



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR

Tudományos Diákköri Konferencia 2012



## Könnyűbetonok tűz- és fagyállósága

Készítette:  
Jancsó László Imre  
IV. éves építőmérnök hallgató

Konzulensek:  
Dr. Lublós Éva  
adjunktus  
Dr. Balázs L. György  
egyetemi tanár

Budapest, 2012. okt. 29.

## Tartalom

1. Bevezetés .....	4
1.1. Célkitűzés, áttekintés .....	4
1.2. A könnyűbeton szerepe .....	4
1.3. A könnyűbeton fogalma .....	5
1.4. A könnyűbeton fajtái .....	5
1.4.1. Egyszemcsés könnyűbeton .....	5
1.4.2. Adalékanyagok könnyűbeton .....	6
1.4.3. Gázzárványos könnyűbeton, pórusbeton .....	6
1.5. Történeti áttekintés .....	7
2. Szerkezeti könnyűbeton .....	9
2.1. Könnyű adalékanyag .....	9
2.2. Könnyű adalékanyagok jellemző tulajdonságai .....	11
2.2.1. Duzzasztott agyag .....	11
2.2.2. Duzzasztott üvegekavics, habüveg .....	12
2.2.3. Polisztirol gyöngy .....	13
2.2.4. Kohóhabsalak .....	13
2.2.5. Téglazúzalék .....	13
2.2.6. Természetes könnyű adalékanyagok .....	14
3. Kísérleti anyagok .....	14
3.1. Kvarckavics adalékanyagú beton receptúrája .....	14
3.2. Duzzasztott üvegekavics (habüveg) adalékanyagú beton receptúrája .....	15
3.3. Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton receptúrája .....	15
3.4. Polisztirol adalékanyagú beton receptúrája .....	16
4. A Kísérletek leírása .....	17
4.1. Tűzterheléses kísérletek leírása .....	17
4.1.1. A beton viselkedése tűz hatására .....	17
4.1.1.1. Kémiai átalakulások .....	17
4.1.1.2. A betonfelület réteges leválása .....	18
4.1.2. Kvarckavics adalékanyagú beton .....	19
4.1.2.1. Szemrevételezés .....	19
4.1.2.2. Nyomószilárdsági vizsgálat .....	20
4.1.2.3. Hajlító-húzó szilárdsági vizsgálat .....	22

4.1.2.4.	A kvarckavics adalékanyagú beton viszonyított szilárdságainak összehasonlítása .....	23
4.1.3.	Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton .....	24
4.1.3.1.	Szemrevételezés .....	24
4.1.3.2.	Nyomószilárdsági vizsgálat.....	27
4.1.3.3.	Hajlító-húzószilárdsági vizsgálat .....	28
4.1.3.4.	A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonok viszonyított szilárdságainak összehasonlítása.....	29
4.1.4.	Duzzasztott üvegekavics (habüveg) adalékanyagú beton.....	30
4.1.4.1.	Szemrevételezés .....	30
4.1.4.2.	Nyomószilárdsági vizsgálat.....	32
4.1.4.3.	Hajlító-húzószilárdsági vizsgálat .....	33
4.1.4.4.	A duzzasztott üvegekavics adalékanyagú beton viszonyított szilárdságainak összehasonlítása.....	34
4.1.5.	Polisztirol gyöngy adalékanyagú beton .....	35
4.1.5.1.	Szemrevételezés .....	35
4.1.6.	Kvarckavics, duzzasztott agyag és habüveg adalékanyagú betonok összehasonlítása tűzállóság szempontjából .....	36
4.1.6.1.	Nyomószilárdság.....	36
4.1.6.2.	Hajlító-húzószilárdság.....	37
4.2.	Fagyhámlesztásos kísérletek leírása .....	38
4.2.1.	Kvarckavics adalékanyagú beton.....	40
4.2.1.1.	Szemrevételezés .....	40
4.2.1.2.	Fagyhámlesztási vizsgálat eredményei .....	41
4.2.2.	Duzzasztott üvegekavics (habüveg) adalékanyagú beton.....	42
4.2.2.1.	Szemrevételezés .....	42
4.2.2.2.	Fagyhámlesztási vizsgálat eredményei .....	43
4.2.3.	Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton .....	44
4.2.3.1.	Szemrevételezés .....	44
5.	Összefoglalás .....	45
6.	Summary .....	46
7.	Köszönetnyilvánítás .....	47
8.	Irodalmi hivatkozások.....	48

## TDK dolgozat 2012

### 1. Bevezetés

#### 1.1. Célkitűzés, áttekintés

A könnyűbetonok egyre több sikeres alkalmazása található meg a modern szerkezetépítésben. A könnyűbetonok alkalmazásának azonban korlátai lehetnek a magas hőmérséklet és a fagy hatása. Vizsgálataink során négy különböző könnyűbeton vizsgáltam, hogy útmutatást kapjunk a könnyű adalékanyagok betonok fagypon alatti és magas hőmérsékleten való viselkedéséről.

A könnyűbeton fagypon alatti és magas hőmérsékleten való viselkedéséről kevés irodalmi adat áll rendelkezésre. A könnyűbeton alkalmazásának esetleges korlátait vizsgálom, a tűz alatti viselkedésre az adalékanyagban tárolt víz miatt, illetve a fagyállóságot az adalékanyag porozitása miatt.

#### 1.2. A könnyűbeton szerepe

Növekvő igényeink egyre nagyobb kihívás elé állítják az építőipart. Szükségleteink kielégítéséhez rendre újabb határokat kell átlépnünk. A minket körülvevő épületek egyre magasabbak, a hidak egyre nagyobb fesztávolságúak. A teherhordó szerkezetek nagy hányada beton, ezért a betontechnológia szerepe kiemelkedő ebben a versenyben. A beton kivételesen jó tulajdonságú szerkezeti anyag. Szinte bárhol, nagy mennyiségben előállítható, a tetszőleges alakra, méretre formálható, a helyszínen is elkészíthető. Megfelelő receptúra kiválasztása és megfelelő bedolgozás esetén a betonszerkezet további karbantartást nem igényel. Hátránya a szilárdsághoz tartozó viszonylag nagy önsúly, hiszen a fesztávolság növelése esetén az önsúlyteherből származó nyomatékok négyzetesen nőnek. Ez különösen olyan szerkezeteknél bír nagy jelentőséggel, ahol jellemzően az önsúlyteher a domináns (pl.: hidak).

A lehetséges támaszköz növelésének a módja adott. Vagy az anyag szilárdságát növeljük, vagy a sűrűségét csökkentjük. A fentiek alapján a szerkezeti könnyűbeton létjogosultsága tehát vitathatatlan. A könnyűbetonok általában a nagy porozitás miatt kedvező hőtechnikai tulajdonságokkal bírnak így hőszigetelő anyagként, míg másokat falazóelemként vagy vázkitöltőként alkalmazzák (Nemes, 2006).

### 1.3. A könnyűbeton fogalma

Könnyűbeton fogalmán a  $2000 \text{ kg/m}^3$  testsűrűséget meg nem haladó betonokat értjük. A kis testsűrűséget könnyű adalékanyagok, illetve pórusok, légzárványok alkalmazásával érjük el.

### 1.4. A könnyűbeton fajtái

A felépítés szempontjából 3 csoportba sorolhatjuk a könnyűbetonokat.

#### 1.4.1. Egyszemcsés könnyűbeton

Azonos átmérőjű adalékanyag szemcséket ( $d=8-20 \text{ mm}$ ) cementpéppel vonják be. A telítetlen betonban az adalékanyag szemcsék között hézagok alakulnak ki. A cementpép az adalékanyag szemcséit csak az érintkezési pontokon köti össze. A szemcsék közötti teret levegő tölti ki, ezzel csökkentve a testsűrűséget. A normál betonnál kedvezőbb a hőszigetelő képessége. Szigorúan csak nyomásra vehető igénybe. Hajított szerkezeti elem anyagaként nem alkalmazható, hiszen a szükséges vasalás korrózióvédelme és lehorgonyzása nem biztosítható (Balázs L. Gy., 2004).

### 1.4.2. Adalékanyagos könnyűbeton

A könnyűbeton ezen fajtája valamilyen nagy porozitású, a kvarckavicstól, illetve zúzottkőtől jóval kisebb szemcse-testsűrűségű adalékanyag felhasználásával, telített vagy túltelített habarcsvázal készül (1-1. ábra). A habarcsváz tartalmazhat kvarchomokot, adalékszereket (pl. légpórusképző) vagy kovalisztet szilárdságnövelés céljából. Az adalékanyagos könnyűbetont a szokványos beton könnyített változatának tekinthetjük. Tervezése, gyártása és felhasználása (elérhető szilárdság) hasonló a szokványos betonéhoz. Vasalható, hajlított szerkezeti elemek anyagaként is használható. Előállítható önterülő valamint szivattyúzható könnyűbeton is (Balázs L. Gy., 2004).



1-1. ábra Adalékanyagos könnyűbeton

### 1.4.3. Gázzárványos könnyűbeton, pórusbeton

A mész, cement, illetve cement és mész kötőanyaggal készített habarcsban a pórusképzésre gázfejlesztő anyagot vagy habot alkalmaznak, és nyomás alatti gőzérleléssel (pórusbeton, sejtbeton) vagy természetes úton (habbeton) szilárdítják. Gyártásuk csak üzemben valósítható meg. A gázzárványokat tehát a kötési folyamat során fejlődő gázok alakítják ki. A zárványok alakja, mérete és elhelyezkedése szabálytalan. A gyakorlatban falazóelemek gyártására használják (Balázs L. Gy., 2004).



## 1.5. Történeti áttekintés

A könnýübeton története régmúltra nyúlik vissza. Már az ókorban az i.e. I. században a Római Birodalomban alkalmazták kupolák építőanyagaként. Az egyik máig is épen maradt példa a római Pantheon és 43,3 m átmérőjű kupolája (1-2. ábra).



1-2. ábra Pantheon

<http://stuff.mit.edu/afs/athena/course/21/21h.405/www/Pantheon/Pantheon/Dome.html>

Az alaptestekhez travertinörleményt használtak. A kupola építéséhez négy különböző könnýü adalékanyagot alkalmaztak. Legalul travertin- és tufaörleményt tartalmazó betont alkalmaztak melynek testsűrűsége  $1750 \text{ kg/m}^3$ , feljebb tufaörleményt és téglazúzalékot tartalmazó betont használtak melynek testsűrűsége  $1600\text{-}1500 \text{ kg/m}^3$  és legfőlü a kupola teteje tufaörlemény adalékanyagú betonból készült, melynek testsűrűsége  $1350 \text{ kg/m}^3$ . A Pantheon az egyik legjobb állapotban fennmaradt római kori épület, ezzel bizonyítva a szerkezeti könnýübeton tartósságát. A Pantheon kupoláját csak Fuller Geodéziai Dómja tudta túlszárnyalni a XIX. században. A Római Birodalom hanyatlásával a beton is feledésbe merült (Nemes, 2006).

Könnýübetont az újkorban először az Egyesül Államokban, hidak és toronyházak építésénél alkalmaztak (Park Plaza Hotel St. Louis 1928, Oakland-Bay-híd pályalemeze San Fransisco 1936, Lake Point Tower Chicago 1968, Marina City Towers Chicago 1964,)

(1-3. ábra és 1-4. ábra). Európában a könnyűbeton ipari előállítását az 1940-es években indult be elsőként Dániában (Nemes, 2006; Clarke, 1993).



**1-3. ábra Lake Point Tower**  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Lake\\_Point\\_Tower](http://en.wikipedia.org/wiki/Lake_Point_Tower))



**1-4. ábra Marina City Towers**  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Marina\\_City](http://en.wikipedia.org/wiki/Marina_City))

Hazánkban a salakbetont először 1865-ben említik. Egy 1898-ban kiadott könyvben már szerepel a nagyolvasztó-salak mint lehetséges adalékanyag könnyűbetonokhoz. Magas kéntartalma miatt nedvesség hatására erősen duzzad és szilárdságából veszít, ezért alkalmazása háttérbe szorult. Tufabeton kézi falazóelemeket gyártottak 1920 körül Andornaktályán. 1957-ben Bodrogkeresztúron üzemet létesítettek, ahol könnyű falazóblokkokat gyártottak riolittufa vagy kohósalak felhasználásával. A 60-as, 70-es években 3-8 emeletes lakóházak épültek könnyűbetonból (Nemes, 2006)

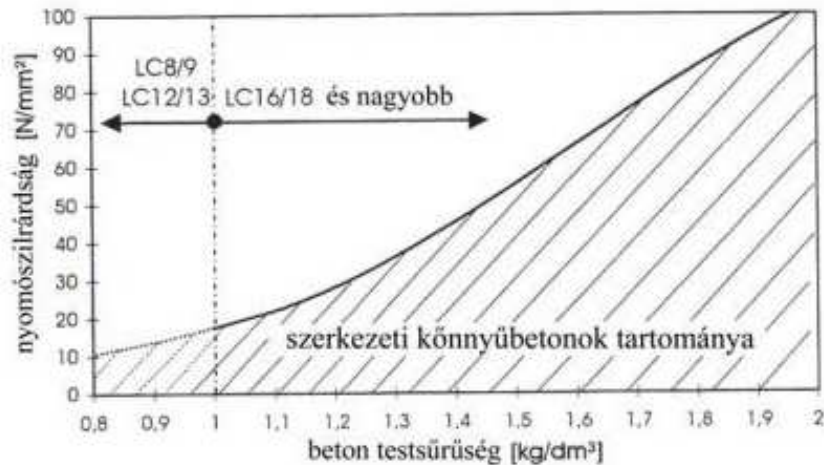
Napjainkban a könnyűbeton megtalálható mind a magas, mind a mélyépítésben: hidak, alagutak, olajfűró platformok építésénél is alkalmazzák. Napjainkban könnyűbeton alkalmazásában az Egyesült Államok, Japán, Németország és a skandináv államok járnak élen.

A természetes adalékanyagok (habkő, tufák) nem minden országban hozzáférhetők és mennyiségük korlátozott egyes országokban nem fellelhetők. A XX. sz. elején megjelentek a mesterséges úton előállított könnyű adalékanyagok is. Az első könnyű adalékanyagokat gyártó üzem Kansas Cityben létesült 1917-ben. Magyarországon 1959-ben kezdődött meg az ipari előállítás (Nemes, 2006).



## 2. Szerkezeti könnyűbeton

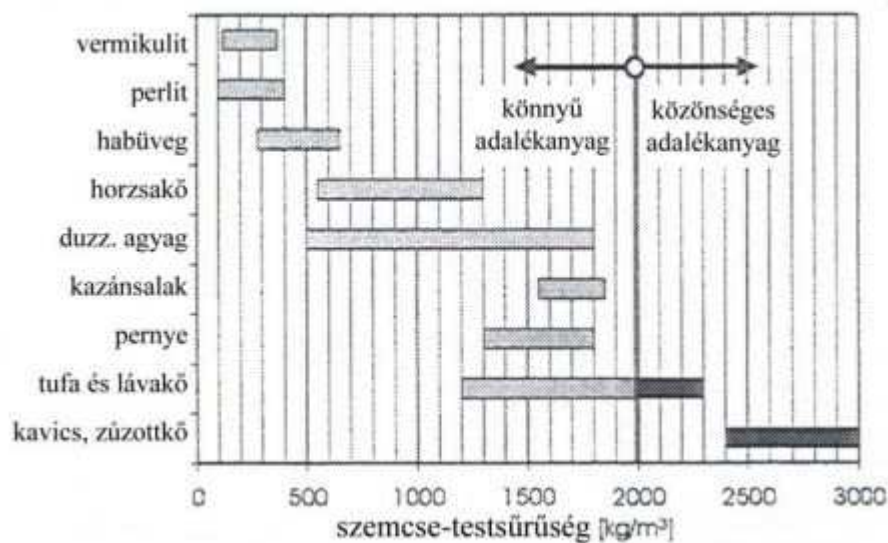
Szerkezeti könnyűbeton kizárólag könnyű adalékanyagos betonból készül. Szerkezeti könnyűbeton fogalmán a nagyobb sűrűségű, legalább LC 16/18 szilárdsági osztályú könnyűbetonokat értjük (2-1. ábra).



2-1. ábra Nyomószilárdság és testsűrűség összefüggése (Faust, 2000)

### 2.1. Könnyű adalékanyag

A könnyű adalékanyagok követelményei eltérnek a hagyományos adalékanyagokétól. A már megszokott követelmények mellett megjelenik a halmaz- ( $< 1200 \text{ kg/m}^3$ ) és szemcse-testsűrűség ( $< 2000 \text{ kg/m}^3$ ) fogalma is. Halmaz alatt tömör vagy porózus anyagrészek véletlenszerű halmozódása által keletkezett diszperz vázat és a váz által kialakított hézagrendszert értjük. A halmazsűrűség a teljes halmaz tömegének és térfogatának a hányadosa. A szemcse-testsűrűség a szemcse tömegének és térfogatának hányadosa. A nyitott pórusok és a nagy porozitás miatt a könnyű adalékanyagoknál a megszokottnál sokkal jelentősebb vízfelvétellel kell számolnunk ez betontechnológiai problémát eredményezhet. Ennek a problémának egy kiküszöbölési módja lehet az úgynevezett drázsézás, amikor a szemcséket előzetesen cementpéppel vonják be. Ez a felületi kezelés azonban egy különálló technológiai lépés és jóval megdrágítja és lassítja az előállítást [Nemes, 2006].



2-2. ábra Könnyű adalékanyagok szemcse-testsűrűsége (Faust, 2000a)

A következő ábrán a leggyakrabban előforduló adalékanyagok szemcse-testsűrűség értékeit láthatjuk (2-2. ábra). Az ábrán jól látható, hogy mind a habüveg, mind pedig a duzzasztott agyagkavics szemcse-testsűrűség megoszlása a  $2000 \text{ kg/m}^3$ -es határérték alatt marad. A 2-1. táblázat különböző könnyű adalékanyagok sűrűségi értékeit és az átlagos szemcseporozitási adatokat tartalmazza.

2-1. táblázat Adalékanyagok sűrűségei (Nemes, 2006)

adalékanyag fajta	Halmazsűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	Szemcse-testsűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	Anyagsűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	átlagos szemcseporozitás [%]
duzzasztott agyagkavics	300-1000	650-1600	2500-2600	38-74
duzzasztott polisztirol	20-50	100	1000	90
téglatörmelék	800-1250	1700-1900	2500-2700	30-32
perlit	50-120	300-600	2300-2500	76-87
habüveg	100-400	300-600	2050-2450	75-85

## 2.2. Könnyű adalékanyagok jellemző tulajdonságai

### 2.2.1. Duzzasztott agyag



**2-3. ábra Duzzasztott agyagkavics**  
([www.liapor.hu](http://www.liapor.hu))

A duzzasztott agyagtermékek alapanyagát, a jó minőségű, egyenletes agyagot külszíni fejtéssel nyerik. A gyártásfolyamat során először örlik, majd granulálják. Az így készült granulátumot végül forgócsöves kemencében 1200 °C-on kiégetik. Az égetés során a külső felület megolvad, a hő hatására a szerves anyagok kiégnek, az ekkor fejlődő gázok a szemcsét felfújják, majd a kérget felszakítva távoznak. A folyamat végtermékeként egy pórusos belső szerkezetű, kemény klinkeres héjú szemcsét kapunk (2-3. ábra). A gyártás során kémiai pórusképzőt nem adnak a termékhez. A gyártási folyamat lehetőséget ad a geometriai (méret), fizikai (tömeg, porozitás) és a

mechanikai tulajdonságok szabályozására. A kész termék alakja nem szabályos gömb, pórustartalma nagy, szemcse-testsűrűsége 500-1800 kg/m<sup>3</sup>, halmazsűrűsége 300-800 kg/m<sup>3</sup> közötti. A szemcsék szilárdsága a kemény klinker héj, a belső szerkezet és a közelítően gömb alak miatt 2-8 N/mm<sup>2</sup> tartományba esik. Nagyszilárdságú, vasalt szerkezeti beton előállítására is alkalmas (LC 20-55).

Hőtechnikai tulajdonága a pórusos szerkezet miatt kedvező ( $\lambda = 0,079-0,8$  W/mK). Ennek megfelelően a duzzasztott agyag adalékanyaggal készült könnyűbetonok hőtechnikai tulajdonságai hasonlóan jó ( $\lambda = 0,11-1,2$  W/mK).

Tűzállósága igen jó a gyártási folyamatnak köszönhetően (égetés 1200°C-on).

Maga a nyers duzzasztott agyagkavics és a belőle készített könnyűbeton is fagyálló.

A pórusos belső szerkezet miatt kisebb falvastagságokkal is jó hangelnyelő szerkezeti elemek készíthetők belőle.

Vízzel szemben a duzzasztott agyagkavics ellenálló. Nem korhad, nem penészedik, teljesen szagtalan. Teljes egészében természetes anyagból készült, vegyszerek felhasználása nélkül, ezért környezetbarát ([www.liabau.hu](http://www.liabau.hu); Nemes, Gyömbér, 2001).

Felhasználási területek:

- teherviselő könnyűbetonok
- falazóblokkok
- zöldtetők
- készházak

## 2.2.2. Duzzasztott üvegekavics, habüveg



**2-4. ábra Duzzasztott üvegekavics**  
([www.bau-docu.at](http://www.bau-docu.at))

A duzzasztott üvegekavics (2-4. ábra) teljes egészében hulladék üvegből készül. A nyersanyag beszerzési költsége minimális, ezért a termék ára kedvező. A habüveg gyártása során nagy mennyiségben üveghulladék újrahasznosítás történik. Igaz, az üvegyártás maga is hasznosít némi hulladéküveget, de csak a színtelent, a színes (barna, zöld) üveghulladék újrahasznosítása sokáig megoldatlan probléma volt. Habüveg előállítására bármilyen színű üveg alkalmas, ezért gyártása környezetvédelmi szempontból is nagyon kedvező.

A gyártási folyamat az üveghulladék megtisztításával kezdődik. A megtisztított alapanyagot ezután összezúzzák, örlik, végül pedig granulálják. A granulálás után következik a gyártási folyamat végső és legfontosabb lépése, az égetés. Az üveggranulátumot forgó kemencében 800 °C, valamint 1000 °C között kiégetik. Az égetés során alakíthatóak ki a termék végső tulajdonságai, melyek igen széles tartományban változhatnak.

A szemcse-estsűrűség 450-1700 kg/m<sup>3</sup>, a halmazsűrűség 250-1100 kg/m<sup>3</sup> közötti.

A szemcsék minimális vízfelvétele 0,4 m%, de elérheti az 50 m%-ot is. Az szemcsék önszilárdsága 0,2-14 N/mm<sup>2</sup>.

A habüveg adalékanyagú, gipsz-, cement- vagy szilikát gyanta kötőanyagú építőanyagok testsűrűsége 350-2000 kg/m<sup>3</sup> közötti. A hővezető képességük 0,098-0,8 W/mK, nyomószilárdságuk 2,5-58 N/mm<sup>2</sup>.

A víz nem tesz kárt benne, nem penészedik, nehézfémeket (pl.: ólom, króm) nyomokban tartalmazhat, de minden esetben az egészségügyi határérték alatti.

Felhasználása igen sokrétű. A habüveg adalékanyaggal készített teherbíró szerkezeti könnyűbeton nyomószilárdsági értéke eléri a LC50/60 szilárdsági osztályt. A habüveg könnyűbeton előnyösen alkalmazható épületek utólagos, esztétikus homlokzati hőszigetelésére, padlófűtés alá hő- és hangszigetelő rétegnek. Tűzállóság szempontából is jól alkalmazható 1400°C-ig. Alkalmas továbbá könnyű építőelemek, álmennyezetek gyártására zajárnyékoló falak építésére ([www.poraver.com](http://www.poraver.com); Nemes Gyömbér, 2001).

### 2.2.3. Polisztirol gyöngy



2-5. ábra Polisztirol gyöngy  
([www.bensiker.hu](http://www.bensiker.hu))

A gyártási folyamat első lépése a sztírol gyöngy-polimerizációja. A polimerizáció után polisztirol granulátumot nyerünk. A granulátum 0.1-0.3 mm átmérőjű gyöngyökből áll. A gyöngyök szemcsetestsűrűsége  $96 \text{ kg/m}^3$ . Az expandálás első lépéseként a gyöngyöket  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  alatti hőmérsékletre melegítik. A bennük lévő hajtóanyagok elgőzölögnek és a termoplasztikus anyagot 1-5 mm átmérőjűre felfújják, így kapjuk a

gyöngyöket (2-5. ábra). A polisztirol gyöngy halmazsűrűsége  $15\text{-}30 \text{ kg/m}^3$ . A szemcséknek nincs szilárdsága. A gyöngyben lévő cellák zárt

rendszerűek, így a vízfelvétel igen csekély, maximum 1 m% (Kovács, 2008).

### 2.2.4. Kohóhabsalak

A kohósalak habosítása után állítják elő úgy, hogy a legalább  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  hőmérsékletű kohósalak-olvadékat kis mennyiségű vízbe öntve a fejlődő gőzök és gázok az anyagot felduzzasztják, habosítják. Az anyag habosodva szilárdul meg. A megszilárdult anyagból aprítással nyerik a betonban alkalmazott adalékanyagot. Nem tartalmaz káros anyagokat. Halmazsűrűsége  $600\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ . Szemcseporozitása legalább 50% (Balázs, 1994).

### 2.2.5. Téglazúzalék

Téglagyári selejtek vagy elbontott téglá épületek építőanyagának törmelékéből nyert adalékanyag.

Nagy porozitása, kis testsűrűsége és jó nyomószilárdsága miatt ideális adalékanyag szerkezeti könnyűbetonokhoz. Nem tartalmaz káros anyagokat, teljesen természetes. Felhasználásával környezetbarát építőanyagot hozhatunk létre, hiszen alkalmazásával az építési törmelék nagy része újrahasznosítható (Balázs, 1994).



### 2.2.6. Természetes könnyű adalékanyagok

Szerkezeti könnyűbetonok természetes könnyű adalékanyagai a természetben előforduló nagy porozitású vulkáni kőzeteket, a vulkáni tufák, a habkő és a lávasalak. A vulkáni tufák a kitörések visszahulló láva- és hamutömegeiből keletkeznek. A tufák pórustartalma 10-60 V% között ingadozik. A habkő riolit és a kvarcporfir üveges módosulata. Kis testsűrűségű, nagy porozitású, világos színű, szivacsos szerkezetű anyag. A lávasalak a kiömlési kőzetek felső rétegeiben képződik, ha a lehülés lassú (Balázs, 1994).

## 3. Kísérleti anyagok

A kísértelek során 3 féle könnyű-adalékanyagot vizsgáltam meg. Az összevetéshez pedig készítettem egy kvarckavicsos referencia keveréket.

### 3.1. Kvarckavics adalékanyagú beton receptúrája

A kvarckavicsos referencia keverékhez kötőanyagként CEM I 42,5 S jelű cementet használtam, melynek mennyisége  $300 \text{ kg/m}^3$ . A keverékbe 4/8-as szemcsefrakciójú kavicsot és keverővizet alkalmaztam. A beton víz-cement tényezője 0,4, homok-cement tényezője 2,85. A beton tervezett testsűrűsége  $2478 \text{ kg/m}^3$ . A kvarckavics adalékanyagú beton receptúráját a 3-1. táblázatban adom meg.

3-1. táblázat Kvarckavics adalékanyagú beton receptúrája

Alkalmazott anyag	$\text{kg/m}^3$	kg/keverés	$\text{l/m}^3$
cement	300.00	18.00	96.80
víz	120.00	7.20	120.00
ada.4/8	1202.00	72.09	450.00
folyósító	1.50	0.09	1.40
kvarchomok	855.00	51.30	322.60

a beton tervezett testsűrűsége      2478       $\text{kg/m}^3$

### 3.2. Duzzasztott üvegvadics (habüveg) adalékanyagú beton receptúrája

A habüveg könnyű adalékanyagok keverékhez CEM I 42,5 S jelű cementet használtam kötőanyagként, szintén  $300 \text{ kg/m}^3$  mennyiségben. Az adalékanyag szemcsefrakciója ennél a keveréknél is 4/8-as. A víz-cement és a homok-cement tényezők is maradtak 0,4, illetve 2,85. A keverék tervezett testsűrűsége  $1047 \text{ kg/m}^3$ . A habüveg adalékanyagú beton receptúráját a 3-2. táblázat tartalmazza.

3-2. táblázat Habüveg adalékanyagú beton receptúrája

Alkalmazott anyagok	$\text{kg/m}^3$	kg/keverés	$\text{l/m}^3$
cement	300.00	18.00	96.80
víz	120.00	7.20	120.00
ada.4/8	131.00	7.83	450.00
folysító	1.50	0.09	1.40
kvarchomok	855.00	51.30	322.60

a beton tervezett testsűrűsége  $1407 \text{ kg/m}^3$

### 3.3. Duzzasztott agyagvadics adalékanyagú beton receptúrája

A duzzasztott agyagvadicsos keveréknél is  $300 \text{ kg/m}^3$  CEM I 42,5 S jelű cementet alkalmaztam kötőanyagként. A víz-cement és homok-cement tényezők szintén 0,4 és 2,85. Az adalékanyag 4/8-as szemcseosztályú. A tervezett testsűrűség  $1838 \text{ kg/m}^3$ . A duzzasztott agyagvadics felhasználásával készült beton receptúrája a 3-3. táblázatban olvasható.

3-3. táblázat Duzzasztott agyagvadics adalékanyagú beton receptúrája

Alkalmazott anyagok	$\text{kg/m}^3$	kg/keverés	$\text{l/m}^3$
cement	300.00	18.00	96.80
víz	120.00	7.20	120.00
ada.4/8	561.00	33.67	450.00
folysító	1.50	0.09	1.40
kvarchomok	855.00	51.30	322.60

a beton tervezett testsűrűsége  $1838 \text{ kg/m}^3$

### 3.4. Polisztirol adalékanyagú beton receptúrája

A polisztirol adalékanyagú könnyűbeton 4/8-as polisztirol-gyöngyöt tartalmaz adalékanyagként. A kötőanyag  $300 \text{ kg/m}^3$  CEM I 42,5 S jelű cement. A víz-cement és homok-cement tényezők változatlanul 0,4 és 2,85. A tervezett testsűrűség  $1320 \text{ kg/m}^3$ . A polisztirol gyöngy adalékanyagú beton receptúrája a 3-4. táblázatban olvasható.

3-4. táblázat Polisztirol adalékanyagú beton receptúrája

Alkalmazott anyagok	$\text{kg/m}^3$	kg/keverés	$\text{l/m}^3$
cement	300.00	11.10	96.80
víz	120.00	4.44	120.00
ada.4/8	43.00	1.60	450.00
folyósító	1.50	0.06	1.40
homok	855.00	31.64	322.60

a beton tervezett testsűrűsége  $1320 \text{ kg/m}^3$

Referenciaként kvarckavics adalékanyagú betont használtam. Keverésenként 12 darab henger (60 mm x 120 mm), ugyanennyi hasáb (70 mm x 70 mm x 250 mm) valamint 6 darab kocka (150 mm x 150 mm x 150 mm) próbatest készült.

Különböző betonok vizsgálatakor fontos, hogy a különböző keverékek összehasonlíthatóak legyenek. Ez úgy érhető el, hogy betontechnológiailag azonos keverékeket készítünk. A legfontosabb betontechnológiai mutató a keverék víz-cement tényezője. Könnyűbetonoknál hasonlóan fontos a homok-cement tényező is. Fontos továbbá a kötőanyag mennyisége is. Ha ezen mutatók megegyeznek, akkor betontechnológiailag azonos cementmátrixot kapunk és a különböző adalékanyagok hatása kimutatható. A kísérletsorozat során, az általam készített keverékekben megfigyelhető, hogy a betontechnológiai mutatók megegyeznek, tehát a cementmátrix közelítőleg azonos. A kísérletek során a mérési eredményekben jelentkező különbség az eltérő adalékanyagok miatt keletkezik, tehát a keverékek alkalmasak a kísérletre.

## 4. A Kísérletek leírása

### 4.1. Tűzterheléses kísérletek leírása

A hasáb és henger alakú próbatesteket 5 különböző hőterhelési szintnek vettem alá. A kvarckavics és a habüveg adalékanyagú próbatesteket szabványos tűzterhelés szerint vizsgáltam, ahol a hőterhelés mértékei 20, 150, 300, 500 vagy 800 °C két órán keresztül. A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú próbatestek tűzterhelésénél az utolsó lépcsőt 1000 °C-ra növeltem azért, hogy megvizsgálhassam a kiégetett agyagkavicsok viselkedését is.

A polisztirol adalékanyagú betonnál a hőterhelést 150 °C-ról indítottam és 10 °C-kal növeltem 180 °C-ig.

#### 4.1.1. A beton viselkedése tűz hatására

##### 4.1.1.1. Kémiai átalakulások

A betonban tűz hatására különböző anyagszerkezeti változások mennek végbe. A változások kiváltó okai lehetnek a cement és az adalékanyag eltérő hőtágulása, a belső vízgőznyomás és az eltérő hőmérsékletek az anyagon belül. A hőmérséklet emelkedésével a beton szilárdsági jellemzői romlanak.

A betonban hő hatására lejátszódó kémiai folyamatok:

100 °C körül a makropórusokból elpárolgó víz tömegvesztést okoz, a kémiailag kötött víz távozásának kezdete

50 °C és 110 °C között elbomlik az ettringit ( $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )

100 °C és 200 °C között a gipsz kétlépcsős bomlása játszódik le

200 °C körül további dehidratáció figyelhető meg. Ez a folyamat további tömegvesztést okoz. A különböző próbatestek tömegvesztése eltérő lesz mindaddig, amíg a fizikailag és kémiailag kötött víz távozása be nem fejeződik.

300 °C felett már a kiindulási nedvességtartalomtól függő további tömegvesztés nem érzékelhető. a kvarckavics adalékanyagú betonok szilárdságvesztésének kezdete.

450 °C és 550 °C között a nem karbonátosodott portlandit (kalcium-hidroxid) bomlása következik be ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ) ez a folyamat további tömegvesztést okoz.

573 °C -on a közönséges betonok esetén a kvarc a módosulatból b módosulatba alakul át.

Ez az átkristályosodás 5.7 %-os térfogat-növekedést okoz. Ez a térfogatváltozás lényeges károsodást okoz a betonban.

700 °C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami térfogat-növekedéssel és további szilárdságcsökkenéssel jár.

800 °C-on a kerámiai kötések bomlása

1200 °C az olvadás kezdete (Balázs, Lublós, Mezei, 2011)

Tűz hatására a betonban olyan irreverzibilis folyamatok mennek végbe melyek miatt az anyag a kihülés során sem képes visszanyerni a kiindulási tulajdonságait. A betonszerkezet megbomlik és tönkremegy.

#### 4.1.1.2. A betonfelület réteges leválása

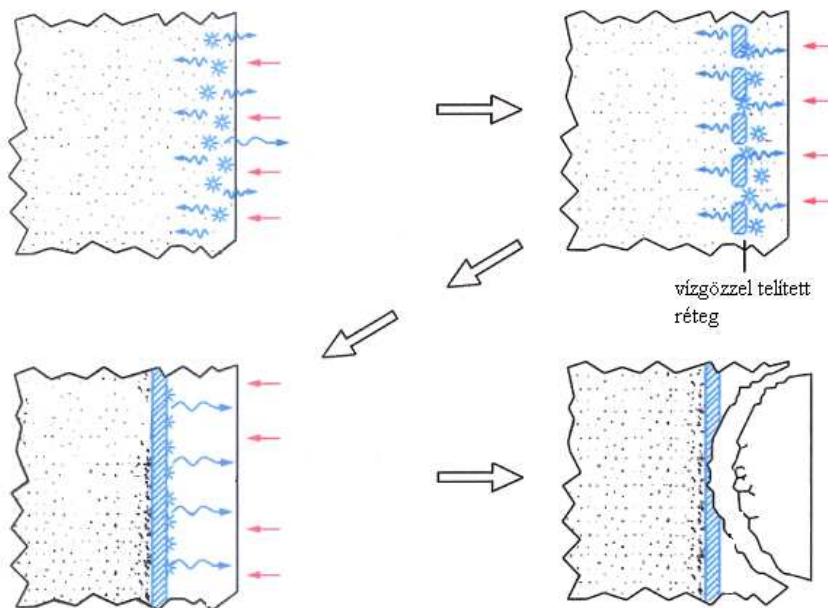
A betonfelület réteges leválása gyakori tönkremeneteli mód a könnyű adalékanyagos betonoknál, az adalékanyagból távozó víz miatt. A betonfelület réteges leválásának két oka lehet:

1. A betonban lévő víz elpárolog és a növekvő gőznyomás lefeszíti a felszíni réteget;
2. A hőtágulás okozta húzófeszültségek meghaladják a beton szilárdságát és a felszíni réteg lehasad.

A nagyszilárdságú betonok felületének leválását általában a hőmérséklet emelkedésének hatására bekövetkező feszültségek okozzák. Normálbetonok esetén általában a betonból távozó vízgőz feszíti le a felületi rétegeket. *Könnyű adalékanyagos betonoknál különösen veszélyes lehet az adalékanyag szemcsékben tárolt víz mennyisége miatt.*

A betonfelület réteges leválásának az esélyét a következő tényezők befolyásolják:

- külső tényezők: a tűz jellege, a szerkezetre ható külső terhek nagysága;
- geometriai jellemzők: a szerkezet geometriai adatai, a betonfedés nagysága, a vasbetétek száma és elhelyezkedése;
- a beton összetétele: az adalékanyag mérete és típusa, a cement és a kiegészítő anyag típusa, a pórusok száma, a polipropilén száladagolás, az acél szálerősítés, a beton nedvességtartalma, áteresztőképessége és szilárdsága (Balázs ,Lublóy, Mezei, 2011).



4-1. ábra A betonfelület leválásának mechanizmusa (Balázs ,Lublóy, Mezei, 2011)



## 4.1.2. Kvarckavics adalékanyagú beton

### 4.1.2.1. Szemrevételezés

A kvarckavics adalékanyagokos próbatetek az alacsony hőterhelési tartományon (150 °C, 300 °C) történt hőterhelés után nem mutattak szemmel látható károsodást. A magas hőhatásnak (500 °C, 800 °C) kitett próbatetek elszíneződtek, szemmel látható repedéseket figyeltem meg a felületükön. Robbanásszerű tönkremenetel nem történt.

A henger alakú próbatesteknél, 500 °C-ig történő hőterhelés esetén a nyomószilárdság vizsgálatnál a töréskép egységes, megfigyelhető a hasadó felület kialakulása. A cementkő és az adalékanyag szemcsék egyaránt elhasadtak. A 800 °C-nak kitett próbatetek a szilárdságvizsgálat során összemorzsolódtak. Az adalékanyag szemcséi sok esetben sértetlenül kifordultak az őket körülvevő cementkő vázból.

A hasábok hajlító-húzó szilárdsági vizsgálatánál az alacsony hőmérsékletnek (max. 300 °C) kitett próbatetek tönkremenetelekor az adalékanyag szemcse és a cementkő váz egyaránt elhasadt. Magasabb hőterhelés esetén a hasadó felület a cementkő vázban és az adalékanyag szemcse határfelületén alakult ki.



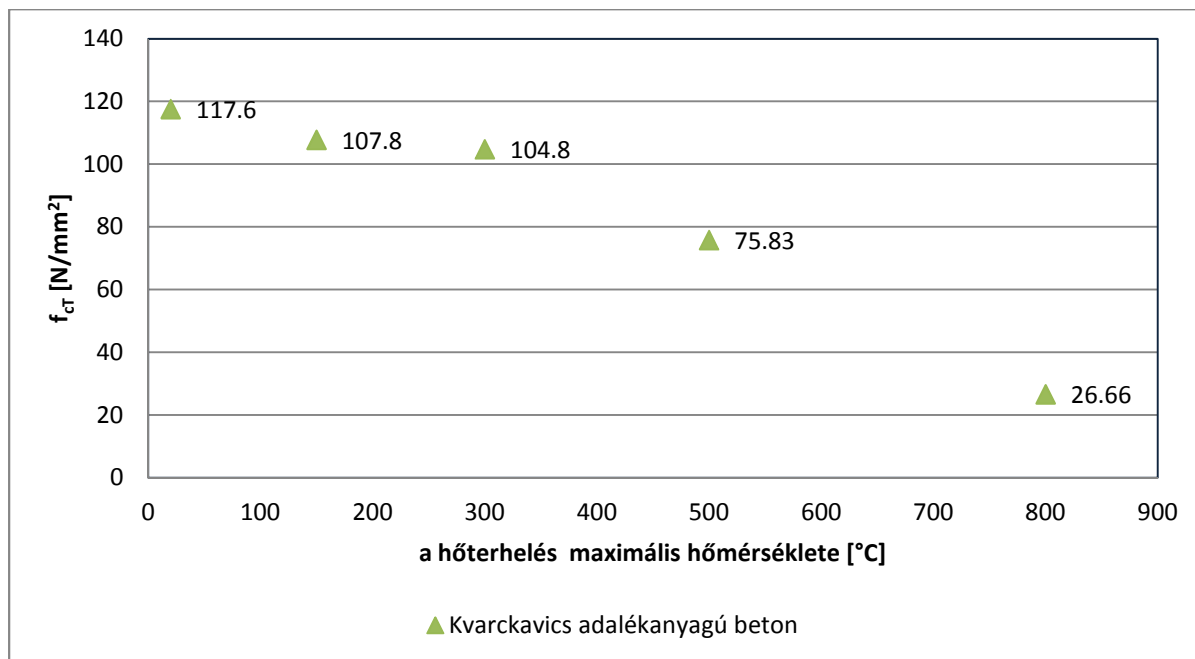
4-2. ábra Henger törésképek



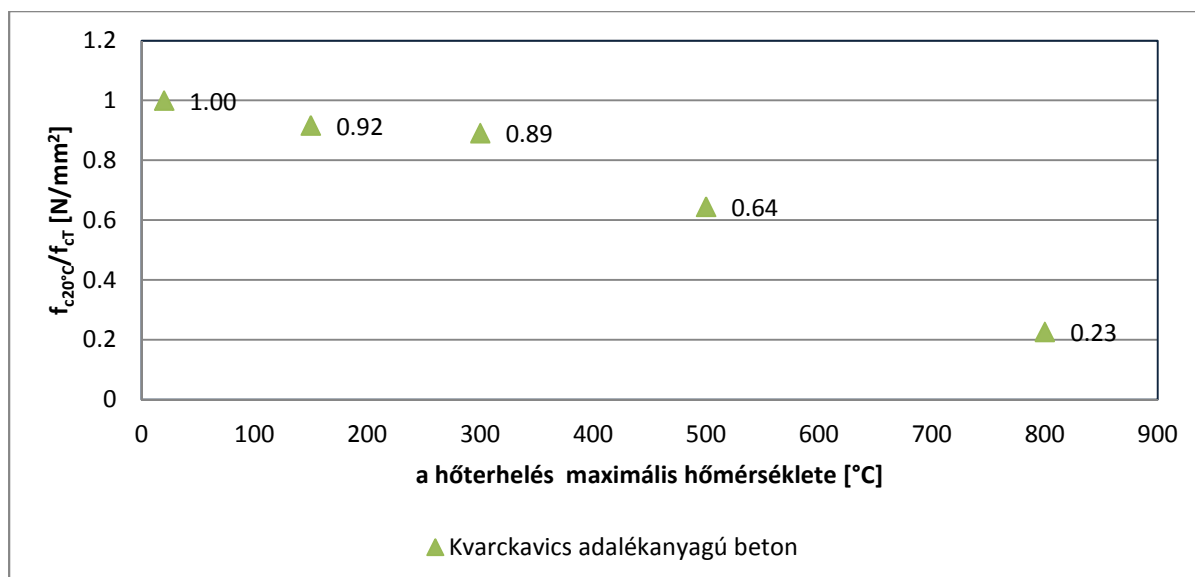
4-3. ábra Hasáb törésképek

#### 4.1.2.2. Nyomószilárdsági vizsgálat

A nyomószilárdsági vizsgálatokhoz 12 darab henger alakú próbatestet készítettem. Ezeket tűzterhelésnek (20, 150, 300, 500 vagy 800 °C) vettem alá, majd kihülésük után a nyomószilárdságukat vizsgáltam. A mért eredmények alapján elkészítettem a szilárdsági- (4-4. ábra) és a 20 °C-os szilárdsági értékhez tartozó, viszonyított szilárdsági diagramot (4-5. ábra).



4-4. ábra Kvarckavics adalékanyagú beton nyomószilárdsága



4-5. ábra Kvarckavics adalékanyagú beton viszonyított szilárdsága

A szilárdságsökkenés tendenciája a diagramokon jól látható.

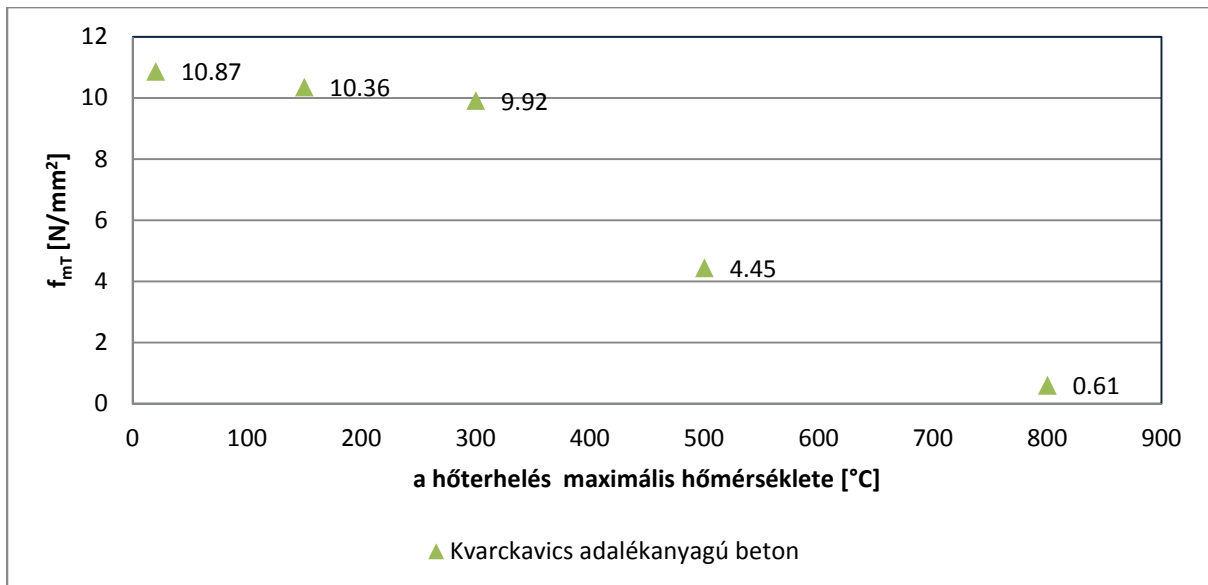
A kvarckavics adalékanyagú beton tűzhatás nélkül (20 °C) 117,6 N/mm<sup>2</sup> nyomószilárdsági értéket ért el. 300 °C alatt nem tapasztaltam számottevő szilárdságvesztést. A 300 °C-hoz tartozó nyomószilárdság értéke 104,8 N/mm<sup>2</sup>. Ez csupán 11 %-al marad el a 20 °C-os értékektől. A kis szilárdságcsökkenés oka az, hogy a beton fő szilárdsághordozói (kálcium-szilikát-hidrátok) ilyen alacsony hőmérsékleten nem károsodnak. Ezen a hőmérsékleti szinten csupán a gipsz és az ettringit bomlásával kell számolnunk.

Tovább növelve a hőterhelés értékét az 500 °C-os lépcsőre már jelentős szilárdságcsökkenést tapasztaltam. A mért szilárdsági érték csupán 75,83 N/mm<sup>2</sup>, ez kevesebb mint a kiindulási szilárdság 65%-a. Ezen a teherszinten a beton eredeti szilárdságának majdnem felét elvesztette. A betonban ilyen hőteher hatására a nem karbonátosodott portlandit elbomlik. Ilyen mértékű szilárdságcsökkenés tartószerkezetek szempontjából végzetes kimenetelű lehet.

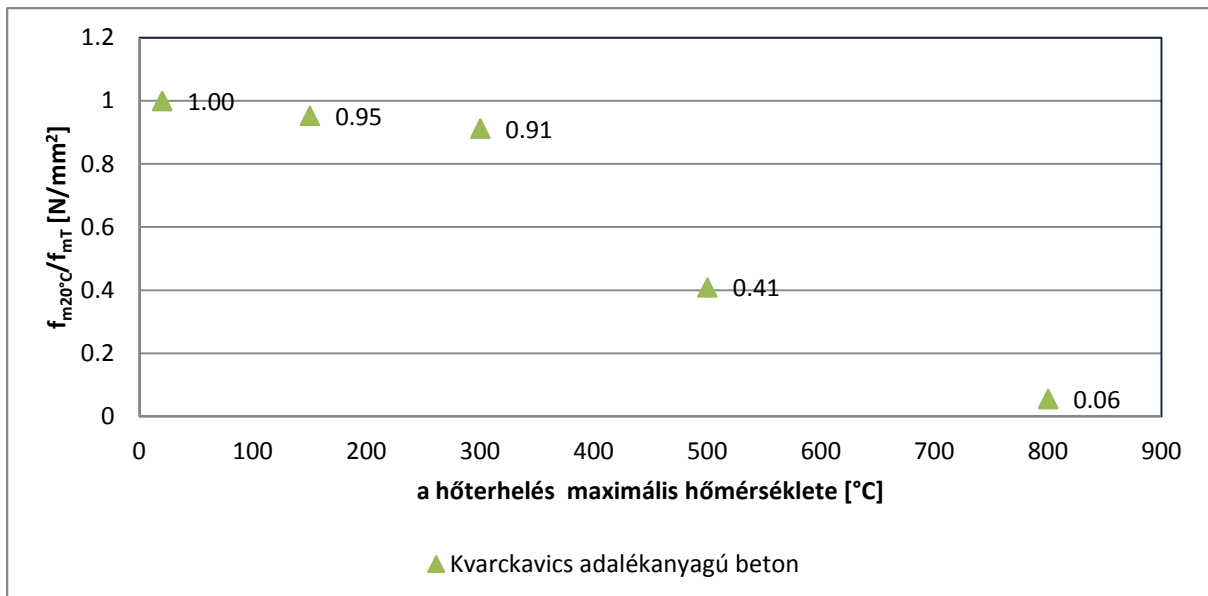
A 800 °C-os teherszinten a szilárdságvesztés jelentős mértékű. A mért érték kevesebb, mint a kiindulási szilárdság negyede (23 %) 26,66 N/mm<sup>2</sup>. Ekkora mértékű szilárdságcsökkenést a kvarc átkristályosodása és a kalcium-szilikát-hidrátok – a beton fő szilárdsághordozója – elbomlása okozza.

#### 4.1.2.3. Hajlító-húzó szilárdsági vizsgálat

A hajlító-húzó szilárdsági vizsgálatokhoz 12 darab hasáb alakú próbatestet készítettem. Ezeket tűzterhelésnek (20, 150, 300, 500 vagy 800 °C) vettem alá, majd kihülésük után a hajlító-húzó szilárdságukat vizsgáltam. A mért eredmények alapján elkészítettem a szilárdsági- (4-6. ábra) és a 20 °C-os szilárdsági értékhez tartozó, viszonyított szilárdsági diagramot (4-7. ábra).



4-6. ábra Kvarckavics adalékanyagú beton hajlító-húzó szilárdsága



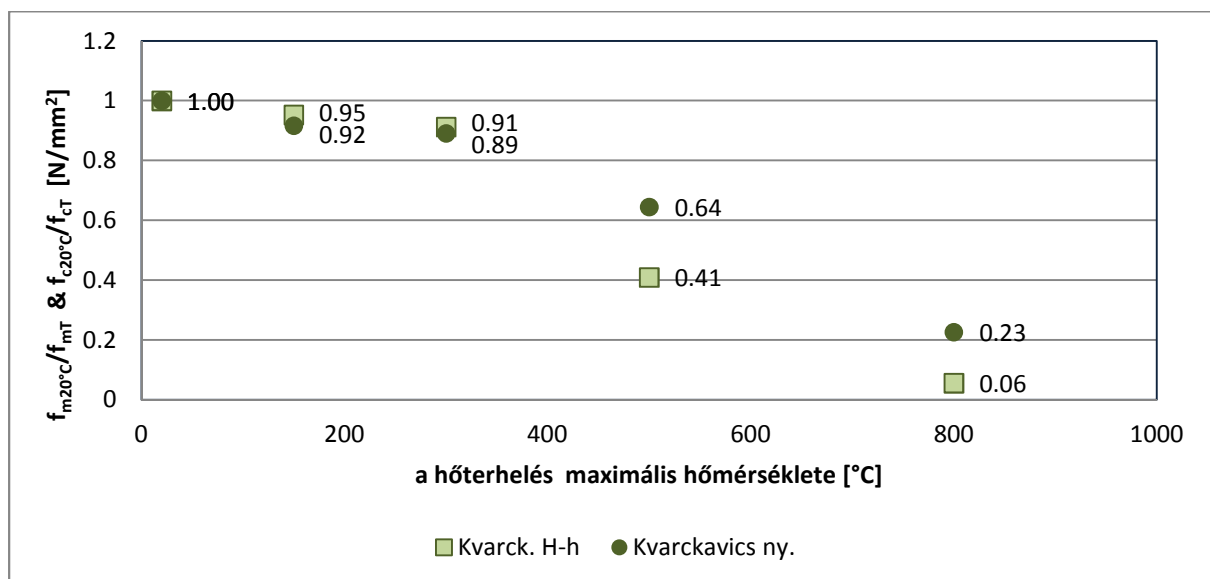
4-7. ábra Kvarckavics adalékanyagú beton viszonyított hajlító-húzó szilárdsága

A kvarckavics adalékanyagú beton hajlító-húzó szilárdsági értékei monoton csökkenő tendenciát mutatnak. A kezdeti, 20 °C-hoz tartozó érték 10,87 N/mm<sup>2</sup>. Az alacsony hőmérsékleti tartományokban (300 °C-ig) csekély szilárdságcsökkenés jellemzi, melynek értéke nem haladja meg a 10 %-ot. Az 500 °C-ra hevített próbatestek szilárdságuk közel 60 %-át elvesztették a portlandit elbomlása miatt. A 800 °C-hoz tartozó mért szilárdsági érték

0,61 N/mm<sup>2</sup>. Ezek a próbatestek a CSH-ok bomlása miatt hajlító-húzószilárdságuk csaknem egészét elvesztették.

#### 4.1.2.4. A kvarckavics adalékanyagú beton viszonyított szilárdságainak összehasonlítása

Megvizsgálva a viszonyított hajlító-húzószilárdsági diagramot kimondhatjuk, hogy lefutása a viszonyított nyomószilárdsági diagramhoz nagyon hasonló, az eredmények kezdetben (300 °C-ig) nem térnek el jelentősen. Ugyanakkor, ha a nyomószilárdság és a hajlító-húzó szilárdság viszonyított értékeit összehasonlítjuk a magasabb hőmérsékleti tartományokban, akkor megfigyelhetjük, hogy a hajlító-húzószilárdság viszonyított értékei jóval alul maradnak a nyomószilárdság esetében mért adatoktól (4-8. ábra). Az 500 és 800 °C-hoz tartozó viszonyított nyomó és hajlító-húzó szilárdsági értékpárok rendre 64 % és 41 %, valamint 23 % és 6 %. Ez a különbség a törési mechanizmus eltéréséből eredhet. 500 °C körül elbomlanak az adalékanyag szemcsék határfelületén kialakult portlandit kristályok, amelyek a cementváz és az adalékanyag szemcse közötti kapcsolatot biztosítják. A portlandit kristályok elbomlásával a törési felület elkerüli az adalékanyag szemcséket, azok határfelületén fut végig a cementkőben. Nyomószilárdság vizsgálat esetén, az ott létrejövő törési mechanizmus nem érzékeny a beton ezen átalakulására. Ezzel indokolható 500 °C hőhatásnak kitett nyomó és hajlító-húzószilárdság viszonyított értékei eltérőek.



4-8. ábra Kvarckavics adalékanyagú betonok viszonyított nyomószilárdsági és hajlító-húzó szilárdsági értékei a maximális hőterhelés függvényében



### 4.1.3. Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton

#### 4.1.3.1. Szemrevételezés

A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú próbatestek viszonylag jól viselték a hőterhelést (4-9. ábra). A legfelső, 1000 °C-os hőlépcsőn terhelt próbatestek sem szenvedtek külső sérülést. A próbatestek egy darabban maradtak, leválások nem történtek. Makroszkopikus repedések nem keletkeztek. Az 1000 °C-on terhelt próbatestek színe megváltozott, kifehéredtek (4-9. ábra).



4-9. ábra Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú próbatestek hőterhelés után

A henger alakú próbatestek nyomószilárdság vizsgálatánál, az alacsony hőterhelési lépcsőkön (20 °C, 150 vagy 300 °C) terhelt próbatestek törésképein jól láthatók a törési felületek. Kétféle tönkremeneteli módot figyeltem meg. Az egyik esetén a próbatestek tönkremenetel után egyben maradnak (4-10. ábra), a hasadó felület, a próbatest külső felületén jól látható, a sarkok esetleg lehasadnak (4-11. ábra). A másik esetben a hasadó felület mentén kettéválik a próbatest (4-12. ábra). Az adalékanyag szemcsék hasadó felülete szürkés-fekete, matt fényű.



4-10. ábra Henger töréskép I.



4-11. ábra Henger töréskép II.



4-12. ábra Henger töréskép III.

Az 500 vagy 1000 °C-os hőmérséklettel terhelt próbatetek törésképein nem ismerhetők fel egyértelműen a hasadó felületek (4-13. ábra, 4-14. ábra). A törőerő hatására a próbatest szétporlott. A törési felületen megtalálhatók ugyan elhasadt adalékanyag szemcsék, de sok szemcse ép állapotban pergett ki a próbatestből. Ez arra utal, hogy a cementkő váz szilárdsága jelentősen lecsökkent. Az adalékanyag szemcsezilárdságát nem éri el a cementkő szilárdsága, a tönkremenetelt a cementkő tönkremenetele határozta meg. Az 500 °C-kal hőterhelt próbatesteken az elhasadt adalékanyag szemcsék hasított felülete szintén szürkés-fekete, matt fényű (4-13. ábra). Az 1000 °C -kal terhelt próbatesteknél az elhasadt adalékanyag szemcsék felülete már téglavörös színű. A téglák és cserepek égetési hőmérséklete 1000 °C. Tehát a próbatestben lévő duzzasztott agyagkavicsok kiégnek (4-15. ábra), de a szilárdságuk nem csökken.



4-13. ábra Henger töréskép IV.



4-14. ábra Henger töréskép V.



4-15. ábra Kiégett duzzasztott agyagkavics szemcse

A hasáboknál is megfigyelhető volt a törési felületeken, hogy azokban a próbatestekben, amelyek nem voltak, illetve csak alacsony hőmérsékletre (150 vagy 300 °C) voltak felhevítve, az adalékanyag szemcsék hasadtak el (4-16. ábra). Az 500 °C -ra hevített próbatestek törésképén sokkal kisebb számban találunk elhasadt szemcséket (4-17. ábra). Az 1000 °C-ra hevített próbatestek törési felületén elvétve találunk elhasadt szemcsét (4-18. ábra).



4-16. ábra Hasáb töréskép I.



4-17. ábra Hasáb töréskép II.

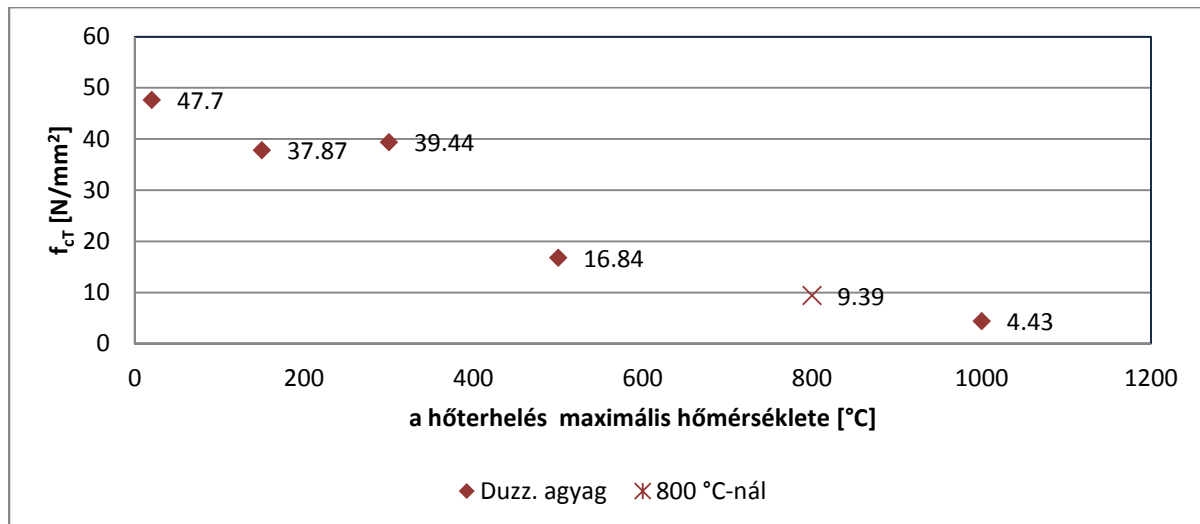


4-18. ábra Hasáb töréskép III.

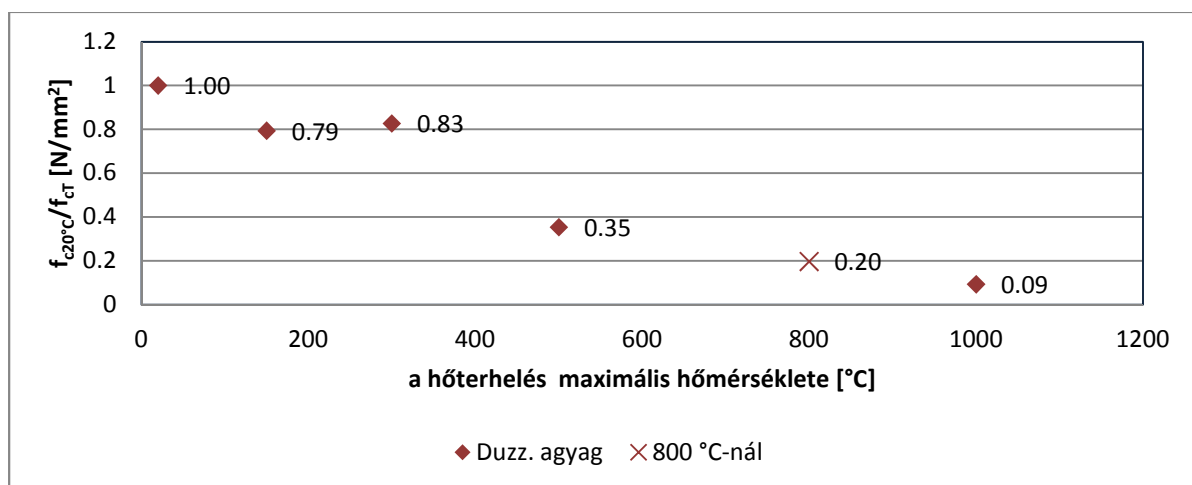


#### 4.1.3.2. Nyomószilárdsági vizsgálat

A nyomószilárdsági vizsgálatokhoz 12 darab henger alakú próbatestet készítettem. Ezeket tűzterhelésnek (20, 150, 300, 500, 1000 °C) vettem alá, majd kihülésük után a nyomószilárdságukat vizsgáltam. A mért eredmények alapján elkészítettem a szilárdsági- (4-19. ábra) és a 20 °C-os szilárdsági értékhez tartozó, viszonyított szilárdsági diagramot (4-20. ábra).



4-19. ábra Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton nyomószilárdsága



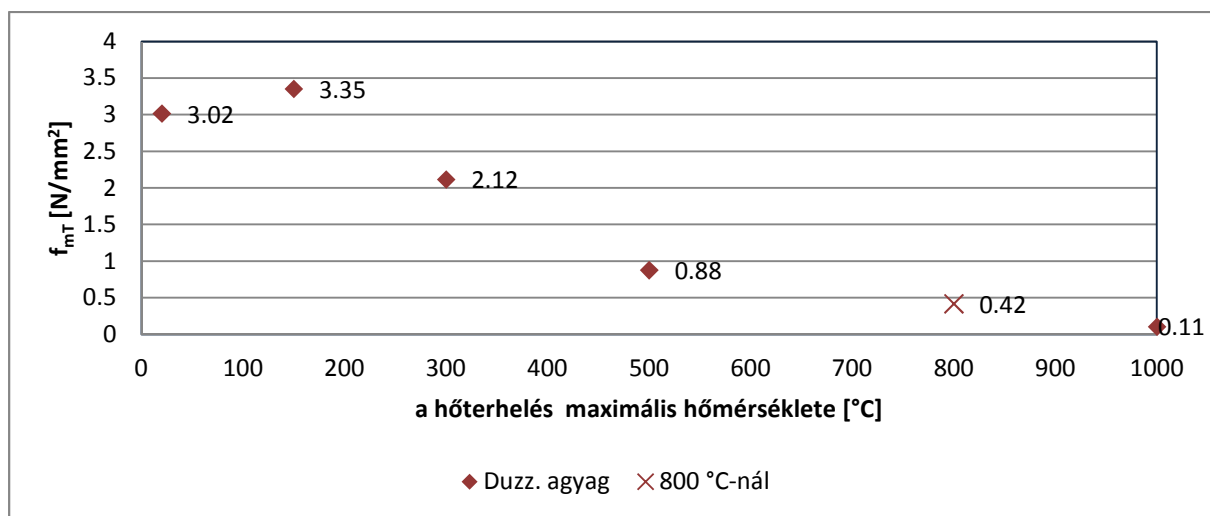
4-20. ábra Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton viszonyított nyomószilárdsága

A duzzasztott agyagkavics adalékanyaggal készített próbatestek nyomószilárdsági diagramja (4-19. ábra, 4-20. ábra) követik a kvarckavicsos keveréknél látott szilárdságcsökkenési tendenciát. A 20 °C-hoz tartozó szilárdság értéke 47,7 N/mm<sup>2</sup>. Az alacsonyabb hőmérsékletnek (maximum 300 °C) kitett próbatestek kezdeti szilárdságuk közel 20 %-át veszítették el. A 150 °C-hoz tartozó szilárdság értéke 37,87 N/mm<sup>2</sup>, a 300 °C-nál mért érték ezt kissé meghaladja, 39,44 N/mm<sup>2</sup>. Tovább emelve a maximális hőterhelés mértékét, a magasabb hőmérsékleti tartományokban a szilárdságcsökkenés értéke jelentős. Az 500 °C-nak kitett próbatestek kezdeti szilárdságuknak közel két harmadát elvesztették. Ezen hőmérsékletnek kitett próbatestek esetében 16,84 N/mm<sup>2</sup> szilárdságot mértem, ez a kezdeti

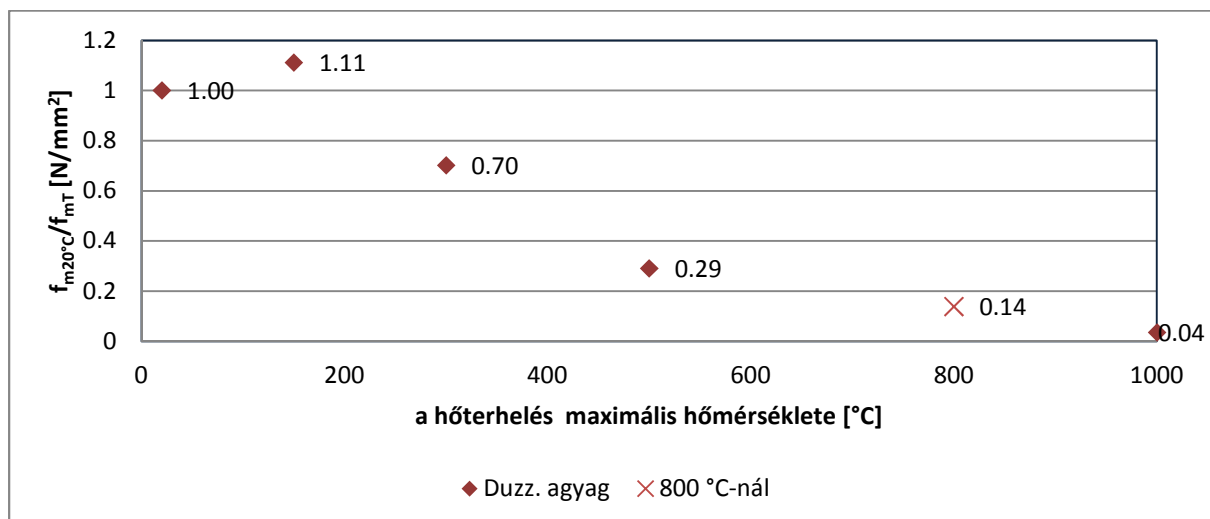
érték csupán 35 %-a. Az agyag égetési hőmérsékletére, 1000 °C-ra hevített próbatetek esetén a kezdeti szilárdság csupán 9 %-át, 4,43 N/mm<sup>2</sup> mértem. A 800 °C-hoz tartozó értéket lineáris interpolációval kiszámítva a két szomszédos szilárdsági értékből 9,39 N/mm<sup>2</sup> adódik. Ez az érték a kezdeti szilárdság 20 %-a. A jelentős szilárdságcsökkenés az 500 °C-nak, vagy annál magasabb hőmérsékletnek kitett próbateteknél tapasztalható. Ennek oka a cementkő átalakulása, a portlandit (450 °C) és a CSH vegyületek (700 °C) bomlása.

#### 4.1.3.3. Hajlító-húzószilárdsági vizsgálat

A hajlító-húzó szilárdsági vizsgálatokhoz 12 darab hasáb alakú próbatestet készítettem. Ezeket tűzterhelésnek (20, 150, 300, 500 vagy 1000 °C) vettem alá, majd kihülésük után a hajlító-húzószilárdságukat vizsgáltam. A mért eredmények alapján elkészítettem a szilárdsági- (4-21. ábra) és a 20 °C-os szilárdsági értékhez tartozó, viszonyított szilárdsági diagramot (4-22. ábra).



4-21. ábra Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton hajlító-húzó szilárdsága

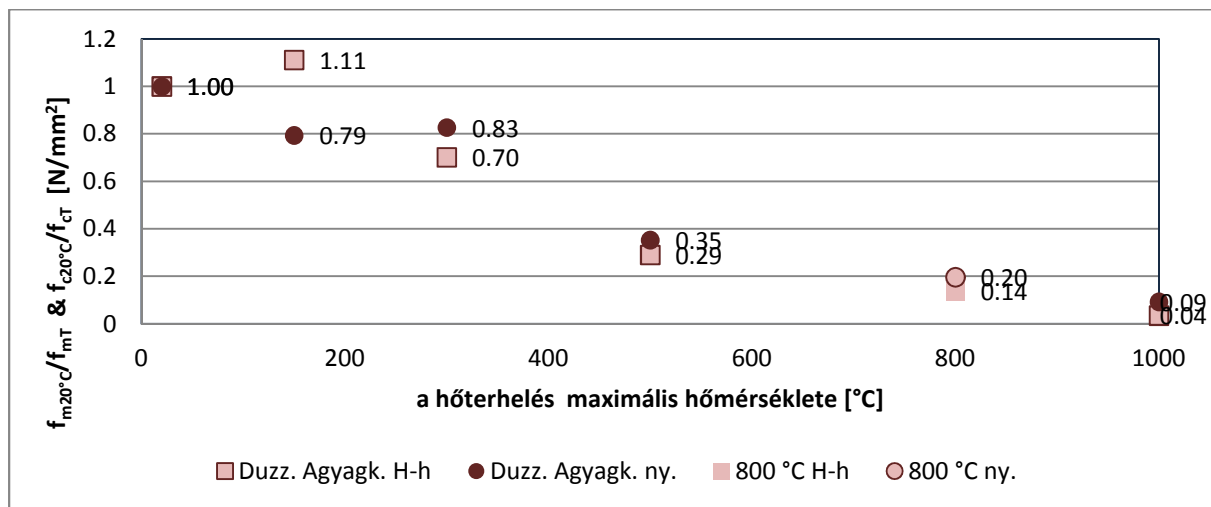


4-22. ábra Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton viszonyított hajlító-húzó szilárdsága

A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú hasábok hajlító-húzószilárdsági diagramjain (4-21. ábra, 4-22. ábra) megfigyelhetjük, hogy a 150 °C-nak kitett próbatestek szilárdsági értéke (3,35 N/mm<sup>2</sup>) 10 %-al meghaladja a kiindulási értéket (3,02 N/mm<sup>2</sup>). Ezt az enyhe szilárdságnövekedést a hőterhelés hatására kialakult utólagos hidratáció okozza. Az ezt követő hőlépcsőknél azonban gyors ütemű szilárdságcsökkenés figyelhető meg. A 300 °C maximális hőmérsékletre tartozó szilárdsági érték, a kiindulási érték 70 %-a, 2,12 N/mm<sup>2</sup>. Az 1000 °C-nak kitett próbatestek a maadó szilárdság értéke a kezdeti szilárdság csupán 4 %-a, 0,11 N/mm<sup>2</sup>. A 800 °C-hoz tartozó interpolált érték 0,42 N/mm<sup>2</sup> (14 %). A szilárdságcsökkenés oka a cementkő károsodása, amit elsősorban a portlandit és a CSH vegyületek bomlása okoz.

#### 4.1.3.4. A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonok viszonyított szilárdságainak összehasonlítása

A viszonyított szilárdsági diagramokat összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a szilárdságcsökkenés tendenciája a magas hőmérsékleti tartományban mind nyomó-, mind pedig hajlító-húzó szilárdsági vizsgálat esetén megegyező (4-23. ábra). Kivételt képeznek a 150 °C maximális hőmérsékletre kitett próbatestek, mert itt nyomószilárdsági vizsgálat esetén szilárdságcsökkenést, hajlító-húzó szilárdság vizsgálat esetén pedig a szilárdság növekedését figyelhetjük meg.



4-23. ábra Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton viszonyított szilárdságai



#### 4.1.4. Duzzasztott üvegvadics (habüveg) adalékanyagú beton

##### 4.1.4.1. Szemrevételezés

A duzzasztott üvegvadics adalékanyaggal készült próbatestek a tűzterhelés hatására igen nagy károsodásokat szenvedtek. Az alacsonyabb hőmérsékleten terhelt próbatestek a hőterhelést makroszkopikus károsodások nélkül viselték. A 800 °C -nak kitett próbatestek kifehéredtek (4-24. ábra).



4-24. ábra Duzzasztott üvegvadics adalékanyagú próbatestek hőterhelés után

Az 500 °C-nak kitett hasáb alakú próbatestek kivétel nélkül roncsolódtak (4-25. ábra) a hőterhelés folyamán, valamint az egyik henger sarkából is kihaladt egy darab. A 800 °C-nak kitett hasábok teljesen összeroncsolódtak (4-26. ábra), sarkaik, éleik lehasadtak. A hengerek közül is volt olyan amelyik tönkrement a hőterhelés során.



4-25. ábra 500 °C-nak kitett próbatestek



4-26. ábra 800 °C-nak kitett hasáb

Összességében megfigyelhető, hogy a szögletes, éllel határolt próbatestek hajlamosabbak tönkremenni a hőterhelés hatására, mint azok, amelyeket görbült felületek határolnak. Ennek oka, hogy a görbült határfelületű próbatestekben kisebb mértékű feszültségek keletkeznek a hőtágulás miatt, mint a szögletes alakúakban. Ez a megfigyelés a mérnöki alkalmazásban a henger alakú vasbeton oszlopok alkalmazását szorgalmazza, hiszen azok kedvezőbb viselkedést mutatnak tűzterhelés hatására, mint a szögletes változatok.

A nyomószilárdság vizsgálatoknál a próbatestek tönkremenetele 500 °C-os hőterhelésig egységes (4-27. ábra). A próbatest jól kirajzolódó hasadó felület mentén mentek tönkre, esetenként a szélei lerepednek. Az adalékanyag szemcsék elhasadnak, hasadó felületük matt fehér. A 800 °C-nak kitett próbatestek tönkremenetelkor összemorzsolódnak (4-28. ábra). A próbatest belsejében nem látható adalékanyag szemcse, csupán a helyükön lévő üregek figyelhetők meg. Ennek oka, hogy az üveg 800 °C -on plasztikus állapotba kerül.



4-27. ábra Henger töréskép I.



4-28. ábra Henger töréskép II.

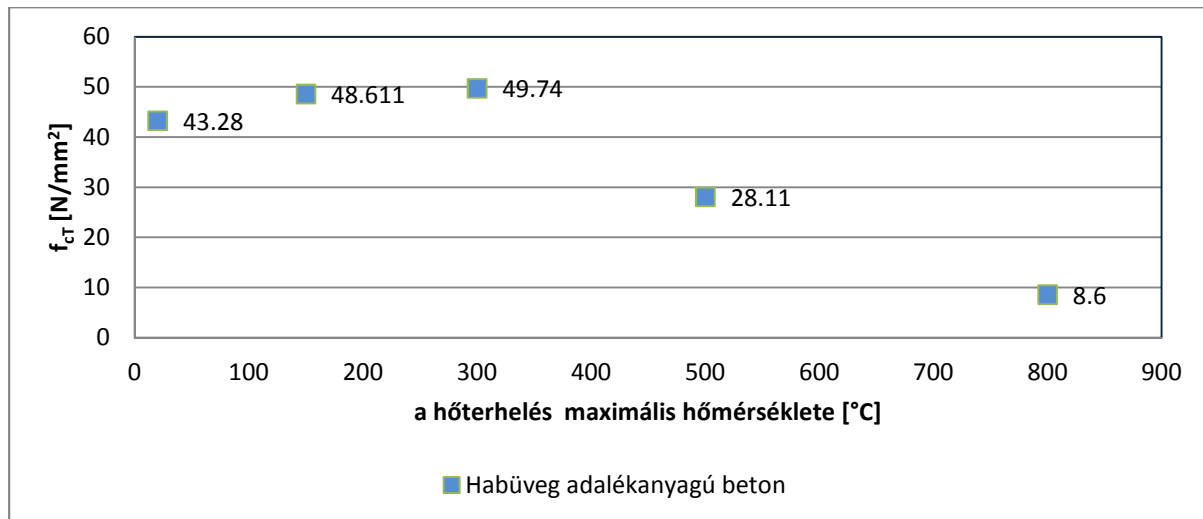
A hasábok törésképe egységes. Az adalékanyag szemcsék és a cementkő váz elhasadnak. A szemcsék felülete matt fehér színű (4-29. ábra).



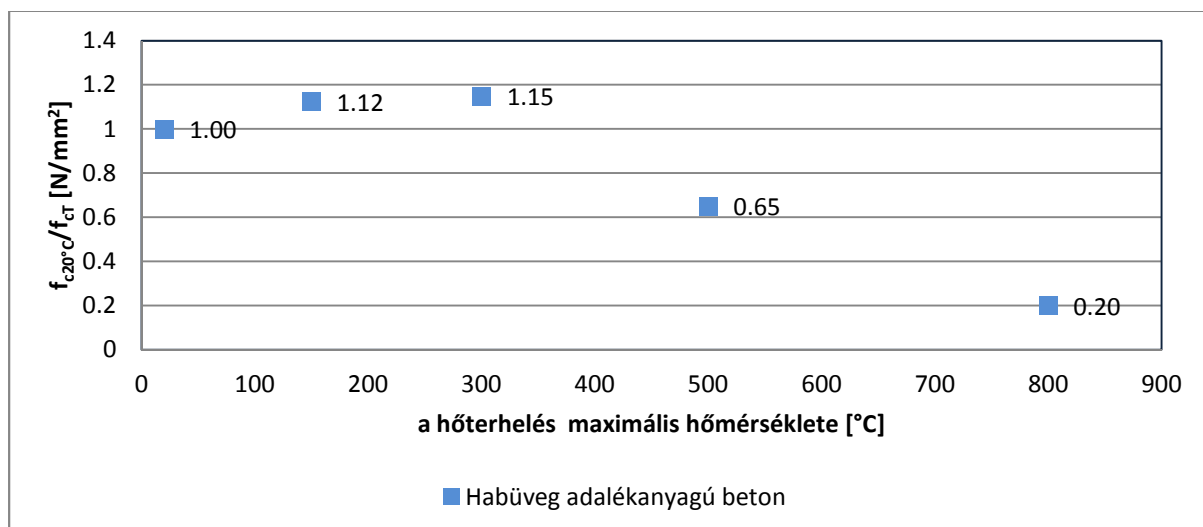
4-29. ábra Hasáb töréskép

#### 4.1.4.2. Nyomószilárdsági vizsgálat

A nyomószilárdsági vizsgálatokhoz 12 darab henger alakú próbatestet készítettem. Ezeket tűzterhelésnek (20, 150, 300, 500 vagy 800 °C) vettem alá, majd kihülésük után a nyomószilárdságukat vizsgáltam. A mért eredmények alapján elkészítettem a szilárdsági- (4-30. ábra) és a 20 °C-os szilárdsági értékhez tartozó, viszonyított szilárdsági diagramot (4-31. ábra).



4-30. ábra Duzzasztott üvegekavics adalékanyagú betonok nyomószilárdsága



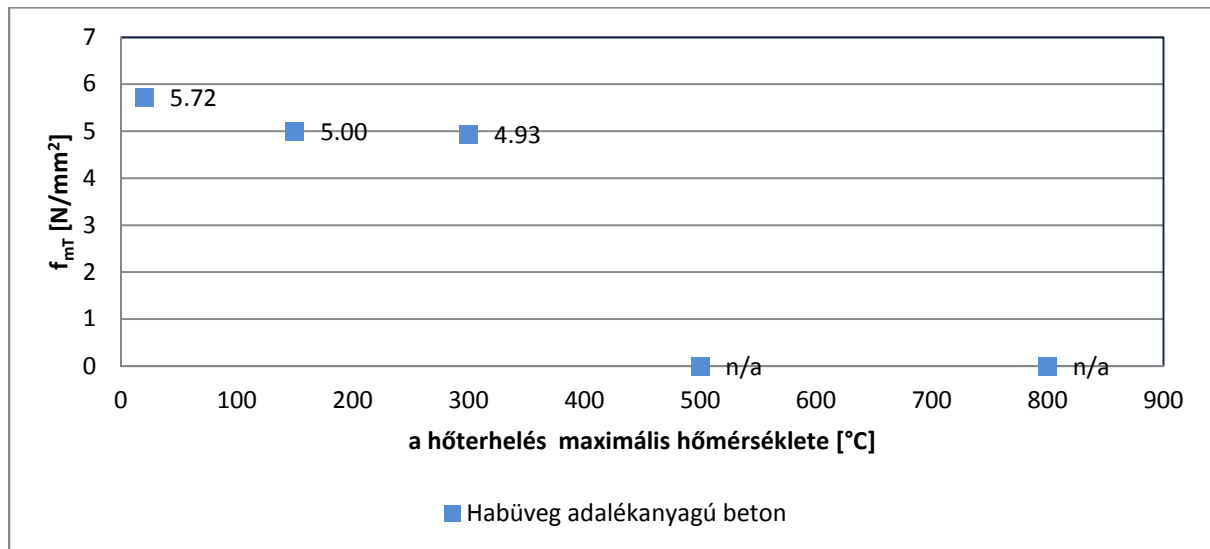
4-31. ábra Duzzasztott üvegekavics adalékanyagú betonok viszonyított nyomószilárdsága

A habüveg adalékanyagú próbatesteknél, a 20 °C-hoz tartozó, kezdeti szilárdsági értéknek 43,28 N/mm<sup>2</sup>-t mértem. Az ezt követő két hőlépcsőben (150 °C vagy 300 °C) kis mértékű mintegy 12-15 %-os szilárdságnövekedés következett be (4-30. ábra, 4-31. ábra). Ennek oka a hő hatására lejátszódó utólagos hidratáció. Az ezt követő 500 °C-os hőlépcsőnél jelentős szilárdságcsökkenést okoz a portlandit bomlása. A maradó nyomószilárdság a kezdeti érték csupán 65 %-a. A 800 °C terhelt próbatesteknél a CSH-ok elbomlása további

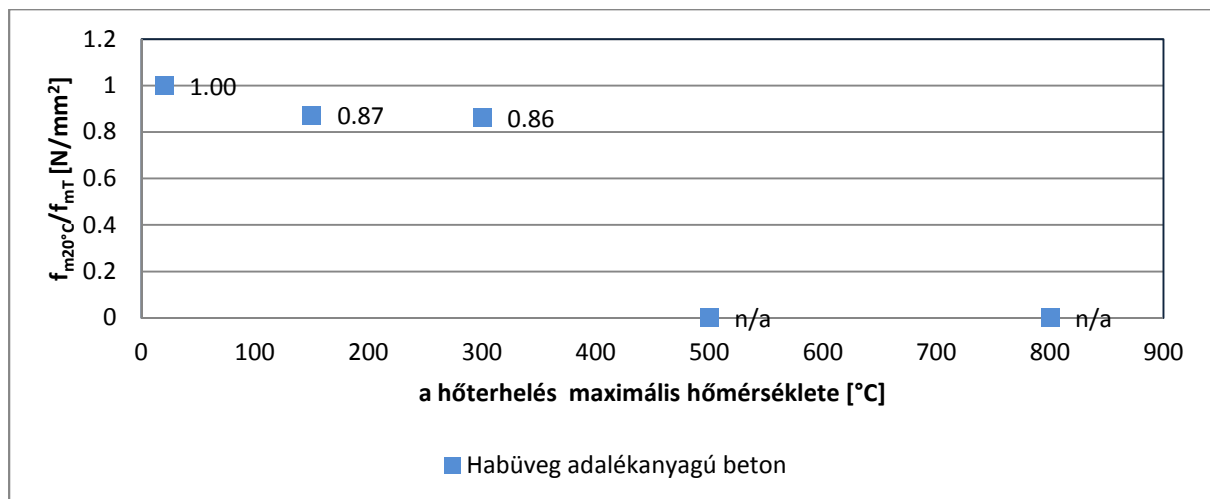
szilárdságcsökkenést eredményez. Ezekhez tartozó szilárdság értéke  $8,6 \text{ N/mm}^2$ , azaz a kezdeti szilárdság 20%.

#### 4.1.4.3. Hajlító-húzószilárdsági vizsgálat

A hajlító-húzó szilárdsági vizsgálatokhoz 12 darab hasáb alakú próbatestet készítettem. Ezeket tűzterhelésnek (20, 150, 300, 500 vagy  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ) vettem alá, majd kihülésük után a hajlító-húzó szilárdságukat vizsgáltam. A mért eredmények alapján elkészítettem a szilárdsági- (4-32. ábra) és a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -os szilárdsági értékhez tartozó, viszonyított szilárdsági diagramot (4-33. ábra).



4-32. ábra Duzzasztott üvegvadics adalékanyagú beton hajlító-húzó szilárdsága



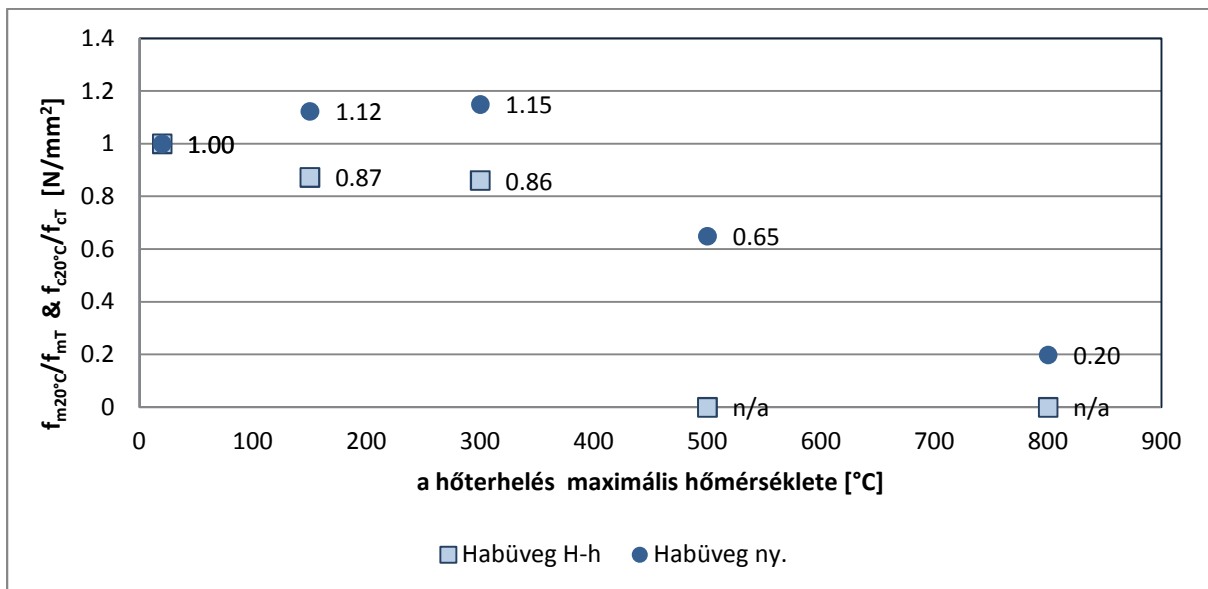
4-33. ábra Duzzasztott üvegvadics adalékanyagú beton viszonyított hajlító-húzó szilárdsága

A habüveg adalékanyagú próbatestek hajlító-húzószilárdsága csak a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőlépcsőig meghatározott, mert magasabb hőmérsékletű hőteher hatására a hasáb alakú próbatestek összeroncsolódtak és a szilárdsági vizsgálatot nem lehetett elvégezni rajtuk (4-25. ábra, 4-26.

ábra). Ennek oka lehet a betonba zárt víz miatt keletkező gőznyomás. Ezekhez a teherszintek tehát nem tartozik mért adat (n/a). Az alacsony teherszinteket az ettringit bomlása miatt csekély mértékű, 13-14 %-os szilárdságvesztés jellemez (4-32. ábra, 4-33. ábra).

#### 4.1.4.4. A duzzasztott üvegkavics adalékanyagú beton viszonyított szilárdságainak összehasonlítása

A nyomószilárdság és hajlító-húzó szilárdság összehasonlítása során szembevető különbség, hogy amíg nyomószilárdság esetén 12-15 %-os szilárdságnövekedés történt, addig a hajlító-húzó szilárdság értékei 13-14 %-ot csökkentek (4-34. ábra). Ennek oka a hasáb alakú próbatestek károsodása a hőtágulási feszültségek miatt, amelyek a magasabb hőmérsékletnek kitett próbatesteket teljesen összeroncsolták.



4-34. ábra Duzzasztott üvegkavics adalékanyagú betonok viszonyított szilárdságai



#### 4.1.5. Polisztirol gyöngy adalékanyagú beton

##### 4.1.5.1. Szemrevételezés

A polisztirol gyöngy adalékanyagú próbatesteket a 150 °C-os hőtehernek kitéve megfigyeltem, hogy a polisztirol gyöngyök egy része kiégett. 10 °C-ként emelve a maximális hőmérsékletet megfigyeltem, hogy 180 °C-on a polisztirol gyöngyök teljesen kiégnek a betonból. A helyükön repedésmentes, közel tökéletesen gömb alakú cellák maradnak vissza. A póruskép egyenletes. A pórusok mérete, mennyisége ezáltal pontosan szabályozhatóvá válik. A gömb alakú cellák előnye, hogy a szükséges pórustérfogatot a lehető legkisebb pórusfelülettel érik el. Ez az adott pórustérfogattal elérhető legnagyobb szilárdságot eredményezi (Balázs Gy., 1994). A polisztirol gyöngy adalékanyagú betonok nem teherviselő szerkezeti anyagok, ezért szilárdsági vizsgálatot nem végeztem rajtuk.



4-35. ábra Kiégett polisztirol gyöngy adalékanyagú henger I.



4-36. ábra Kiégett polisztirol gyöngy adalékanyagú henger II.



4-37. ábra Kiégett polisztirol gyöngy adalékanyagú próbatest pórusképe



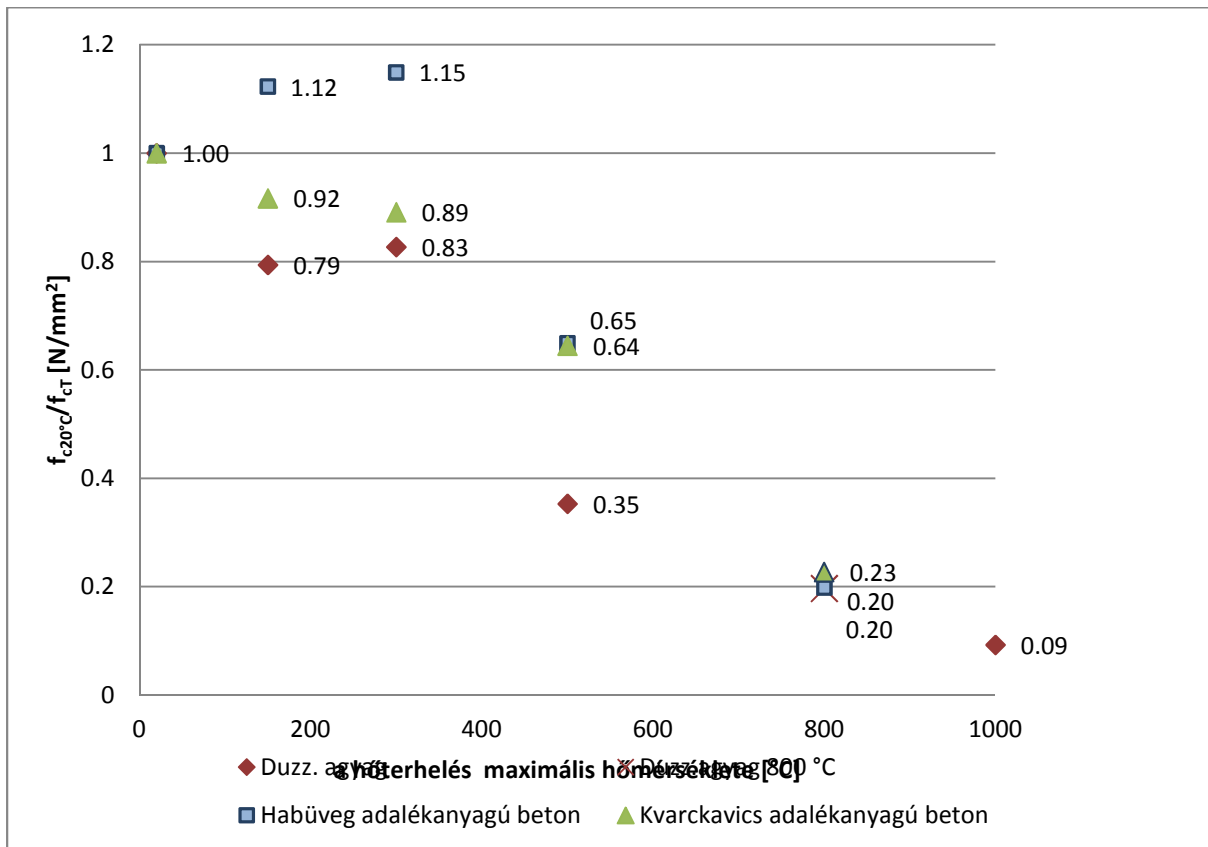
#### 4.1.6. Kvarckavics, duzzasztott agyag és habüveg adalékanyagú betonok összehasonlítása tűzállóság szempontjából

A különböző könnyű adalékanyagú betonok viszonyított szilárdságait a referenciaként alkalmazott kvarckavicsos normál beton értékeihez viszonyítom.

##### 4.1.6.1. Nyomószilárdság

A habüveg adalékanyagú próbatetek az alacsony hőterhelési tartományban (max. 300 °C) jobban teljesítettek, mint a referencia keverék. Ennek oka, hogy a pórusokban lévő víz utókezelési a betont. A magas hőmérsékleti tartományokban pedig a referencia keverékhez nagyon hasonlóan teljesítettek.

A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú próbatetek viszonyított szilárdságai az utolsó hőlépcsőt kivéve végig elmaradnak a kvarckavicsos referencia keverék értékeitől.

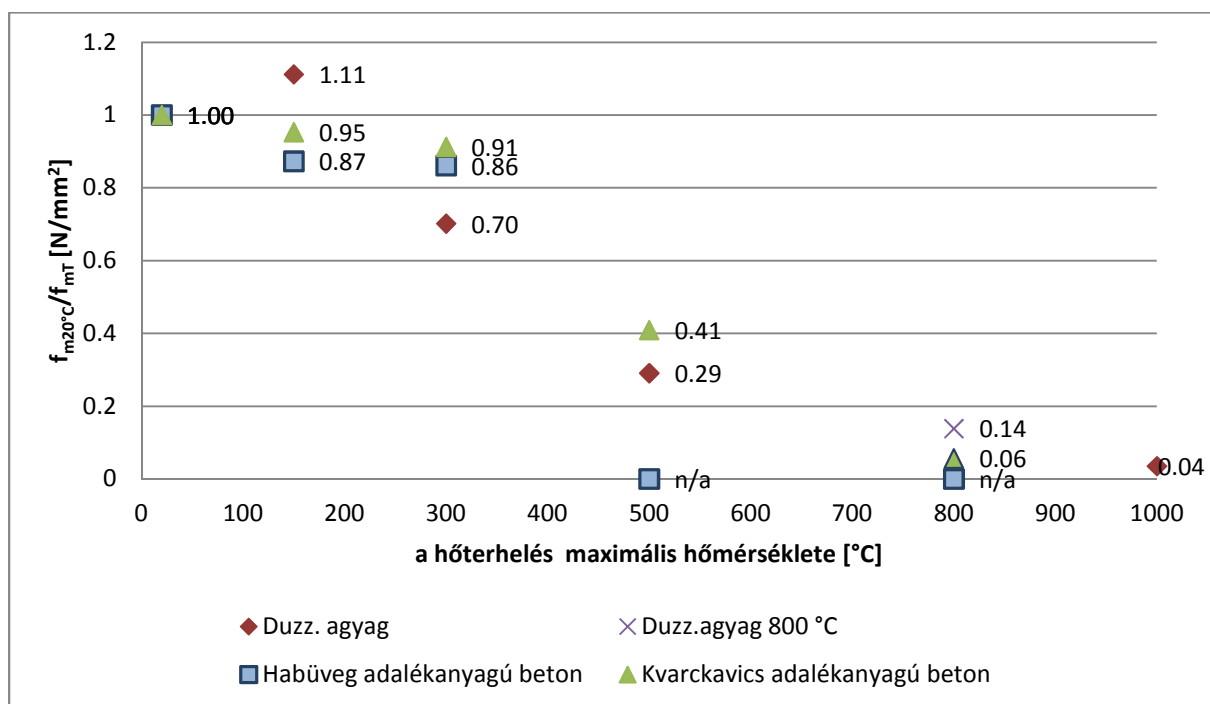


4-38. ábra Viszonyított nyomószilárdságok

#### 4.1.6.2. Hajlító-húzószilárdság

A habüveg adalékanyagú próbatetek viszonyított hajlító-húzószilárdsága az alacsony hőmérsékleti tartományban elmarad a referencia értéktől. Magas hőmérséklet hatására pedig a próbatetek tönkrementek.

A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú próbatetek viszonyított hajlító-húzószilárdsága a 150 °C hőlépcsőn meghaladja a referencia keverék értékeit. A 300 °C, 500 °C-os hőlépcsőkön a referencia keverék értékeitől elmaradnak az értékei, viszont az utolsó, 800 °C hőlépcsőn a referencia keverék viszonyított szilárdságának több mint dupláját teljesíti (4-39. ábra).



4-39. ábra Viszonyított hajlító-húzó szilárdságok

## 4.2. Fagyhámlasztásos kísérletek leírása

Beton fagyállóság vizsgálata ma az MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szerint történik, ami lehet (4-1. táblázat):

- A) bemeztéses vizsgálat
- B) peremes hámlasztás vizsgálat
- C) kapilláris felszívásos hámlasztás vizsgálat.

A bemeztéses vizsgálat esetén a próbatesteket víz illetve sós víz alatt fagyasztjuk meg. Az előírt fagyasztási ciklusok száma: 56. A megfelelés feltétele: tömegvesztés  $< 5\%$  és szilárdságvesztés  $< 20\%$ .

Beton fagyállóság vizsgálata peremes hámlasztás vizsgálat az MSZ CEN/TS 12390-9:2007. Az előírt fagyasztási ciklusok száma: 56. A megfelelés feltétele (tömegvesztés): a környezeti kitéti osztályoknak megfelelően történik.

Beton fagyállóság vizsgálata a kapilláris felszívásos hámlasztás az MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szerint. Az előírt fagyasztási ciklusok száma: 28 (XF2, XF4); 56 (XF1, XF3). Megfelelés feltétele (tömegvesztés):  $< 1500 \text{ g/m}^2$  (Lublóy, 2010).

**4-1. táblázat A Fagy- és olvasztóállóság szabványos vizsgálatainak összehasonlítása (Lublóy, 2010)**

Szabvány	MSZ CEN/TS 12390-9:2007			MSZ 4798-1:2004	
	REFERENCIA	ALTERNATÍV (lásd 4. ábra)	ALTERNATÍV CF/CDF (lásd 5. ábra)	„A” eset (MSZ EN 12371:2002)	„B” eset (MSZ EN 1338:2003)
Vizsgálati módszer	REFERENCIA	ALTERNATÍV (lásd 4. ábra)	ALTERNATÍV CF/CDF (lásd 5. ábra)	NORMATÍV Előírás	NORMATÍV Előírás
Vizsgálat jellege	Peremes hámlasztás	Bemeztéses leválás	Kapilláris felszívásos hámlasztás	Bemeztéses leválás	Peremes hámlasztás
Fagyasztóközeg	3 mm mély réteg: ionmentes víz vagy 3 %-os NaCl oldat	Próbatestet (25±5) mm- rel ellepő ionmentes víz vagy 3 %-os NaCl oldat	10 mm mély réteg: ionmentes víz vagy 3 %-os NaCl oldat	Fagyasztás levegőn, olvasztás vízben	3 mm mély réteg: 3 %-os NaCl oldat (esetleg csapvíz, lásd az „A” esetet)
Eredeti próbatest mérete	150 mm-es kocka	100 mm-es kocka	I-alakú PTFE (pl. Teflon) betéttel függőlegesen két részre osztott, 150 mm-es kockasablonban készülő, kb. 140-150 mm vizsgálati felületű, (70±5) mm magas próbatest	Vízzel telített 100 vagy 150 mm-es kocka, vagy Ø150-150 vagy Ø100-100 mm-es henger	Legalább 20 napos 150 mm-es kocka, amelynek felezőjéből ki lehet vágni az 50-150-150 mm-es vizsgálati próbatestet
Próbatestek száma	4 db kockából kivágott 1-1 próbatest	4 db kocka, két tartály 2-2 kockával	5 db próbatest	3 db vízzel telített fagyasztandó és 1 db nem fagyasztott referencia próbatest hőmérsékletmérésre	3 db próbatest
Vizsgálati felület	A vizsgálati felület az eredeti próbatest felezősíkjával azonos vágott felület	Mind a hat oldal érintkezik a fagyasztóközeggel	A sablonban a függőleges PTFE anyagú elválasztó lemezzel érintkezett, kb. 140-150 mm-es felület	Mind a hat oldal érintkezik a fagyasztóközeggel	7500-25000 mm <sup>2</sup> közötti felület
Fedővel zárható, rozsdamentes tartály mérete	—	Széles: (120±15) mm Hossz: (260±15) mm Magas: (150±15) mm Falvastagság: kb. 1 mm	Alakja speciális. A próbatest és a tartály függőleges fala között (30±20) mm hely legyen. Falvastagság: (0,7±0,01) mm	—	—

A fagyhámlasztáshoz szükséges próbatesteket a kocka alakú próbatestekből alakítottam ki. A fagyhámlasztási próbatesthez kivágtam egy 10 cm x 10 cm x 5 cm-es téglatestet. A téglatest öt oldalára vízhatlan ragasztóval gumilapot és hungarocellt ragasztottam úgy, hogy a hatodik, szabad oldal, a 100 cm<sup>2</sup> felületi méretű, vágott oldal legyen. A szabad oldal és a gumi határfelület, éleit szilikon tömítővel vízhatlanítottam (4-40. ábra).

A kísérlet során a próbatest szabad felszínére 10 ml 3%-os sóoldatot öntöttem, majd lefóliázva 21 napig olvadás-fagyasztás ciklusnak kitéve, hetente mértem a lehámlott beton tömegét. A lemért tömegek összegét diagramon ábrázoltam.

Ezzel a kísérlettel jól szimulálhatóak a télen sózásnak kitett betonfelületeket érő károsító hatások és vizsgálható a betonfelületek tartóssága.



**4-40. ábra Fagyhámlasztási vizsgálathoz készített próbatestek**

#### 4.2.1. Kvarckavics adalékanyagú beton

##### 4.2.1.1. Szemrevételezés

A próbatestek (4-41. ábra) felületét megvizsgálva jól látható, hogy a lehámlás a sarkokon, az adalékanyag szemcsék határfelületeinél (4-42. ábra), légpórusok környezetében indult el. A lehámlás és a károsodás mértéke nem volt számottevő egyik próbatest esetében sem.



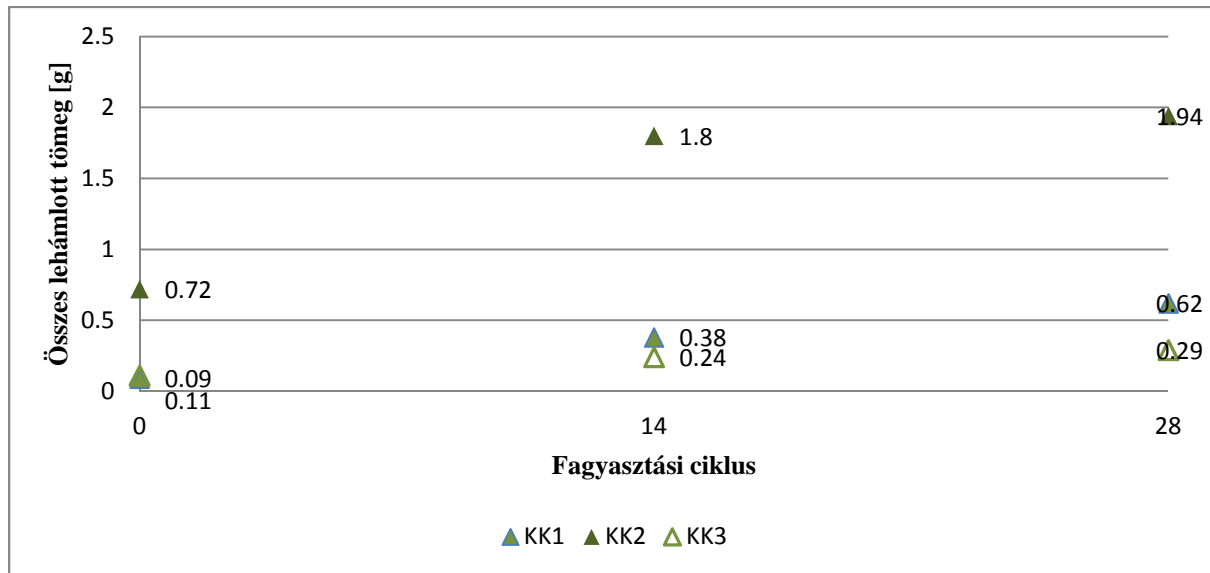
4-41. ábra Kvarckavics adalékanyagos fagyhámlasztási próbatestek



4-42. ábra Lehámlás adalékanyag szemcse mellett

#### 4.2.1.2. Fagyhámlasztási vizsgálat eredményei

A kvarckavics adalékanyagú beton fagyhámlasztási vizsgálatánál mért adatokból látható, hogy mind a három próbatest lehámlási értékei végértékhez tartanak. A legnagyobb lehámlási értéket a KK2-es próbatestnél mértem. A lehámlott beton tömege nem haladta meg a 2 grammot.



4-43. ábra Kvarckavics adalékanyagú betonok fagyhámlasztása



## 4.2.2. Duzzasztott üvegekavics (habüveg) adalékanyagú beton

### 4.2.2.1. Szemrevételezés

A habüveg adalékanyagú próbatesteket (4-44. ábra) megvizsgálva megállapítható, hogy a lehámlás (4-45. ábra) elsősorban a sarkokban és a légzárványok körül alakul ki. Megfigyeltem továbbá azt is, hogy az adalékanyag szemcsék elvágott felülete is károsodást szenvedet.



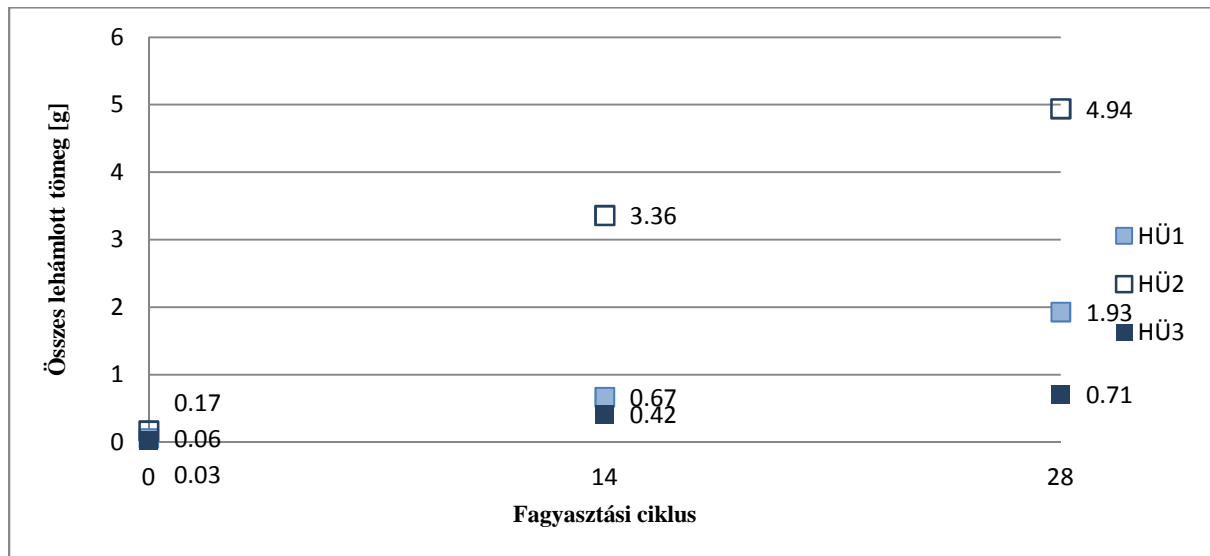
4-44. ábra Duzzasztott üvegekavics adalékanyagú fagyhámlesztási próbatestek



4-45. ábra Lehámlott felület

#### 4.2.2.2. Fagyhámlasztási vizsgálat eredményei

A habüveg adalékanyagú próbatestek lehámlási diagramjai végértékhez tartanak. A mért legnagyobb lehámlási érték 4,94 g. A lehámlás mértéke jelentősebb, közel a kétszerese, a kvarckavics adalékanyagok esetében mért értékeknek.



4-46. ábra Duzzasztott üvegekavics adalékanyagú betonok fagyhámlasztása

### 4.2.3. Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton

#### 4.2.3.1. Szemrevételezés

A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton péptelítetlen szerkezetű (4-48. ábra), ezért a próbatestek (4-47. ábra) felületén nem maradt meg a NaCl oldat, hanem beszivárgott a próbatest belsejébe. A kiterjedt pórusszerkezet miatt a folyadék a hőmérséklet hatására akadálytalanul tágulhatott. *A mérések során nem tapasztaltam felületi lehámlást* (4-49. ábra). A méréssorozat végén a próbatesteket szétszedve azok alján és belsejében sem tapasztaltam károsodást.



4-47. ábra Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú fagyhámlasztási próbatestek



4-48. ábra Péptelítetlen próbatest



4-49. ábra Károsodásmentes felület



## 5. Összefoglalás

A dolgozatban három könnyű- és egy kvarckavics adalékanyagú beton viselkedését vizsgáltam tűzterhelés és fagy hatására. A könnyű adalékanyagok közül a duzzasztott agyagkavicsot, a duzzasztott üveggkavicsot és a polisztirol gyöngyöt vizsgáltam.

A kísérlethez keverékenként 12 darab henger, 12 darab hasáb és 6 darab kocka alakú próbatest készült. A henger- és hasáb alakú próbatesteket 5 különböző mértékű hőterhelésnek tettem ki. A hőterhelés hőfokai: 20 °C, 150 °C, 300 °C, 500 °C vagy 800 °C, (duzzasztott agyagkavics próbatestek esetén 1000 °C).

A hőterhelés után, a polisztirolgyöngy adalékanyagú betont kivéve, a hengereken nyomószilárdságot, a hasábokon hajlító-húzószilárdságot mértem. Mindkét szilárdságcsökkenés azonos tendenciát mutatott az 500 °C feletti tartományon, bár az alacsonyabb hőmérsékleti tartományokban, 150 °C és 300 °C-on, egyes adalékanyagok viselkedése eltérő volt (4.1.6).

A polisztirol adalékanyagú betonból az adalékanyag szemcsék 180 °C-on teljesen kiégték (4.1.5). Ezzel hátrahagyva egy szabályos, és rendezett pórusképet. A polisztirol adalékanyagú próbatesteken szilárdságvizsgálat nem történt.

A kísérleti eredmények bizonyítják, hogy a könnyű adalékanyagok alkalmazása kvarckavics helyett nem okoz jelentős csökkenést a betonok tűzállóságát tekintve. A tűzhatás miatti tönkrementelek közül különösen veszélyesnek bizonyult a betonfelületek réteges leválása (4.1.1.2). Ez a tönkremeneteli mód a habüveg adalékanyagú betonra volt elsősorban jellemző (4.1.4.1).

A fagyállósági vizsgálat alapján a duzzasztott üveggkavics adalékanyagú beton mért lehámlási értékei meghaladták a kvarckavicsos beton értékeit (4.2.1, 4.2.2). A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonnál nem történt felületi lehámlás (4.2.3).

## 6. Summary

In this research the fire and frost resistance of three different lightweight aggregate concrete and one conventional concrete was investigated. For the lightweight aggregate concrete expanded clay, expanded glass and polystyrene balls were used.

For the research 12 cylindrical, 12 prismatic and 6 cubic specimens were made from each mixture. The cylindrical and prismatic samples were subjected to fire load. The applied temperatures for fire load were: 20 °C (68 °F), 150 °C (302 °F), 300 °C (572 °F), 500 °C (932 °F), 800°C (1472 °F), (in case of expanded clay specimens 1000 °C (1832 °F)).

After the fire load was applied compressive strength test was carried out on the cylindrical specimens and the prismatic samples were subjected to flexural strength test. No strength tests were performed upon polystyrene concrete specimens. The strength reduction of specimens exposed to higher temperature showed the same tendency regardless the type of the aggregate. However, the behaviour of a particular concrete type was different on 300 °C or lower (4.1.6).

At 180 °C the polystyrene aggregate was completely vaporised leaving an uniform, orderly porous system in its place. No strength tests were carried out upon polystyrene concrete specimens.

The tests' results prove that the use of lightweight aggregates do not cause significant reduction of the fire resistance. Spalling (4.1.1.2) proved to be dangerous especially in case of expanded glass specimens (4.1.4.1).

The results of the frost resistance test of the expanded glass concrete showed and increased amount of peeling in comparison to that of the convention concrete (4.2.1, 4.2.2). In case of the expanded clay concrete no peeling was observed (4.2.3).

## 7. Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani:

Dr. Nemes Rita adjunktusnak a betonreceptúrák elkészítésében való segítségével  
Kovács Gábor és Diriczi Dávid technikusoknak a laboratóriumban nyújtott  
segítségükért  
a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia  
Tanszékének, amiért lehetőséget biztosított a kísérletek elvégzésére  
konzulensemnek Dr. Lublós Éva adjunktusnak és Dr. Balázs L. György egyetemi  
tanárnak a dolgozat során nyújtott támogatásáért és segítségével.



## 8. Irodalmi hivatkozások

Nemes R. (2006), Habüveg adalékanyagok könnyűbetonok, PhD értekezés

Clarke, J. L. (1993), Structural Lightweight Aggregate Concrete, Taylor & Francis

Nemes R., Gyömbér Cs. (2001) Könnyűbeton adalékanyagok összehasonlító vizsgálata, TDK dolgozat

Kovács K. (2008), ÉMI jelentés

[http://www.emi.hu/webadatbazisok/Publikaciok.nsf/PublicationsPreviewHTMLByDate/90A08037251AEFD9C1257479002448D2/\\$FILE/Publ\\_2008\\_Kov%C3%A1csKdr.Polisztirolobet.pdf](http://www.emi.hu/webadatbazisok/Publikaciok.nsf/PublicationsPreviewHTMLByDate/90A08037251AEFD9C1257479002448D2/$FILE/Publ_2008_Kov%C3%A1csKdr.Polisztirolobet.pdf)

(2012. okt. 28.)

Balázs L. Gy., Lublós É., Mezei S. (2011), Innovációs kutatás-fejlesztési tanulmány

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

Balázs L. Gy. (2004), Építőanyagok II. HEFOP

Faust, T. (2000) Herstellung, Tragverhalten und Bemessung von konstruktivem Leichtbeton – Dissertation, Universität Leipzig

1-2. ábra Pantheon:

<http://stuff.mit.edu/afs/athena/course/21/21h.405/www/Pantheon/Pantheon/Dome.html>

1-3. ábra Lake Point Tower: [http://en.wikipedia.org/wiki/Lake\\_Point\\_Tower](http://en.wikipedia.org/wiki/Lake_Point_Tower)

1-4. ábra Marina City Towers: [http://en.wikipedia.org/wiki/Marina\\_City](http://en.wikipedia.org/wiki/Marina_City)

2-1. ábra Nyomószilárdság és testsűrűség összefüggése: Faust, 2000

2-2. ábra Könnyű adalékanyagok szemcse-testsűrűsége: Faust, 2000

2-1. táblázat Adalékanyagok sűrűségei: Nemes, 2006

2-3. ábra Duzzasztott agyagkavics: [www.liapor.hu](http://www.liapor.hu)

2-4. ábra Duzzasztott üvegkavics: [www.bau-docu.at](http://www.bau-docu.at)

2-5. ábra Polisztirol gyöngy: [www.bensiker.hu](http://www.bensiker.hu)

4-1. ábra A betonfelület leválásának mechanizmusa: Balázs, Lublós, Mezei, 2011

4-2. táblázat A Fagy- és olvasztóállóság szabványos vizsgálatainak összehasonlítása: Lublós, 2010