



TDK dolgozat

Könnyűbetonok fagyállósági vizsgálatai különböző mérési módszerekkel

**Testing of frost resistance of lightweight aggregate concrete with several
methods**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Készítette: Hajós Jácint, Mészáros Dávid
Konzulens: Dr. Fenyvesi Olivér, Szijártó Anna

2019

Tartalomjegyzék

1. Irodalomkutatás	5
1.1. A könnyű adalékanyag általános jellemzői.....	5
1.2. Könnnyűbetonok jellemzői.....	7
1.3. Könnnyűbetonok összetételének meghatározása	9
1.4. Nagyteljesítőképességű könnnyűbetonok	11
1.5. Könnnyűbetonok tartóssága	11
1.6. Zsugorodás	12
2. Vizsgálatok.....	14
2.1. Nyomószilárdság vizsgálat.....	14
2.2. Bemérítéses fagyasztás	15
2.3. Peremes fagyhámlás	17
2.4. Keverékek	19
3. Eredmények.....	20
3.1. Nyomószilárdság	20
3.2. Bemérítéses fagyasztás	21
3.2.1. „A” keverék.....	21
3.2.2. „B” keverék.....	22
3.2.3. „C és D” keverék	23
3.3. Peremes lehámlás vizsgálat.....	23
3.4. „A” keverék.....	23
3.4.1. „B” keverék.....	25
3.4.2. „C” keverék.....	27
3.4.3. „D” keverék.....	29
4. Összefoglalás	31
5. Hivatkozások.....	33

Összefoglaló

Hídszerkezetek építéséhez a korábbi szabványok Magyarországon nem tették lehetővé könnyűbetonok felhasználását azok kis szilárdsága miatt, azonban az önsúlycsökkentés érdekében alkalmazásuk előnyös lehet. Az új szabvány megjelenésével párhuzamosan kutatások indultak a hídszerkezeti könnyűbetonok megfelelő anyagjellemzőinek elérése céljából, amelybe az Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriuma is bekapcsolódott. A szilárdság mellett az egyik legfontosabb anyagjellemző a faggyal szembeni ellenállás, kiváltképpen a magyarországi éghajlatra való tekintettel. Ebből kiindulva született a tudományos diákköri munkánk témája, amelyben különböző könnyűbeton összetételeket vizsgáltunk meg fagyállóság szempontjából, több fajta szabványos és nem szabványos kísérleti módszerrel.

A kutatás során négyfajta, megfelelő nyomószilárdsággal rendelkező betonösszetételt kevertük meg, amelyek könnyű adalékanyagot, úgynevezett duzzasztott agyagkavicsot tartalmaztak különböző adagolással.

A fagyállóságot két különböző módszerrel vizsgáltuk a 150mm élhosszúságú próbatesteket bemerítéses fagyasztással és a 100mm élhosszúságú próbatesteket peremes lehámlással vizsgáltuk. Bemerítéses fagyasztás esetén 50 cikluson keresztül történt a fagyasztás normál és 3m%-os sós (NaCl) vizes közegben. A peremes lehámlás vizsgálat 56 ciklus hosszan tartott, amely során 3m%-os sós (NaCl) vízzel árasztottuk el a próbatestek vágott, illetve zsaluzott felületét.

A különböző vizsgálati eljárásokkal kapott mérési eredményeket összehasonlítottuk és értékeltük. A vizsgálatok eredményei nagyban elősegítik a könnyűbetonok kutatását, újabb kérdéseket és irányokat felvetve. Lehetőséget adnak jövőbeni kísérletek elvégzésére és újfajta könnyűbeton-összetételek tervezésére, amelyekkel akár elérhetővé válhatnak nagyobb fesztávú és karcsúbb hídszerkezetek is.

Summary

In the construction of bridge structure elements, the previous standards in Hungary did not allow the use of lightweight concrete because of its low strength, but their use for weight reduction may be advantageous. In parallel with the release of new standard, research has begun on the appropriate material properties of lightweight aggregate concrete in bridge structures in which the Materials Testing Laboratory of the Department of Construction Materials and Technologies could take part as well. In addition to the strength, one of the most important material property is frost resistance, especially under the Hungarian weather. Thus this was the starting point for our research project, in which we investigated various lightweight aggregate concrete mixes using several standard and non-standard test methods for frost resistance.

During the research, four types of concrete mixes have been fabricated with adequate compressive strength, containing one type of lightweight aggregate - so-called expanded clay aggregate - in different dosages. The frost resistance was tested with two different methods, freeze and thaw test on the whole cube (150×150×150 mm) and on one surface of the cube (50×50×50 mm). In the first method, freezing was performed for 50 cycles in both normal and 3m% saline (NaCl) aqueous media. The second test lasted for 56 cycles, and the cut and shuttered surfaces of the specimens were flooded with 3m% saline (NaCl) water.

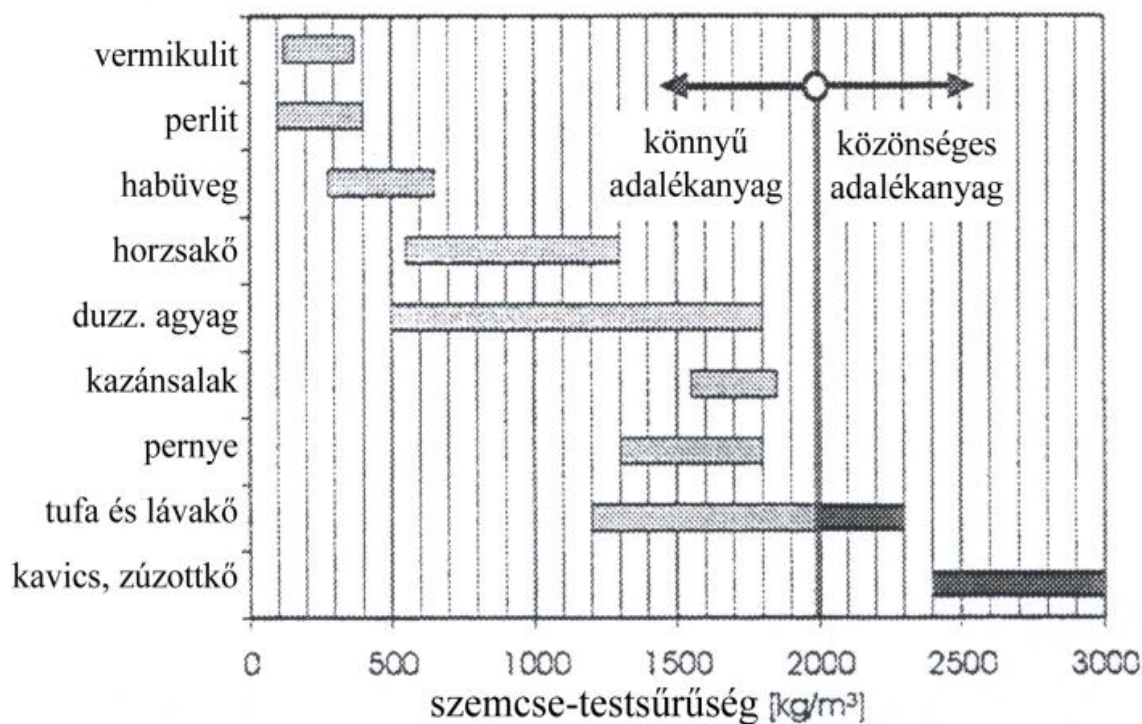
The measurement results of the methods were compared and evaluated. The results of the examinations significantly facilitate the research of lightweight aggregate concrete, raising new questions and directions. They provide the opportunity for future experiments and new designs for lightweight aggregate concrete compositions that could make larger spans and slimmer bridge structures possible.

1. Irodalomkutatás

1.1. A könnyű adalékanyag általános jellemzői

A könnyű adalékanyagokkal szemben támasztott követelmények és azok vizsgálati módszerei részben eltérnek a hagyományos adalékanyagokétól. Az európai betonszabványhoz (MSZ EN 206:2000, MSZ 4798 :2016) már tartozik könnyű adalékanyag szabvány is, az MSZ EN 13055-1:2002, amely tárgyalja a könnyű adalékanyagok vizsgálatát is. A hagyományos adalékanyagok követelményei mellett megjelennek a halmaz- ($< 1200 \text{ kg/m}^3$) és a szemcse-testsűrűség ($< 2000 \text{ kg/m}^3$) határok is (mindemellett a Betonkalender 2005, általános ajánlása szerint a szemcse-testsűrűség legyen 1500 kg/m^3 alatt) (Bergmeister, Wörner, 2005).

A legfontosabb könnyű adalékanyagok alkalmazhatósági tartományát az 1. ábra, fő tömegeloszlási jellemzőit pedig az 1. táblázat tartalmazza.



1. ábra: A könnyű és a szokványos szemcse-testsűrűségű adalékanyagok alkalmazhatósági tartományai (Faust, 2000)

1. táblázat: A fontosabb könnyű adalékanyagok fő jellemzői (Bölcskei - Dulácska, 1974; Faust, 2000; Kausay, 2002; Neunast, Lange, 2001; Reinhardt, 1993; Ujhelyi, 1995; Nemes, 2006)

adalékanyag fajta	halmazsűrűség [kg/m³]	szemcse- testsűrűség [kg/m³]	anyagsűrűség [kg/m³]	átlagos szemcseporozitás [%]
tufa		800-1900	2500-2800	32-68
lávasalak	650-950	1200-2200	n.a.	n.a.
vermikulit	100-300	100-300	2500-2700	72-87
horzsakó	300-500	400-700	~2500	72-84
kazánsalak	550-850	1600-1900	n.a.	n.a.
duzzasztott agyagkavics	300-1000	650-1600	2500-2600	38-74
habüveg	100-1000	300-2200	2050-2450	35-85
tégla- és cseréptörmelék	800-1250	1700-1900	2500-2700	30-32
duzzasztott perlit	50-120	300-600	2300-2500	76-87
duzzasztott kohósalak	680-900	1000-1900	2900-3000	37-65
duzzasztott polisztirol	20-50	~100	~1000	90

A táblázatban felsorolt könnyű adalékanyagok közül napjaink elvárásainak megfelelő, teherhordó könnyűbeton szerkezet szinte kizárólag duzzasztott agyagkavics adalékanyaggal készül (fib, 2000), ezért a vizsgálatokat is elsősorban ezzel végzik napjainkban. Ezek következtében az újabb ajánlások és szabványok gyakorlatilag az agyagkavicsos betonokra érvényesek. Korábban készült szerkezeti beton duzzasztott kohósalakból (B70-B200 szilárdsági osztályban) de azok a mai szerkezeti beton követelményeinek nem felelnek meg (maximum C16-ig) (Ujhelyi, 1959).

A könnyű adalékanyagok alkalmazása esetén az adalékanyagok nagy porozitása miatti nagy vízfelvevő képesség okozza gyakorlati szempontból az egyik nehézséget, elsősorban a kivitelezés során. Kiküszöbölésének egyik lehetséges megoldási módja, a könnyű adalékanyag szemcsék cementpéppel való előzetes bevonása, és ezzel az adalékanyag pórusainak lezárása, az úgynevezett „drazsézás” (Müller, Linsel, Garrecht, Wagner, Thienel, 2000). Ez azonban egy külön technológiai lépést jelent, ami idő és költségigényes. További lehetőség, az adalékanyag előzetes vízzel való telítése, amely azonban kellő precizitás hiányában minőségi problémákat okozhat. A leggyakrabban alkalmazott mód a 0,5-1 órás vízfelvétel alapján meghatározott többletvízzel való előkeverés az adalékanyag szemek telítése céljából.

1.2. Könnnyűbetonok jellemzői

Adalékanyagos könnyűbetonok esetén is, mint a szokványos betonoknál, a legfontosabb és egyben a minősítés alapjául szolgáló mechanikai jellemző a nyomószilárdság, de ezen túlmenően követelmény a testsűrűség is. A különböző szabványok némiképp eltérően definiálják a könnyűbetonok fogalmát és követelményeit.

Az európai betonszabvány, az EN 206-1:2013 és ennek nemzeti alkalmazási dokumentummal egybeszerkesztett változata, az MSZ 4798-1:2016 szabvány könnyűbetonnak azt a 800 kg/m^3 -nél nem kisebb és 2000 kg/m^3 -nél nem nagyobb testsűrűségű betont nevezi, amelyet részben vagy teljes egészében könnyű adalékanyaggal készítenek. Ez a szabvány nem vonatkozik az egyszemcsés betonra és a sejt-, hab-, illetve pórusbetonra, és a 800 kg/m^3 -nél kisebb testsűrűségű könnyűbetonokra. Korábbi szabványok pl. DIN 4028:2004, 600 kg/m^3 -ben jelölték meg az alsó határt, hasonlóan a MÉÁSZ ME-04.19-hez, 1995. Könnnyű adalékanyagnak azt az adalékanyagot tekintik, amelynek kiszárított állapotában az EN 1097-6:2000 szabvány 6. része szerint megállapított szemcse-testsűrűsége $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$, vagy kiszárított állapotában az MSZ EN 1097-3:2000 szabvány 3. része szerint meghatározott laza halmazsűrűsége $\leq 1200 \text{ kg/m}^3$. A méretezési szabványok és ajánlások, amelyek kitérnek a könnyűbetonokra, egységesen a 2200 kg/m^3 alatti testsűrűségű betonokat tekintik könnyűbetonnak.

A szilárdságvizsgálatok végrehajtása, a szokásos vizsgálati kor és a próbatestek mérete adalékanyagos könnyűbeton esetén megegyezik a hagyományos adalékanyagú betonok esetén alkalmazottakkal. A különböző alakú és méretű próbatestek és tárolási mód közötti szabványos átszámítási módszerek azonban nem érvényesek a könnyűbetonokra, a szabványos hengerkocka átszámításon kívül az adott esetre mindig laborkísérletet kell végezni. A próbatest méretének hatása különösen az öntött (nem pedig kész anyagból kivágott) próbatestek esetén jelentős. Közönséges betonok esetén minél nagyobb a próbakockák élhossza, annál kisebb lesz – azonos betonminőség esetén – a beton mért szilárdsága (Rudnai, 1966).

Adalékanyagok könnyűbetonoknál viszont pont az ellenkezőjét tapasztalták a kutatók, nagyobb élhosszúság esetén mértek nagyobb szilárdságot (1. táblázat).

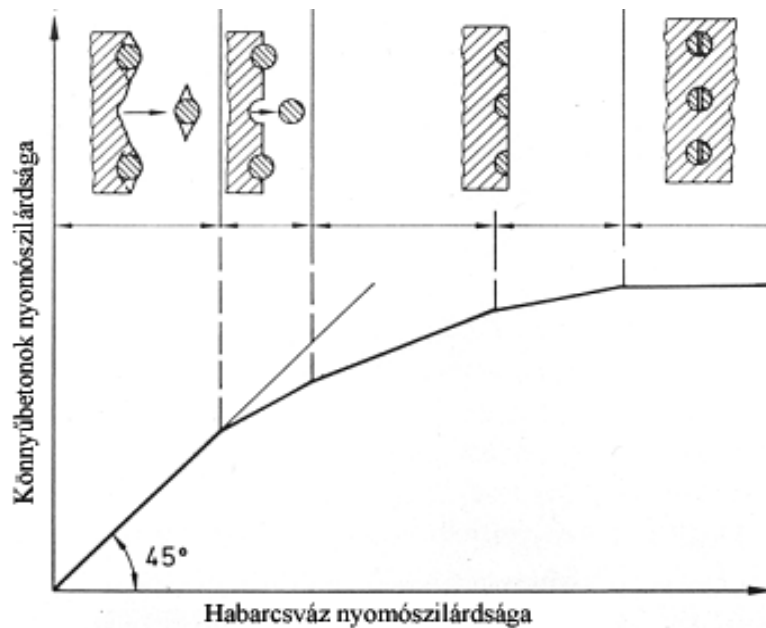
1. táblázat: A próbatestek mérethatása könnyű-adalékanyagok esetén

[Hamann, 1953; Ujhelyi, 1959 alapján]

A próbakocka élhossza [mm]	Nyomószilárdság [N/mm ²]		
	Horzsakő beton (Hamann szerint)	Kohóhabsalak beton (Hamann szerint)	Kohóhabsalak beton (Ujhelyi szerint)
100	3,90	3,08	1,61
150	4,49	3,44	-
200	4,70	3,80	1,85
300	-	-	1,96

A beton húzószilárdságát jelentősen befolyásolja az adalékanyag felületének érdessége és porozitása, mivel ez javítja az adalékanyag-cementkő együttdolgozását. Azonos nyomószilárdság esetén a könnyűbetonokon rendszerint kisebb húzószilárdságot mértek, a szokványos betonokhoz képest. A számítások során ezért csökkentő tényező figyelembevételét írják elő a szabványok, ha a húzószilárdságot nem közvetlen méréssel határozzák meg, hanem a nyomószilárdság alapján becsülik.

Az adalékanyag – cementkőváz heterogén rendszerben a leggyengébb összetevő tönkremenetele a teljes anyag tönkremenetelét okozza. Közönséges betonok esetén a repedések a cementkőben futnak, vagy a kvarckavics adalékanyag szemcsék fordulnak ki a cementkővázból. A kavicsok kifordulása olyan összetételek esetén fordul elő, ahol az adalékanyag szilárdsága és merevsége nagyobb a cementkő merevségénél. Könnyű adalékanyagok esetén is lehetséges ez a tönkremenetel, de általában csak a korai törésekre jellemző, ahol a cementkőváz még nem érte el a tervezett szilárdságot. Könnyű adalékanyag alkalmazása esetén a tönkremenetel leggyakrabban az adalékanyag szemcsék törésével következik be. Optimális összetétel esetén, amikor mind az adalékanyag, mind a cementkőváz szilárdságát kihasználjuk, a trajektóriák, majd a repedések mind a cementkővázon, mind az adalékanyag keresztlfutnak. A cementkőváz szilárdságának és a könnyűbeton szilárdságának arányában a lehetséges tönkremeneteli módokat a 2. ábra foglalja össze.



2. ábra: A tönkremenetek lehetséges módjainak modellje könnyűbetonok esetén Gröbl szerint (Gröbl, 1979; Laister, 2000)

1.3. Könnnyűbetonok összetételének meghatározása

A könnyűbetonok tervezése során figyelembe kell venni néhány igen fontos szempontot, amely eltér a szokványos betonokétól. A legfontosabb különbség, hogy míg a szokványos betonoknál a tervezés kiinduló alapadata a megkívánt szilárdság értéke, addig könnyűbetonok esetén a szilárdság mellett – mint ahogy már említettük – párhuzamos követelményként megjelenik a testsűrűség is, és ennek a kettőnek az optimalizálása a fő feladat. A beton szilárdsága a cementkő és az adalékanyag szilárdságának térfogatarányos összegével közelíthető (Ujhelyi, 1995):

$$f_{cL} = (f_a \cdot V_a + f_c \cdot V_h) / (V_a + V_c)$$

ahol: f_c a habarcs szilárdsága, amely függ

- a cement típusától
- a cement mennyiségétől
- a víz-cement tényezőtől

f_a az adalékanyag szilárdsága

V_c a habarcs mennyisége a betonban

V_a az adalékanyag mennyisége a betonban

$$\rho_{lc} = (\rho_a \cdot V_a + \rho_c \cdot V_c)$$

ahol: ρ_{lc} a könnyűbeton testsűrűsége

ρ_a az adalékanyag szemcse-testsűrűsége

ρ_c a habarcs testsűrűsége

V_c a habarcs mennyisége a betonban

V_a az adalékanyag mennyisége a betonban.

Szokványos betonok esetén a szilárdságot befolyásoló legfontosabb tényezőnek a víz-cement tényezőt tekintik. Nem szabad viszont megfeledkezni arról, hogy a nyomószilárdságot alapvetően az adalékanyag-váz adja, ami a szemmegoszlás helyes megválasztásával érhető el. Az adalékanyag-váz helyes megválasztása és megfelelő tömörítés esetén valóban a víz-cement tényező adja meg az elérhető szilárdság korlátait. Ha azonban eltérünk a szokásos kvarckavics (vagy zúzottkő) adalékanyagtól, akkor az adalékanyag szilárdsága és mennyisége is döntő lesz (Nemes, 2006).

A víz-cement tényező hatása azonos mindkét betonfajta esetében, de a könnyű adalékanyagok kisebb szilárdsága és kisebb alkalmazott mennyisége (térfogataránya) miatt a cementpép jellemzőinek jelentősége a könnyűbetonok esetén nagyobb; ezért mind szilárdsági, mind tartóssági szempontból különösen ügyelni kell az alacsony víz-cement tényező megválasztására. Az adalékanyag megválasztásakor el kell dönteni, hogy a homokfrakció is könnyű adalékanyag legyen-e vagy hagyományos kvarchomok. Ha az alkalmazott adalékanyagok szemcse-testsűrűsége eltérő, a szemmegoszlási görbe készítésekor nem alkalmazható a hagyományos tömegszázalékos számítás, az adalékanyagok térfogatszázalékos ábrázolása szükséges (Nemes, 2006).

1.4. Nagyteljesítőképességű könnyűbetonok

Napjainkban a könnyűbetonokkal szemben is egyre több követelményt támasztunk a szokványos betonokhoz hasonlóan. A szilárdság mellett a tartóssági követelmények, mint például fagyállóság, vízzáróság, kloridion-behatolással vagy a karbonátosodással szembeni ellenállás is felmerülnek. Egyre nagyobb szerepet kap a könnyűbetonoknál is a nagy teljesítőképesség. A legtöbb kutatás a kiegészítő anyagok alkalmazhatóságáról, az egyes kiegészítő anyagok hatásáról és mennyiségének optimalizálásáról készült. (Gao, X.F., Lob, Y.T., Tam, 2002)

1.5. Könnnyűbetonok tartóssága

Az európai betonszabvány (MSZ EN 206-1:2016) és annak a nemzeti alkalmazási dokumentummal egybeszerkesztett magyar változata (MSZ 4798-1:2018) a különböző környezeti osztályokhoz előírja többek között a minimális cementtartalom és maximális víz-cement tényező mellett a minimális szilárdságot is. Az előírt minimális szilárdsági osztály azonban csak hagyományos (kvarckavicsos, zúzottköves) betonok esetén értelmezhető (C jelű betonok). A könnyűbetonok a szilárdság szempontjából külön kategóriát jelentenek, mivel a tartósságot elsősorban a tömör cementkőváz biztosítja, míg a szilárdságot többnyire az adalékanyag határozza meg. Kis testsűrűségű, kis szilárdságú könnyű adalékanyaggal is készíthető jó tartóssági jellemzőkkel rendelkező beton (kivéve a kopásállósági követelményt, ahol az adalékanyag kopásállósága meghatározó).

A könnyűbetonok agresszív környezettel szembeni ellenállására nagyon kevés vizsgálati adat ismeretes. Az adalékanyagos könnyűbeton zárt cementkőváza miatt éppen olyan vízzáró, mint a közönséges beton, ha a víz-cement tényező és a hidratációs fok megegyezik. (Liu, Chia, Zhang, 2010)

A CO₂ behatolás a durva könnyű adalékanyag szemcsékben nagyobb mértékű lehet, ezért a minimális betonfedésnek könnyűbetonok esetén XC1 környezeti osztálytól kezdve legalább 5 mm-rel nagyobbak kell lennie, mint a maximális szemnagyság (DIN 1045-1). Ez általában nem jelent szigorú feltételt, mivel a szerkezeti könnyűbetonok maximális szemnagysága, ritkán haladja meg a 16 mm-t, a 20-25 mm-es betonfedést pedig már viszonylag alacsony fokú környezeti hatások esetén is előírja a szabvány.

A könnyűbeton fagyállósága akkor jó, ha maga az adalékanyag is fagyálló (Erdélyi, 1994). A jégolvasztó sózással szembeni ellenállása a nagy pórustartalmú

adalékanyagokkal készült betonoknak kedvezőbb, mint a kvarckavics adalékanyagoké. (Kanadában például finom téglazúzalék bekeverésével helyettesítették a légpórusképzőt (Erdélyi, 1997).)

A beton nedvességtartalma és vízfelvétele nagymértékben befolyásolja a szerkezet tartósságát, mivel a legtöbb károsító anyag (pl. klorid, szulfát, stb.) vízzel jut a betonba. Ezen kívül a korróziót okozó reakciók (pl. elektrolitikus korrózió) végbemeneteléhez is vízre van szükség. A könnyűbetonok porozitása nagyobb, mint a hagyományos betonoké, ezért nedvességtartalma légszáraz állapotban is nagyobb lehet, ami tartósság szempontjából kedvezőtlen, ennek számszerű ismerete célszerű.

1.6. Zsugorodás

A megszilárdult cementkő háromféle módon tartalmazhat vizet: a kémiailag kötött vizet (szokásos körülmények között megtartja), a fizikailag kötött vizet (ennek elvesztése kis méretváltozást okoz, és időben lassan lejátszódó folyamat) és kapilláris vizet (ami a környezet relatív nedvességtartalmának vagy vízfelszívásának függvényében élettartama folyamán folyamatosan változik és alakváltozást okoz) (Balázs, 1994).

A gátolt korai zsugorodás repedéseket okozhat, ami alkalmatlanná teszi a betont néhány esetben (pl. vízzáró szerkezet) és csökkenti az élettartamát. A kis zsugorodás elérése betontechnológiai (betontervezési, bedolgozási és utókezelési) kérdés, ehhez azonban ismerni kell, hogy milyen eltérésekre lehet számítani könnyűbeton esetén a közönséges betonokhoz képest.

A szakirodalom a könnyűbetonok zsugorodása esetén rendkívül különböző eredményekről számol be. Vannak a közönséges betonnál kisebb és annál nagyobb zsugorodási értékek is.

Általánosságban a könnyűbetonok zsugorodása nagyobb, mint a hagyományos, kvarckavics adalékanyagoké. Ez két okra vezethető vissza. A legtöbb adalékanyag gyakorlatilag nem zsugorodik, tehát a betonban a zsugorodás a cementkő zsugorodásából adódik, így elsősorban ennek zsugorodása és aránya a meghatározó. Míg a hagyományos adalékanyagoké betonoknál a szilárdság szempontjából rendszerint a péptelített beton az optimális, addig a könnyűbetonoknál túltelített betonra van szükségünk az eltérő teherviselési mód miatt. Ennek következtében a cementkő térfogataránya, így a zsugorodás is nagyobb a betonban.

Az adalékanyag akadályozza a cementkőváz zsugorodását. Ennek mértéke az adalékanyag merevségétől függ. A könnyű adalékanyagok szilárdsága és merevsége jelentősen kisebb, mint a kvarckavicsé, tehát ez az akadályozó hatás kisebb. A zsugorodást befolyásolja még az adalékanyag víztároló képessége és a vízvesztés „sebessége” is.

A könnyű adalékanyag vízfelvevő képessége sok esetben hátrányos, de a zsugorodás szempontjából ez éppen előnyös, a „hosszan tárolt víz” úgynevezett „belső utókezelő hatása” miatt.

2. Vizsgálatok

A TDK munkánk egy nagyobb projekt kisebb részét képezi, ezért a vizsgálatok egyik részéből, azaz a nyomószilárdság méréséből már készült egy diplomamunka. Az általunk elvégzett vizsgálatok kiértékeléséhez és megértéséhez szükségünk volt ezekre az eredményekre, ezért jelen dolgozat is tartalmazza azokat. A projekt során két fajta, különböző méretű kockát készítettünk a különféle vizsgálatok elvégzéséhez. A 150 mm élhosszúságú próbakockákat nyomószilárdság és bemelegítési fagyasztás kísérletekhez, a 100 mm élhosszúságú próbatesteket pedig peremes lehámlás vizsgálathoz készítettük. A próbakockákat 28 napos korukban kezdtük el vizsgálni, és helyeztük el a különböző vizsgálatokhoz szükséges megfelelő közegekben.

2.1. Nyomószilárdság vizsgálat

Nyomószilárdság meghatározásához minden külön keverékből 3 darab, szabványosan elkészített, vegyesen tárolt, 150×150×150 mm élhosszúságú próbakockát készítettünk.

Az MSZ EN 12390-3:2009 szabvány előírása alapján, a próbakockákat bedolgozási felületükre merőleges irányban, 11,25 kN/s terhelési sebességgel terheltük egy FORM+TEST típusú, hidraulikus, 3000 kN maximális törőerejű, erővezérelt terhelő berendezéssel (3. ábra). A kiértékelésnél a kapott eredmények átlagait vettük figyelembe.



3. ábra: Form+Test típusú törőgép

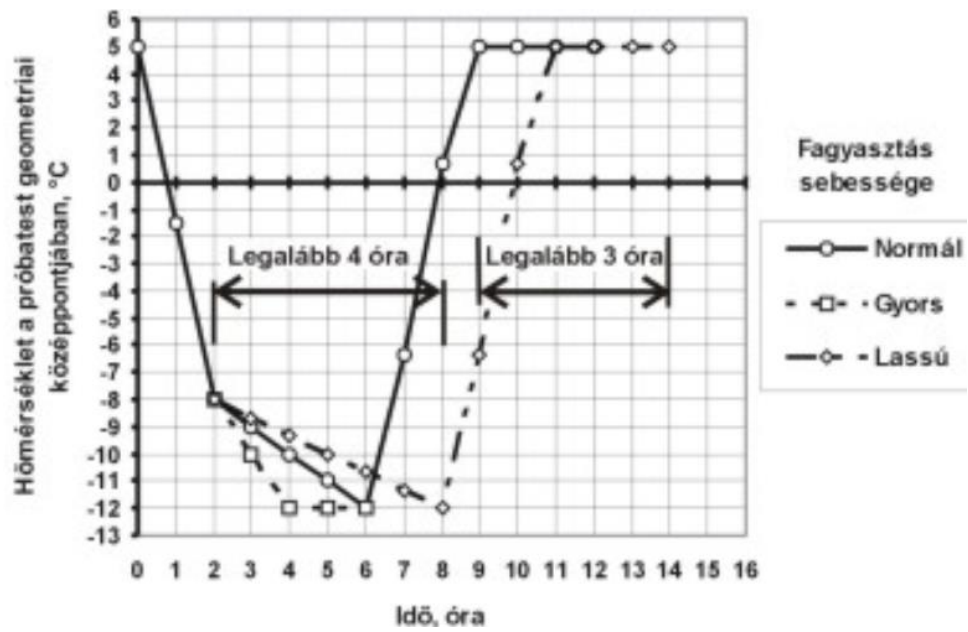
2.2. *Bemerítéses fagyasztás*

A beton belső fagykárosodással szembeni ellenállását bemerítéses fagyállósági vizsgálattal mértük. A vizsgálatokat az MSZ CEN/TS 1230-9 szabványnak megfelelően végeztük. A vizsgálatokat 150 mm élhosszúságú kocka alakú próbatesteken hajtottuk végre, 28 napos kortól kezdve. A beton belsejébe jutó víz fagyása esetén 9 V%-os térfogatnövekedés áll fent. A fagyás kezdetekor a már megfagyott víz a térfogatnövekedés hatására tolni kezdi a még meg nem fagyott vizet a még nem telítődött pórusok felé. Nem megfelelő méretű pórusok esetén nincs elegendő tér a tágulásra, ezért a betonszerkezet belülről egy plusz feszültséget kap, mely meghaladja a beton húzószilárdságát ezáltal mikrorepedéseket okozva. 50 fagyási ciklus után a beton duzzadása elérheti a 0,4 mm/m-t (Kausay, 2010).

A vizsgálathoz felhasznált próbatesteket két csoportra osztottuk. A fagyasztásra szánt próbatesteket 26 napos korukban szárazon lemértük, majd 28 napos korukban vízzel telített állapotban is. Ezután kerültek a fagyasztóba a 4. ábra alapján. A fagyasztó berendezés a mintákat ciklikusan fagyasztásnak és olvasztásnak tette ki. Az olvasztási idő alatt a kockák 3m%-os NaCl oldatba kerültek. A ciklusszámok lejáta után a fagyasztóból kivett próbatesteket minimum 72 óráig laborhőmérsékletű vízbe helyeztük át, ezzel kiküszöbölve azt, hogy a próbatestek fagyott állapotban legyenek a töréskor.

A második csoportot az etalonok képezték, ezek a próbakockák nem kerültek be a fagyasztó tartályba az első csoporttal ellentétben. A rendelkezésünkre álló próbatestekből az adalékanyag véges mennyisége miatt nem tudtunk megfelelő mennyiséget keverni, ezért etalon eredményként a 28 napos korban eltört próbatestek átlagos nyomószilárdságát vettük. Viszont ezeket a próbatesteket a fagyasztottakkal ellentétben száraz állapotban vizsgáltuk. Az MSZ EN 4798:2016 szabványban leírtak alapján a vízzel telített próbatestek nyomószilárdsági értéke 0,92-ed része a szárazon tört próbatestek értékének. Az eredmények kiértékelésénél ezt vettük figyelembe.

A vizsgálatot az 5. ábrán látható fagyasztógépben végeztük A berendezésbe egyszerre 40 próbakocka fér, és egy nap három ciklus elvégzésére képes.



4. ábra Merítéses vizsgálat fagyasztás-olvadás ciklus diagramja (Kausay, 2018.)



5. ábra: bal: próbatestek a bementéses fagyasztóberendezésben
jobb: bementéses fagyasztás vizsgálatnál használt automata vezérlésű berendezés

2.3. Peremes fagyhámlás

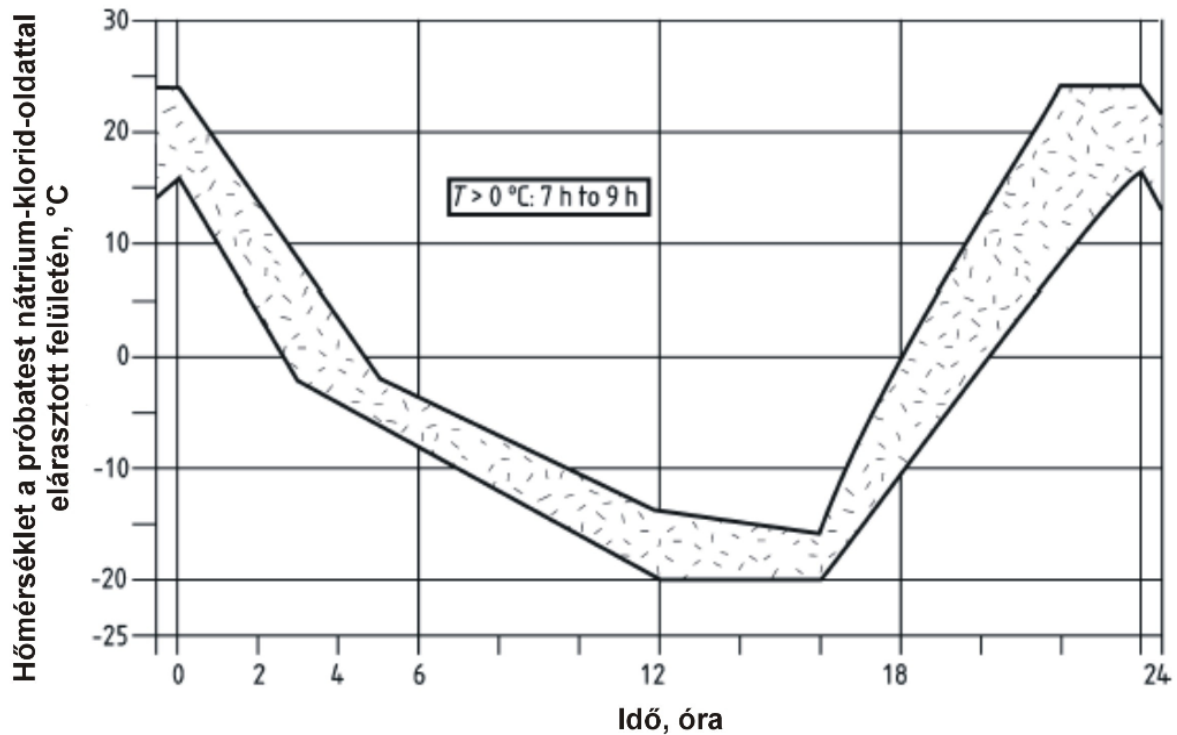
A beton felületi fagyhámlással szembeni ellenállását peremes hámlasztási vizsgálattal tettük próbára. A vizsgálatokat az MSZ CEN/TS 12390-9 szabványnak megfelelően végeztük el. A vizsgált próbatesteket próbakockákból alakítottuk ki 50×100×100 mm méretűre, melyeket 100mm élhosszúságú betonkockák félbevágásával kaptunk, így külön vizsgálhattuk az adott keverékek zsaluzott (sima), illetve vágott felületét. A vizsgált felületek határolóéleit 45°-os szögben lesarkítottuk.



6. ábra: bal: peremes fagyhámlásnál használt légkeveréses fagyasztóberendezés
jobb: próbatestek félbevágására és lesarkítására használt vágóberendezés

A kialakított próbatesteknek azon oldalaira, amiket nem vizsgáltunk, Palmatex ragasztóval gumilapokat erősítettünk, a 45°-os sarkítások mentén pedig vízhatlan szilikonnal szigeteltünk. Ezeknek a "kád"-szerű próbatesteknek a nem vizsgált oldalait hőszigetelő lapokkal óvtuk a vizsgálat során a lehűléstől. Ezek után a vizsgált 100×100 mm-es felületre desztillált vizet öntöttünk, hogy a pórusok telítődjenek. Miután telítődtek a pórusok 3m%-os NaCl oldattal árasztottuk el a felületet, és egy fólia segítségével lefedtük azt, hogy a vizsgálat során ne párologhasson el a felületről a sóoldat". A vizsgálatokat 28 napos korban kezdtük el.

A Slabtester típusú légkeveréses fagyasztóberendezésben 1db fagyasztás – olvasztás ciklus 24 óra alatt játszódik le. A 7. ábra mutatja a hőmérséklet változását egy ciklus alatt.



7. ábra: Hámlasztási vizsgálat fagyasztás-olvasztás ciklus diagram (Kausay, 2018.)

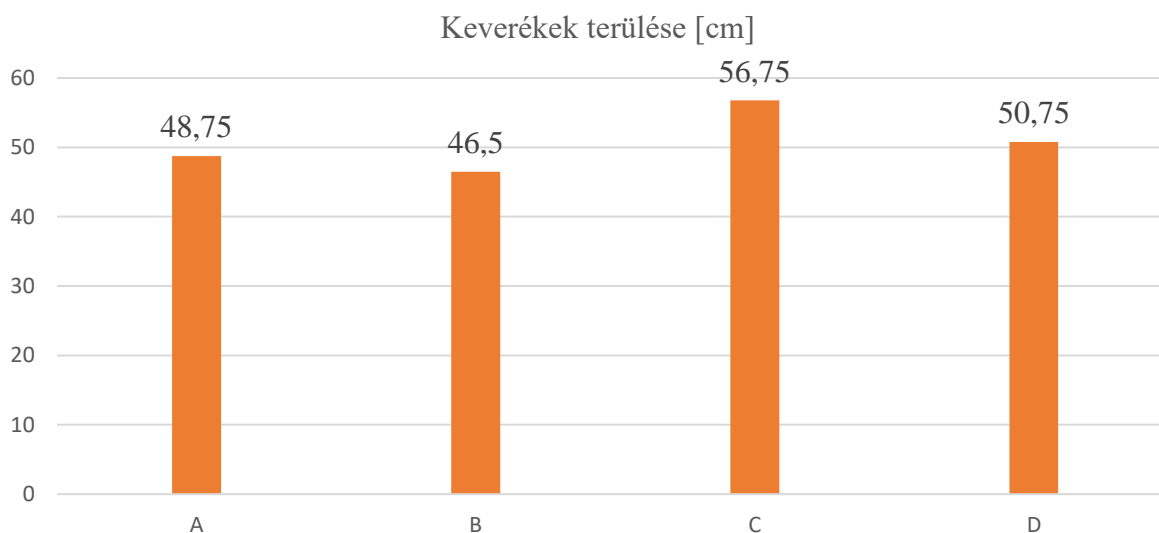
A próbatesteket 7, 14, 28, és 56 fagyás – olvadás ciklus letelte után kivettük a fagyasztóberendezésből, majd a felületükön "lehámlott" anyagot egy szűrőpapírban összegyűjtöttük, kiszárítottuk és lemértük. Az összes levált anyag mennyiségét g/m^2 -ben fejeztük ki az eredmények kiértékelhetőségének érdekében. A próbatesteken minden köztes mérési alkalom után újra felöntöttük a 3m%-os NaCl oldattal.

2.4. Keverékek

A TDK munkánk során 4 különböző könnyűbetont készítettünk. Az adalékanyag Liapor 7n típusú duzzasztott agyagkavics volt, valamint cement, homok, víz és folyósító adalékszer (Gelnium 300) felhasználásával készítettük a próbakockáinkat. Keverés után minden keveréken terülmérés vizsgálatot (MSZ 4714-3:1986, MSZ EN 206-1:2002) végeztünk a konzisztencia meghatározása érdekében. Ezt szabványos ejtőasztalon, csonkakúppal és csömöszlő rúddal végeztük. A keverést 4 percen keresztül végeztük, majd ha a konzisztenciája megfelelő volt, elkezdtek a zsalukba rétegesen 15-15 másodpercen át vibrálva bedolgozni. Így nagy szilárdságú könnyűbetonokat tudunk létrehozni. A keverékek összetételét a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Keverékek összetétele

Keverék jele	Könnyű adalékanyag mennyisége [kg/keverék]	Cement mennyiség [kg/keverék]	Homok mennyisége [kg/keverék]	Víz mennyisége [kg/keverék]	Adalékszer mennyisége [g/keverék]
A	32,43	25,30	41,45	8,804	125
B	32,43	27,50	42,17	6,628	172
C	40,14	27,83	37,61	9,684	127
D	36,49	27,50	33,38	8,250	138



3. *Eredmények*

A TDK munka során készített próbatesteken nyomószilárdsági, bemerítéses és peremes lehámlásos fagyasztási vizsgálatokat végeztünk el. Ezeknek az eredményeit mutatjuk be ebben a fejezetben.

3.1. *Nyomószilárdság*

28 napos korban megvizsgáltuk a nyomószilárdságot iránymutatásképp a további nyomószilárdság vizsgálatokhoz, amelyeket fagyasztás után végeztünk. Keverékenként két darab kockát törtünk.

4. táblázat: 28 napos nyomószilárdsági értékek

Próbatest jele	Tömeg [kg]	a [mm]	b [mm]	m [mm]	Testsűrűség [kg/m ³]	Nyomószilárdság [N/mm ²]
A5	6,476	149,9	152,8	150,1	1883,65	48,8
A6	6,434	150,0	151,6	150,1	1884,99	45,6
B5	6,666	149,9	151,2	149,9	1962,05	55,8
B6	6,532	149,9	151,5	149,9	1918,80	49,4
C5	6,393	149,8	152,5	149,6	1870,60	45,9
C6	6,344	149,8	153,0	149,8	1847,81	42,5
D5	6,650	149,9	149,7	150,2	1973,00	53,0
D6	6,419	150,2	148,1	150,1	1926,30	48,1

Ezen adatok alapján a keverékeink nyomószilárdsága megfelelő lenne a célunk eléréséhez, hídszerkezet építéséhez elegendően nagy szilárdságú könnyűbetont tudunk létrehozni.

3.2. Bemerítéses fagyasztás

3.2.1. „A” keverék

Bemerítéses fagyasztásban a 3m%-os sós víz hatására nem feleltek meg a kockáink, darabokra hullottak az 50 ciklus letelte előtt. A normál vizes fagyasztásban a kockák túléltek az 50 ciklust, amely után eltörtük azokat, így a következő adatokat kaptuk:

5. táblázat: „A” keverék sima vízbe való bemerítéses fagyasztása utáni eredményei

Próbatest jele	Méretek			Tömeg vizsg. előtt	Tömeg vizsg. után	Test-sűrűség	Törőerő	Nyomószilárdság egyedi értékek	Tömeg veszteség
	a	b	c						
	mm								
A1	150,3	150,2	151,0	6708	6689	1962	312	13,8	0,28
A2	150,2	150,2	150,3	6652	6637	1957	350	15,5	0,23
Átlag:						1960	331	14,7	0,25

Ezekkel összehasonlításképpen etalon kockákat is törtünk, melyek nem voltak fagyasztásban. Ezek a próbatestek száraz állapotban lettek eltörve, ezért 0,92-vel szorozva korrigáltuk a vízzel telítetthez képest a nyomószilárdsági eredményeket.

6. táblázat: „A” keverék etalon próbakocka adatai

Próbatest jele	Méretek			Tömeg vizsg. előtt	Tömeg vizsg. után	Test-sűrűség	Törőerő	Nyomószilárdság egyedi értékek
	a	b	c					
	mm							
A3	150,0	149,9	150,2	6405	6403	1896	1080,0	44,20
A4	149,9	152,8	150,1	6478	6476	1884	1117,0	44,87
Átlag:					6440	1890	1098,5	44,53

Összehasonlítás után láthatjuk, hogy a nyomószilárdság a fagyasztás után körülbelül az 1/3-ára csökkent, egészen pontosan 67,06%-os a nyomószilárdság csökkenése. Ez a keverék nem fagyálló, nem sorolható be egyetlen XF kategóriába sem (MSZ 4798-2016).

3.2.2. „B” keverék

Bemerítéses fagyasztásban a 3m%-os sós víz hatására nem felelt meg ez a keverék sem, darabokra hullott. A normál vizes fagyasztásban a kockák túléltek az 50 ciklust, valamint az összes keverék közül ez teljesített a legjobban. 50 ciklus lejártá után eltörtük a próbatesteket és a következő eredményt kaptuk:

7. táblázat: „B” keverék sima vízbe való bemerítéses fagyasztása utáni eredményei

Próbatest jele	Méretek			Tömeg vizsg. előtt	Tömeg vizsg. után	Test-sűrűség	Törőerő	Nyomószilárdság egyedi értékek	Tömeg veszteség
	a	b	c						
	mm								
B1	150,10	150,10	150,10	6770	6756	1998	812	36,0	0,21
B2	151,20	151,50	150,20	6759	6743	1960	547	23,9	0,24
Átlag:						1979	680	30,0	0,22

Az előző keverékhez hasonlóan ehhez is törtünk száraz etalon próbakockákat, így az itt kapott eredményeket is össze tudtuk hasonlítani a szükséges módon.

8. táblázat: „B” keverék etalon próbakocka adatai

Próbatest jele	Méretek			Tömeg vizsg. előtt	Tömeg vizsg. után	Test-sűrűség	Törőerő	Nyomószilárdság egyedi értékek
	a	b	c					
	mm							
B3	149,9	154,4	150,3	6577	6579	1891	1215	48,3
B4	149,9	151,2	149,9	6668	6666	1962	1264	51,3
Átlag:					6623	1927	1239	49,8

Összehasonlítás után észrevehető, hogy a nyomószilárdság ebben az esetben is csökken a fagyasztás után, körülbelül az 3/5 részére. A nyomószilárdságcsökkenés itt 39,84%-os, ami jelentősen kisebb, mint az A keverék esetén, de ez a keverék sem fagyálló.

3.2.3. „C és D” keverék

A C és D keverék esetén a próbatestek a normál és sós bemeztetéses fagyasztás vizsgálaton egyaránt nem feleltek meg. A próbakockák a fagyasztóberendezésben darabjaira hullottak, ezáltal nem tudunk nyomószilárdság vizsgálatot végezni ezeken a keverékeken az 50 ciklusos fagyasztás után.

3.3. Peremes lehámlás vizsgálat

3.4. „A” keverék

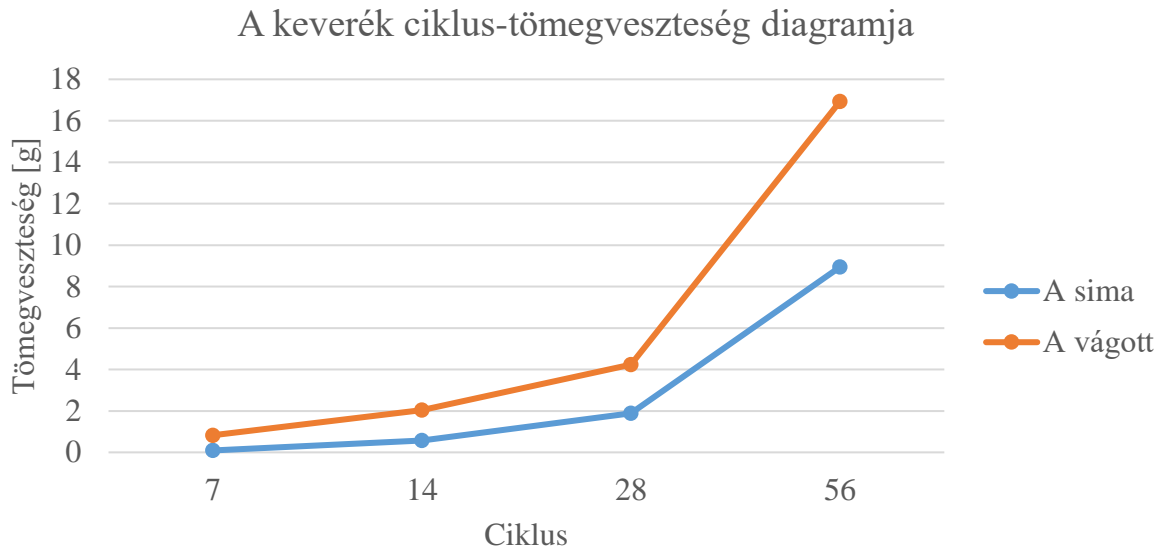
Peremes fagyhámlás vizsgálat után ezt a keveréket XF4-es osztályba lehet sorolni az MSZ 4798-2016-os szabvány szerint, ami azt mondja ki, hogy 56 ciklus után a levált anyag relatív tömege nem lehet több 1000 g/m²-nél. A zsaluzott (sima) felületen a 3 kocka átlagából 899,5 g/m²-es eredményt kaptunk.

A vágott felületen nem felel meg, mert még az XF2-es osztályba sem tudjuk besorolni, amely esetén 1500 g/m²-nél nem lehet nagyobb a levált anyag relatív tömege.

A következő táblázat és grafikon szemlélteti a bizonyos ciklusok után levált tömegeket mind a sima, mind a vágott felületeken.

9. táblázat: „A” keverék peremes fagyhámlás eredményei

Próbatest jele	Méretek		Vizsgált felület nagysága	Eltelt ciklusok száma				Levált anyag relatív tömege 56 ciklus után
				nap				
	a	b		7	14	28	56	
	mm			mm ²	Levált tömeg [g]			
A sima 1	99,3	99,5	9878	0,06	0,21	0,54	5,71	660,0
A sima 2	99,8	99,9	9970	0,10	0,45	0,79	13,35	1473,4
A sima 3	99,7	99,6	9930	0,12	0,77	2,60	2,12	564,9
átlag:								899,5
A vágott 1	99,3	99,5	9878	0,33	0,44	0,72	13,48	1515,4
A vágott 2	99,8	99,9	9970	0,8	1,7	3,44	1,15	712,1
A vágott 3	99,7	99,6	9930	1,3	1,5	2,42	23,42	2890,2
átlag:								1705,9



8. ábra: „A” keverék peremes fagyhámlás diagramja

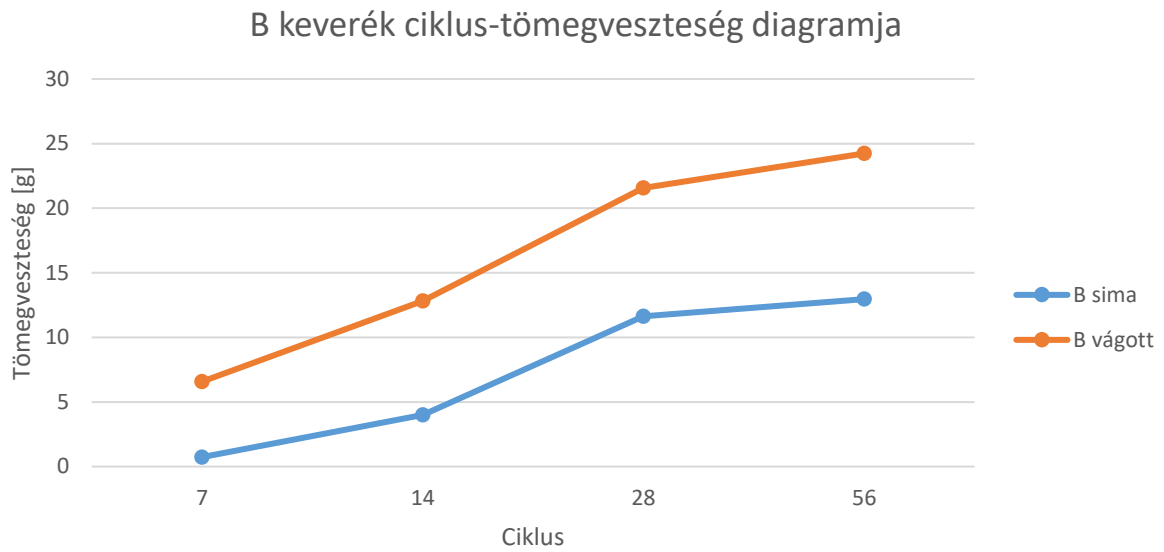
Ahogy a diagrammon látható a fagyasztást az elején jobban viselte a beton, 28 nap után megugrott a romlás mértéke.

3.4.1. „B” keverék

Peremes fagyhámlás vizsgálat után ezt a keveréket XF2-es osztályba lehet sorolni az MSZ 4798-2016-os szabvány szerint, de csak a zsaluzott felület felel meg ennek az osztálynak, mert a tömegveszteség 56 ciklus után $1296,0 \text{ g/m}^2$, ami kevesebb a megengedett 1500 g/m^2 -nél, de meghaladja az XF4 által előírt 1000 g/m^2 -es maximumot. A vágott felületet ebben az esetben is jobban kikezdték a környezet viszontagságait szimuláló ciklusok. A mikrorepedésekbe beszivárgó víz miatt $2424,0 \text{ g/m}^2$ relatív tömegű anyag vált le a felületről, amely jócskán meghaladja a szabvány által előírt mértéket.

10. táblázat: „B” keverék peremes fagyhámlás eredményei

Próbatest jele	Méretek		Vizsgált felület nagysága	Eltelt ciklusok száma				Levált anyag relatív tömege 56 ciklus után
				nap				
	a	b		7	14	28	56	
	mm			Levált tömeg [g]				
		mm ²	Egyedi	Egyedi	Egyedi	Egyedi		
B sima 1	99,1	99,2	9831	0,48	3,03	7,61	1,77	1311,2
B sima 2	99,2	99,0	9821	0,87	3,33	3,72	1,36	944,9
B sima 3	98,7	98,8	9752	0,84	3,42	11,57	0,88	1713,6
átlag:								1323,2
B vágott 1	99,1	99,2	9831	5,35	5,05	7,16	0,54	1841,2
B vágott 2	99,2	99,0	9821	7,7	7,2	10,10	3,36	2886,7
B vágott 3	98,7	98,8	9752	6,7	6,5	8,94	4,13	2693,9
átlag:								2473,9



9. ábra: „B” keverék peremes fagyhámlás diagramja

A diagrammról leolvasható, hogy a vágott oldal már az elején sokkal nagyobb mértékben károsodott mint a sima zsaluzott felület.

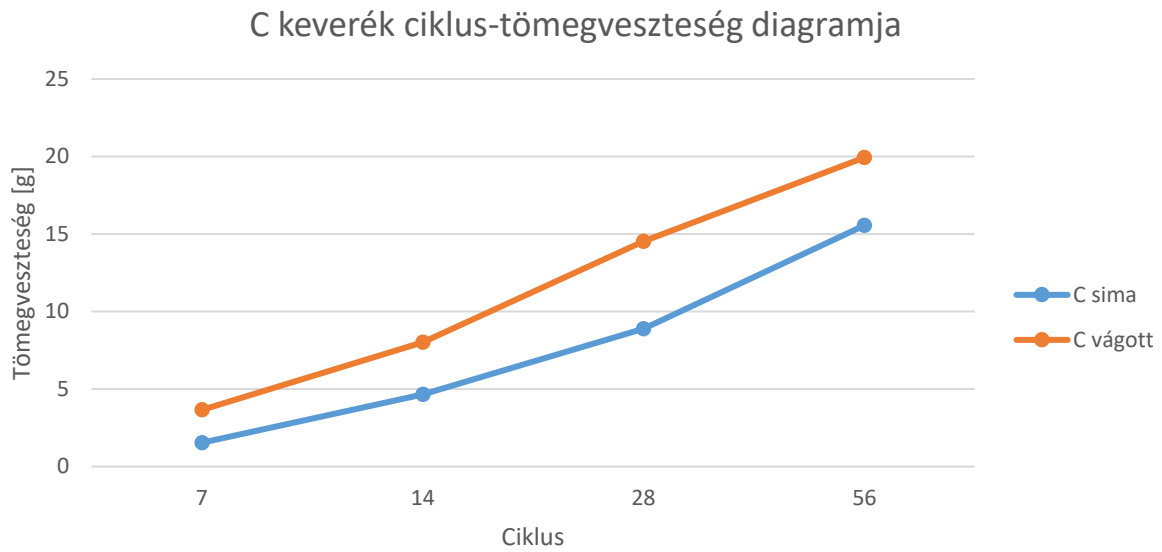
3.4.2. „C” keverék

Peremes fagyhámlás vizsgálat után ezt a keveréket nem lehet osztályba sorolni az MSZ 4798-2016-os szabvány szerint. A próbatest zsaluzott sima felülete is meghaladja a maximum értéket, mivel az átlaga 1560,1 g/m²-ig emelkedett az 56 ciklus végére, amelyre az eddigi keverékekben nem volt példa.

A vágott felületen nagyobb károkat okozott a sós fagyhámlás vizsgálat. A 2000,2 g/m²-nyi levált anyag szintén meghaladja az előírásokat, de ez a vágott felületnél várható volt az előzőek betonkeverékek alapján.

11. táblázat: „C” keverék peremes fagyhámlás eredményei

Próbatest jele	Méretek		Vizsgált felület nagysága	Eltelt ciklusok száma				Levált anyag relatív tömege 56 ciklus után
				nap				
	a	b		7	14	28	56	
	mm			Levált tömeg [g]				
		mm ²	Egyedi	Egyedi	Egyedi	Egyedi		
C sima 1	100,0	100,0	10000	1,97	4,77	6,90	8,05	2169,0
C sima 2	99,8	99,7	9950	1,29	1,80	3,97	1,16	826,1
C sima 3	99,7	99,7	9940	1,35	2,76	1,86	10,78	1685,1
átlag:								1560,1
C vágott 1	100,0	100,0	10000	4,90	4,77	6,09	6,97	2273,0
C vágott 2	99,8	99,7	9950	1,8	3,3	7,00	5,22	1741,7
C vágott 3	99,7	99,7	9940	4,3	5,0	6,44	4,04	1985,9
átlag:								2000,2



10. ábra: „C” keverék peremes fagyhámlás diagramja

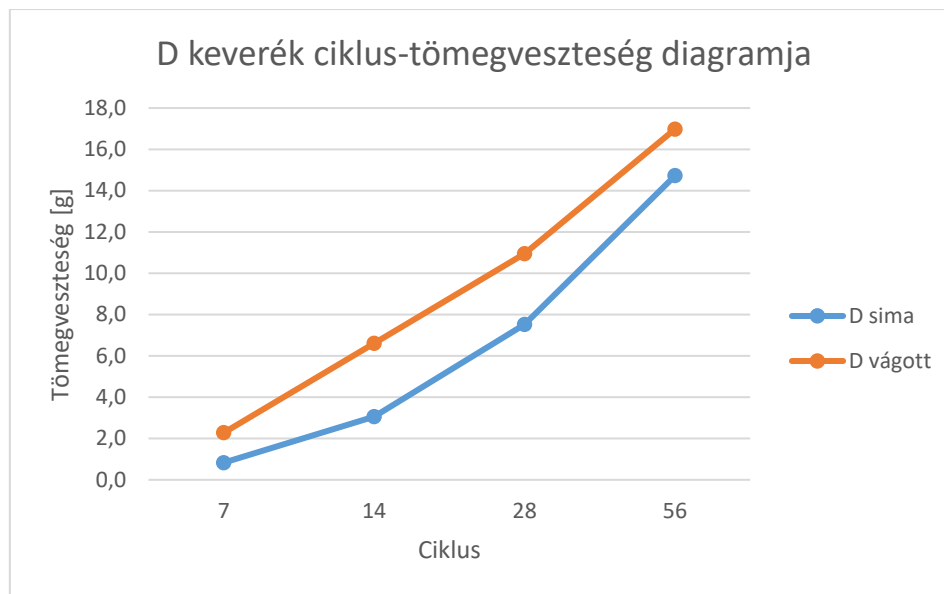
A diagramm megmutatja, hogy a vágott oldal és a sima oldal közel párhuzamosan halad, ennek eredményeképpen mindkettő meghaladja a szabvány szerinti maximális értéket.

3.4.3. „D” keverék

Peremes fagyhámlás vizsgálat után ezt a keveréket sem lehet osztályba sorolni az MSZ 4798-2016-os szabvány szerint. A próbatest zsaluzott sima felülete, valamint a vágott felülete is túlhaladja az 1500 g/m²-es maximumot, igaz, hogy a bedolgozott felület éppen hogy nem felel meg. Ebben a keverékben sem haladja meg a zsaluzott sima felületekről levált anyag relatív tömegeinek átlaga a vágott felületről levált anyag relatív tömegeinek átlagát. Mivel a többi keverésnél is ezt tapasztaltuk, ez várható volt.

12. táblázat: „D” keverék peremes fagyhámlás eredményei

Próbatest jele	Méretek		Vizsgált felület nagysága	Eltelt ciklusok száma				Levált anyag relatív tömege 56 ciklus után
				nap				
	a	b		7	14	28	56	
	mm			Levált tömeg [g]				
		mm ²	Egyedi	Egyedi	Egyedi	Egyedi		
D sima 1	98,6	99,0	9761	0,80	0,62	0,14	0,36	196,7
D sima 2	99,1	99,3	9841	1,20	3,59	4,27	8,54	1788,5
D sima 3	99,0	98,8	9781	0,49	2,45	8,98	12,72	2519,1
átlag:								1501,4
D vágott 1	98,6	99,0	9761	1,74	3,32	2,64	1,43	935,3
D vágott 2	99,1	99,3	9841	3,2	5,6	3,90	4,43	1737,7
D vágott 3	99,0	98,8	9781	1,9	4,0	6,47	12,25	2525,3
átlag:								1732,8



11. ábra: „D” keverék peremes fagyhámlás diagramja

13. táblázat Vizsgálatok kiértékelése

Keverék jele	Bemerítéses fagyasztás		Peremes lehámlás	
	sima	sós	vágott	bedolgozott
A	nem felel meg	nem vizsgálható	nem felel meg	XF4
B	nem felel meg	nem vizsgálható	nem felel meg	XF2
C	nem vizsgálható	nem vizsgálható	nem felel meg	éppen hogy nem XF2
D	nem vizsgálható	nem vizsgálható	nem felel meg	éppen hogy nem XF2

4. Összefoglalás

A négy keverék peremes fagyhámlás vizsgálat eredményei korrelálnak egymással, miszerint a sima (zsaluzott) felületek jobban ellenállnak sós vizes fagy hatásának, mint a vágott felületek. Ennek oka, hogy a zsaluzott oldalon a cementpép egy folytonos, vízzáró felületet tud képezni. Gondos kivitelezéssel ennek a felületnek a minősége javítható, így a felületi hibák mennyisége csökken, amelyben megindulhatnak ennek a kísérletnek a káros hatásai. A vágott felületek esetében viszont ez a folytonos felület nem biztosítható. Az adalékanyag szemcsék, akár zárt akár nem zárt cellás, a vágás mentén sérülnek és pórusaikba be tud hatolni a víz. Továbbá a vágás mentén mikrorepedések keletkeznek a cementmátrixban, melyekbe a víz szintén be tud hatolni, kifejtteni káros hatásait.

Véleményünk szerint könnyűbetonok esetén a vágott felület peremes fagyhámlás vizsgálata nem ad korreláns eredményeket a zsaluzott, sima felületével az előző jelenségek miatt. Tehát a vágott felület peremes fagyhámlás vizsgálata mindig rosszabb eredményeket mutatnak, akármilyen jó minőségű vagy akármilyen eljárással kezelték az adalékanyagot. A valóságot jobban tükrözi a zsaluzott felületek peremes fagyhámlás vizsgálatai.

A „C” és „D” jelű keverékek nem feleltek meg bementéses fagyasztás semmilyen módjának. A beton próbatestek a fagyasztó berendezésben még az 50 ciklus lejártá előtt „megsemmisültek”. A kockákat a vizsgálat lejártá előtt darabjaira hullva találtuk a fagyasztó berendezés alján mind sós mind normális víz és fagyasztás váltakozásánál. Ezek közül a próbatestek közül egyik darab sem maradt olyan állapotban, amit el lehetett volna törni. Így ezek a keverékek egyáltalán nem nevezhetők fagyállóknak.

Sós bementéses vizsgálatnál az „A” és „B” jelű keverékek is ugyan azt produkálták, mint a „C” és „D”, tehát egyik sem felelt meg a követelményeknek. A sima vízben történt fagyállóság vizsgálat során a próbakockák ugyan egyben maradtak, ám sem az XF2, sem az XF4 fagyállósági osztálynak nem feleltek meg.

Az „A” és „B” jelű keverékekből készült kockákon a peremes fagyhámlás vizsgálat a zsaluzott sima oldalon megfelelték, de a vágott oldalon átlépték az előírt maximumot, míg a „C” és „D” jelűek mindegyik oldaláról levált anyag relatív tömege túllépte a szabványos maximumot 56 ciklus letelte esetén, igaz, hogy csak minimális mennyiséggel.

Ezek a betonok nem fagyállóak, így nem alkalmasak szerkezetépítésre olyan helyeken, ahol a hőmérséklet $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá csökken.

A projekt alapvetően könnyű hídgerenda gyártásának gyakorlati megvalósításának lehetőségeire fekteti a hangsúlyt. Kiindulásként azt feltételeztük, hogy a TDK munka során felhasznált könnyű adalékanyag, a Liapor 7n duzzasztott agyagkavics fagyálló, így azt is, hogy a belőle kevert beton szintén fagyálló lesz. Sajnos ezt a feltételezésünket a kapott vizsgálati eredmények cáfolták, így bizonyítottuk, hogy ez a fajta adalékanyag nem alkalmazható fagyhatásnak kitett szerkezetekhez, még akkor sem, ha nyomószilárdságban megfelelne erre a célra. Ennek kiküszöböléseként alkalmazhatunk jobb minőségű adalékanyagot, például Liapor 9n-t, valamint javítható lehet olyan adalékszerrel, amely a felületet vízzáróvá teszi, esetleg használható olyan bevonat (pl: cementpép), amit az adalékanyag pórusait teljesen eltömíti, így megakadályozza a víz bejutását a pórusokba, ami jéggé fagyva később szétfeszíti a betonszerkezetet. Olyan adalékanyag lenne ideális fagyálló könnyűbeton készítésére, melynek szemcséi zárt cellákat képeznek és pórusaiba a víz nem tud bejutni.

5. Hivatkozások

Szakirodalmi hivatkozások

Bergmeister, K. – Wörner, J.-D. (2005) BetonKalender 2005 Fertigteil-Tunnelbauwerke, Erst & Sohn, ISBN: 3433016704

Faust, T. (2000a) Herstellung, Tragverhalten und Bemessung von konstruktivem Leichtbeton – Dissertation, Universität Leipzig, ISBN 973-9377-38-6

Böleskei E. - Dulácska E. (1974) Statikusok könyve – 9. fejezet: Könnnyübeton szerkezetek (Ujhelyi, Dulácska), *Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974*

Kausay T. (2002) Könnnyü-adalékanyag. *Beton X. évf. 11. szám 2002 november*

Neunast, A. – Lange, F. (2001) Leichtbeton Handbuch, *Verlag Bau + Technik*

Reinhardt, H. W (1993) Werkstoffe im Bauwesen, *Univerisät Stuttgart 1993/94 WS*

Ujhelyi J. (1995) Műszaki előírás – Beton és vasbeton készítése (MÉÁSZ ME-04.19:1995) 14. fejezet – Könnnyübetonok, *Magyar Építőipari Szövetség, Budapest, 1995*

Nemes R. (2006) Habüveg adalékanyagok könnnyübetonok - PhD értekezés, Budapest

fib (2000) Lightweight Aggregate Concrete, CEB-FIP guidance documnets bulletin 8.

Ujhelyi J. (1959) Mesterséges adalékanyagok felhasználásával készülő könnnyübetonok technológiájának kidolgozása *ÉTI-jelentés 6. Budapest, 1959*

Müller, H. S. – Linsel, S. – Garrecht, H. – Wagner, J.-P. – Thienel, K.-C. (2000) Hochfester konstruktiver Leichtbeton – Teil 1: Materialtechnologische Entwicklungen und Betoneigenschaften, *Beton- und Stahlbetonbau 95, 2000, Heft 7*

Rudnai, Gy.(1966) Leichtbeton Baukonstruktionen *Akadémiai Kiadó*

Hamann, H. (1953) Über die Druckfestigkeit von Leichtbeton *Betonstein-Zeitung 1953/9*

Grübl, P.: Druckfestigkeit von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge *Beton, 1979. Heft 3*

Laister, C. (2000) Vorspannung von vorgefertigten Leichtbetondecken, *Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2000*

Erdélyi, A. (1994) A beton tartósságát javító betontechnológiai tényezők *Beton II. évf. 7-8. sz. pp. 3-18. 1994*

Erdélyi, A. (1997) Fagyállóak-e a légpórusképző szer nélküli, nagyszilárdságú betonok? *Beton* 1997 12. sz. pp. 10-11.

Balázs Gy. (1994) *Építőanyagok és kémia, Műegyetemi Kiadó, Budapest*

Kausay, T (2018.november 25.) *Betonopus. Forrás: www.betonopus.hu*

Gao, X.F., Lob, Y.T., Tam, C.M. (2002) Investigation of micro-cracks and microstructure of high performance lightweight aggregate concrete *Building and Environment* 37 pp. 485 – 489

Hivatkozott szabványok

MSZ 4798-1 : 2004 Beton 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon 2004

EN 13055-1:2002 “Lightweight aggregates – Part 1: Lightweight aggregates for concrete and mortar” Brussels 2002

MSZ EN 1097-3 : 2000 Kőanyaghalmozatok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 3. rész: A halmazsűrűség és a hézagterfogat meghatározása

MÉÁSZ ME-04.19 : 1995 Beton és vasbeton készítése

DIN 1045-1 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton

Magyar Szabványügyi Testület (2016). MSZ 4798 :2016

Magyar Szabványügyi Testület (2018) MSZ CEN/TS 12390-9 :2018