelítettem meg. Az egyik a tervezett, szabvány szerint előírt 0,5 értékű v/c. A másik a hatékony v/c tényező, melynek számított értékeit az alábbi 4.23. ábra szemléltetik. Feltételezem, hogy az adalékanyag a 15. sz. mellékletben vizsgálattal megállapított 5,1%-ban veszi fel a keverővizet, ezzel csökkentve a tervezett v/c értékét.

Recept neve [Keverék]	Tervezett			Hatékony		
	Tervezett víz [l/m ³]	Tervezett cement [kg/m ³]	Tervezett v/c [-]	Adalékanyag által felvett víz [5,1%]	Módosított víz [l/m ³]	V/C [-]
MIX REF-1	170	350	0,5	0,00	170	0,49
MIX REF-2 (+D)	170	375	0,5	0,00	170	0,45
MIX REC-1 (15)	170	350	0,5	8,52	161	0,46
MIX REC-2 (30)	170	350	0,5	17,09	153	0,44
MIX REC-3 (15m)	180	370	0,5	8,01	172	0,46
MIX REC-4 (30m)	180	370	0,5	15,96	164	0,44
MIX REC-5 (15m+D)	180	395	0,5	7,91	172	0,44
MIX REC-6 (30m+D)	180	395	0,5	15,76	164	0,42



4.23. ábra: Tervezett és hatékony v/c tényező számítása és ábrázolása [saját vizsgálat alapján]

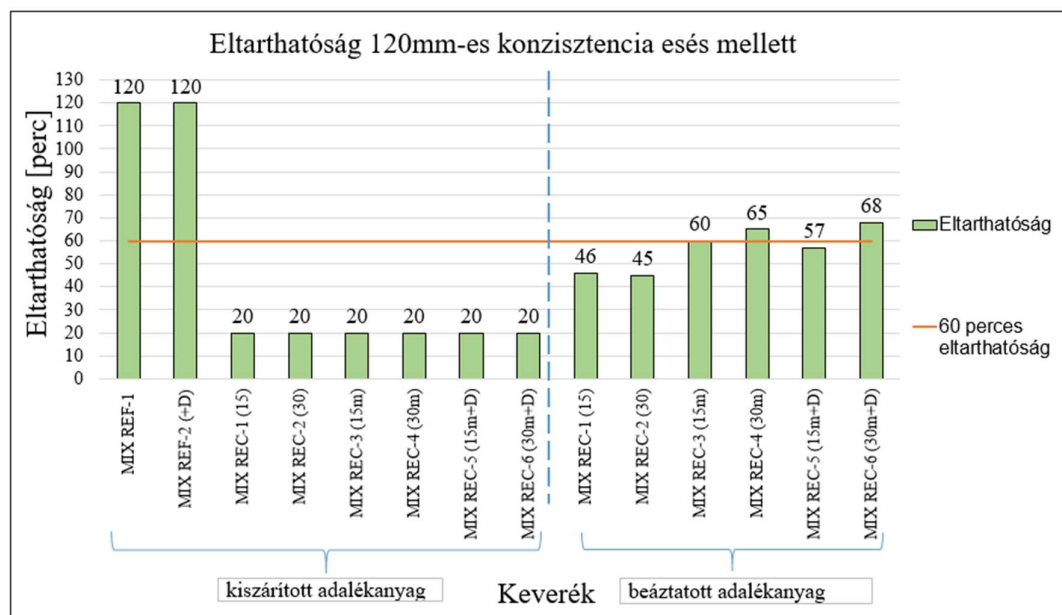
Harmadik szakasz: Konzisztencia eltarthatósággal kapcsolatos összefüggések

A vizsgálatok a következő alapvetések alapján végeztem:

- 8 receptúrán végeztem ellenőrző méréseket 5, 30, 60 és 90 perces korban.
- irányadónak a 90 perces eltarthatóságot vagy 120 mm-es konzisztencia esést tekintettem.
- az adalékszer mennyiségét a keverékekben az 1. próbakeverés eredményei alapján emeltem az újrahasznosított adalékanyag mennyiségét figyelembe véve.

A mért értékek alapján interpolációt végezve ábrázoltam, hogy a 120 mm-es konzisztencia eséshez milyen időtartamok rendelhetők. A diagramról leolvasható, hogy ezek az időpontok, hogyan szórnak a 60 perces eltarthatósághoz képest. [4.24. ábra]

Megállapítható, hogy az alap újrahasznosított adalékanyaggal készült keverékek nem teljesítették a 60 percet. Igazolván a korábbi kijelentést, miszerint az alap keverékterveken (REC-1 és REC-2) történő víz és cement mennyiségének módosítása szükséges, annak ellenére, hogy az adalékanyag beáztatva került a keverékbe.



4.24. ábra: 2. próbakeverés: Eltarthatóság ábrázolása 120 mm-es konzisztencia esés mellett
[saját vizsgálat alapján]

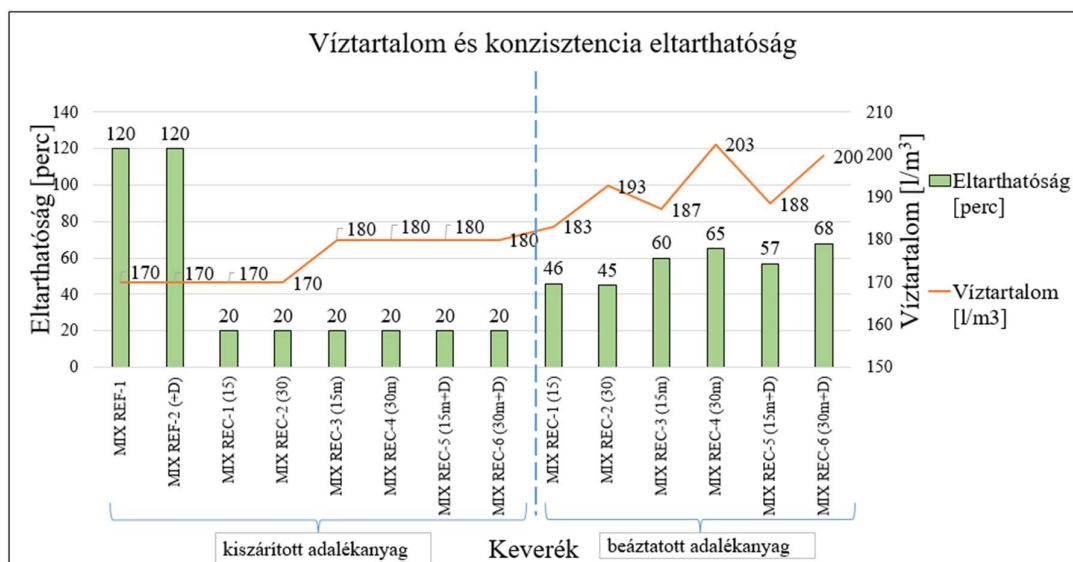
Minden receptúra mozgékonyágát dokumentáltam a vizsgálat során, melyek azonos keverési idővel készültek. Szükséges megemlíteni az „m” jelű keverékek esetén, hogy az 5 perces frissbeton keverékekben - valószínűleg a többlet vízzel függ össze – a zúzott beton adalékanyag és a pép nem mozgott együtt, a pép és a „kő” határai tisztán láthatóak voltak. Valószínűsíthető, hogy a keverési idő nem volt elegendő a komplett vízfelvételre, mely valószínűleg az 5 perces

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

vizsgálat ideje alatt is tartott. Ezt a feltételezést alátámasztja az is, hogy a 30 perces ellenőrzésnél már homogén volt a keverék és a későbbi mérések során a bedolgozhatósága nem romlott látványosan.

A szilikapor adagolású keverékeknel a nagyobb péptartalom miatt az első 30 percben alig volt mérhető konzisztencia esés, a homogenitása közel 60 perc és 20 cm-es konzisztencia csökkenés után is elfogadható lett volna.

Az általam visszaszárításos módszerrel meghatározott víztartalom értékei is ábrázolásra kerültek. [4.25. ábra] A szilárd test tömegéből számítottam vissza az 1 m³-re vonatkozó víztartalmat.



4.25. ábra: 2. próbakeverés: víztartalom és konzisztencia eltarthatóság [saját vizsgálat alapján]

Kísérleti úton igazoltam, hogy az adalékanyag által felvett víz távozik el a betonból a vizsgálat során. A grafikonon [4.25. ábra] ábrázolt víztartalom értékek a visszaszárításból származó adatok alapján kerültek kiszámításra.

Ez arra hívja fel a figyelmet, hogy az újrahasznosított adalékanyagok esetén a szokványos vizsgálat félrevezethető lehet, mert nem csak a keverővizet mutatja ki, hanem az adalékanyag által felszívott víz egy részét is. Üzemi gyártás esetén fontos feltüntetni, ha az adalékanyag előnedvesített állapotban kerül bekeverésre.

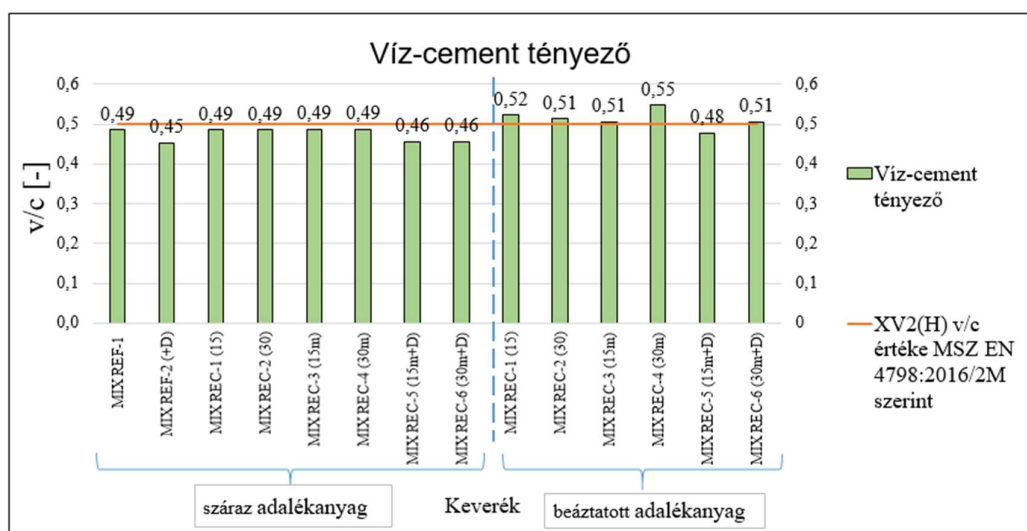
Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Eltelt idő [perc]	MIX REC-1 (15)	MIX REC-2 (30)	MIX REC-3 (15m)	MIX REC-4 (30m)	MIX REC-5 (15m+D)	MIX REC-6 (30m+D)
5	510	550	580	540	460	520
30	440	510	510	550	440	520
60	340	400	400	430	350	440
90	260	290	340	330	0	360
Adalékszer 1 [m%]	0,5	0,5	0,5	0,55	0,65	0,65
Adalékszer2 [m%]	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5
Víztartalom [tér%]	7,9	8,2	8,1	8,6	8	8,6
Szilárd próbatest tömege [kg]	7825	7932	7799	7948	7952	7839
Testsűrűség [kg/m ³]	2319	2350	2311	2355	2356	2323
Víztartalom [l/m ³]	183	193	187	203	188	200
Víztartalom [%]	7,9	8,2	8,1	8,6	8	8,6

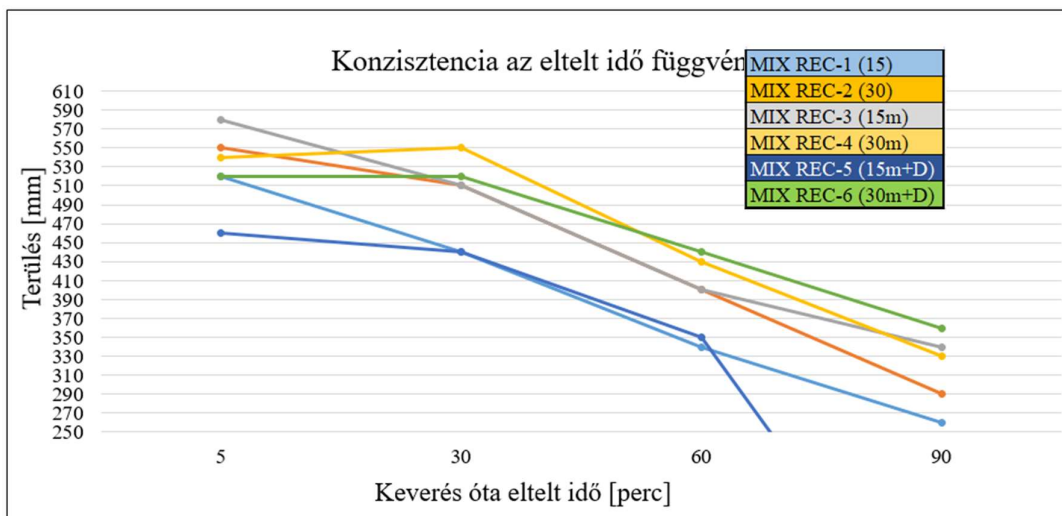
4.26. ábra: Konzisztencia eltarthatósággal kapcsolatos számítások (adalékszer, víztartalom, testsűrűség) [saját vizsgálat alapján]

A beáztatással bevitt többlet víz hatása a v/c tényezőre:

A visszaszárított víz mennyiségéből kiszámítottam a tényleges víz-cement tényezők értékeit. Megállapítható, hogy a beáztatással bevitt többlet víz habár eltolta a v/c tényezőt, az eltérések REC-4 (30m) kivételével még teljesítik a szabvány szerint megengedett (0,02) eltérést. Az értékekből arra következtetek, hogy az újrahasznosított adalékanyag keverékben történő vízfelvétele meghaladja a korábban megállapított 5,1 %-ot. Vízfelvétel vizsgálat mintájának mennyisége nem reprezentálja kellőképpen a teljes adalékanyag halmaz viselkedését. [4.27. ábra]

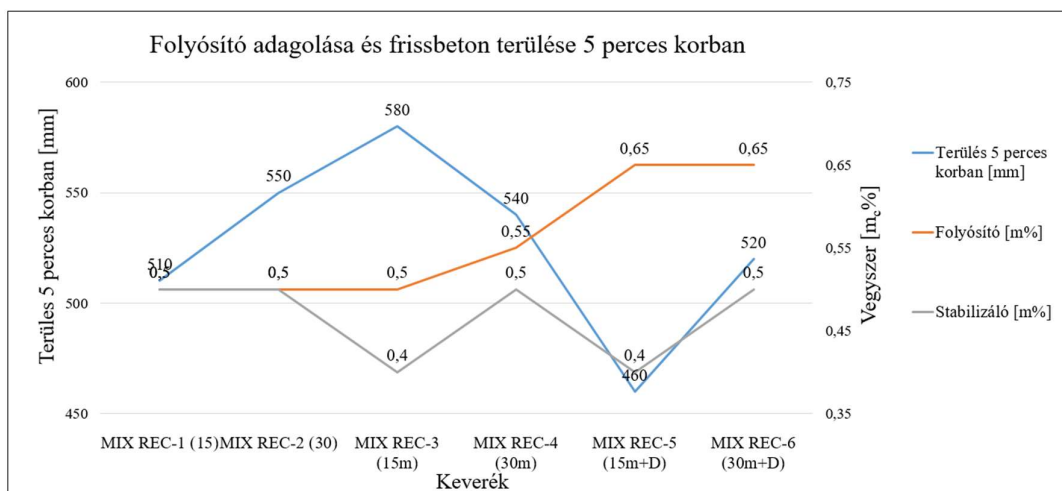


4.27. ábra: 1.-2. próbakeverés: hatékony víz-cement tényező változása [saját vizsgálat alapján]

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

4.28. ábra: 2. próbakeverés: keverékek terülés értékei az eltelt idő függvényében [saját vizsgálat alapján]

Az alábbi diagramon a folyósító és a stabilizáló adalékszer mennyisége és a frissbeton konzisztenciája közötti összefüggés látható. Kijelenthető, hogy a folyósítószer 0,5 m %-os adagolásáig a területi értékek kedvezőbb irányba, felfelé mozdultak el, viszont az afölötti adagolás jelentős konzisztencia esést eredményezett. [4.28.-4.29. ábra]



4.29. ábra: 2. próbakeverés: Folyósítószer adagolása és frissbeton területése 5 perces korban [saját vizsgálat alapján]

Nyomószilárdság vizsgálat MSZ EN 12390-3:2019 és az MSZ 4798:2016 szerint

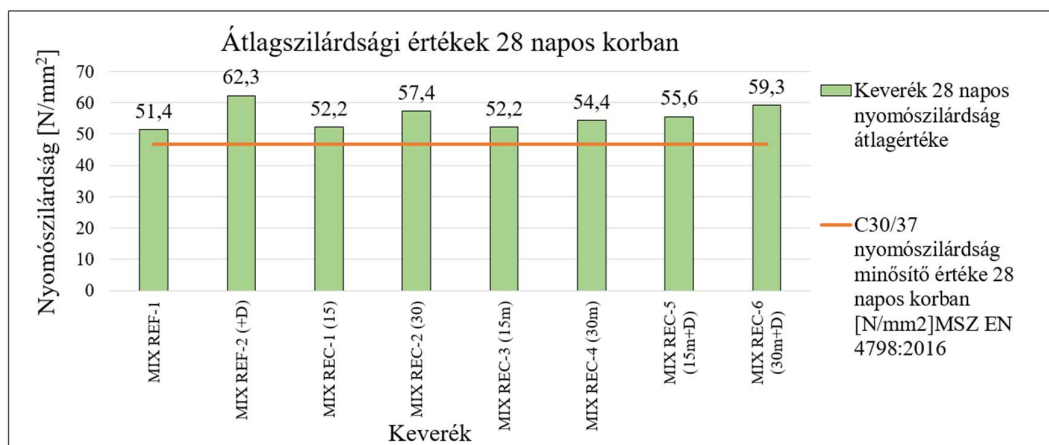
Recept neve [Keverék]	28 nap						
	Szilárd próbatest jellemzői				Törőteher [kN]	Testsűrűség [kg/m ³]	Egyedi szilárdság [N/mm ²]
	Hosszúság [mm]	Szélesség [mm]	Magasság [mm]	Tömeg [g]			
MIX REF-1	150,5	150,2	150,1	7935,3	1161,0	2340	51,4
MIX REF-2 (+D)	150,7	150,0	150,1	7892,0	1407,0	2327	62,3
MIX REC-1 (15)	150,8	149,8	149,9	7902	1083	2334	47,9
MIX REC-2 (30)	150,1	149,6	149,6	7788	1011	2318	45,0
MIX REC-3 (15m)	151,1	149,8	149,9	7858	1071	2316	47,3
MIX REC-4 (30m)	151,1	149,8	149,6	7821	1036	2310	45,8
MIX REC-5 (15m+I)	151,1	149,8	149,5	7862	1196	2323	52,8
MIX REC-6 (30m+I)	149,9	149,5	149,9	7745	1167	2306	52,1

4.30. ábra: 2. próbakeverés: Nyomószilárdság vizsgálat eredményei és testsűrűségük 28 napos korban [saját vizsgálat alapján]

Az 4.30. táblázat alapján ábrázoltam [4.31. ábra] a kapott eredményeket és tendenciát. Kísérleti eredményeim alapján megállapítható, hogy a beáztatott adalékanyaggal készült betonok nyomószilárdsága az 1-es próbakeverés vizsgálatához képest alulmaradást mutatnak az újrahasznosított betonok esetén. A kísérleti eredményekkel igazoltam, hogy a 30%-ban helyettesített újrahasznosított adalékanyaggal készült receptúrák nyomószilárdsága nem éri el a minősítő 46,7 N/mm² értéket. Ez összefüggésbe hozható a beáztatás során bevitt többlet víz mennyisége és annak hatásával a víz-cement tényezőre és a nyomószilárdság értékeire. A 15%-ban alkalmazott és a szilikaporról kevert újrahasznosított adalékanyaggal készült betonok elérték a minősítő szilárdságot.

Megjegyzendő azonban, hogy ebben a kísérleti szakaszban 1 próbatest készült a 28 napos nyomószilárdság vizsgálatára. Ahhoz, hogy pontosabb értékeket és tendenciákat állapítsak meg további mintavétel és próbakeverés lenne szükséges.

A szilikaporról készült betonok nyomószilárdsága megfelel az előírt C30/37-es nyomószilárdsági osztály minősítő értékének. A másodlagos kiegészítő anyag szilárdulás növelő hatását igazoltam a vizsgálat alkalmával, a REC-5 és REC-6 keverékek nyomószilárdsága megközelítőleg 15%-al magasabb értékeket eredményezett. Feltételezem, hogy további mérésekkel a szilárdság tartáshoz szükséges minimális beáztatási időtartam optimalizálható.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

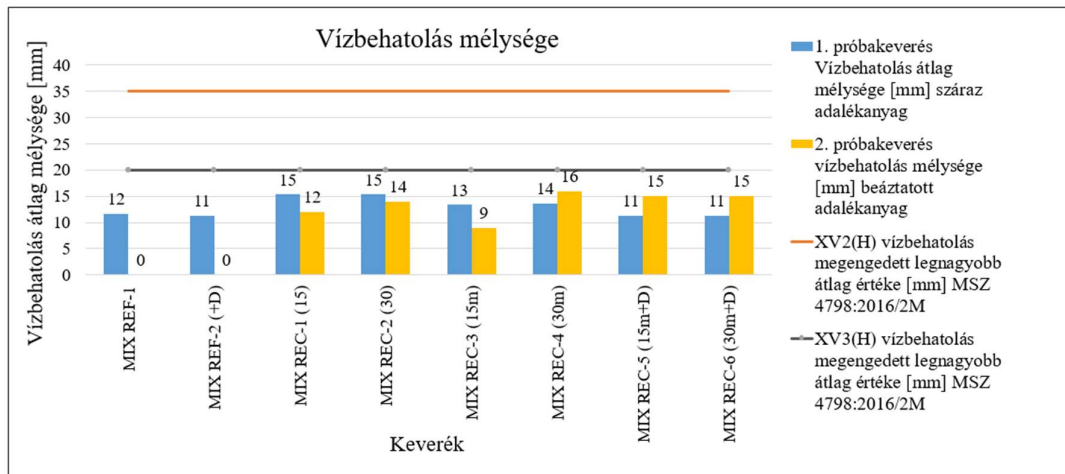
4.31. ábra: 2. próbakeverés: Nyomószilárdság vizsgálati eredmények 28 napos korban [saját vizsgálat alapján]

MSZ 4798:2016/2M szerinti vízzáróság

Az alábbi összefoglaló táblázatban az 1. próbakeverés eredményei mellett a 2. keverés vízbehatolási értékeit hasonlítom össze. [4.32. és 4.33.]

Kijelenthető, hogy a harmadik kísérleti szakasz során alkalmazott receptúrák és a bevitt többletvíz (beáztatás) ellenére kísérlettel igazoltan teljesítették a tervezett XV2 (H)-nál magasabb XV3 (H) vízzárósági osztályt. Megjegyzendő, hogy a v/c tényezők szabvány szerinti túrésát a „30m” jelű összetétel nem teljesítette, ez a 30%-os újrahasznosított adalékanyag keverés előtti vízfelvételének tudható be.

Recept neve [Keverék]	1. próbakeverés 38 nap					2. próbakeverés 28 nap		
	Szilárd próbatest jellemzői				Testsűrűség [kg/m³]	Vízbehatolás mélysége [mm]	Vízbehatolás átlagmélysége [mm]	Vízbehatolás átlagmélysége [mm]
	Hosszúság	Szélesség	Magasság	Tömeg				
MIX REF-1	149,6	149,9	150,1	7872,0	2338,7	15	12	-
	150,8	150,6	150,0	7963,0	2337,5	10		
	151,0	150,0	150,2	7971,0	2343,0	10		
MIX REF-2 (+D)	150,1	150,0	150,0	7891,0	2336,5	11	11	-
	151,2	150,1	150,3	7906,0	2317,7	9		
	150,7	149,8	150,0	7880,0	2327,1	14		
MIX REC-1 (15)	150,8	149,7	149,9	7970,0	2355,2	19	15	12
	150,7	149,8	150,0	7981,0	2356,9	14		
	151,6	149,9	149,8	7994,0	2348,3	13		
MIX REC-2 (30)	151,9	149,9	149,9	7997	2343,0	18	15	14
	150,1	150,2	149,9	7941	2349,8	11		
	150,9	150,1	150	7965	2344,4	17		
MIX REC-3 (15m)	150,9	149,9	149,9	7939	2341,4	12	13	9
	149,8	150,1	150,1	7892	2338,4	15		
	150,5	149,8	149,9	7897	2336,7	13		
MIX REC-4 (30m)	149,9	149,9	150	7876	2336,7	15	14	16
	150,1	149,7	149,9	7884	2340,7	12		
	150,3	150,1	150,1	7903	2333,8	14		
MIX REC-5 (15m+D)	152,0	149,6	149,6	7936	2332,9	12	11	15
	151,6	149,7	149,6	7943	2339,5	7		
	151,7	149,7	149,9	7893	2318,6	15		
MIX REC-6 (30m+D)	152,7	149,8	149,8	7959	2322,7	12	11	15
	150,9	149,9	150	7890	2325,4	10		
	152,1	149,7	149,9	7889	2311,4	12		

Vízáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

4.32. és 4.33. ábra: 1.-2. próbakeverés vízzárósági vizsgálatok eredményeinek összehasonlítása [saját vizsgálat alapján]

5. Újrahasznosított betonból készült szerkezet karbon lábnyom számítása

Gyakorló mérnökként azt gondolom, időszerű, hogy minden mérnök foglalkozzon az általa tervezett szerkezetek beépített karbonlábnyomának (embodied vagy upfront carbon CO₂eq) számításával.

A mérnöki tervezésben a környezettudatosság ma már nem perifériás szakértői papírgyártás, hanem a mindennapi műszaki tervezés összetevője. [V. Nagy Zoltán, 2022]

Jelen elemzésben az ökológiai lábnyom egy részlábnyomának, a karbonlábnyom kiszámítását mutatom be az általam vizsgált medence szerkezetén keresztül.

Karbonegyenérték számítás részletei

Nagyon általánosan tekintve a karbonlábnyom alkalmazható a fenntarthatóság szintjének felmérésére. A kutatási munkámban megfogalmazott elmélet szerint egy meglévő vasbeton szerkezetet –esetemben vasbeton versenymedencét- a bontás helyszínén zúzzák, osztályozzák, és újra felhasználják szerkezeti beton formájában. Az említett ciklusnak - a karbon lábnyom számítás modelljei közül- a szakirodalomban „cradle-to-gate” (bölcsőtől a kapuig) néven említett megközelítéssel számítható leginkább a környezetre gyakorolt hatása a gyártás kezdetétől (újrahasznosított beton gyártása) az értékesítés pillanatáig (új szerkezet építése). [Bakosné Böröcz (2016)]

A fenntartható tervezés az életciklus-elemzésen alapul, amelynek módszere egy költségvetés készítéséhez hasonlítható. Egy ún. „leltár” összeállítása szükséges, melybe az építéssel kapcsolatos összes folyamatot és anyagot rögzítjük. Azzal a különbséggel, hogy jelen esetben nem árat és munkadíjat, hanem különböző környezeti indikátorokat rendelünk a tételekhez. A

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

korábbiakban említett „leltár” látható a vasbeton medence szerkezetére kidolgozva. [5.1. ábra][44. sz. melléklet]

Diplomamunkámban egy finn cég, a *OneclickLCA* programját használtam a medence beépített karbonlábnyomának elemzésére.

A szoftver alapvetően különböző besorolású épületek elemzésére alkalmazható, legjobb közelítésként a medencét az „egyéb” kategóriába sorolva adtam meg a szerkezet alapadatait. A beépített karbon számítás elve arról szól, hogy az építmény létrehozásával kapcsolatos környezeti terheléseket mutatjuk ki.

Két fajta karbon lábnyom létezik épületek esetén, a használati karbon és a beépített karbon. Jelen projekt keretén belül a beépített karbonnal foglalkozunk. Rögzíthető adatként az építés során felhasznált elektromos energia, víz, sőt még a gépekhez használt üzemanyag mennyisége is.

Hogyan történik az elemzés?

Első fázis: Táblázatos formában „leltárat” készítünk, a tételek kiírásával, melyek mellé mennyiséget és anyagminőséget társítunk. *LCA* programban a karbonelemzéshez közvetlen és frissített adatbázishoz férünk hozzá, a különböző termékek környezetvédelmi termékadatlapjához. [Gibbson (2022)] *Tagolás felépítése:* Alapozás, alépítmény; Függőleges tartószerkezetek; Vízszintes tartószerkezetek; más egyéb szerkezetek. Már bevétel közben számítja az adott tételhez tartozó karbonlábnyomot.

Az alépítményi munkáknál számításba vettem a beépített ágyazat (törtbeton), szerelőbeton, a lemezalapozáshoz szükséges betonacél mennyiségét és a szerkezeti betont (CEM II/B-S 42,5 N cementtel 370 kg/m³ adagolással). Figyelembe véve, hogy a betont és a betonacélt milyen távolságról szállítják a kivitelezés helyszínére.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Main > **Újrahasznosított Vasbeton medence** > Újrahasznosított betonból készült vasb > One Click LCA Planetary Eastern and Southern Euro

Újrahasznosított betonból készült vasbeton medence

Building materials

Construction site operations

Building area

Fill in the material consumptions by material type. You may fill in all materials lumped together, or on separate rows for example by type of structure. Unless instructed otherwise

1. Foundations and substructure 229 Tonnes CO₂e - 69 %

Materials in the foundations will never be replaced, no matter assessment period length. For BREEM UK Mat 1 IMPACT equivalent provide the data for site excavation fuel use here, choose

Foundation, sub-surface, basement and retaining walls [Move materials](#)

Start typing or click the arrow

Resource	Quantity	Comment	Transport, kilometers	Wastage
Ready-mix concrete, low-strength, g	70 m3	Szerelőbeton	11 Concrete mixer truck	4 %
Ready-mix concrete, high strength, g	350 m3	(Megj:Nem nagy	11 Concrete mixer truck	4 %
Reinforcement steel (rebar), gener	44 ton	Alaplemez betonacél	210 Trailer combination, 40	4.85 %

2. Vertical structures and facade 66 Tonnes CO₂e - 20 %

External walls and facade [Move materials](#)

Start typing or click the arrow

Resource	Quantity	Comment	Transport, kilometers	Wastage
Ready-mix concrete, high strength, g	130 m3	Medence falak	11 Concrete mixer truck	4 %
Reinforcement steel (rebar), gener	12 ton	Falak betonacél szerelése	210 Trailer combination, 40	4.85 %

Columns and load-bearing vertical structures [Move materials](#)

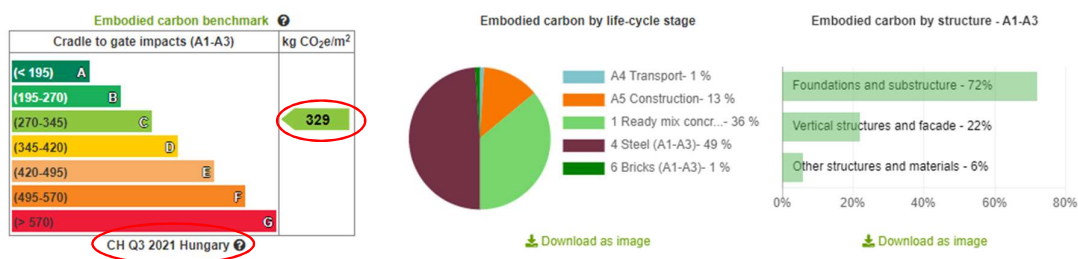
Start typing or click the arrow

Internal walls and non-bearing structures [Move materials](#)

Start typing or click the arrow

5.1. ábra: „Leltár” vasbeton medence beépített karbon számításához [OneClick LCA – saját számítás alapján]

Az épület alapterületére számított teljes beépített karbonlábnyom a következőképpen alakul: **329 t CO₂e/m²** karbonegyenérték a teljes szerkezetre, mely alapján az LCA alapján „C” kategóriába sorolható. Megjegyzendő, hogy a medence vízgépészeti és elektromos oldala (gépészet üzemeltetésének energia igénye, medence világítás stb.) nincs figyelembe véve. Ha az eredményeket megnézzük, ez 329 tonna szén-dioxid kibocsájtással egyenértékű terhelést, fajlagosan 329 kg/m² beépített karbon lábnyomot jelent. [5.2. ábra]



5.2. ábra: Szerkezeti besorolás „Benchmark” OneClick LCA alapján [saját számítás]

Vízáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

A minősítés (Benchmarking) jelzi azt is, hogy milyen adatbázisra támaszkodunk számítás során. [5.2. ábra] Például egy vasbeton vázas 20 emeletes épületet közel hasonlóan a medencéhez 360 kg/m² értékre adódik jó becslések alapján. [Mullholland et al: ICE Knowledge – Low Carbon Concrete Routemap (2022).]

Mit is jelentenek a számok? Megközelítésként Magyarországon az 1 főre jutó karbon kibocsátás értéke 2021-ben 5 tonna volt.

Szemléletes módon egy ilyen vasbeton medence 66 magyar CO₂ kibocsátásának felel meg. Éves szinten az egész országra nézve nyilván ez eltörpül, mely Magyarországon 28,3 millió tonna.

A 329 kg sok vagy kevés? Ennek a megítélésében segít a **LETI** (London Energy Transformation Initiative), amely segédleteket bocsátott ki ezzel kapcsolatban.

A számítás végeredményeként meg lehet nézni, hogy a különböző anyagok, milyen arányban veszik ki részüket a terhelésből.

▼ Most contributing materials (Global warming)			
No.	Resource	Cradle to gate impacts (A1-A3)	Of cradle to gate (A1-A3)
1.	Ready-mix concrete, high strength, generic, C45/55 (6527/7977 PSI) with CEM II/B-S, 30% GGBS in cement (400 kg/m ³ ; 25.0 lbs/ft ³ total cement) 	1,6 kg CO ₂ e	66.7 %
2.	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615 	0,45 kg CO ₂ e	18.8 %
3.	Ready-mix concrete, low-strength, generic, C12/15 (1700/2200 PSI), 10% (typical) recycled binders in cement (220 kg/m ³ / 13.73 lbs/ft ³) 	0,2 kg CO ₂ e	8.4 %
4.	Stoneware tiles glazed, 10 mm, 20.0 kg/m ² , 2000 kg/m ³ 	0,15 kg CO ₂ e	6.2 %

5.4. ábra: Beépített anyagok „részesedése” a teljes szerkezet karbon terheléséből [saját számítás]

Nem meglepő egy monolit vasbeton szerkezet esetén - még gondos tervezés mellett is- hogy a leginkább közreműködő anyagok: a beton: 66,7 %-ban, a betonacél: 18,8%-ban. A többi tényező az ágyazat, burkolatok, szállítási és egyéb elenyészők. [5.4. ábra].

Fajlagosan látszik, hogy a szerkezet karbonlábnyomának a legnagyobb részét a transzportbeton emésztí fel.

Hogyan csökkenthető ez az érték?

Ismeretes, hogy a transzportbeton előállításában, legnagyobb mértékben a cement felelős a karbonkibocsátásért.

Az általam használt különböző keverékek karbon kibocsátásának értékét az ICE nevű szervezet adatbázisa alapján modelleztem és hasonlítottam össze az LCA-ben kapott értékekkel.

1. Első lépésben minden általam tervezett keverék összetételét elemeztem a kalkulátor

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

segítségével. Az eredményeket a 20.-21.-22. számú mellékletben szemléltetem. Megállapítható, hogy alapvetően a referencia és az újrahasznosított betonok karbonlábnyoma megközelítőleg azonos. Az „m” jelű receptúrák karbonlábnyoma az emelt cement és vegyszer mennyiségének hatására kb. 5%-al emelkedett. Megjegyzendő, hogy keverékeimben másodlagos kiegészítő anyaggal készült cementtel dolgoztam (CEM II/B-S 42,5 N).

2. Második lépésben különböző keverékeket modelleztem egyre nagyobb kiegészítő anyag százalékkal előállított cementekkel. A MIX megnevezésnél az általam használt receptúrák jelölését használtam. [5.5.-5.6. ábra]

A keverékekben szemléltetésképpen a következő típusú cementeket használtam, figyelembe véve az összetételből adódó esetleges magasabb anyagigényt.

MIX I: CEM II/B-S - kohósalak-portlandcement

MIX II: CEM III/B – kohósalak cement

MIX III: CEM I – portlandcement

A cement összetétele alapján a következőképpen számítható a CO₂ egyenértéke:

Component	Cement composition - % weight	Embodied Carbon contribution - kg CO ₂ / kg
Cement, OPC	72,00%	0,657
GGBS	28,00%	0,012
Fly ash	0,00%	-
Natural pozzolanic ash	0,00%	-
Gypsum	0,00%	-
Limestone	0,00%	-
MAC	0,00%	-
Total	100,00%	0,668
Mass total check OK		
plus Waste & additional energy	0,00%	-
Embodied Carbon RESULTS - Kg CO ₂ /kg		0,668

5.5. ábra: CEM II/B-S 42,5 N típusú cement CO₂ egyenértéke [ICE Cement, mortar and concrete Model V1.1 Beta kalkulátor-saját számítás]

Számítással igazoltam, hogy minél magasabb a hagyományos portland cement tömegszázaléka az összetételben annál magasabb a CO₂ egyenértéke is.

Alábbi eredmények jól szemléltetik, hogy a beton fajlagos 1 m³-re eső karbon egyenértéke a magasabb kiegészítőanyag tartalmú cementek alkalmazásával csökkenthető. (pernye, kohósalak, mészkő, gipsz). Az általam is alkalmazott szilikapor, mint másodlagos kötőanyag is ide sorolható.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

5. RESULTS - Summary Calculations

Embodied carbon factor for cement

Embodied carbon factor CEMENT - kg CO ₂ e/kg	0,67	0,28	0,91
--	------	------	------

Concrete calculations - Embodied Carbon Contribution - kg CO₂e / m³ concrete

Material	Embodied Carbon Factor - kg CO ₂ e / kg	Mix 1	Mix 2	Mix 3
		MIX REC-3 (15m)	MIX REC-4 (30m)	MIX REF-1
Cement	See above	248,5	102,9	291,8
GBBS	0,04	-	-	-
Fly ash	0,00	-	-	-
Limestone fines	0,02	-	-	-
Water	0,00	0,1	0,1	0,1
Admixture	See below	13,0	14,9	10,2
Aggregates	0,007	13,5	13,5	13,9
Transport of constituents	0,004991322	11,83	11,80	11,68
Concrete batching plant operations	0,00072	1,71	1,70	1,68
With mixing waste	1,0%	2,89	1,45	3,29
Precasting	0,0142	-	-	-
Steel reinforcement	See below	170,50	170,50	170,50
Transport to site	0,1033	2,49	2,49	2,48
RESULTS - kg CO ₂ e / m ³ concrete		464	319	506
RESULTS - kg CO ₂ e / kg concrete		0,196	0,135	0,216

5. RESULTS - Embodied Carbon

Embodied carbon of concrete per m³

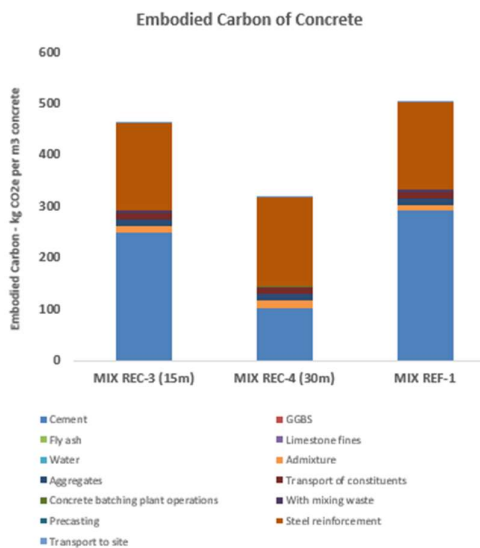
Material	Mix 1	Mix 2	Mix 3
RESULTS - kg CO ₂ e / m ³ concrete	464	319	506

Embodied carbon of concrete per kg concrete

RESULTS - kg CO ₂ e / kg concrete	0,196	0,135	0,216
--	-------	-------	-------

Results - Contribution Chart %

Material	Mix 1	Mix 2	Mix 3
	MIX REC-3 (15m)	MIX REC-4 (30m)	MIX REF-1
Cement	53,5%	32,2%	57,7%
GBBS	0,0%	0,0%	0,0%
Fly ash	0,0%	0,0%	0,0%
Limestone fines	0,0%	0,0%	0,0%
Water	0,0%	0,0%	0,0%
Admixture	2,8%	4,7%	2,0%
Aggregates	2,9%	4,2%	2,7%
Transport of constituents	2,5%	3,7%	2,3%
Concrete batching plant operations	0,4%	0,5%	0,3%
With mixing waste	0,6%	0,5%	0,7%
Precasting	0,0%	0,0%	0,0%
Steel reinforcement	36,7%	53,4%	33,7%
Transport to site	0,5%	0,8%	0,5%

5.6. ábra: Különböző összetételű cementekkel készült keverékek CO₂ egyenértéke [ICE

Cement, mortar and concrete Model V1.1 Beta kalkulátor-saját számítás]

Egyértelműen kijelenthető, hogy a betonnak és betonacélnak együtt van meghatározó szerepe. Az anyagfelhasználás tekintetében nagy szerepet kap a szerkezeti optimalizálás. [5.7. ábra]/45. sz. melléklet]

Elemzésem a 45. sz. melléklet szemlélteti. Az építőanyagok előállítása a domináns, más életciklus elemző fázisok mértéke viszonylag kisebb, 20 % körüli.

Költségbecslés

A Danubiusbeton Szolnok Kft. ügyvezetőjével, több alkalommal volt lehetőségem egyeztetni. Iránymutatásai alapján és a vállalat költséggazdálkodásából és önköltségszámításából merítve végeztem kalkulációkat arra vonatkozóan, hogy milyen anyagi- és eszköz ráfordítási igényt jelenthet a zúzott beton adalékanyagként történő felhasználása.

Elkészítettem minden általam alkalmazott keverék költségelemzését hagyományos transzportbeton illetve újrahasznosított beton tekintetében is. Az újrahasznosított betonok esetén két módozatot vettem figyelembe a zúzott beton előállításnak technológiája függvényében: bérelt törőgéppel, építéshelyszínen történő betondarálás illetve betonüzem környezetében, fixen telepített törőgép használata esetén.

A táblázatok az alapanyagok jelenlegi piaci árait, keverési és szállítási költségeit tartalmazzák 1 m³ frissbetonra vonatkoztatva helyszínre kiszállítva. Az újrahasznosított beton esetén tartalmazza az adalékanyag előkészítését (darálás, osztályozás, beszállítás betonüzem telephelyére illetve letelepített üzemi törőgép esetére is).

Az elkészített költségbecslések minden esetben a szolnoki Danubiusbeton Kft. telephelyére leszállítva kerültek kiszámításra.

A REF-1 és a REC-4 (30m) típusú keverékek összehasonlításánál megállapítható, hogy az 1 m³-re vetített fajlagos költség az újrahasznosított és a hagyományos kavics beton esetén közel azonos egységárra adódott. [24.-37. sz. mellékletek]

Az táblázatokban számított összegek tényleges bérleti és üzemeltetési költségek felhasználásával kerültek kiszámításra, fajlagosan 1 m³-re (1 m³-be felhasználandó 335 kg-os mennyiséget gyakorlatilag percek alatt zúz le a gép).

A beton zúzásához egy nagyobb teljesítményű HARTL PC 1055 pofás törőgépet választottam, mely esetében a gép a belépőtérben előzúzza, a kiömlőtérben pedig utózúzza az adalékanyagot. Ezzel a technikával a kerek és sima kövek is könnyebben zúzhatók.

Az előállított zúzalék mérete: 10-130 mm, és törési teljesítménye elérheti megfelelő előkészítés és adagolás mellett a 100 tonna/órás teljesítményt.

Fenti teljesítményű gép alkalmazása esetén viszonylag gyorsan, akár 1 munkanap alatt előkészíthető a szükséges mennyiségű adalékanyag. A zúzással párhuzamosan egy gépi vibrációs nehéztával az adalékanyag tovább osztályozható a kívánt frakciókra.

Az 1 m³ szilikaporrall előállított transzportbeton egységárát szemlélteti. A fajlagos költségnövekményt a szilikapor anyagára generálja.

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

A 30 %-os újrahasznosítás mellett az osztályozott kavics (4/8, 8/16) mennyisége ezáltal költsége is csökkent, melynek régióként a szállítási távolságok függvényében az egységára jelentősen eltérő lehet. Esetemben a depózott törtbeton, a betonüzem és a felhasználás helye kis távolságra van (11 km) egymástól, ezért ez egy életszerű felhasználásnak tekinthető.

Az előállítás költségei tovább mérsékelhetők, amennyiben nem bérgepet, hanem folyamatos üzemelés mellett telephelyre letelepített törőgépet alkalmaznak a zúzott adalékanyag előállításához. Ezzel a szállítási költségek is jelentősen lecsökkenthetők.

További költségcsökkentésként említendő meg, hogy az újrahasznosított betonba felhasznált adalékanyagon kívüli frakciókat az alaplemez alatti tömörített ágyazatba, de továbbgondolva útalapba, feltöltésként közvetlenül a helyszínen fel lehet használni.

Az elkészített költségbecslés alapján az alábbi egységárak adódnak (30%-os újrahasznosított adalékanyag alkalmazása esetén):

Természetes osztályozott adalékanyag 1 tonna: 4926 Ft/tonna

Újrahasznosított adalékanyag 1 tonna bérgep esetén: 4078 Ft/tonna

Újrahasznosított adalékanyag 1 tonna telepített gép esetén: 2021 Ft/tonna

Vizsgálódásom alapján kijelenthető, hogy amennyiben megfelelően összeállított teljesítménnyel rendelkező géplánc kerül felállításra az újrahasznosításra, a belőle előállított transzportbeton költsége fajlagosan nem változik számottevően. Amennyiben a törőgép telephelyre letelepített saját hatáskörben történő üzemel az előállítás költsége lefelezhető.

Nyilván ebben az esetben a berendezések (törőgép, homlokrakodó, forgó-kotró) beszerzése nagy összegű anyagi befektetést igényelnek. Továbbá kiemelten fontos számításba venni az adalékanyag minősítő vizsgálatok költségét, mely hozzávetőlegesen 2 és 3 millió forint közötti összeget képviselnek jelen pillanatban.

Újrahasznosított adalékanyag felhasználás lehetőségének felmérésére eltérő technológiai kialakítással rendelkező üzemeket jártam be.

Danubiusbeton Szolnok Kft. üze me csillagdepó kialakítású, 1,0 m³-es keverővel szerelt burkolt-szigetelt betongyár. 5 frakciós kialakítás az adalékanyagok számára, manuális kotróval szerelve. Az 5 frakciós csillagdepónia alkalmasnak bizonyul a pontosan 5 féle adalékanyag tárolására. Viszont egy ilyen típusú keverőüzem esetében a depóniákban a támfal és az adagolónyílás között megközelítőleg nagyságrendileg 120 tonnás „holttér” alakul ki, melynek mennyiségével kalkulálni szükséges. Fenti adagolási probléma figyelembevételével egy több szektoros zárt soradagolás rendszerrel felszerelt üzemben praktikusabb módon oldható meg. Nem elfeledve, hogy ezekben az esetekben több passzív tároló kapacitása is lekötésre kerül.

6. Összefoglalás

Összegzés, kitekintés jövőbeni kutatások:

Napjaink egyre hangzatosabb kifejezései a fenntarthatóság, ökológiai lábnyom, újrahasznosítás, CO₂-kibocsátás. Az építőiparban az körforgásos gazdaság, az anyagok újrafelhasználásának lehetősége egyre inkább aktuális feladat a jövő mérnökei számára. Igyekeztem az újrahasznosított adalékanyag felhasználásával készített betonok alkalmazhatóságának betontechnológiai vonatkozásait részleteiben is vizsgálni.

Feladatunk a hatékony hasznosítás érdekében az felhasználást támogató jogszabályokat alkotni; el kell készíteni az építési és bontási hulladék kezelésének részletes szabályait; meg kell oldani a másodlagos nyersanyag minőségi (felhasználhatósági) osztályba sorolását; felül kell vizsgálni az építőipari, útépitési, építési szabványokat; a műszaki irányelveket, vizsgálati, minősítési módszereket módosítani kell; az állami és önkormányzati pályázatokban előnyben kell részesíteni a hasznosítható építési hulladék felhasználását. *[CeMBeton: Körforgásos gazdaság, 2020]*

Dolgozatom témája, egy létező projekt kapcsán elbontott vasbeton medence zúzott anyagát visszaforgatva, olyan szerkezeti betont készíteni, mely teljesíti a helyére tervezett új szerkezet előírt betonminőségét. Célom volt az újrahasznosított adalékanyagból vízzáró betont készíteni, igazolva a mikroszilika kiegészítő anyag hatását a friss- és megszilárdult betontulajdonságokra.

Vizsgálat útján meghatároztam a zúzott beton adalékok közetfizikai és mechanikai tulajdonságait labor körülmények között. Ehhez közel 1000 kg zúzalékot volt szükséges feldolgozni. 16 keveréken végeztem friss- és megszilárdult beton vizsgálatokat, többek között konzisztencia, nyomószilárdság és vízzáróság tekintetében. Kísérletileg igazoltam a darált betonból visszanyert másodlagos adalékanyag hatását különböző betonkeverékekben, eltérő adagolási mennyiségekkel.

Külön figyelmet fordítottam az eltérő összetételek konzisztencia eltarthatóságának vizsgálatára. Megállapításokat tettem a többlet víz hatására a bedolgozhatóság, a nyomószilárdság, illetve vízzáróság értékeire nézve. Összefüggést állapítottam meg a zúzott beton által felvett víz mennyisége és a tervezett víz/cement tényező, illetve a nyomószilárdság kapcsolata között.

Eredményeim alapján igyekszem rávilágítani az újrahasznosított betonból készült szerkezet beépített karbonlábnyomának mértékére, előállításának költségeire és technológiai hátterére.

Dolgozatom célkitűzései 1. fejezet (6. oldal) alapján:

Kutatásom eredményeit, azokból levont következtetéseket és értékelésüket az alábbiakban foglalom össze [6.1. táblázat és 23. sz. melléklet]

1. Újrahasznosított adalékanyag vizsgálata, összehasonlítása

A zúzott adalékanyagot különböző laboratóriumi vizsgálatnak vetettem alá, melyek eredményei alapján igazoltam az újrahasznosított adalékanyagokkal készült betonok környezeti és nyomószilárdsági osztálynak való megfelelését, annak ellenére, hogy maga az újrahasznosított adalékanyag a szabvány követelményeit nem teljesítette.

2. Különböző százalékban alkalmazott újrahasznosított adalékanyagú beton nyomószilárdsági és vízzárósági vizsgálata

Kísérleti eredmények alapján megállapítottam, hogy az újrahasznosított adalékanyaggal készült betonok mindkét adagolási aránnyal (15 % és 30 %) magasabb átlag nyomószilárdságot értek el 28 napos korukra, mint a hagyományos kavicsvázsal készült keverék. Ezt azzal magyarázom, hogy a szárazon adagolt zúzaléknak magasabb a vízfelvétele, mint a hagyományos osztályozott adalékanyagoknak, ezáltal a keverővízből vonja el a víz mennyiségét, ami alacsonyabb hatékony v/c értéket és ezáltal magasabb nyomószilárdságot eredményez.

3. Konzisztencia eltarthatóság vizsgálata az eltérő adagolási arányú újrahasznosított adalékanyaggal készített keverékeken

Kísérletekkel igazoltam, hogy a konzisztencia eltarthatóságot az emelt keverővíz mennyisége nem javítja, amennyiben az újrahasznosított adalékanyag kiszáritott állapotban kerül a keverékbe.

A kísérleti eredményekkel igazoltam, hogy beáztatott adalékanyag kedvezően befolyásolja a betonkeverék konzisztenciájának eltarthatóságát.

Kísérleti úton megállapítottam, hogy az újrahasznosított adalékanyag keverékben történő vízfelvétele meghaladhatja a vízfelvétel vizsgálat eredményét, amennyiben a minta nem reprezentálja kellőképpen a teljes adalékanyag halmaz viselkedését.

A zúzott adalékanyag változó összetétele befolyásolhatja a keverővíz, az adalékszer hatékonyságát.

4. Vízzáróság fokozásának vizsgálata

Vizsgálati eredményeim alapján megállapítottam, az általam alkalmazott összes keverék teljesítette az MSZ 4798:2016/2M szerinti XV2 (H) környezeti osztályra vonatkozó maximális vízbehatolást, annak ellenére, hogy a vonatkozó szabvány nem javasolja újrahasznosított

Vízzáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

adalékanyag alkalmazását vízzáró szerkezeteken. Ezek alapján érdemes lehet további vizsgálatokat végezni, s szükség szerint a szabályozást felülvizsgálni.

A beáztatott adalékanyag által bevitt többletvíz mennyisége miatt a keverék tényleges v/c tényezője meghaladta az *MSZ 4798:2016 E2-es táblázat* szerint megengedett maximális (0,50) v/c tényező értékét. Viszont nem lépte túl a szabvány frissbeton átadás-átvételénél megengedett 0,02-os maximális eltérést.

A szilikapor II.-es típusú kötőanyagként k-tényezővel beszámítható a víz/kötőanyag tényezőbe, segítve a beáztatott adalékanyaggal bevitt többletvíz miatt megengedett v/c tényező határértéken belül maradásában.

5. Újrahasznosított beton készítésének karbonlábnyom számítása, alkalmazásának költségelemzése

Számításokkal megállapítottam, hogy az újrahasznosított adalékanyaggal készült betonok előállítása nem befolyásolja kedvezőtlenül a beton karbon-lábnyomát és az előállítás költségét, mint egy hagyományos értelemben vett természetes adalékanyaggal készített beton. Azonban ezen jellemzők jelentősen függenek az újrahasznosítás módjától és felhasználási helytől mért távolságtól.

Paraméter érzékenység: Az általam készített receptúrákat vizsgálva az ICE kalkulátorral, az újrahasznosított adalékanyag mennyiségének függvényében igazoltam, hogy a cement, illetve a keverővíz és a vegyszer mennyiségének változtatása befolyásolja a beépített karbon értékét. További kutatási terület, hogy a cementek kiegészítőanyag tartalmának növelésével, hogyan érhető el a szilárdságtartás és ezzel párhuzamosan a cement mennyiségét milyen módon lehet optimalizálni.

Fontosnak tartom a jövőben megvizsgálni további betonösszetételek (több különböző forrásból származó újrahasznosított adalékanyag, speciális adalékszerek használata egy azonos összetételű esetén bekövetkező lehetséges károsodásokat és a károsodások mértékét, újrahasznosított betonok tartósságát, kúszásra gyakorolt hatását. Elősegítve ezzel az iparban való használhatóságát és az arra való ösztönzést. Fontosnak tartom megemlíteni, hogy jelenleg jelentős többletköltséget eredményeznek az előzetes vizsgálatok, melyek a felhasználhatóság feltételei. Mindemellett fontosnak tartom megvizsgálni, hogy az újrahasznosított adalékanyagok zsugorodása, rugalmassági modulusa, kúszása miként fokozható például szálak, másodlagos kiegészítő adalékanyagok adagolásával. Van-e esetleg lehetőség a természetes adalékanyagú betonokéval közel azonos jellemzők, illetve költségeit tekintve ennek gazdasági szempontból van-e realitása?

Vízáró szerkezeti beton újrahasznosított adalékanyag felhasználásával

Összefoglalás									
Recept neve [Keverék]	Újrahasznosított adalékanyag	Konzisztencia eltartósság [perc]	Nyomó szilárdság [N/mm ²]	Vízbehatalási mélység [mm]	Vízárósság	Számtolt hatékony V/C tényező	Karbonlábnym [CO ₂ kg/betonm ³]	Költség [Ft]	Megjegyzés
MIX REF-1		120	51,4	12	XV/3(H)	0,49	443	20 952	Kiváló frissbeton paraméterek, jó nyomószilárdsági értékek (7 és 28 nap); jó vízáróssági értékek. Kiváló konzisztencia eltartóssági paraméterek
MIX REF-2(+D)		120	62,3	11	XV/3(H)	0,45	444	45 952	Kiváló frissbeton paraméterek, átlag feletti nyomószilárdsági értékek (7 és 28 nap); jó vízáróssági értékek. Kiváló konzisztencia eltartóssági paraméterek
MIX REC-1(15)	száraz	20	52,2	15	XV/3(H)	0,46	445	19 113	Gyenge frissbeton paraméterek (konzisztencia eltartósság); jó nyomószilárdsági értékek, stabilizáló adalékszer adagolás.
	beáztatott	46	47,9	12		0,52			
MIX REC-2(30)	száraz	20	57,4	15	XV/3(H)	0,44	445	18 916	Jobb frissbeton paraméterek, gyengébb szilárdsági érték (REC-1-száraz-hoz képest), magasabb vegyszer adagolás, jó vízáróssági paraméterek.
	beáztatott	45	45,0	14		0,51			
MIX REC-3(15m)	száraz	20	52,2	13	XV/3(H)	0,46	458	19 822	Gyenge frissbeton paraméterek, kiváló nyomószilárdsági értékek (7 és 28 nap); jó vízáróssági értékek, emelt cement és víz mennyiségek. Induló konzisztencia 650+.
	beáztatott	60	47,3	9		0,51			
MIX REC-4(30m)	száraz	20	54,4	14		0,44	460	19 625	Jó frissbeton paraméterek, magasabb cement és víz adagolás, alacsonyabb vízbehatalási és nyomószilárdsági értékek, magasabb vegyszeradagolás. Nagyobb technológiai figyelmet igényel gyártás és mikroszálítás esetén.
	beáztatott	65	45,8	16		0,55			
MIX REC-5(15m+D)	száraz	20	55,6	11	XV/3(H)	0,44	461	44 822	Gyenge frissbeton paraméterek, kiváló nyomószilárdsági értékek (7 és 28 nap); kiváló vízáróssági értékek. Szilikapor adagolás növeli a fajlagos költséget. Magasabb vegyszer adagolás.
	beáztatott	57	52,8	15		0,48			
MIX REC-6(30m+D)	száraz	20	59,3	11	XV/3(H)	0,42	461	44 625	Gyenge frissbeton paraméterek, kiváló nyomószilárdsági értékek (7 és 28 nap); kiváló vízáróssági értékek. Magasabb vegyszer adagolás.
	beáztatott	68	52,1	15		0,51			

6.1. táblázat: Kutatási eredményeket összefoglaló táblázat [saját vizsgálatok alapján] [23. sz.

melléklet]