



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR**

HABÜVEG ADALÉKANYAGOS KÖNNYŰBETONOK

PhD értekezés

NEMES RITA
okl. építőmérnök

Tudományos vezető:
DR. JÓZSA ZSUZSANNA
PhD, egyetemi docens

Budapest, 2006

Ajánlom Keresztnak

TARTALOM

JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK
FOGALOM-MEGHATÁROZÁSOK

1. BEVEZETÉS, KÉRDÉSFÖLVETÉS	1
1.1. A könnyűbeton jelentősége	1
1.2. Adalékanyagok könnyűbetonok	3
1.2.1. A könnyűbeton fogalma és típusai	3
1.2.2. Történeti áttekintés	4
1.2.3. Könnyű adalékanyagok	8
1.3. A duzzasztott habüveg	9
1.4. Az értekezés célkitűzései	11
2. A SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE	12
2.1. Könnyű adalékanyag	12
2.1.1. A könnyű adalékanyag általános jellemzői	12
2.1.2. A könnyű adalékanyagok szilárdsága	13
2.2. A könnyűbeton szilárdsága	15
2.3. Alakváltozási jellemzők	21
2.3.1. A rugalmassági modulus	21
2.3.2. Zsugorodás	24
2.3.3. Hőtechnikai jellemzők	25
2.4. Tartóssági kérdések	26
2.5. Könnyűbetonok tervezése	26
2.6. Vonatkozó szabványok	28
3. LABORATÓRIUMI KÍSÉRLETEK	29
3.1. Adalékanyag vizsgálatok	29
3.1.1. Adalékanyag szilárdságának vizsgálata	30
3.1.1.1. Halmaz-önszilárdság vizsgálat	30
3.1.1.2. Szilikon-próbatestes vizsgálat	31
3.1.1.3. Műgyanta-próbatestes vizsgálat	32

3.1.2.	Adalékanyagok vízfelvételének vizsgálata	33
3.1.3.	Alkáliállóság vizsgálata	33
3.2.	Könnnyűbeton szilárdságvizsgálatok	34
3.2.1.	Alapanyagok	35
3.2.2.	Az adalékanyag szilárdságának és mennyiségének hatása	35
3.2.3.	A cementkő szilárdságának hatása	36
3.2.4.	A próbatest alakjának hatása	37
3.2.5.	A húzó- és a nyomószilárdság aránya	37
3.2.6.	Törési kép a szilárdságok függvényében	38
3.2.7.	A próbatestek nedvességtartalma	38
3.3.	Alakváltozási jellemzők vizsgálata	39
3.3.1.	Rugalmassági modulus vizsgálata	39
3.3.2.	Zsugorodás vizsgálata	40
3.3.2.1.	A mérés módszere	40
3.3.2.2.	A különböző adalékanyagok hatása a zsugorodásra	41
3.3.2.3.	Az adalékanyag adagolás mértékének hatása a zsugorodásra	41
3.3.2.4.	A habarcs összetételének hatása a zsugorodásra	41
3.3.3.	A hőtágulási együttható vizsgálata	42
4.	VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELEÉSÜK	43
4.1.	Adalékanyag vizsgálatok	43
4.1.1.	Adalékanyag szilárdsága	43
4.1.1.1.	Halmaz-önszilárdság vizsgálat	43
4.1.1.2.	Adalékanyag szilárdság műgyanta és szilikon-próbatesten vizsgálva	46
4.1.2.	Adalékanyag vízfelvétele	46
4.1.3.	Alkáliállóság	49
4.2.	A könnyűbeton szilárdsága	51
4.2.1.	Az adalékanyag mennyiségének hatása	51
4.2.2.	Az adalékanyag mennyiségének optimalizálása	53
4.2.3.	A cementkő szilárdságának hatása	53
4.2.4.	A próbatest alakjának hatása	56
4.2.5.	A hajlító-húzó- és a nyomószilárdság aránya	57

4.2.6. Törési kép a szilárdságok függvényében	58
4.2.7. A próbatestek nedvességtartalma	60
4.3. Alakváltozási jellemezők	61
4.3.1. Rugalmassági modulus	61
4.3.2. Zsugorodás	63
4.3.2.1.A különböző adalékanyagok hatása	63
4.3.2.2.Az adalékanyag adagolás mértékének hatása	65
4.3.2.3.A habarcs összetételének hatása	66
4.3.3. Hőtágulási együttható	66
5. ALKALMAZÁSOK	70
5.1. Tervezési kérdések	70
5.2. Kivitelezési kérdések	70
5.3. Az értekezés eredményeinek hasznosítási lehetőségei	73
6. ÖSSZEFOGLALÁS	74
7. AZ ÉRTEKEZÉS ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI – TÉZISEK	76

SUMMARY (ANGOL NYELVŰ ÖSSZEFOGLALÓ)

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK

FELHASZNÁLT SZABVÁNYOK ÉS IRÁNYELVEK

A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓI A TÉMAKÖRBEN

SZAKMAI ÉLETRAJZ

JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK

A szakirodalmi hivatkozásoknál az eredeti jelöléseket használtam azok magyarázatával. A többi jelölés és rövidítés az alábbi szerinti:

Jelölések

A	felület
C	az adalékanyagok halmaz-önszilárdsága
C.../...	a közösleges betonok szilárdsági jele
CEM	a cementek jele
D	a betonok testsűrűségi osztályának jele
E_c	a beton rugalmassági modulusa
E_m	a beton rugalmassági modulusának átlagértéke
η	könnnyűbetonokra vonatkozó csökkentő tényező a közösleges betonokhoz képest
F	erő
f_c	a beton nyomószilárdsága
f_{cd}	a beton nyomószilárdságának tervezési értéke
f_{ck}	a beton nyomószilárdságának karakterisztikus értéke
$f_{ck,cyl}$	a beton nyomószilárdságának karakterisztikus értéke szabványos hengeren mérve
$f_{ck,cube}$	a beton nyomószilárdságának karakterisztikus értéke
f_{cm}	a beton nyomószilárdságának átlagértéke
f_{cm}^*	a beton nyomószilárdságának átlagértéke nem szabványos próbatesten vizsgálva
l	hossz
L	önsúlyból származó erő
LC.../...	a könnnyűbetonok szilárdsági jele
ρ	testsűrűség (általános)
ρ_{LC}	a könnnyűbetonok testsűrűségi osztályának jele
ρ_T	testsűrűség (porózus anyagokra)
w	vízfelvétel (tömeg vagy térfogat százalékban)

Rövidítések

ACI	American Concrete Institute (Amerikai Betonintézet)
ASTM	amerikai vizsgálati szabványok jele (American Society for Testing and Materials)
BBK	svéd szabványok jele (Boverkets Handbok om Betongkonstruktner)
CEB-FIP	Comité Euro-Internationale du Béton – Fédération Internationale de la Précontrainte (Nemzetközi Betonszövetség – Nemzetközi Feszítettbeton Szövetség)
CUR	a holland Építőmérnöki Kutatási és Szabályozási Központ (Civieltechnische Centrum Uitvoering Research en Regelgeving)
DAfStb	német műszaki előírás vasbetonokra (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton)

DIN	német szabványok jele (Deutsche Industrie Norm)
EN	európai szabványok jele (European Norm)
JSCE	japán szabványok jele (Japan Society of Civil Engineers)
LWAC	adalékanyagok könnyűbeton (Lightweight Aggregate Concrete)
MC	ModelCode
MÉASZ ME	Magyar Építőanyagipari Szövetség - Műszaki előírás
MSZ	Magyar Szabvány
NS	norvég szabványok jele (Norsk Standard)
RILEM	Reunion Internationale des Laboratoires D'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions (nemzetközi anyag- és szerkezet kutató laborszövetség)
v/c	a beton víz-cement tényezője (a víz- és cementadagolás tömegaránya)

FOGALOM-MEGHATÁROZÁSOK

Az értekezés során a fogalmakat a szakirodalomnak megfelelően használom. Minden alapvető fontosságú kifejezést az értekezés során definiálok. Az érthetőség és egyértelműség kedvéért itt összefoglalom azokat a fogalmakat, amelyeket a szakirodalomban különböző szerzők különbözőképpen használnák.

könnnyűbeton: 2000 kg/m^3 -nél kisebb testsűrűségű beton a pórusképzés módszerétől függetlenül

adalékanyagos könnyűbeton: könnyűbeton egy típusa, amelynél az adalékanyag részben vagy teljes egészében nagy porozitású, a kvarckavicsnál ill. zúzottkőnél könnyebb adalékanyaggal készül, telített vagy túltelített cemetkővázsal. A szakirodalom gyakran *könnnyű adalékanyagos betonnként* is említi, illetve egyes szabványok (pl. EN 206-1) csak ezt tekintik *könnnyűbetonnak*.

közönséges beton: az MSZ 4798-1 szerinti megnevezése a hagyományos „normál” testsűrűségű betonnak

szerkezeti (könnnyű)beton: az MSZ 4798-1 szerinti szilárdsági csoportokba besorolható nem nagyszilárdságú (<C 55/67 ill. LC 55/60) beton ill. könnyűbeton

könnnyű adalékanyag: betonban alkalmazható kis szemcse-testsűrűségű (< 2000 kg/m^3) természetes vagy mesterséges adalékanyag

habüveg: granulált üvegpórá és adalékok (gázfejlesztő anyagok) kiégetésével keletkező cellás szerkezetű nagy porozitású szemcsék, gyártási eljárástól függően zárt vagy nyitott felülettel. A szakirodalom *duzzasztott üveg* vagy *üveg habkavics* néven is említi. (Részletesen lásd 1.3. fejezet.)

1. BEVEZETÉS, KÉRDÉSFÖLVETÉS

1.1. A könnyűbetonok jelentősége

A könnyűbeton alkalmazásának egyre nagyobb a jelentősége. Mind magasabb épületeket, nagyobb fesztávú hidakat építünk, ahol a súly csökkentése döntő. Használata a felújítások esetén is előnyös, mivel egy megerősítés így kisebb többletterhet jelent. Az önsúly minden hajlított vasbetonszerkezetnél fontos. Előregyártott szerkezetek esetén a szerelési technológiát is egyszerűsítheti (nagyobb elemméret illetve gémkinyúlás lehetséges, vagy kisebb daru szükséges). Minél „monumentálisabb” egy szerkezet, az önsúly annál jelentősebb része az összes tehernek. Az építőanyagok testsűrűségének csökkentése fontos eszköze az önsúlycsökkentésnek, így karcsúbb, esztétikusabb megjelenésű szerkezetek építhetők, és kisebb anyagfelhasználást eredményez. Teherviselő szerkezeteink jelentős része betonból épül. A beton előnye a többi szerkezeti anyaghoz képest, hogy tetszőleges méretben és formában alakítható ki, helyszínen is elkészíthető, megfelelő minőség esetén gyakorlatilag nem igényel rendszeres karbantartást. Hátránya viszont a szilárdsághoz képest nagy testsűrűsége (1.1. táblázat). A lehetséges támaszköz (l) a szilárdság (f_c) és a testsűrűség (ρ) hányadosával egyenesen arányos:

$$l = const \cdot \frac{f_c}{\rho} \quad (1.1)$$

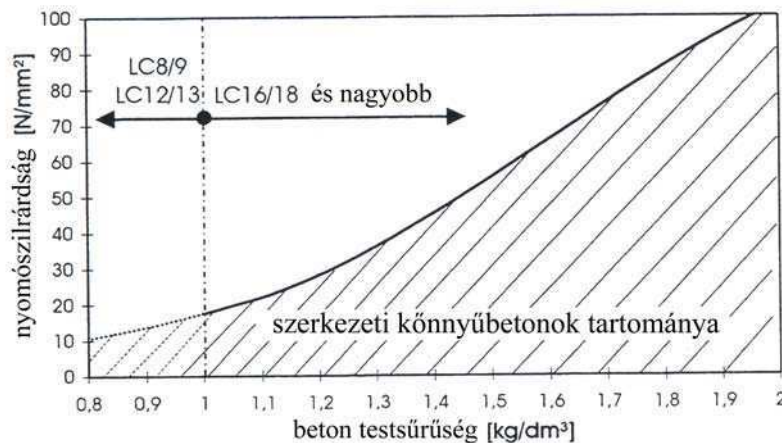
Szerkezeti anyag	Testsűrűség ρ [kg/m ³]	Nyomószilárdság f_c [N/mm ²]	f_c / ρ [GNm/kg]
beton (C12-C40)	2400	8-26,7	3-11
acél	7850	175-280	22-36
fa	400-800	7-25	17-31

1.1. táblázat A szilárdság és testsűrűség aránya a főbb hajlított tartószerkezeti anyagok esetén [Kollár, 1997; Dulácska, 1995; Scholz-Hiese, 1999]

Ez az arányszám a betonok testsűrűségének csökkentésével, illetve szilárdságának növelésével jelentősen javítható. Könnyűbeton széles szilárdsági tartományban készíthető. A kisebb testsűrűségűt hőszigetelő céllal készítik, LC 16/18 szilárdsági osztálytól felfelé pedig szerkezeti betonként, egészen LC 80/88-ig (1.1. ábra).

A könnyűbeton alkalmazása környezetvédelmi és gazdasági szempontból egyaránt előnyös, ennek ellenére – egy átmeneti időszakot kivéve (1950-1970) – Magyarországon egyelőre alig terjedt el, nagyszilárdságú könnyűbetonból szerkezet hazánkban pedig még nem

is épült. A hazai gyártású könnyű adalékanyagok mellett több külföldi termék is jelen van már a magyar piacon, de felhasználásuk kismértékű. Ennek egyik oka, hogy a könnyű adalékanyagok alkalmazása kevésbé szabályozott (az utolsó, könnyűbetonokra vonatkozó tartószerzeti szabványt az MSZ 15022/6-ot 1986-ban visszavonták és csak műszaki irányelvként adták ki), vagy a meglévő ajánlások részben elavultak (a MÉÁSZ ME 04.19:1995 is már több mint 10 éves), részben csak konkrét termékekre vonatkoznak, és az új anyagokat, mint például a habüveg egyáltalán nem említik. Egyes szerkezetek esetében, pl. hidaknál – a külföldi gyakorlattal ellentétben – nem engedélyezett a könnyűbeton alkalmazása. Könnyűbeton hidakra már korábban is készültek statikai számítások külföldi példák alapján [Kelemen, 1995], a hidak azonban máig nem valósultak meg.



1.1.ábra A könnyűbeton szilárdságának változása a testsűrűség függvényében [Faust, 2000a]

Szerkezeti és nagyszilárdságú könnyűbetonokat az Egyesült Államokban, Észak- és Nyugat-Európában illetve Japánban gyakran alkalmaznak [fib, 2000; Hiroaki – Suzuki – Ichinomiya – Yamamma, 2004]. Ezek főként hidak, magasházak, héjszerkezetek és fűrotornyok. A felhasználás másik gátja a nem naprakész szabályozás és kevés hazai tapasztalat mellett a könnyűbetonok és könnyű adalékanyagok ára. Bár rendkívül sokféle adalékanyagot ismerünk [Kausay, 2002b], jelenleg Magyarországon a megfelelő műszaki adatbázissal is rendelkező, folyamatosan forgalmazott adalékanyagok többsége külföldről importált duzzasztott agyagkavics, amelyek alkalmazása másfélszeresére növelheti a beton árát.

A könnyűbeton igencsak körültekintő tervezést és kivitelezést igényel. Ennek elmulasztása kedvezőtlen végeredménnyel jár, ezért van számos rossz tapasztalat a szerkezeti könnyűbetonokkal kapcsolatban. A legtöbb szabvány és ajánlás csak nagy általánosságokban beszél a könnyűbetonról, mivel azok, az alkalmazott könnyű-adalékanyagtól függően nagyon különbözőek lehetnek.

1.2. Adalékanyagok könnyűbetonok

1.2.1. A könnyűbeton fogalma és típusai

A különböző szabványok némi eltéréssel definiálják a könnyűbeton és a könnyű adalékanyag fogalmát, ezért ezeket érdemes röviden összefoglalni. A könnyűbeton nagy pórustartalmú beton, a pórusképzés módszere szerint három fő csoportot különböztetünk meg [Balázs, 1994]:

- egyszemcsés könnyűbeton (szemcsehézagos könnyűbeton) (1.2. ábra)

Ekkor a tömör vagy porózus, kb. azonos méretű (10-20 mm átmérőjű), durva adalékanyag-szemcséket felületükön cementpéppel vonják be, a szemcsék között hézag marad, a péphiányos beton adalékanyag szemcséi csak a szemek érintkezési pontjainál vannak összeragasztva. Elsősorban a betonénál nagyobb hőszigetelő képessége miatt előnyös, de hátránya, hogy csak nyomásra vehető igénybe.

- adalékanyagok könnyűbeton (1.3. ábra)

Itt elsősorban az adalékanyag szemcsék pórustartalma határozza meg a jellemzőket, mert itt a könnyű adalékanyag teszi a betont könnyűvé. Készíthető kvarchomokot vagy könnyű pórusos homokot és cementet tartalmazó habarcsvázzal, adalékszerrel (pl. légpórusképző), vagy kovaliszttal, azaz mikroszilikával (szilárdságnövelő célzattal), stb.

- sejtített könnyűbeton, pórusbeton (1.4. ábra)

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.



1.2. ábra Egyszemcsés könnyűbeton



1.3. ábra Adalékanyagok könnyűbeton



1.4. ábra Pórusbeton (sejtbeton)

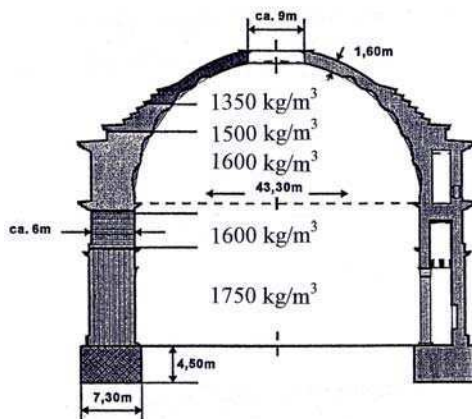
Az egyszemcsés könnyűbetont [Neumann – Reuschel - Sahlman, 1998] illetve a pórusbetont (gáz- és sejtbetont) viszonylag kisebb szilárdsága miatt falazóelemként vagy

vázkitöltőként alkalmazzák, utóbbi gyártása csak üzemben lehetséges. Az adalékanyagok könnyűbeton viszont a közönséges betonok könnyített változatának tekinthető, mind az elérhető szilárdság, mind a tervezési és gyártási technológia tekintetében. Egyszerű betontechnológiai módszerekkel állítható elő, mérete kevésbé korlátozott. További előnye, hogy alkalmazható helyszíni betonként is. A legújabb technológiákat is fokozatosan alkalmazni kezdték, megoldható például szivattyúzható [Müller - Haist, 2005], illetve önterülő könnyűbeton [Dehn - Holschemacher, 2001; Müller – Haist - Metcherine, 2001] készítése is.

Nagyszilárdságú, teherhordó szerkezetekben (híd- és szerkezetépítésben) a könnyűbeton fajták közül kizárólag az adalékanyagok könnyűbetont alkalmazzák (angolul: lightweight aggregate concrete, rövidítve: LWAC), ezért a továbbiakban – disszertációm célja szerint – ezek vizsgálatával foglalkoztam.

1.2.2. Történeti áttekintés

A könnyűbetonok alkalmazása nem újdonság, már a Kr.e. I. században is alkalmazták a rómaiak a kupolák építésénél (Pantheon, Colosseum).



1.5. ábra A Pantheon vázlatos metszete a különböző adalékanyagú könnyűbetonok testsűrűségének jelölésével [Bramshuberm, 2000]



1.6. ábra A Pantheon kupolája belülről [Briscoe – Philpott]

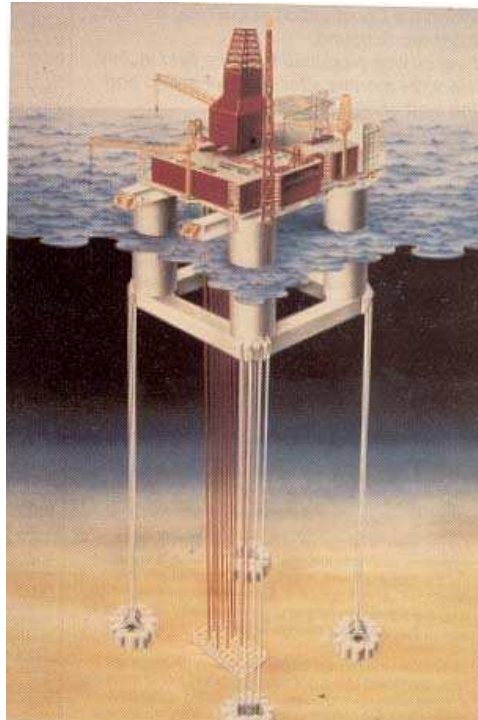
A Pantheon esetében például négy különböző testsűrűségű betont használtak, felfelé egyre könnyítve ezzel a szerkezet önsúlyát (1.5. és 1.6. ábra), az alapozáshoz travertinórleményt, majd travertin- és tufaórleményt (1750 kg/m³), tufaórleményt + téglatörmeléket (1500-1600 kg/m³), legfölül pedig könnyű tufaórleményt (1350 kg/m³ testsűrűségű) használtak [Kollár, 1997]. Az ókori rómaiak nagyszerű teljesítményét bizonyítja mind statikai, mind pedig tartóssági szempontból, hogy a Pantheon az egyik legjobb

állapotban fennmaradt római kori épület, és 43,3 m átmérőjű kupolaméretét csak Fuller „geodéziai kupolája” tudta túlszárnyalni a XIX. században.

A könnyűbeton alkalmazása csökkenti az altalajjal szemben támasztott követelményeket és az alapozási költségeket, a fölfelé fokozatosan csökkenő tömeg pedig stabilizálja a szerkezetet. Napjainkban is hasonló elvet követnek a fűrotornyok esetében (pl.: Heidrun platform (1995) (1.7. ábra), South Arne platform (1999) (1.8. ábra) [fib, 2000])



1.7. ábra Heidrun platform



1.8. ábra South Arne platform

A Római Birodalom bukásával a beton és vele együtt a könnyűbeton is feledésbe merült. Szerkezeti könnyűbetont az újkorban először az Egyesült Államokban alkalmazták, elsősorban hidak és toronyházak építésénél (Park Plaza Hotel /Saint Louis 1928/, South Western Bell Telephone Company /Kansas City 1928/, Oakland- Bay-híd pályalemeze /San Fransisco 1936/, Prudential Life Building földemjei /Chicago/, Om Shell Plaza /Houston/) [Faust, 2003]. Az 1940-es évektől Európában is megindult a könnyűbeton ipari előállítása, elsőként Dániában.

Ez idő tájt Észak-Amerika hídjainál a tengeri (sós) levegő és a fagy miatt károsodott betonokat már könnyűbetonra cserélték, így biztosítva a megnövekedett forgalom okozta többlet teher viselését azonos méretek mellett. Az 1960-as évek elején új építészeti stílust

teremtett az Amerikai Egyesült Államokban a könnyűbeton alkalmazása. Ennek első példája az 1962-ben épült 180 m magas chicagói Marina City Towers (1.9. ábra [fib, 2000]).



1.9. ábra Marina City Towers



1.10. ábra Guggenheim Múzeum

Magyarországon a salakbetont már 1865-ben is említik, de csak a XIX-XX. századforduló táján terjedt el. 1898-ban kiadott könyvben már szerepel a nagyolvasztó-salak ajánlott könnyű adalékanyagként a porfir és a téglatörmelék mellett [Sobó, 1898]. A hazai salakok nagy kéntartalma miatt az alkalmazás az első világháborút követően egyre jobban háttérbe szorult azon kedvezőtlen tulajdonsága miatt, hogy nedvesség hatására erősen duzzad és szilárdságából is veszít [Michailich - Haviár, 1966]. Tufabeton kézi falazóelemeket gyártottak Andornaktályán 1920 körül [Balázs, 1996]. Az 1950-es években könnyűbeton kutatások folytak az Építéstudományi Intézetben, majd a Betonolith Kft.-ben és a BME Építőanyagok Tanszékén. Az ipari alkalmazásra az ötvenes évek végétől került sor. 1957-ben megépült a bodrogkeresztúri tufabeton üzem, ahol könnyű falazóblokkokat gyártottak riolittufa vagy kohósalak felhasználásával. Ezt követően az országban több helyen gyártottak könnyűbeton falazóblokkokat és nagyméretű falpanelokat. A múlt század hatvanas, hetvenes éveiben 3-8 emeletes lakóházak készültek könnyűbetonból. Kohóhabsalak adalékanyagú öntött könnyűbetonból az első lakóházakat 1959-60-ban építették Szigetszentmiklóson, majd a hatvanas években még kb. 3000 lakást Budapesten és a nagyobb városokban. Egyszemcsés könnyűbetonból 1986-1992 között 6800 lakás épült [Balázs, 1996]. 1995-ben jelent meg a Beton és vasbeton készítése c. műszaki előírás, ennek 14. fejezete igen részletesen és alaposan adja meg a könnyűbeton készítésére vonatkozó ismereteket [Ujhelyi, 1995].

A könnyűbeton ma már szinte minden építőmérnöki területen elterjedt, így a híd- és magasépítésen kívül az alagútépítésben és az olajfűró-tornyoknál is. Feszített szerkezetekben is alkalmazható (hiperbolikus héj Speyerben [Romić, Lazić, 1985]). Szabadabb építészeti kialakítást tesz lehetővé, erre az egyik legjobb példa a bilbaoi Guggenheim Múzeum (1.10. ábra) [fîb, 2000]. Napjainkban a könnyűbeton-alkalmazásban az Egyesült Államok, Japán, Németország és a skandináv országok járnak az élen.

A természetes porózus adalékanyagok (mint például a habkő, a tufák, stb.) földrajzilag helyhez kötöttek, és korlátozott mennyiségben fordulnak elő, egyes országokban teljesen hiányoznak; ezért a XX. század elején a természetes anyagok mellett fokozatosan megjelentek a mesterséges úton előállított könnyű adalékanyagok is. Az első könnyű adalékanyagokat gyártó üzem 1917-ben épült Kansas Cityben; ezt követően 1931-ben Európában, majd 1959-ben Albert János munkája alapján Magyarországon is megkezdődött az ipari előállítás [Rudnai, 1966]. A 0,14-1 m³-es előregyártott elemekhez (kémény- és falelemekhez) is alkalmazták, és teherhordó szerkezeteket építettek duzzasztott agyagkavics adalékanyaggal [Józsa - Ujhelyi, 2000].

A mesterséges anyagok minőségét és méretét már az igényeknek megfelelően lehet kialakítani. Igyekeztek az ipari melléktermékeket egyre jobban bevonni az adalékanyagok sorába. Így terjedtek el a granulált kohósalak és a kohóhabsalak a nyersvasgyártás melléktermékeiből, a pernyekavics és az agloporit a hőerőművek melléktermékeiből [Kausay, 2002b].

Jelenleg a legelterjedtebben duzzasztott agyagtermékeket használnak, de környezetvédelmi szempontból egyre többen foglalkoznak a üveghulladék felhasználásával készülő habkavicsok gyártásával [Ducan – Mladenovič – Šuput, 2002]. Ez nem azonos a norvégok által látszóbetonokhoz alkalmazott – elsősorban díszítő célzatú – üvegtörmelék adagolással [Német, 2002]. A korábbi habüveg adalékanyagok testsűrűsége 300-600 kg/m³ közötti tartományba esett, és a vízfelvételük is nagy volt [Neunast - Lange, 2001]. Az új típusok új felhasználási területeken is alkalmazhatók lesznek, és így mindig újabb és újabb követelmények is felmerülnek az adalékanyag tulajdonságokkal szemben, ezért a fejlődés napjainkban is folyamatos.

1.2.3. Könnyű adalékanyagok

Rendkívül sokféle anyagot alkalmaztak és alkalmaznak jelenleg is a betonban a kavics és a homok részben vagy teljes egészében való helyettesítésére.

A rómaiak főként a vulkáni lávát és a tufakövet használták, de már ők is alkalmaztak téglazúzalékot. Ma környezetvédelmi szempontok miatt egyre elterjedtebb a hulladékanyagok felhasználása. A természetes tufa, lávakő és agyagszármazékok (duzzasztott agyagkavics, agyagpala) mellett könnyű adalékanyagként jelen van a pernye, a kazánsalak, a duzzasztott perlit, a habüveg és a visszanyert könnyű adalékanyag is, hőszigetelő célzattal pedig műanyagszármazékok (pl. duzzasztott polisztirolgyöngy).

Az adalékanyagoknak két tipikus csoportosítási módja van: az előállítás és a származás szerinti. *Előállítás szerint* az adalékanyagok készülhetnek mechanikai eljárással (pl.: kohósalak, vulkáni anyagok), hőkezeléssel eljárással (pl.: duzzasztott kohósalak, vermikulit, duzzasztott agyagpala) vagy lehetnek feldolgozás nélküliek (pl.: pernye). *Származás szerint* lehetnek természetes eredetűek, mint a vulkáni eredetű anyagok (pl.: tufa, tufakő, lávakő, salakos láva, horzsakő, mésztufa), az ásványi eredetű anyagok (pl.: duzzasztott perlit, duzzasztott agyagkavics, agyagpala, hőkezelt vermikulit), szerves anyagok (pl.: pelyva, farost); vagy lehetnek ipari előállításúak, azon belül ipari melléktermékek (pl.: kohósalak, kazánsalak, pernyekavics, téglazúzalék) vagy hulladékok (műanyagok, üvegek, építési-bontási hulladékok). Alkalmazható újrafelhasznált könnyűbeton is.

A könnyűbetont és így a könnyű adalékanyagokat speciális célra vagy a helyi adottságoknak megfelelően szokás alkalmazni, ezért tulajdonságaik rendkívül változatosak, de általánosságban elmondható, hogy a következők várhatók el egy könnyű adalékanyagtól [EN 13055-1:1997]:

- kis halmazsűrűség (1200 kg/m³-ig) és kis szemcse-testsűrűség (2000 kg/m³-ig)
- nyomásállóság
- hőszigetelő képesség
- mechanikai és vegyi ellenállóképesség
- tűzállóság
- fagyállóság
- alaktartóság

Napjainkban a duzzasztott agyagkavics különböző formái a leginkább elterjedtek a könnyűbetonokban. Ez a kutatások fő területe is és erre vonatkozik ma a legtöbb vizsgálati

eredmény és e területen van a legnagyobb gyakorlati tapasztalat. A hulladékok és melléktermékek felhasználásának azonban egyre nagyobb a jelentősége, ezért indokolt az ilyen hulladékok alkalmazásának tudományos eredményekkel való megalapozása. Ez a disszertáció témaválasztásának indoka.

1.3. A duzzasztott habüveg

Az üveg fontos szerepet játszik életünkben. Többféle meghatározása is létezik, a kutatók az üveg különböző tulajdonságait tekintik a legfontosabbnak (mint például az üveg amorf volta, az átlátszósága, a szilárdsága vagy a tartóssága), ami alapján az üveg definícióját megadják [Náray-Szabó, 1967]. Az építőiparban általában térelhatároló vagy díszítő elemként jelenik meg. Ma már azonban léteznek teherhordó üvegszerkezetek [Pankhardt, 2000], de rejtetten is megjelenhet a teherhordó szerkezetekben például üvegszál erősítésű polimerek (GFRP) [Machida, 1993, 1997], vasalást helyettesítő üvegszövet [Balázs, 1984, Schorn – Butler, 2004] vagy habüveg formájában könnyűbeton vagy könnyű feltöltés adalékanyagaként.

Habüveg alatt olyan üreges és üveges heterogén durva diszperz rendszert értünk, amelyben a diszperz rész a gázfázis és a diszperziós közeg az üvegfázis. Ha „cellás” szövetszerkezetű, akkor elsősorban hőszigetelő, ha „szivacsos” (áttört cellás) szövetszerkezetű akkor pedig a hangelnyelési (rezgésállási) jelleg dominál [Kocsis, 1994].

Léteznek természetes üvegek, mint például az obszidián és a tufa, illetve ezek habosodott formái. A habüvegnek elsősorban környezetvédelmi szempontból nagy a jelentősége. A habüveg gyártásának viszonylag alacsony az energiaigénye (égetési hőmérséklete ~ 800 °C, szemben a hasonló duzzasztott agyagkaviccsal ahol ez ~ 1200 °C) és kevésbé környezetterhelő. Az üveg kiválóan újrahasznosítható, de nem korlátlan mértékben. A habüveg olyan üveghulladék felhasználásával is gyártható, amelyből már azonos funkciójú üvegtermék – például újabb ablaküveg vagy italos palack – már nem gyártható. A gyártás során alkalmazott segédanyagok jelentős része is másodnyersanyag. A felhasználható hulladéküveg mennyiségét a hagyományokra visszatekintő üveghulladék gyűjtés is segíti. Az üveg egyike a legnagyobb mértékben visszagyűjtött hulladék-fajtáknak. [www.kukabuvvar.hu/kukabuvvar/kb30/kb30_23.html] A habüveg nem csak beton adalékanyagként van jelen az építőiparban, hanem festékek és ragasztók töltőanyagaként is.

A habüveg gyártása során a különböző fajta üvegeket őrlik, majd granulálás után 800-1000 °C közötti hőmérsékleten forgócsöves kemencében kiégetik (1.11. ábra).



1.11. ábra „Geofil-Bubbles” habüveg gyártási vázlata

A Geofil habkavics termékeket („Geofil-Bubbles”) Magyarországon gyártják magyar szabadalom alapján hulladéküveg felhasználásával, és elsősorban építőipari felhasználásra szánják [www.geofil-bubbles.com]. Az üvegyöngyök nagy része vegyes hulladéküveg alapanyagú (pl.: üdítőszüveg, infúzióspalack, befőttesüveg stb.), nincs szükség sem válogatásra, sem a kis mennyiségben jelen lévő más anyagok, mint például a fém, a műanyag, a papír eltávolítására. Vannak válogatott üvegből készülő termékek is, például kizárólag speciális Tungstram-izzók hulladékából készülők (jellegzetes fehér színt adva az adalékanyagoknak, ami esztétikai szempontból lehet fontos). A felületképzéshez alkalmazott anyagok egy része is hulladék (perlit, téglapor). A szemcsék felülete a bevonat fajtájától függően változó: sima vagy érdes; a színük szürke, barna vagy rózsaszín. Testsűrűségük és szilárdságuk rendkívül széles tartományban mozog. A kísérleti gyártással párhuzamosan megkezdődtek az építőipari alkalmazhatósági, megfelelőségi vizsgálatok és az első betonkísérletek is. A gyártás során ezen eredmények figyelembevételével alakították az adalékanyagok fizikai tulajdonságait, fejlesztették az újabb termékeket. Legfontosabb új tulajdonságai közé tartozik a gyártás során készíthető bevonat, amely a betonszivattyúzásnak megfelelő nyomás mellett is kis vízfelvevő képességet biztosít, továbbá a lehetséges könnyű adalékanyagok között nagynak számító halmaz-önszilárdság.

1.4. Az értekezés célkitűzései

Számos vizsgálat készült már különböző könnyű adalékanyagú betonokkal. A tapasztalatok azt mutatják, hogy ha változik az adalékanyag, vagy például a természetes adalékanyag lelőhelye, a mesterséges adalékanyag gyártási technológiája, akkor a főbb mechanikai jellemzők lényegesen eltérnek. A könnyűbetonokra vonatkozó minden általános szabály csak durva közelítésnek tekinthető. Ezért rendkívül fontos, hogy egy-egy adalékanyag típusra külön is elkészüljenek a vizsgálatok.

A habüveg adalékanyag betont a szakirodalomban sok helyen egyáltalán nem említik, ahol részletesen foglalkoznak a tulajdonságaival, ott is csak a nagyon kis testsűrűségű és szilárdságú változat viselkedése ismert (2.1. ábra).

Jelen értekezés célja:

1. a habüveg adalékanyagok felhasználásával készíthető szerkezeti könnyűbetonok mechanikai jellemzőinek meghatározása;
2. a habüveg adalékanyag könnyűbeton tulajdonságainak összehasonlítása más könnyű adalékanyagokkal, elsősorban a duzzasztott agyagkavicsal készült könnyűbetonokkal és a közönséges ($2300\text{-}2500\text{ kg/m}^3$) testsűrűségű betonokkal.

A könnyűbetonok esetében mindig két ellentétes szempontot kell egyidejűleg figyelembe venni: a lehető legkönnyebb legyen, ugyanakkor kellő szilárdsággal rendelkezzen. Ezen két ellentétes tulajdonságnak az optimumát olyan módon adom meg, hogy közvetlenül fölhasználható legyen a betontervezés során. A vizsgált jellemzőket elsősorban annak alapján választottam ki, hogy milyen módosító tényezőket írnak elő a közönséges betonokhoz képest a szabványok és irányelvek. A szilárdsági tulajdonságokon kívül a legfontosabb alakváltozási jellemzőket is meghatároztam (rugalmassági modulus, zsugorodás, hőtágulási együttható).

Az értekezésben minden esetben természetes folyami kvarchomokkal ($d < 4\text{ mm}$) készülő könnyű-adalékanyag betonok vizsgálata szerepel. Ahol könnyű adalékanyag jelölések szerepelnek, azokat a terméknevek alapján adtam meg, vagy ha a termék még nem létezett, azonosak a gyártó kísérleti jelölésével.

2. A SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

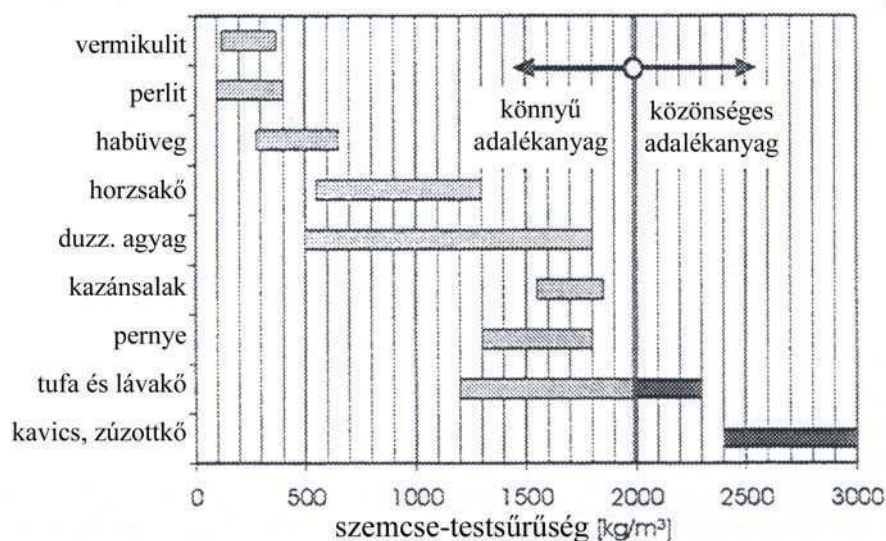
2.1. Könnyű adalékanyag

2.1.1. A könnyű adalékanyag általános jellemzői

A könnyű adalékanyagok követelményei és vizsgálati módszerei részben eltérnek a hagyományos adalékanyagokétól. Az új betonszabványhoz már tartozik könnyű adalékanyag szabvány is, az MSZ EN 13055-1, amely tárgyalja a könnyű adalékanyagok vizsgálatát is. A hagyományos adalékanyagok követelményei mellett megjelenik a halmaz- ($< 1200 \text{ kg/m}^3$) és a szemcse-testsűrűség ($< 2000 \text{ kg/m}^3$) határ, de például a BetonKalender 2005 [Bergmeister - Wörner, 2005], általános ajánlása szerint a szemcse-testsűrűség legyen 1500 kg/m^3 alatt.

A könnyű adalékanyagok alkalmazása esetén a nagy porozitás és a nyitott pórusok miatti nagy vízfelvevő képesség okozza gyakorlati szempontból a legnagyobb problémát. Kiküszöbölésének egy lehetséges megoldási módja, a könnyű adalékanyag szemcsék cementpéppel való előzetes bevonása, és ezzel az adalékanyag pórusainak elszigetelése, az u.n. „drázsézás” [Müller – Linsel – Garrecht – Wagner – Thienel, 2000]. Ez azonban egy külön technológiai lépést jelent, továbbá idő és költségigényes.

A legfontosabb könnyű adalékanyagok alkalmazhatósági tartományát a 2.1. ábra, fő tömegeloszlási jellemzőit pedig a 2.1. táblázat tartalmazza.



2.1. ábra A könnyű adalékanyagok alkalmazhatósági tartománya [Faust, 2000a]

adalékanyag fajta	halmazsűrűség [kg/m ³]	szemcse- testsűrűség [kg/m ³]	anyagsűrűség [kg/m ³]	átlagos szemcseporozitás [%]
tufa		800-1900	2500-2800	32-68
lávalalak	650-950	1200-2200		
vermikulit	100-300	100-300	2500-2700	72-87
horzsakő	300-500	400-700	~2500	72-84
kazánsalak	550-850	1600-1900		
duzzasztott agyagkavics	300-1000	650-1600	2500-2600	38-74
habüveg (eddigyi szakirodalmi adatok alapján)	100-400	300-600	2050-2450	75-85
tégla- és cseréptörmelék	800-1250	1700-1900	2500-2700	30-32
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

2.1. táblázat A fontosabb könnyű adalékanyagok fő jellemezői szakirodalmi adatok alapján
[Bölcskei - Dulácska, 1974; Faust, 2000a; Kausay, 2002b; Neunast - Lange, 2001; Reinhardt, 1993;
Ujhelyi, 1995]

A felsorolt számos könnyű adalékanyag közül napjaink elvárásainak megfelelő teherhordó könnyűbeton szerkezet szinte kizárólag duzzasztott agyagkavics adalékanyaggal készül [fib, 2000], ezért a vizsgálatokat is ezzel végzik napjainkban. Így az újabb ajánlások és szabványok (pl. a DIN által megadott tájékoztató, illetve ajánlott értékek) gyakorlatilag az agyagkavicsos betonokra érvényesek. A 2. fejezet adatai a továbbiakban – ahol nincs külön megjelölve az adalékanyag típusa vagy anyaga – duzzasztott agyagkavicsra vonatkozó megállapítások.

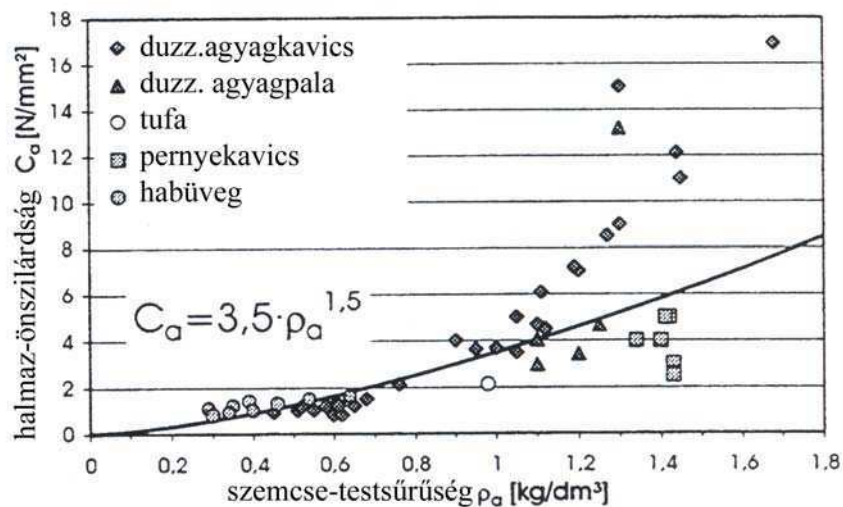
2.1.2. A könnyű adalékanyagok szilárdsága

A könnyű adalékanyagok önszilárdsága (törési ellenállása) nem vizsgálható a hagyományos kőanyag-halmazokra vonatkozó szabályok szerint. Itt a dinamikus vizsgáttal (Los Angeles, Deval [Árpás – Emszt – Gálos - Kárpáti, 2002]) meghatározott aprózódás nem értelmezhető, mert olyan nagy mértékű, hogy az eredmények kiértékelhetetlenek.

A habüveg adalékanyagokból korábban csak kis szilárdságú változatok léteztek és ezek teherviselő képességét a gyakorlatban elhanyagolták (mintha nem lenne a keverékben), tehát

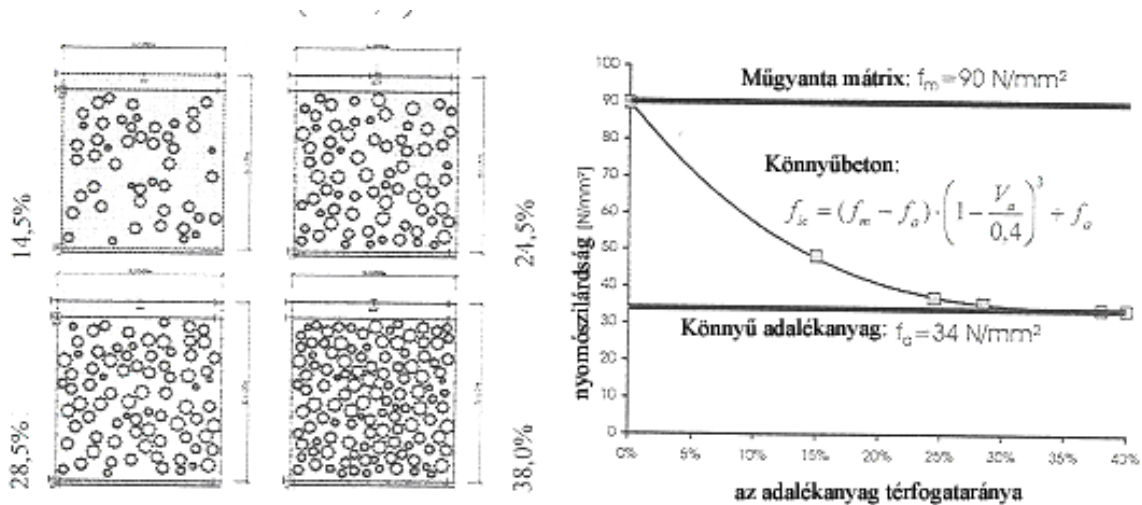
ennek részletes vizsgálatára nem is volt szükség. Nagyobb szilárdsági osztályú betonokhoz jelenleg is csak a duzzasztott agyagkavicsot és agyagpálát ajánlják a legtöbb segédletben.

Faust egy általános összefüggést határozott meg, amely megadja a könnyű adalékanyagok (szabványos 10 %-os összenyomódáshoz tartozó) halmaz-önszilárdságát a szemcse-testsűrűség függvényében (2.2. ábra). Ennek azonban hibája, hogy a különböző anyagú és típusú könnyű adalékanyagokra egy általános összefüggést akar megadni. Ez jól láthatóan a nagyobb szemcse-testsűrűségi tartományban gyakorlatilag használhatatlan a nagy szórás miatt [Faust, 2000a].



2.2. ábra A szemcse-testsűrűség és a halmaz-önszilárdság összefüggése [Faust, 2000]

Ezt nem csak az adalékanyagok különbözősége, hanem a mérés bizonytalansága is okozza. Ezért Faust kidolgozott egy más elven működő mérési módszert. Az adalékanyagokat nem halmazban, hanem nagyszilárdságú (90 N/mm²-es nyomószilárdságú) műgyantába ágyazva vizsgálta (2.3. ábra).



2.3. ábra Faust kísérletei az adalékanyagok szilárdságának meghatározása műgyanta próbatestekkel [Faust, 2000b]

Kimutatta, hogy ha az adalékanyag térfogataránya eléri a kb. 35 %-ot, akkor az így meghatározott nyomószilárdsággal már jellemezhető az adalékanyag szilárdsága. Ez azért is előnyös, mert ennél a módszernél az adalékanyag hasonlóan viselkedik, mint a cementkővázban, a törött szemcsék nem tudnak a halmaz aljára hullani [Faust, 2000b].

2.2. A könnyűbeton szilárdsága

Adalékanyagos könnyűbetonok esetén is a legfontosabb és egyben a minősítés alapjául szolgáló mechanikai jellemző a nyomószilárdság, de itt követelmény a testsűrűség is.

Az *MSZ 4719 Betonok* című szabvány az *MSZ 4715-4 Megszilárdult beton vizsgálata. Mechanikai tulajdonságok roncsolásos vizsgálata* című előírás szerint vizsgált, kiszáritott állapotban $600\text{-}2000\text{ kg/m}^3$ testsűrűségű betont tekinti könnyűbetonnak.

A *MÉÁSZ ME-04.19:1995 Beton és vasbeton készítése 14. fejezet Könnyűbetonok* című műszaki előírás idézi a RILEM munkabizottság felhasználási terület szerinti csoportosítását, amely szerint a 600 kg/m^3 testsűrűség alatti beton megnevezése **hőszigetelő könnyűbeton**. Ezek teherbírása viszonylag kicsi ($0,1\text{ - }3,5\text{ N/mm}^2$ nyomószilárdságú), ezért vázkitöltő falaknál, kis lejtésű tetők és födémek hőszigetelésénél, előregyártott hőszigetelő elemekként, apró szemcsék (pl. polisztirol gyöngy vagy duzzasztott perlit) alkalmazása esetén pedig hőszigetelő vakoló- és falazóhabarcsként van jelentőségük.

A $601\text{-}1600\text{ kg/m}^3$ testsűrűség tartományban **hőszigetelő és teherbíró könnyűbeton** a megnevezés. Ezek az alkalmazási területnek megfelelő optimum keresésével előregyártott falazóelemek, nagyblokkok, monolit öntött falak és födémek, akusztikai zajárnyékoló falak, stb. lehetnek, szilárdságuk a $10\text{-}20\text{ N/mm}^2$ -es tartományba esik.

Az $1601\text{-}2000\text{ kg/m}^3$ testsűrűségű tartományban **teherbíró könnyűbeton**ról beszélünk. Vasalt és feszített szerkezetekben is használható, szilárdsága 20 N/mm^2 -től ma már akár $90\text{-}100\text{ N/mm}^2$ -ig is terjedhet. Használata elsősorban ott előnyös, ahol az önsúly nagy hányada a teljes tehernek (pl. hidak), de a magasépítésben is jól alkalmazható (pl. külső falak, homlokzatok, födémek), illetve az öszvérszerkezetekben is felhasználható. Egyes esetekben gazdasági előnyt jelent az alkalmazása, de előfordul, hogy a megvalósíthatóságnak eleve feltétele a lehető legkönnyebb szerkezet kialakítása.

Az új európai *EN 206* és ennek hazai változata, az *MSZ 4798 szabvány 1. része* 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

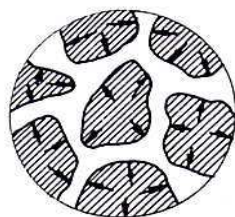
pórusbetonra és a 800 kg/m^3 -nél kisebb testsűrűségű könnyűbetonokra. (Korábbi szabványok pl. DIN 4028) 600 kg/m^3 -ben jelölték meg az alsó határt, hasonlóan a *MEÁSZ ME-04.19*-hez.) Könnyű adalékanyagnak azt az ásványi eredetű adalékanyagot tekintik, amelynek kiszáritott állapotában a EN 1097-6:2000 szabvány 6. része szerint megállapított szemcse testsűrűsége $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$, vagy kiszáritott állapotában az *MSZ EN 1097-3 szabvány 3. része* szerint meghatározott laza halmazsűrűsége $\leq 1200 \text{ kg/m}^3$. A méretezési szabványok és ajánlások, amelyek kitérnek a könnyűbetonokra, egységesen kezelik a 2200 kg/m^3 alatti testsűrűségű betonokat.

A 2.2. táblázat röviden összefoglalja a fent említett szabványok által meghatározott követelményeket és testsűrűség tartományokat.

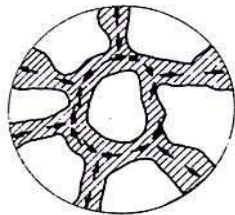
Szabvány	Testsűrűség (kg/m^3)	Anyag
MSZ 4719	600-2000	nincs megkötés
ME-04.19:1995	600 alatti 601-1600 1601-2000	nincs megkötés
EN 206-1 MSZ 4798-1	800-2000	ásványi anyag adalékanyagós beton

2.2. táblázat Különböző szabványok szerinti követelmények a könnyűbeton testsűrűségére és adalékanyagára vonatkozóan

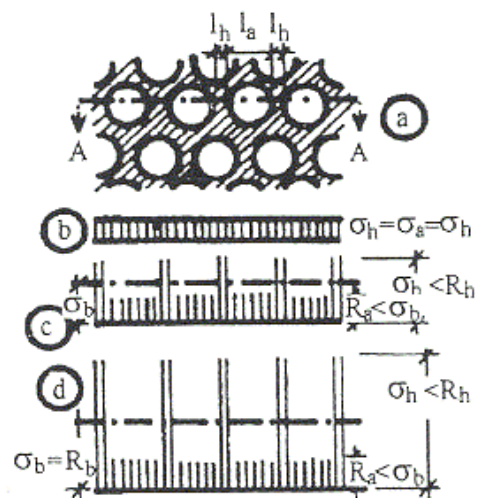
A teherviselés módja a közönséges- és könnyűbetonok esetén alapvetően különbözik. A közönséges betonban az adalékanyag szemcsék (kavicsok) merevsége nagy, és ezek a merev szemcsék rugalmas habarcsba vannak ágyazva. A terhelés nagy részét az adalékanyag szemcsék veszik fel, de az összekötő habarcs rétegnek kell az erőt közvetítenie az adalékanyag szemcsék között (2.4. ábra).



2.4. ábra Teherviselési mód kvarckavics adalékanyagós betonok esetén [Romić, Lazić, 1985]



2.5. ábra Teherviselési mód hagyományos könnyű-adalékanyagós betonok esetén [Romić, Lazić, 1985]



2.6. ábra A könnyűbeton idealizált szövetszerkezete és a feszültségek eloszlása [Ujhelyi, 1960]

A könnyűbetonban az adalékanyag könnyebben összenyomható, a teherviselés a habarcsváz feladata (2.5. és 2.6. ábra). Az adalékanyag szemcsék csak kismértékben vesznek részt a teherviselésben [Ujhelyi, 1995; Faust, 2000a].

A könnyűbeton jelölések hasonlóak a betonjelöléshez, és ez a nemzetközi előírásokban egységes. A jelölési mód a betonoknál megszokott módon a két minősítési értéket (előírt jellemző hengerszilárdság / előírt jellemző kockaszilárdság) adja meg az LC betűjelzés után (2.3. táblázat). A két érték közötti közönséges betonokénál kisebb különbség a könnyű adalékanyagok betonoknak a közönséges betonokhoz képesti nagyobb húzószilárdság / nyomószilárdság hányadosnak és az ebből következő eltérő alakváltozási jellemzőknek (kisebb rugalmassági modulusnak) tulajdonítható. A könnyűbetonok esetén a próbatest alakja kevésbé befolyásolja a szilárdságot. (Korábban a könnyűbeton jelében a számértékek megegyeztek a közönséges betonéval, de az előírt $f_{ck,cube}$ érték akkor is a 2.3. táblázatban feltüntetett volt megegyező [Eibl, 1996], így a jelölés megtévesztő volt, különösen azt a gyakorlatot figyelembe véve, hogy a kutatáson kívül gyakorlatilag mindenhol kocka próbatesteket alkalmaznak.) Az LC 50/55 fölötti szilárdsági osztály esetén nagyszilárdságú könnyűbetonról beszélünk.

Nyomószilárdsági osztály	$f_{ck,cyl}$ N/mm ²	$f_{ck,cube}$ N/mm ²
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.3. táblázat Könnyűbeton nyomószilárdsági osztályok az EN 206-1/MSZ 4798-1 szerinti könnyűbetonokra

A szilárdságvizsgálatok végrehajtása, a szokásos vizsgálati kor és a próbatestek mérete adalékanyagok könnyűbeton esetén megegyezik a hagyományos adalékanyagok betonok esetén alkalmazottakkal. A különböző alakú és méretű próbatestek és tárolási módok közötti szabványos átszámítási módszerek azonban nem érvényesek a könnyűbetonokra, a

2.3. táblázatban említett szabványos henger-kocka átszámításon kívül az adott esetre mindig laborkísérletet kell végezni. A próbatest méretének hatása különösen 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]. Ez az összefüggés egyes könnyűbetonokra is igaz, például a sejtesített könnyűbeton nagyon hasonlóan viselkedik, mint a közönséges betonok. Adalékanyagos könnyűbetonoknál viszont pont az ellenkezőjét tapasztalták a kutatók, nagyobb élhosszúság esetén mértek nagyobb szilárdságot (2.4. táblázat).

A próbakocka élhossza [cm]	Nyomószilárdság [kg/cm ²]		
	Horzsakő beton (Hamann szerint)	Kohóhabsalak beton (Hamann szerint)	Kohóhabsalak beton (Ujhelyi szerint)
10	39,0	30,8	16,1
15	44,9	34,4	-
20	47,0	38,0	18,5
30	-	-	19,6

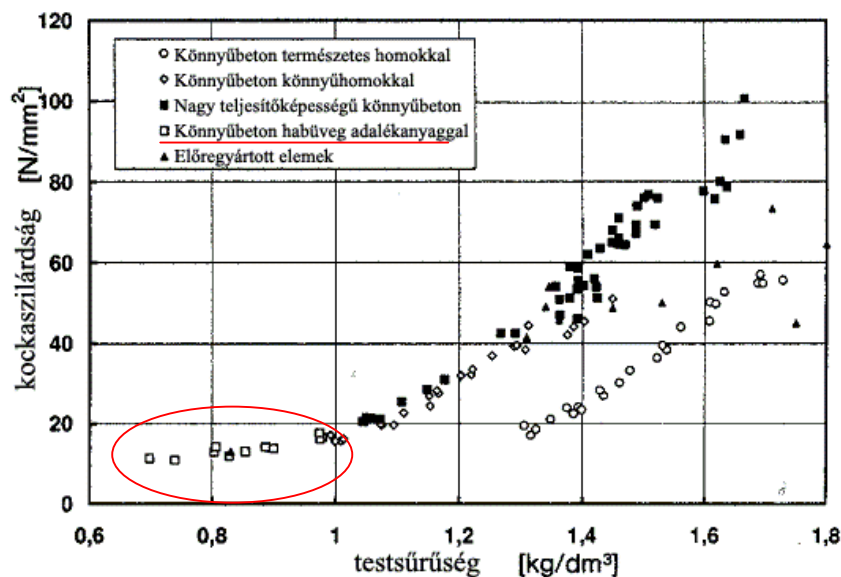
2.4. táblázat A próbatestek mérethatása könnyű-adalékanyagos betonok estén [Hamann, 1953; Ujhelyi, 1959]

Az MSZ 4798-1:2004-ben a szilárdsági osztályon kívül könnyűbetonok esetén megjelenik a testsűrűségi osztály is (2.5. táblázat).

Testsűrűségi osztály (D ill. ρ_{LC})	Száraz testsűrűség átlaga [kg/m ³]
1,0	800-1000
1,2	1000-1200
1,4	1200-1400
1,6	1400-1600
1,8	1600-1800
2,0	1800-2000

2.5. táblázat A könnyűbetonok testsűrűségi osztályai az szerint

A könnyű-adalékanyagos betonoknak alapvetően két csoportja van. Készíthető olyan könnyűbeton, ahol az adalékanyag összes frakciója a könnyű adalékanyag valamelyik típusába sorolható és készíthető könnyűbeton úgy, hogy a finomfrakció (szemcseátmérő < 4 mm) részben vagy teljes egészében természetes kvarchomok, ami alapvetően befolyásolja a szilárdság és a testsűrűség arányát. Könnyűhomokot alkalmazva azonos szilárdság mellett a 200-300 kg/m³-rel kisebb betontestsűrűség is elérhető (2.7. ábra). Általánosságban elmondható, hogy a betongyári beton testsűrűsége nagyobb a laboratóriumi kísérleteknél kapottnál [Bergmeister - Wörner, 2005].



2.7. ábra Szerkezeti és nagyszilárdságú könnyübetonok nyomószilárdsága a testsűrűség függvényében a BetonKalender 2005 [Bergmeister - Wörner, 2005], pirossal jelölve a habüvegre vonatkozó rész, a többi duzzasztott agyagkavics adalékanyagú

A 2.2. és 2.7. ábrán az is megfigyelhető, hogy csak a nagyon kis testsűrűségű (<math><1000 \text{ kg/m}^3</math>) és kis szilárdságú (kockaszilárdság <math><20 \text{ N/mm}^2</math>) habüveg adalékanyagú könnyübetonokat vizsgáltak eddig.

A közönséges betonok szilárdsága a víz-cement tényezőtől közvetlenül függ, és az adalékanyag szilárdsága mindig nagyobb a cementkő szilárdságánál. A könnyübeton tulajdonságai elsősorban az adalékanyag jellemzőitől függenek. A szerkezeti könnyübeton szilárdsága kb. 7 napos korrig növekszik. Azonos szilárdság eléréséhez a hagyományos betonhoz alkalmazottnál kisebb víz-cement tényező szükséges. Az adott könnyübeton szilárdsága azonos víz-cement-tényező mellett a cementtartalom illetve a cementszilárdság növelésével növelhető.

A beton húzószilárdságát jelentősen befolyásolja az adalékanyag felületének érdessége és porozitása, mivel ez javítja az adalékanyag-cementkő együttdolgozását. Annak ellenére, hogy a könnyű adalékanyagok felülete porózus, így érdesebb, mint a közönséges adalékanyagoké – ami elvileg kedvezőbb húzószilárdság szempontjából – azonos nyomószilárdság esetén a könnyübetonokon rendszerint kisebb húzószilárdságot mértek, ezért a számítások során csökkentő tényező figyelembe vételét írják elő a szabványok, amikor a húzószilárdság nem közvetlen mérésrel meghatározott, hanem a nyomószilárdság alapján becsült érték.

Szabvány	Ország	Csökkentő tényező	Csökkentő tényező értéke különböző beton-testsűrűségek esetén		
			1000 [kg/m ³]	1600 [kg/m ³]	2000 [kg/m ³]
BBK 94	Svédország	$0,3 + 0,7 \cdot \frac{\rho}{2400}$	0,59	0,77	0,88
CUR-Rec. 39	Hollandia	$0,4 + 0,6 \cdot \frac{\rho}{2300}$	0,66	0,82	0,92
EN 1992	Európa	$0,4 + 0,6 \cdot \frac{\rho}{2200}$	0,66	0,82	0,92
NS 3473	Norvégia	$0,15 + 0,85 \cdot \frac{\rho}{2200}$	0,53	0,77	0,92

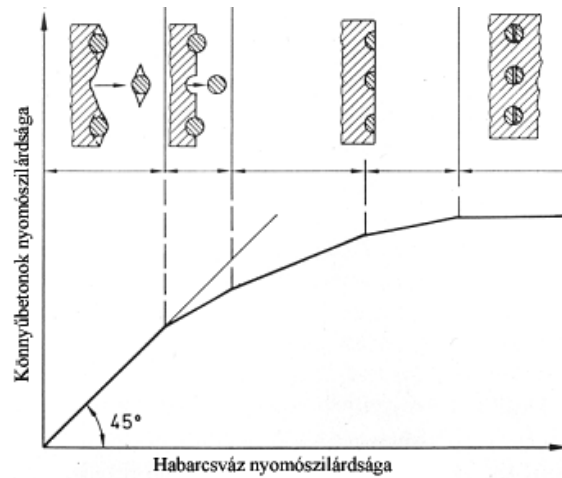
2.6. táblázat A húzószilárdság meghatározása a különböző nemzeti szabványokban
(ρ : a beton testsűrűsége kg/m³-ben)

A szabványok alapvetően kétféle módon közelítik meg a húzószilárdság megadásának kérdést könnyűbetonok esetén: vagy a beton testsűrűsége függvényében adják meg a húzószilárdság értékét a közönséges betonhoz képest (2.6. táblázat), vagy egy konstans szorzótényezőt írnak elő, mint például a JSCE, ahol a könnyűbeton hajlító- és húzószilárdságát a közönséges beton hajlító- és húzószilárdságának 70 %-ára kell felvenni. A norvég szabvány (NS 3473) még további csökkentő tényezőt ír elő abban az esetben, ha az adalékanyag finomrésze is könnyű.

Az USA-ban érvényes előírások (ACI 318-95) szerint, ahol figyelembe akarjuk venni a könnyűbeton húzószilárdságát, ott ennek értékét laboratóriumi kísérletekkel kell a kérdéses esetben meghatározni [fib, 1999].

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. Ez a tönkremeneteli mód olyan összetételekre érvényes, 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 adalékanyagon keresztül futnak. A cementkőváz szilárdságának és a

könnnyűbeton szilárdságának arányában a lehetséges tönkremeneteli módokat a 2.8 ábra foglalja össze.



2.8. ábra A tönkremenetek lehetséges módjainak modellje könnyűbetonok esetén Gröbl szerint [Laister, 2000]

2.3. Alakváltozási jellemzők

2.3.1. A rugalmassági modulus

A rugalmassági modulus mérése körülményes és időigényes a nyomószilárdság vizsgálatához képest, ezért igyekeznek értékét a nyomószilárdság alapján becsülni. A rugalmassági modulus a közönséges betonok esetén elsősorban a szilárdság függvénye, és értéke a szilárdság növekedésével növekszik. A tervezési szabványok és segédletek a beton nyomószilárdsága (pl. ModelCode 90 – 2.1. képlet), illetve a szilárdsági osztálya szerint (pl. Eurocode 2 – 2.7. táblázat) írják elő a rugalmassági modulus számításba veendő értékét.

$$E_c = 2,15 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \quad (2.1.)$$

ahol: E_c a beton rugalmassági modulus N/mm²-ben

f_{cm} a beton hengerszilárdságának átlagértéke N/mm²-ben

A rugalmassági modulus szilárdságtól való függése érvényes a könnyűbetonokra is, itt azonban a testsűrűség hatását is figyelembe kell venni. Abban minden kutató egyetért, hogy a testsűrűség csökkenésével a rugalmassági modulus is csökken, de annak mértékét különböző képpen adják meg. Mivel a testsűrűség változása a szilárdságra is hatással van, ezért az egyszerűsített számítások, illetve egyes szabványok és ajánlások (pl. DIN 4219) a testsűrűségi osztályok szerint adják meg a rugalmassági modulus felvehető értékét (2.8. táblázat). Ez azért

előnyös, mert kiküszöböli az eltérő henger és kockaszilárdság arányból az általánosítások során jelentkező hiba lehetőségét.

Beton szilárdsági jel	Rugalmassági modulus (E_{cm}) [kN/mm ²]
C12/15	25,8
C16/20	27,4
C20/25	28,8
C25/30	30,5
C30/37	31,9
C35/45	33,3
C40/50	34,5
C45/55	35,7
C50/60	36,8

2.7. táblázat Rugalmassági modulus értéke az Eurocode 2 szerint

Testsűrűségi osztály (D)	Rugalmassági modulus [N/mm ²]
1,0	5 000
1,2	8 000
1,4	11 000
1,6	15 000
1,8	19 000
2,0	21 000

2.8. táblázat Testsűrűségi osztályok a DIN 4219 szerint [Eibl, 1996]

Szabvány	Ország	Csökkentő tényező	Csökkentő tényező értéke különböző beton-testsűrűségek esetén		
			1000 [kg/m ³]	1600 [kg/m ³]	2000 [kg/m ³]
BBK 94	Svédország	$\frac{\rho}{2400}$	0,41	0,67	0,83
CUR-Rec. 39	Hollandia	$\left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1,5}$	0,28	0,58	0,81
NS 3473	Norvégia	$\left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$	0,21	0,53	0,83
EN 1992	Európa	$\left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$	0,21	0,53	0,83
MC 90	nemzetközi	$\left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$	0,21	0,53	0,83

2.9. táblázat A rugalmassági modulus meghatározása a különböző nemzeti szabványok szerint (ρ : a beton testsűrűsége kg/m³-ben)

A rugalmassági modulus esetében különösen fontos az adalékanyag típusa, mert azonos testsűrűség mellett is eltérés lehet különböző adalékanyagok között. A DIN értékei gyakorlatilag a duzzasztott agyagkavicsra érvényesek. Viszont mivel sok esetben ennél lényegesen nagyobb rugalmassági modulus is elérhető az adott testsűrűségű osztályba tartozó könnyűbeton egy-egy fajtájához, a kutatók mindig is igyekeztek az adott területen részletesebb eredményekkel alátámasztani a nagyobb rugalmassági modulus alkalmazásának jogosságát.

A húzószilárdság megadásához hasonlóan itt is egy, a közönséges betonok mintájára számított érték melletti csökkentő tényező alkalmazása a leggyakoribb, aminek a testsűrűségek aránya az alapja, illetve ennek 1-2 közti hatványa (2.9. táblázat). Különösen kisebb testsűrűségek esetén látható lényeges különbség a csökkentő tényezők értékében.

Vannak szabványok, ahol a rugalmassági modulusok meghatározásánál mindenképpen, vagyis közönséges betonok esetén is figyelembe veszik a testsűrűséget. De a „csökkentő érték” itt is hasonló, például az amerikai (ACI 318-95 szerinti, 2.2. képlet) vagy az újzélandi (NZS 3101 szerinti, 2.3. képlet) szerint a beton rugalmassági modulusa (E_c):

$$E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,0043 \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.2)$$

ahol: f_c a beton hengerszilárdsága [N/mm^2]
 w_c a beton testsűrűsége (1440-2480 [kg/m^3] között)

$$E_c = (3320 \cdot \sqrt{f_c} + 6900) \left(\frac{\rho}{2300} \right)^{1,5} \quad (2.3)$$

ahol: f_c a beton hengerszilárdsága [N/mm^2]
 ρ a beton testsűrűsége [kg/m^3]

A japán ajánlás (JSCE) a szilárdsági osztály szerint adja meg a rugalmassági modulus értékét közönséges és könnyűbetonokra (2.10. táblázat).

f_{ck} (MPa)		18	24	30	40	50	60	70	80
E_c (GPa)	hagyományos betonok	22	25	28	31	33	35	37	38
	könnyű-adalékanyag betonok	13	15	16	19	-	-	-	-

2.10. táblázat A rugalmassági modulus ajánlott értéke a beton hengerszilárdságának függvényében, közönséges és könnyűbetonokra a japán ajánlás szerint

Az utolsó magyar tartószerkezeti szabvány (MSZ 15022/6-72), majd későbbiekben irányelv (MI 15022/6-86), amely az EN szabványok előtt a könnyűbeton kérdésével

foglalkozott, a nyomószilárdság minősítési értéke és a testsűrűség mellett figyelembe vette a bedolgozási módot, és az adalékanyagokat három csoportba sorolta, de csak az LC 12-es szilárdsági osztályig volt érvényes.

2.3.2. Zsugorodás

A megszilárdult cementkő háromféle módon tartalmazhat vizet: a kémiaailag kötött vizet (szokásos körülmények között megtartja), a fizikailag kötött vizet (ennek elvesztése kis méretváltozást okoz, ez 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 zsugorodás repedéseket okoz, ami alkalmatlanná teszi a betont néhány alkalmazási területeken (pl. vízzáró szerkezet). 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 nagyobb zsugorodási értékek is.

Általánosságban a könnyűbetonok zsugorodása nagyobb, mint a hagyományos, kvarckavics adalékanyagos betonoké. Ez két okra vezethető vissza. A legtöbb adalékanyag gyakorlatilag nem zsugorodik, tehát a zsugorodás a cementkő zsugorodásából adódik, így elsősorban ennek zsugorodása és aránya a betonban a meghatározó. Míg a közönséges adalékanyagos betonoknál a szilárdság szempontjából rendszerint az éppen telített beton az optimális, addig a könnyűbetonoknál túltelített betonra van szükségünk az eltérő teherviselési mód miatt (lásd 2.5. ábra). Ennek következtében a cementkő térfogataránya 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 lehet, mert a „hosszan tárolt víz” utókezelő hatású.

A különböző szabványok által megadott számszerű értékek hasonlóak. A DIN 4219 és EN 1992 a könnyű adalékanyaggal készített betonok zsugorodásának figyelembevételére a

közönséges betonokétól eltérő növelő tényezőt ad meg, két szilárdsági tartományban (2.11. táblázat). A ModelCode 90 1,0 és 1,5 közötti érték megválasztását engedélyezi.

szilárdsági osztály	növelő tényező
LC12/13 - LC 16/18	1,5
LC 20/22 – LC 50/55	1,2

2.11. táblázat Növelő tényezők a zsugorodás végértékére DIN 4219 szerint

Az MSZ 15022/6 nem szorzótényezőket, hanem konkrét értékeket adott meg az adalékanyag típusa, a bedolgozás módja és a könnyűbeton testsűrűsége alapján 0,3 ‰ és 1,6 ‰ között.

2.3.3. Hőtechnikai jellemzők

A könnyűbeton hőtágulási együtthatója kisebb, mint a közönséges betonoké. Átlagosan $8 \cdot 10^{-6}$ 1/K-re vehető föl a $10 \cdot 10^{-6}$ 1/K helyett [Bergmeister-Wörner, 2005; fib, 2000]. Az amerikai szabályozás $6-13 \cdot 10^{-6}$ 1/K értéket ad meg az adalékanyag típusának függvényében. Az MSZ 15022/6 pedig (a kazánsalakos beton kivételével) könnyűbetonokra egységesen $5 \cdot 10^{-6}$ 1/K-t írt elő.

A hővezetési tényező is kisebb könnyűbetonokra, átlagosan 0,40 és 1,00 W/mK közötti, és a testsűrűség csökkenésével – azaz a légtartalom növekedésével – csökken. Ez ugyanakkor a kisebb rugalmassági modulus miatt sem a hőmérsékletváltozás, sem a keresztmetszeten belüli nagyobb hőfokgradiens nem okoz nagyobb sajátfeszültséget [Bergmeister-Wörner, 2005].

A fenti értékek azonban tájékoztató jellegűek. A betonszabványok ebben a kérdésben nem adnak meg követelményértékeket.

A könnyűbeton testsűrűsége [kg/m ³]	Hővezetési tényező [W/mK]
<200	<0,06
200-300	0,06-0,09
300-400	0,09-0,12
400-600	0,12-0,18
600-800	0,18-0,25
800-1100	0,25-0,38
1100-1400	0,38-0,50
1400-1600	0,50-0,60
1600-1800	0,60-0,70
1800-2000	0,70-0,80

2.12.táblázat A várható hővezetési tényező a könnyűbeton testsűrűségének függvényében [Kausay, 2002a]

Kausay szerint a hővezetési tényezőt a könnyűbeton testsűrűsége alapján a 2.12. táblázat szerint érdemes fölvenni, de felhívja a figyelmet arra, hogy ezektől az értékektől jelentős eltérések is lehetségesek.

2.4. Tartóssági kérdések

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.

A CO₂ behatolás a durva könnyű adalékanyag szemcsékben nagyobb mértékű lehet, ezért a minimális betonfedés könnyűbetonok esetén XC1 környezeti osztálytól kezdve legalább 5 mm-rel nagyobbak kell lennie, mint a maximális szemmagyság (DIN 1045-1). Ez általában nem jelent szigorú feltételt, mivel a szerkezeti könnyűbetonok maximális szemmagysága kicsi, ritkán haladja meg a 24 mm-t.

A könnyűbeton fagyállósága akkor jó, ha maga az adalékanyag is fagyálló [Erdélyi, 1994]. Az 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 környezeti osztályok esetén a minimális cementtartalomra és a maximális víz-cement tényezőre vonatkozó előírásokat ugyanúgy be kell tartani, mint a közönséges betonok esetén és akkor hasonló tartósságot várhatunk; kivéve a kopásállóságot, ahol az adalékanyag szilárdsága a döntő.

2.5. Könnyűbetonok tervezése

A beton nagyon sokoldalúan alkalmazható, egy olyan mesterséges kő, ahol széles tartományban választhatjuk meg az elérhető tulajdonságokat. Például a nyomószilárdság 1 és 200 N/mm², a hővezető-képesség 0,1 és 3,0 W/mK, a testsűrűség 150 és 3000 kg/m³ a rugalmassági modulus 1000 és 50 000 N/mm² között változhat [Grübl-Klemm, 2000]. Természetesen ezek a tulajdonságok nem párosíthatók szabadon és gondos tervezést igényelnek, de a tudományos alapon való megközelítés napról-napra új lehetőségeket tár föl. Nem véletlenül nevezte a Német Beton- és Építéstudományi Egyesület a 100 éves évfordulóján a betont az évszázad építőanyagának [Beton, 1998].

A könnyűbetonok tervezése során figyelembe kell venni néhány igen fontos szempontot, amely eltér a közönséges betonokétól. A legfontosabb különbség, hogy míg közönséges betonoknál a tervezés kiinduló alapadata a megkívánt szilárdság értéke, addig könnyűbetonok esetén a szilárdság (2.4. képlet) mellett párhuzamos követelményként megjelenik a testsűrűség is (2.5. képlet), és ennek a kettőnek az optimalizálása a fő feladat. A beton szilárdsága a cementkő és az adalékanyag szilárdságának térfogatarányos összegével közelíthető [Ujhelyi, 1995]:

$$R_{KB} = (R_a \cdot V_a + R_h \cdot V_h) / (V_a + V_h) \quad (2.4.)$$

ahol: R_h a habarcs szilárdsága, amely függ
- a cement típusától
- a cement mennyiségétől
- víz-cement-tényezőtől
 R_a az adalékanyag szilárdsága
 V_h a habarcs mennyisége a betonban
 V_a az adalékanyag mennyisége a betonban

$$\rho_{KB} = (\rho_a \cdot V_a + \rho_h \cdot V_h) \quad (2.5.)$$

ahol: ρ_a az adalékanyag szemcse-testsűrűsége
 ρ_h a habarcs testsűrűsége
 V_h a habarcs mennyisége a betonban
 V_a az adalékanyag mennyisége a betonban

Közönséges betonok esetén a szilárdságot befolyásoló legfontosabb tényezőnek a víz-cement tényezőt tekintik, viszont nem szabad 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 mellett valóban a víz-cement tényező adja meg az elérhető szilárdság korlátait és gyakorlati szempontból ez a legkritikusabb. Ha azonban eltérünk a szokásos kvarckavics adalékanyagtól, akkor ennek szilárdsága és mennyisége is döntő lesz.

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 nő; 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 itt hagyományos kvarchomokot alkalmazunk. Ha az alkalmazott adalékanyagok szemcse-

testsűrűsége eltérő, a szemmegoszlási görbe készítésekor nem alkalmazható a hagyományos tömegszázalékos számítás, az adalékanyagok térfogat-százalékos ábrázolása szükséges.

2.6. Vonatkozó szabványok

A szerkezeti könnyűbetonokra általában a betonokkal foglalkozó szabványok, illetve azok kiegészítései, ha léteznek érvényesek. A szabályozás mára nagyjából egységes Európában. A készítéssel és a minősítéssel az EN 206-1 (magyar nemzeti változata MSZ 4789-1), a méretezéssel az EN 1992-1-4 (közismert nevén az Eurocode 2), az adalékanyaggal pedig az EN 13055-1, illetve az annak alapján készített nemzeti szabványok foglalkoznak.

3. LABORATÓRIUMI KÍSÉRLETEK

3.1. Adalékanyag vizsgálatok

Három gyártó habüveg adalékanyagait választottam ki. A magyar habüveg termékek (Geofil–Bubbles) közül 70-féle, részben kísérleti gyártású adalékanyagot vizsgáltam meg, majd ezekből választottam ki a további betonvizsgálatokhoz a legalkalmasabbakat. Ezeken kívül két különböző német gyártó termékét választottam (Liaver B 2/4 és Poraver 4/8 ill. 8/16), mivel ezek az európai piacon elterjedtek, és Magyarországon is beszerezhetők. Összehasonlításként a legelterjedtebben alkalmazott duzzasztott agyagkavicsot (Liapor termékek) és az üveggkavicsokhoz hasonlóan szintén hulladékból származó téglazúzalékot is megvizsgáltam. Megmértem továbbá a tömegeloszlási jellemzőit és a halmaz-önszilárdságát bontott téglatörmelék (olyan bontási anyag, amelyben legalább 35 m %-a téglatörmelék, a többi része habarcs és esetleg beton [Kausay, 2003]) és bontott vegyes törmelék (amelynek betontartalma legalább 50 m %, és beton + téglátartalma legalább 90 m % [Kausay, 2003]) 4/8-as és 8/16-os frakciója esetén. Referenciának kvarckavicsot használtam.

Egy könnyű adalékanyag adott területhez való alkalmasságának vizsgálatokor három fő szempontot kell megnézni:

1. vízfelvétel: a beton készítését befolyásolja, nagy vízfelvétel esetén az adalékanyag elszívja a keverés során a cementpépből a vizet, a tényleges víz-cement tényező és ennek függvényében a szilárdság, illetve a konzisztencia, azaz ennek következtében a bedolgozhatóság változik;
2. a szemcse-testsűrűség és a halmaz-önszilárdság aránya: befolyásolja, hogy milyen szilárdságú beton készíthető belőle, az adalékanyag mennyire vesz részt a teherviselésben;
3. szemcseméret és szemmegoszlás: meghatározza, hogy a könnyű adalékanyag mennyire tudja kitölteni a teret, mennyi minimális cementpép szükséges.

Mindegyik adalékanyagra meghatároztam a főbb tömegeloszlási jellemzőket: a halmaz-, test- és anyagsűrűséget ill. a szemmegoszlást. A szemmegoszlás szinte minden mesterségesen előállított adalékanyag esetén egyfrakciós, ezért a többi (kvarckavics, téglazúzalék) adalékanyagot frakciónként külön adalékanyagfajtának tekintettem. A tömegeloszlási jellemzőkön kívül a beton szilárdságának megtervezéséhez ismernünk kell az adalékanyag halmaz-önszilárdságát.

adalékanyag megnevezése	szemcse-testsűrűség [kg/m ³]	szemcseporozitás [%]	látszólagos porozitás [%]
habüveg	220 - 2160	14 - 89	0,2 - 44
duzzasztott agyagkavics	660 - 1280	50 - 73	28 - 31
téglazúzalék	1630 - 1640		36 - 37
bontott téglatörmelék	1810 - 1850		28 - 29
bontott vegyes építési törmelék	1840 - 1930		10

3.1. táblázat A kísérletek során alkalmazott adalékanyagok és vizsgált testsűrűségi tartományuk

Technológiai szempontból fontos a könnyű adalékanyagok esetén a rendszerint jelentős mértékű vízfelvétel. Üveg alapanyagú adalékanyagok esetén felmerül az alkáli-adalékanyag-reakció lehetősége is, ezért ezt is vizsgáltam az MSZ EN 13055-1 által előírt kémiai vizsgálatokon kívül.

3.1.1. Adalékanyag szilárdságának vizsgálata

3.1.1.1. Halmaz-önszilárdság vizsgálat

A testsűrűségen kívül az adalékanyag szilárdsága a másik legfontosabb adalékanyag jellemző, viszont mérése közvetlenül nem oldható meg. Az adalékanyagok szilárdságát rendszerint a szemcsehalmaz önszilárdságával jellemzik. Az ilyen típusú vizsgálatok előnye, hogy egyszerű, hátránya viszont, hogy az adalékanyag önmagában vizsgálva más szilárdsági tulajdonságú, mint kötőanyagba ágyazva, például betonban. Ezért mindkét fajta módszert alkalmaztam a vizsgálatok során.

A hagyományos adalékanyag halmazszilárdság-vizsgálati módszerek nagy része, pl. Los Angeles, Deval, Mikro-Deval vagyis a dinamikus vizsgálatok [Árpás – Emszt – Gálos – Kárpáti, 2002] könnyű adalékanyag esetén nem alkalmazhatók, mert az adalékanyagok aprózódása olyan nagymértékű, hogy az adalékanyag nem sorolható be a kategóriákba. A könnyű adalékanyagok vizsgálatára vonatkozó szabvány az MSZ EN 13055-1 is egy statikus módszert ajánl. Ez alapján én az adalékanyagok halmaz-önszilárdság vizsgálatát a Hummel-féle vizsgálathoz használt mozsár és dugattyú alkalmazásával végeztem. Ezzel a módszerrel minden adalékanyagot megvizsgáltam. Ez a vizsgálat azért is célszerű, mert ez mind Magyarországon, mind Európa több országában használatos, és a szükséges felszerelés az

anyagvizsgáló laboratóriumok rendelkezésére áll. Mivel ez a mozsár és dugattyú méret nem felel meg pontosan az EN által előírtak, ezért összehasonlításként egy másik 150 mm-es átmérőjű általam „hosszú”-nak nevezett mozsárral is elvégeztem a vizsgálatot néhány adalékanyag típus esetén. A mozsarak és dugattyúk jellemzői a 3.2. táblázatban láthatók.

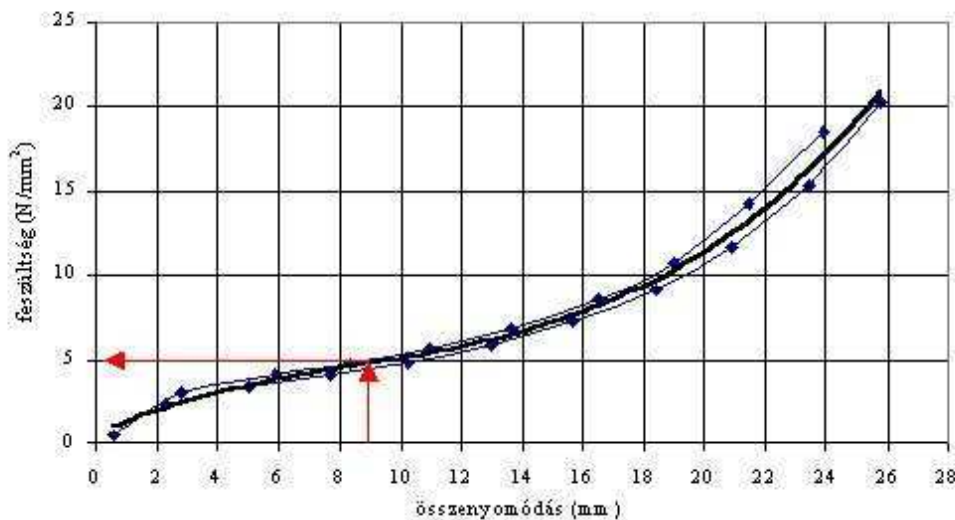
	vizsgált adalékanyag mennyiség [l]	dugattyú tömege [kg]	mozsár átmérője [mm]	10%-hoz tartozó összenyomódás [mm]
Hummel	2,0	17,25	170	8,8
„hosszú”	2,0	10,0	150	11,0

3.2. táblázat A törési ellenállás meghatározásához használt mozsarak és dugattyúk adatai

Két liter adalékanyagot helyeztem a mozsárba és a szabályos időközönként leolvasott erő és összenyomódás értékekből számítottam a törési ellenállást, a pillanatnyi terhelőerő (F) és a dugattyú önsúlyának (L) figyelembe vételével a következő képlet alapján:

$$C [N/mm^2] = \frac{L + F}{A} \quad (3.1)$$

A törési ellenállásnak, azaz a szemcsehalmaz önszilárdságának az MSZ EN 13055-1 szerint a 10 %-os összenyomódáshoz tartozó értéket tekintetem, amelyet a feszültség – összenyomódás diagramból határoztam meg (3.1. ábra)



3.1. ábra A törési ellenállás meghatározása (A nyíllal jelzett számérték a Hummel-mozsár esetére vonatkozik.)

3.1.1.2. Szilikon-próbatestes vizsgálat

Az adalékanyagok viselkedése kötőanyagba ágyazva más, mint halmazként vizsgálva. A szemcsehalmaz-önszilárdság vizsgálat legfőbb hibája, hogy az összetört szemcsedarabok a szemcsék közötti hézagokban a halmaz aljára hullanak, és ott egy nagyobb tömörségű részt

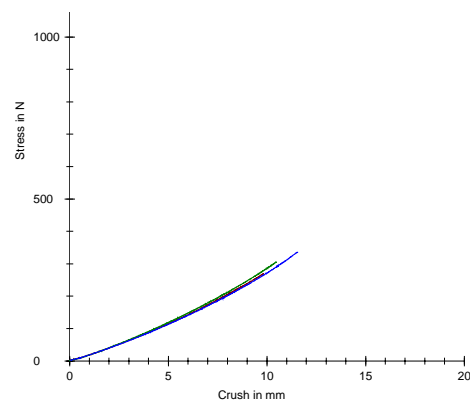
képeznek, amely nagyobb ellenállású. Ez a feszültség – összenyomódás görbén jól megfigyelhető, különösen 20 % összenyomódás felett jelentős ennek hatása (3.1. ábra).

Ennek kiküszöbölése érdekében, az adalékanyag szemcsék kötőanyagban való viselkedésének modellezésére a laza halmaz hézagait két különböző kis szilárdságú, kis rugalmassági modulusú, viszont igen nagy alakváltozó-képességű szilikongyantával (T-SILOX OXAM S2 és OXAM S1 + OXAM katalizátor) (3.3. ábra) töltöttem ki. 30 mm-es élhosszúságú kockákat készítettem lényegesen különböző tulajdonságú könnyű (2 féle habüveg, duzzasztott agyagkavics és téglazúzalék) és kvarckavics adalékanyagok 4/8-as frakciójából (3.2. ábra).

Minden esetben felvettem az erő összenyomódás diagramot, meghatároztam a szilárdságot és a rugalmassági modulusot. A adalékanyagok mindegyike merevnek tekinthető a szilikongyantához képest, tehát teherviselés szempontjából az 2.4. ábra szerint viselkednek, de a szilikon nagy alakváltozó-képessége miatt a tönkremenetel sohasem a kötőanyag tönkremenetelével jön létre, hanem az adalékanyag szétmorzsolódásával; tehát így egy az adalékanyag halmazszilárdságára jellemző értéket kaphatunk.



3.2. ábra Adalékanyagok szilárdságvizsgálata szilikonpróbatesttel



3.3. ábra Az alkalmazott szilikon erő-összenyomódás diagramja

3.1.1.3. Műgyanta-próbatestes vizsgálat

További lehetőség az adalékanyag szemcsék kötőanyagban való viselkedésének modellezésére, ha a szemcsék közti hézagokat nagyszilárdságú kötőanyaggal töltjük ki. Faust vizsgálatai alapján [Faust, 2000] STO IHS-MH nagyszilárdságú műgyantát választottam, ennek szilárdsága a DIN 53454 szerint 12 mm átmérőjű 30 mm magas hengereken vizsgálva átlagosan $69,2 \text{ N/mm}^2$, 30 mm-es (az adalékanyag kísérletekhez alkalmazott méretű) kocka próbatesten mérve $61,5 \text{ N/mm}^2$. Az alkalmazott adalékanyag mennyiség a próbatest

készítéséből adódóan minden esetben elérte a maximális lehetséges értéket. Ez minden esetben nagyobb, mint 30 V %, tehát a mért érték szerint már tekinthető az adalékanyagot jellemező szilárdságnak (2.1.2. fejezet, 2.3. ábra).

3.1.2. Adalékanyagok vízfelvételének vizsgálata

Az adalékanyagos könnyűbetonok kis testsűrűségét az adalékanyag szemcsék nagy porozitása adja. Mivel a természetes könnyű adalékanyagok mindegyike és a mesterségesek nagy része nyitott pórusszerkezetű, ezért a vízfelvételük is jelentős. A nagy vízfelvevő képesség a beton készítését megnehezíti, a víz-cement tényező értéke nehezen állítható be, egyes technológiák, mint például a szivattyúzás nem oldható meg. Ezért ismerni kell az adalékanyagok vízfelvételét és ennek folyamatát. Technológiai szempontból a könnyű adalékanyagok fél vagy egy órás vízfelvétele a mérvadó [Ujhelyi, 1995], de az adalékanyag jobban jellemezhető a maximális vízfelvételével, azaz a látszólagos porozitásával. A vízfelvétel vizsgálatokat is az MSZ EN 13055-1 szabvány szerint végeztem el. A vizsgálat csak ~2 mm vagy nagyobb átmérőjű szemcsék esetén ad valós eredményt, mivel a kisebb szemcsék felületéről nem távolítható el a vízfilm.

3.1.3. Alkáliállóság vizsgálata

Az MSZ EN 13055-1 szabványban meghatározott általános kémiai követelmény, hogy a könnyű adalékanyag nem tartalmazhat olyan mennyiségben káros alkotórészeket (pl.: kloridiont, szulfátiont, szerves anyagot), amelyek a kívánt területen beépítésre alkalmatlanná teszik. Minthogy az általam vizsgált összes könnyű adalékanyagot (duzzasztott agyagkavics, habüveg, téglazúzalék) nagy hőmérsékleten égetik ki, ezért szerves anyag a gyakorlatban nem fordulhat elő. A fenti szabvány viszont nem írja elő a könnyű adalékanyagok alkáli érzékenységének vizsgálatát, de bázikus rendszerekben csak alkáliálló adalékanyag alkalmazható, ezért üvegtermékek esetében ezt a vizsgálatot is nagyon fontosnak tartottam.

A habkavics minták alkáli érzékenységének jellemzésére a Német Vasbeton Egyesület - eredetileg természetes aprózódású homokos kavics adalékanyagokra kidolgozott - módszerét alkalmaztam (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie Alkalireaktion im Beton (12/86)). Az alkáli érzékenység vizsgálatához a felmelegített szemcséket 90 °C-on főztem egy órán át, a 4 mm-nél kisebb szemcsék esetében 4 %-os, 4 mm-es vagy nagyobb szemcsék esetén pedig 10 %-os NaOH oldatban. A vizsgált termék akkor alkalmazható beton-

adalékanyagként, ha ennek hatására nem puhul fel, nem deformálódik, és nem szenved tömegvesztést.

Kiegészítésképpen elvégeztem az autokávos vizsgálatot is 40 x 40 x 160 mm-es hasábokon a ASTM C 151-89 szabvány szerint, ahol már a betonban való viselkedés vizsgálható.

A fenti vizsgálatok egyikével sem tudtam kimutatni különbséget az adalékanyagfajták között, ezért az üvegszálak betonban való korróziójának vizsgálata alapján [Orlowsky – Raupach, 2004] kísérleti tervet készítettem, mely során két különböző szemcse-testsűrűségű bevonatos és egy bevonat nélküli habüveg adalékanyagos betont hasonlítottam össze közönséges betonnal. A vizsgálathoz 40 x 40 x 160 mm-es hasábokat készítettem. A alkáliállóság vizsgálat érdekében 2 hetes korban a próbatestek felét 65 ± 5 °C-os vízbe helyeztem, a többi etalonként törésig laborhőmérsékleten víz alatt tároltam. 2, 8 és 12 hónapos korban végeztem hajlító-húzó- és nyomószilárdság vizsgálatot.

3.2. Könnyűbeton szilárdságvizsgálatok

A hagyományos könnyűbetonok esetén a teherhordó szerep nagy része a habarcsra hárul, tehát ennek szilárdságát növelve a könnyűbeton szilárdsága is növekszik. A könnyűbeton szilárdságát azonban nem lehet tetszőlegesen növelni a habarcsváz szilárdságának növelésével. Az adalékanyag alakja, mérete, szemmegoszlása és felületi szerkezete közvetlenül és közvetve is befolyásolja a beton szilárdságát. Ennek alapján a könnyűbeton tulajdonságait elsősorban

- az adalékanyag fajtája
- az adalékanyag és a habarcs térfogataránya
- a habarcs szilárdsága

határozza meg.

A szerkezeti könnyűbetonok legfontosabb jellemzői **a testsűrűség és a szilárdság**. A tervezés során mindkettő követelmény. Míg a testsűrűség az összetevők testsűrűségéből és arányából, azaz elsősorban az adalékanyag sűrűségi adataiból (halmaz-, szemcse-test- és anyagsűrűség, illetve az ebből következő hézagosság és porozitás) meghatározható, a szilárdság „kialakulása” már nem ilyen egyértelmű, és erősen függ az összetevők szilárdságának arányától. Ennek vizsgálata érdekében három paramétert választottam és változtattam, majd hatásukat vizsgáltam. Célom az volt, hogy meghatározzam, milyen

szilárdságú adalékanyagból milyen mennyiséget célszerű adagolni az összetevők tulajdonságainak legjobb kihasználásához.

3.2.1. Alapanyagok

A szilárdságvizsgálatokhoz minden esetben tiszta portlandcementet alkalmaztam, és minden esetben azonos gyártótól vásároltam (CEM I. 42,5 N). A közönséges és a könnyű adalékanyagokat csak a kavics frakciókban változtattam, a 4 mm alatti szemcse frakció minden esetben I. osztályú 0/4-es folyami kvarchomok volt.

A változó paraméterek:

- az adalékanyag szilárdsága (egyben ez az adalékanyag típusát is jelenti)
- az adalékanyag mennyisége (térfogatszázalékban)
- a habarcs szilárdsága

3.2.2. Az adalékanyag szilárdságának és mennyiségének hatása

jele	Adalékanyag			Adalékanyag mennyisége (V%)				
	anyaga	szemcse- testsűrűség [kg/m ³]	halmaz- önszilárdsága Hummel mozsárban mérve [N/mm ²]	56	47	43	38	36
23	habüveg	484	0,38	✓		✓		
2	habüveg	600	0,41		✓			✓
8	habüveg	610	0,49		✓			✓
20	habüveg	635	0,64		✓			
13A	habüveg	1064	1,92					
21	habüveg	930	1,97				✓	
F6	habüveg	1505	2,64	✓				
12	habüveg	1236	3,87	✓				
24	habüveg	1014	3,89	✓	✓	✓	✓	
1-11A	habüveg	1059	3,93		✓			✓
R II	habüveg	1433	3,97		✓			✓
F4	habüveg	1614	4,67		✓			✓
10A	habüveg	1708	5,36		✓		✓	
R IV	habüveg	1439	7,34		✓			✓
P8/16	habüveg	221	0,2		✓			
L4	duzzasztott agyagkavics	830	1,27			✓		
L6.5	duzzasztott agyagkavics	1278	5,15		✓	✓		
K	folyami kvarckavics	2640	11,1		✓			

3.3. táblázat Az adalékanyagok mennyiségének változtatása az 1. jelű habarcsösszetétel esetén

Összesen 18-féle adalékanyagot (15-féle habüveget, kétféle duzzasztott agyagkavicsot és természetes kvarckavicsot) alkalmaztam 36-56 V% között változtatott adagolásban a 3.3. táblázat szerint.

Minden keverékből 150 mm-es élhosszúságú szabványos kockákat készítettem a nyomószilárdság vizsgálatához és 70,7 x 70,7 x 250 mm-es hasábokat a hajlító vizsgálatához. Az eredményeket mind az adalékanyag szilárdsága, mind pedig a mennyisége alapján csoportosítottam.

A habarcs összetétele minden esetben azonos volt (a 3.4. táblázat szerinti 1. jelű összetétel), így különböző százalékos adagolások esetén a betonkeverékre számított cement, homok illetve vízmennyiségek eltérők voltak, de így tudtam elérni, hogy a habarcsváz minden esetben azonos szilárdságú legyen.

3.2.3. A cementkő szilárdságának hatása

A cementkő szilárdságváltozásának hatásáról feltételeztem, hogy hasonló a közönséges adalékanyagok betonok esetén ismerthez, ezért ezt a vizsgálatot csak ellenőrzésképpen végeztem el. Ennek érdekében anyagtakarékossági szempontból nem szabványos próbatesteket, hanem 70,7 mm-es élhosszúságú kockákat készítettem, amelyek a nyomószilárdságok összehasonlítására alkalmasak. Háromféle összetételt választottam, amelyek során a cementtartalmat, a víz-cement tényezőt (v/c) és a homok-cement tényezőt (h/c) is változtattam, a víztartalom a háromféle habarcsban közel azonos volt (3.4. táblázat 1, 2 és 3 jelű habarcs ill. betonösszetétele).

	homok/cement tömegaránya	víz/cement tömegaránya	cementtartalom a habarcsban [kg/m ³]	cementtartalom a betonban [kg/m ³]
1. jelű összetétel	1,25	0,35	868	380 - 555
2. jelű összetétel	2,0	0,43	638	338
3. jelű összetétel	3,0	0,55	494	262

3.4. táblázat A három alkalmazott habarcsösszetétel

Minden kísérletben azonos 47 V%-os adalékanyag adagolást választottam és minden esetben a próbatest méretére tekintettel 4/8 frakciójú adalékanyagot alkalmaztam, kivéve az LV jelű esetben (3.5. táblázat), ahol a maximális gyártási méret 2/4.

A 3.5. táblázat szerinti betonkeverékeket készítettem el. Az etalon minden keverék esetén a könnyű-adalékanyag, illetve kvarckavics nélküli habarcsot jelenti. Az adalékanyagok

vízfelvételt nem vettem figyelembe a kísérlet során, kivéve a téglá esetében, ahol a lényegesen nagyobb és gyorsabb vízfelvétel miatt a keverék bedolgozhatatlan lett volna szárazon, ezért a téglá tömegére vonatkoztatott 10 % többletvíz adagolást választottam.

adalékanyag	szemcse- testsűrűség [kg/m ³]	halmaz- önszilárdsága [N/mm ²]	1.	2.	3.
			jelű összetétel		
homok-cement tényező			1,25	2,0	3,0
víz-cement tényező			0,35	0,43	0,55
etalon			✓	✓	✓
kvarckavics	2640	11,1	✓	✓	✓
F4	1614	4,7	✓	✓	✓
P4/8	311	0,8	✓	✓	✓
1-11A	1059	4,5	✓	✓	✓
24	1014	3,9	✓	✓	✓
8	610	0,5	✓	✓	✓
2	600	0,4	✓	✓	✓
20	635	0,6	✓		✓
R III	1420	3,9	✓		
LV	329	0,8	✓		
R II	1433	4,0	✓		
R IV	1439	7,3	✓		
téglázúzalék	1535	1,3	✓		

3.5. táblázat Az adalékanyag típusok és habarcsösszetételek összefoglaló táblázata

3.2.4. A próbatest alakjának hatása

A könnyűbetonok esetén az eltérő alakváltozó képesség miatt a próbatest alakjának hatása eltér a közönséges adalékanyagok betonoknál megszokott értékektől. Ez legjobban talán a szilárdsági jelből tűnik ki (2.3. táblázat). Mivel a kísérletek során különböző típusú próbatesteket készítettem, ezért a kiértékelésükhöz fontos a próbatest alakhatásának megállapítása, és figyelembevétele. Ennek érdekében vizsgálatokat végeztem, hogy a 150 mm-es és a 70,7 mm-es kocka nyomószilárdságának arányát meghatározzam.

3.2.5. A húzó- és nyomószilárdság aránya

A szabványok minden esetben csökkentő tényezőt írnak elő a könnyűbetonok húzószilárdságának a nyomószilárdság alapján számítással meghatározott értékeire. Ugyanakkor a porózus felületű adalékanyag szemcse esetén nagyobb tapadás feltételezhető a szemcse és habarcsváz között, ami ellentmondást jelent. Ennek tisztázása érdekében vizsgálatot végeztem, amelyben összehasonlítom a hajlító-húzó- és a nyomószilárdságot. Hajlító vizsgálatnál nem határozható meg a beton tiszta húzószilárdsága, pedig gyakorlati

szempontból a hajlító-húzó szilárdság a jelentős, mert húzott betonszerkezet nem készül, a beton a hajlított szerkezetekben van húzásra igénybe véve.

A kísérletsorozat során 70,7 x 70,7 x 250 mm-es hasábokat készítettem (3.4. ábra). A hajlító erőt hárompontos hajlítóvizsgálattal határoztam meg, majd a két félhasábon 70 x 70 mm-es nyomólappal határoztam meg a nyomószilárdságot.



3.4. ábra A hajlító vizsgálat

3.2.6. Törési kép a szilárdságok függvényében

A hajlítás utáni törési felületeken megfigyelhető, hogy az adalékanyag és a habarcsváz egymáshoz képest milyen szilárdságú, azaz milyen a teherviselési mód (2.4. vagy 2.5. ábra szerinti). Ezért minden esetben, amikor hajlító-húzó vizsgálatot végeztem, feljegyeztem a töréskép típusát is, azaz, hogy a szemcsék eltörtek, kifordultak vagy vegyes tönkremenetelt mutattak a hajlítás során. A habarcsszilárdság változtatásánál (3.4. táblázat) pedig a kockákon kívül készítettem 40 x 40 x 160 mm-es hasábokat is, és ezeken szintén hajlítóvizsgálatot végeztem. A 2 napos és a 28 napos próbatesteket egyaránt vizsgáltam, így az egész kis szilárdságú habarcsban való viselkedést is vizsgálni tudtam.

A hajlító-húzó vizsgálatoknál mindig egyértelmű törési képet tapasztaltam, ezért ehhez a vizsgálathoz kevés próbatest is elegendő volt.

3.2.7. A próbatestek nedvességtartalma

A könnyűbetonok testsűrűsége a szabványok szerint mindig légszáraz állapotban értendő, viszont minden szilárdságvizsgálatot víz alatti tárolást követően, nedves állapotban kell végrehajtani a szabványok előírásai alapján. Így bármely testsűrűség – szilárdság viszony tényleges értékekkel csak nedves állapotra mondható ki. Az általam végzett összes mérés is ilyen. Annak érdekében, hogy meg lehessen adni a légszáraz állapothoz tartozó testsűrűséget is több erre a célra készített, illetve a szilárdságvizsgálatot követően még mérhető állapotban

maradt különböző alakú és méretű próbatesten meghatároztam a száraz (105 °C-on tömegállandóságig való szárítást követően mérhető) és a légszáraz testsűrűséget, és az ezekhez tartozó nedvességtartalmat kiszámítottam.

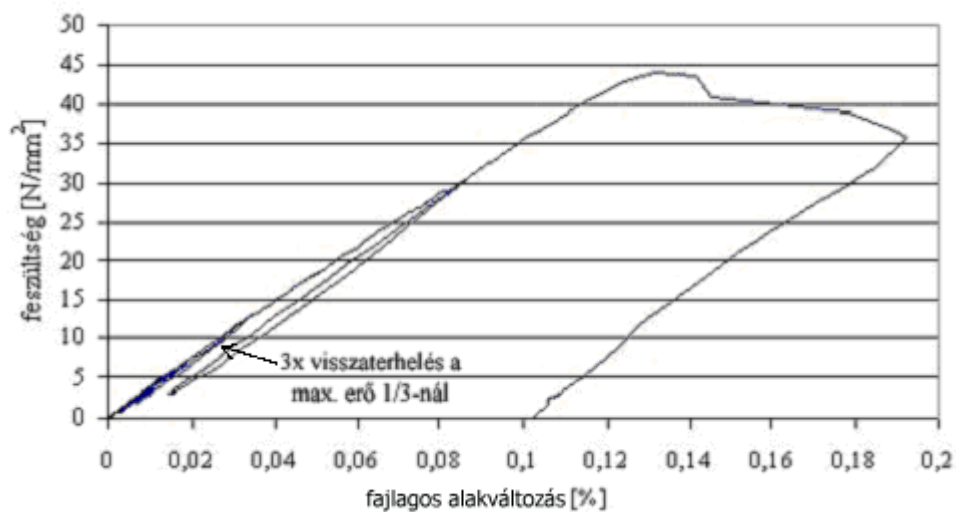
3.3. Alakváltozási jellemzők vizsgálata

3.3.1. Rugalmassági modulus vizsgálata

A szakirodalom szerint (2.3.1. fejezet) az azonos szilárdságú könnyűbetonok rugalmassági modulusa kisebb, mint a hagyományos betonoké, ezért szükségesnek tartottam ennek számszerűsítését a különböző habüveg adalékanyagok esetén. A rugalmassági modulusot 2 és 28 napos korban vizsgáltam 120 x 120 x 360 mm-es fekvő betonozott hasábokon. A hasábot álló helyzetben egy kiegészítő gömbcsukló és két farostlemez teherelosztó réteg közvetítésével helyeztem a törőgépre (3.5. ábra) a mért erőt illetve a hossz- és keresztirányú alakváltozást a számítógép folyamatosan rögzítette és ábrázolta.



3.5. ábra A próbatest helyzete a törőgépben



3.6. ábra Jellegzetes $\sigma - \epsilon$ diagramm

A terhelést a várható törőerő harmadáig növeltem, majd tehermentesítettem, és ezt háromszor ismételttem egymás után, majd a törésig növeltem az erőt. Az erő-elmozdulás diagram (3.6. ábra) lineáris szakaszából határoztam meg a rugalmassági moduluszt.

3.3.2. Zsugorodás vizsgálata

3.3.2.1. A mérés módszere

A zsugorodás a beton megszilárdulása előtti szakaszban is jelentős (képlékeny zsugorodás), ezért nagyon fontos, hogy már a frissbetont is vizsgálni lehessen. Kis méretű 40 x 40 x 400 mm-es hasábokat készítettem, mert ezeken gyorsabban játszódik le a száradási zsugorodás és így könnyebben vizsgálható. A próbatesteket 1 napos korukig műanyag fóliával bélelt fasablonban tároltam. A frissen bedolgozott próbatest felületére 0,1 mm osztású skálával ellátott üveglapokat helyeztem és mikroszkóp alatt (Leitz-Wetzlar készülékkel, 3.7. ábra) mértem az alakváltozást: 315,5 mm-es alaphosszon végeztem a leolvasást, századmilliméter pontossággal. A beton megszilárdulása után a próbatesteket eltávolítottam a sablonból, és a fóliát lehúztam róluk, majd 20 ± 3 °C hőmérsékletű és 50-60 % relatív páratartalmú térben tároltam. A szilárd beton további zsugorodását Huggenberger-féle módszerrel vizsgáltam, azzal a különbséggel, hogy az alaphossz 200 mm volt (Demec típusú deforméter, 3.8. ábra). Mérőcsúcsokat ragasztottam az 1 napos próbatestre és a mérőcsúcsok távolságát kezdetben naponta, később folyamatosan ritkítva hetente, majd havonta mértem. A próbatestek nem utókezelttem, mert így mérhető a maximális zsugorodás. A levegőzést a tároló tálcán elhelyezett műanyag rácsokra való fektetés biztosította. A könnyű adalékanyagos próbatesteken kívül készítettem kvarckavics adalékanyagú és „etalon habarcs” próbatesteket is összehasonlítás céljából.



3.7. ábra Zsugorodás mérés Leitz-Wetzlar készülékkel (24 órás korig)



3.8. ábra A zsugorodás ill. hőtágulás mérése Demec típusú mérőeszközzel (1 napos kortól)

3.3.2.2. A különböző adalékanyagok hatása a zsugorodásra

A kísérletsorozat első lépéseként a különböző típusú adalékanyagok hatását vizsgáltam. A minél nagyobb mértékű zsugorodás elérése érdekében nagy cementadagolást választottam, a 3.2.3. szerinti 1. jelű keveréket (3.4. táblázat). A habarcsösszetétel mindegyik adalékanyag esetén azonos volt, és minden könnyű adalékanyagból és a kvarckavicsból 47 V %-ot alkalmaztam. Minden alkalmazott könnyű adalékanyagokból és a kvarckavicsból 4/8 frakciót választottam a próbatest kis mérete miatt. Ezek fő jellemzői a 3.6. táblázatban láthatók.

	szemcse-testsűrűség [kg/m ³]	halmaz-önszilárdság (MSZ EN 13055 szerint, a kavicshoz képest) [%]	max. vízfelvétel [m %]	max. vízfelvétel [V %]
kvarckavics	2640	100	0	0
habkavics „F4”	1614	31	1,9	3,0
habkavics „20”	635	4	4,5	2,9
duzz. agyag „L4”	830	16	36,4	30,2
téglazúzalék	1633	9	15,4	23,6

3.6. táblázat A zsugorodás vizsgálatához alkalmazott adalékanyagok jellemzői

A rendelkezésemre álló többféle, lényegesen eltérő tulajdonságú habüveg termék közül két, szerkezeti beton készítéséhez alkalmasat választottam ki: egy nagyobb („F4” jelű) és egy kisebb („20” jelű) szilárdságút, amelyek látszólagos porozitás közel azonos. Ezeket hasonlítottam össze kvarckavics adalékanyagos és téglazúzalék adalékanyagos betonokkal.

3.3.2.3. Az adalékanyag adagolás mértékének hatása a zsugorodásra

Ezt követően a második sorozatban megvizsgáltam, hogy a könnyű adalékanyag („F” jelű) mennyiségének változtatása milyen hatással van a zsugorodásra. Itt már „kisebb” cementadagolást (638 kg/m³) választottam a 3.2.3. fejezet szerinti 2. jelű keveréket (3.4. táblázat). Az adalékanyagot 0 %, 20 V % és 47 V %-ban adagoltam.

3.3.2.4. A habarcs összetételének hatása a zsugorodásra

A kísérletsorozat harmadik szakaszában az „F” jelű habüveget 47 V %-ban adagolva vizsgáltam különböző összetételű habarcsokban. Mindhárom habarcsösszetétellel (3.4. táblázat) vizsgáltam és összehasonlítottam a habüveges könnyűbetonokat az etalon habarcsok viselkedésével.

3.3.3. A hőtágulási együttható vizsgálata

A vasbeton „létezésének” egyik feltétele a beton és az acél közel azonos hőtágulási együtthatója. Ha megváltoztatjuk az adalékanyag fajtáját (kvarc, mészkő, gránit, kohósalak, téglá, tufa stb.) akkor ez természetesen hatással van az így kapott beton hőtágulási együtthatójára. Megvizsgáltam, hogy a különböző habüvegek adalékanyagként való alkalmazása hogyan befolyásolja a hőtágulási együtthatót. Épületszerkezeti szempontból a kisebb hőtágulási együttható az előnyösebb.

A hőtágulást a zsugorodás méréshez használt (legalább féléves) próbatesteken végeztem, a zsugorodás teljesnek tekinthető lejátszódása után, mert ehhez a vizsgálathoz is célszerű karcsú, lehetőség szerint hosszú próbatesteket használni. A hőtágulási együttható meghatározása céljából -20 , 0 , $+5$, $+25$ és $+95$ °C tervezett hőmérsékleten mértem a mérőcsúcsok távolságát a 3.8. ábra szerinti Demec típusú derforméterrel. Vizsgáltam a különböző adalékanyagokat és egy habüveg adalékanyag esetén az adagolás mennyiségének hatását is.

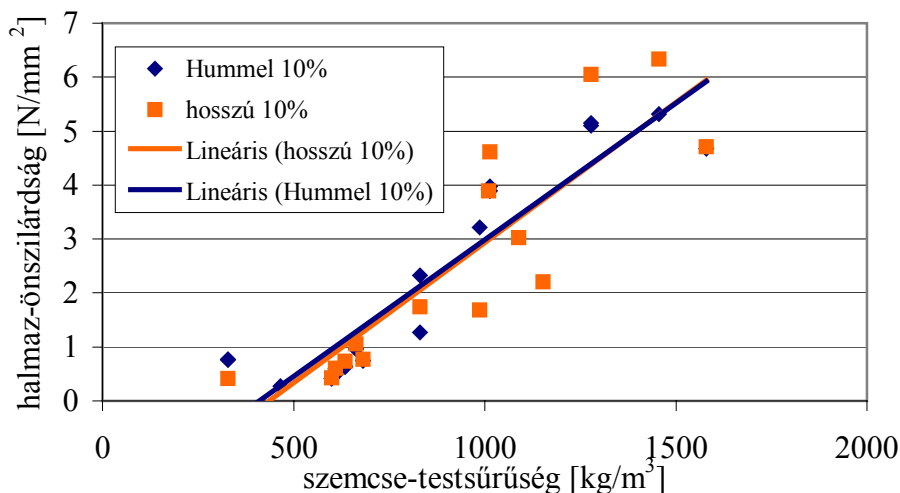
4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

4.1. Adalékanyag vizsgálatok

4.1.1. Adalékanyag szilárdsága

4.1.1.1. Halmaz-önszilárdság

Először a halmaz-önszilárdság vizsgálatnál használt két különböző méretű mozsárral mért eredményeket hasonlítottam össze. A 17 különböző könnyű adalékanyag mintán (habüvegen és duzzasztott agyagkavicson) elvégzett vizsgálat azt mutatta, hogy a mérőeszközökben lévő 15 %-os átmérőkülönbség nincs hatással az eredményre. A szemcse-testsűrűség és a halmaz-önszilárdság összefüggése (4.1. ábra) mindkét esetben azonosra adódott, a közelítő görbétől való eltérésben sem tapasztalható lényeges különbség.



4.1. ábra A halmaz-önszilárdság vizsgálat (3.1.1.1. szerinti) eredményei habüveg és duzzasztott agyagkavics adalékanyagokra két különböző mozsárméret esetén

Etalonként a kvarckavics adalékanyagokat különböző (4/8, 8/16 és 16/32) frakciókban vizsgáltam, amelyek megegyezetek a vizsgált könnyű adalékanyagok frakcióméreteivel.

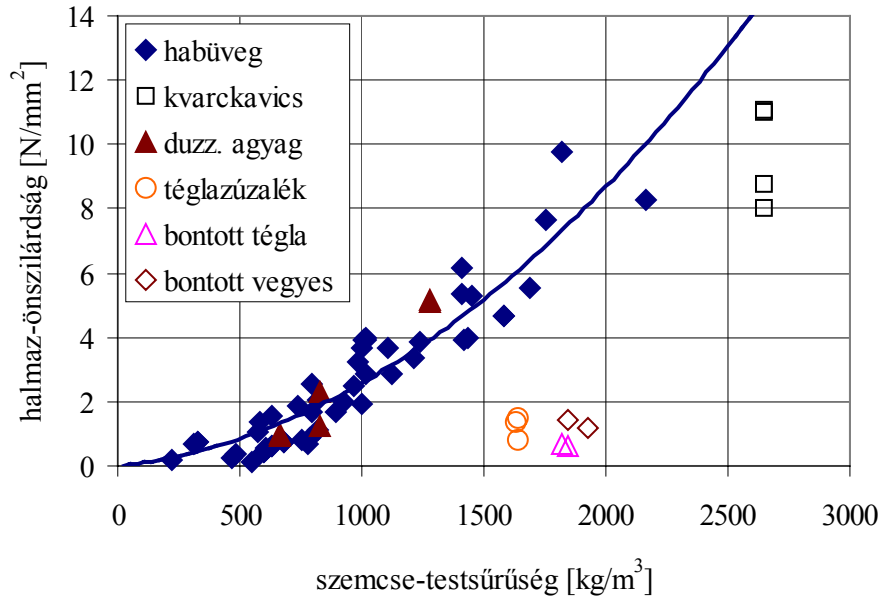
A szemcse-testsűrűség és a halmaz-önszilárdság összefüggése habüveg adalékanyag esetén legjobban egy másodfokú parabolával jellemezhető (4.2. ábra), amely az alábbi (4.1) képlettel írható le:

$$C = 1,75 \cdot \rho_T^2 + 0,84 \cdot \rho_T \quad (4.1)$$

ahol: C a halmaz-önszilárdság (3.1.1.1. szerint meghatározva) N/mm²-ben
 ρ_T az adalékanyag szemcse-testsűrűsége kg/l-ben

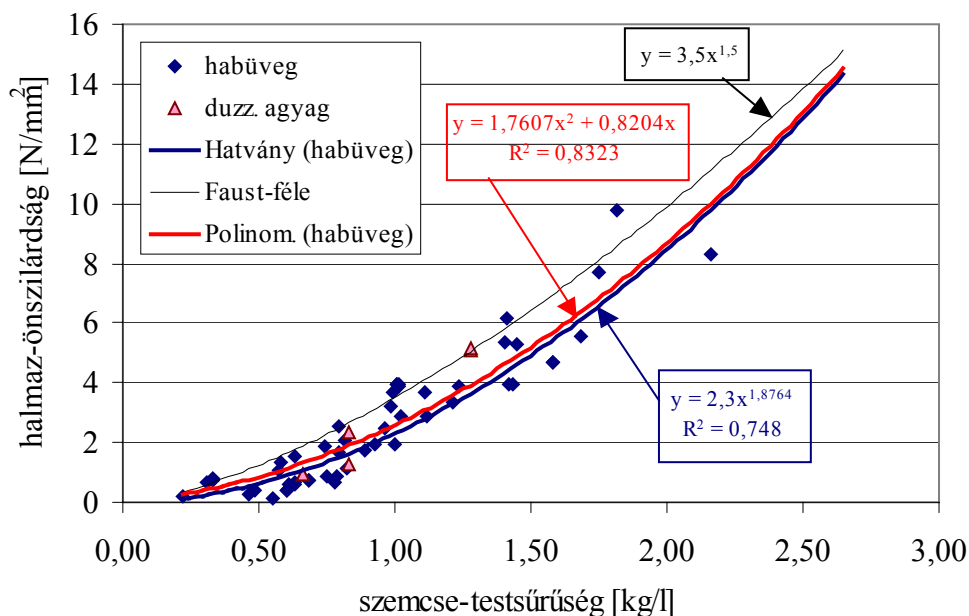
A 4.2. ábrán megfigyelhető, hogy a duzzasztott agyagkavicson mért eredmények is jól illeszkednek a habüvegre fektetett görbére. Megállapítható továbbá, hogy a téglazúzaléokra illetve a bontott építési törmelésekre ez a görbe nem érvényes, itt a testsűrűség és az

önszilárdság aránya lényegesen kedvezőtlenebb. Mivel ezek a termékek csak adott, szűk testsűrűség tartományban fordulnak elő (1600-1900 kg/m³), nem célszerű ezeket függvényekkel jellemezni, diszkrét értékek is megfelelnek.



4.2. ábra Adalékanyagok halmaz-önszilárdságának és testsűrűségének összefüggése 1.

Az exponenciális és a másodfokú polinommal történő közelítés gyakorlatilag azonos eredményt ad. A Faust-féle általános könnyű adalékanyagokra vonatkozó görbével (2.1.2. fejezet, 2.2. ábra [Faust, 2000]) összehasonlítva látható, hogy a habüveg adalékanyagokra illesztett exponenciális görbe a Faust-féle görbe alatt fut (4.3. ábra).



4.3. ábra Adalékanyagok halmaz-önszilárdságának és testsűrűségének összefüggése 2.

Ha a habüveg adalékanyagokat két csoportba soroljuk:

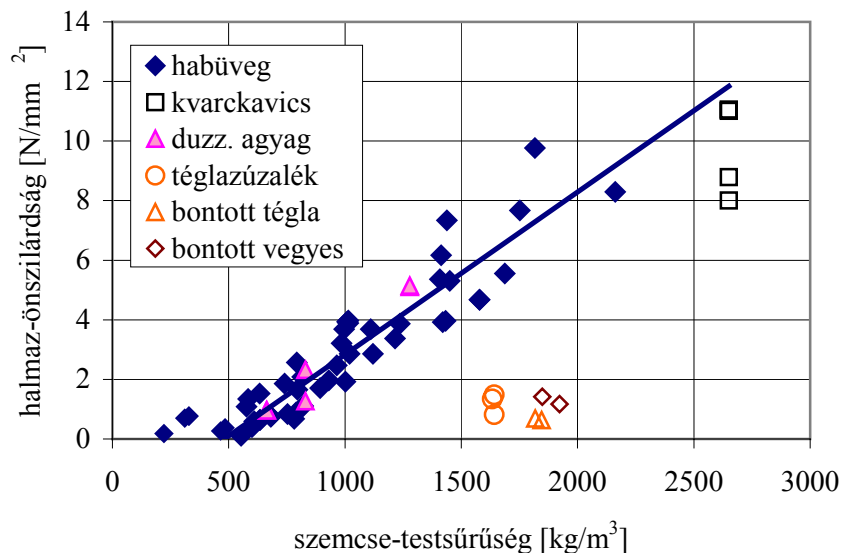
- 500 kg/m^3 alattiak – szerkezeti beton szempontjából kis jelentőségűek,
- $500\text{-}2200 \text{ kg/m}^3$ közöttiek – szerkezeti beton szempontjából jelentősek,

akkor az $500\text{-}2200 \text{ kg/m}^3$ közötti szemcse-testsűrűségű habüveg adalékanyagok esetén a szemcse-testsűrűség és a halmaz-önszilárdság összefüggése gyakorlatilag egyenesen közelíthető (4.4. ábra, 4.2. képlet), amelynek előnye, hogy az így felvett egyenesre a kvarckavics is illeszkedik, így ennek százalékában is megadható a habüveg halmaz-önszilárdsága.

$$C = 5,33 \cdot \rho_T - 2,54 \quad (4.2)$$

ahol: C a halmaz-önszilárdság (3.1.1.1. szerint meghatározva) N/mm^2 -ben
 ρ_T az adalékanyag szemcse-testsűrűsége kg/l -ben

Ha 500 kg/m^3 -nél kisebb testsűrűségű adalékanyagok esetére az összefüggés nem igaz, ezek alkalmazásakor, az adalékanyag szilárdságának elhanyagolása javasolható a korábbi tervezési módszereknek megfelelően, mivel ez nem okoz lényeges eltérést, és az adalékanyag szilárdságának elhanyagolása a biztonság javára történik. A többi esetben célszerű az adalékanyag szilárdságát figyelembe venni, mivel a habüveg adalékanyagok szilárdsága elérheti a kvarckavics ill. kvarchomok szilárdságának akár 70 %-át.



4.4. ábra Adalékanyagok halmaz-önszilárdságának és testsűrűségének összefüggése 3.

Más könnyű adalékanyagokkal való összehasonlítás során megállapítható, hogy a duzzasztott agyagkavics mérési eredményei jól illeszkednek az 500 kg/m^3 -nél nagyobb szemcse-testsűrűségű habüveg adalékanyagok esetén meghatározott egyenesre. Az

agyagkavicshoz tartozó tipikus alkalmazási területeken tehát a sokkal inkább környezetbarát habüveg hasonlóan jól alkalmazható.

4.1.1.2. Adalékanyag szilárdság műgyanta és szilikon próbatesteken vizsgálva

Vizsgálataim szerint mind a műgyantás, mind a szilikonos mérés csak ott használható eredményesen, ahol az adalékanyagnak kicsi a felületi porozitása, különben az adalékanyagot átítatva megváltoztatja annak tulajdonságát. A műgyanta és a szilikon sokkal kevésbé viszkózus a cementpépnél, így ez nagy eltérést ad.

A műgyanta kockában mért eredmények azt mutatják, hogy ha az adalékanyag zárt pórusú, akkor azonosan viselkedik, mint cementpépben (betonban), viszont ha porózus az adalékanyag felülete, akkor a fent említett kis viszkozitás miatt a műgyanta térfogataránya nő és ezzel a próbatest szilárdsága is. A műgyantában mért értékek kis testsűrűségű nyitott pórusú habüveg, agyagkavics és téglazúzalék esetén sokkal magasabbak a könnyűbetonban elérhető értéknél. (4.1. táblázat)

A szilikon alkalmazása kiegyenlítette az adalékanyagok közti különbségeket, így ez sem alkalmasabb más módszereknél az adalékanyag önszilárdságának jellemzésére. (4.1. táblázat)

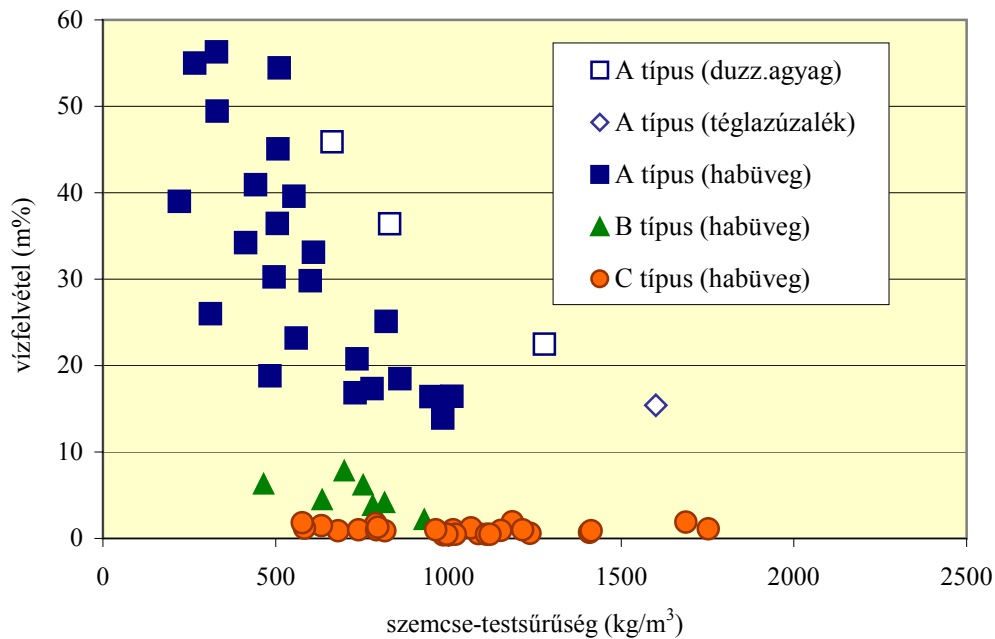
adalék- anyag	nyomószilárdság [N/mm ²]					nyomószilárdság a kvarckavicshoz viszonyítva				
	mozsár- ban	S1 szilikon- ban	S2 szilikon- ban	műgyan- tában	beton- ban	mozsár- ban	S1 szilikon- ban	S2 szilikon- ban	műgyan- tában	beton- ban
kvarc- kavics	11,1	0,9	1,6	52,5	53,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
habüveg (F4)	4,7	0,6	1,4	49,5	50,1	0,4	0,6	0,9	0,9	0,9
habüveg (P4/8)	0,8	0,8	1,0	28,4	14,4	0,1	0,9	0,7	0,5	0,3
d. agyag (L4)	1,8	1,0	1,2	44,3	9,7	0,2	1,1	0,7	0,8	0,2
téglazú- zalék	1,3	0,8	1,1	53,0	46,6	0,1	0,9	0,7	1,0	0,9
etalon	--	--	--	61,5	63,7	--	--	--	1,2	1,2

4.1. táblázat A különböző adalékanyag szilárdság vizsgálatok összehasonlítása egymással és a betonnal

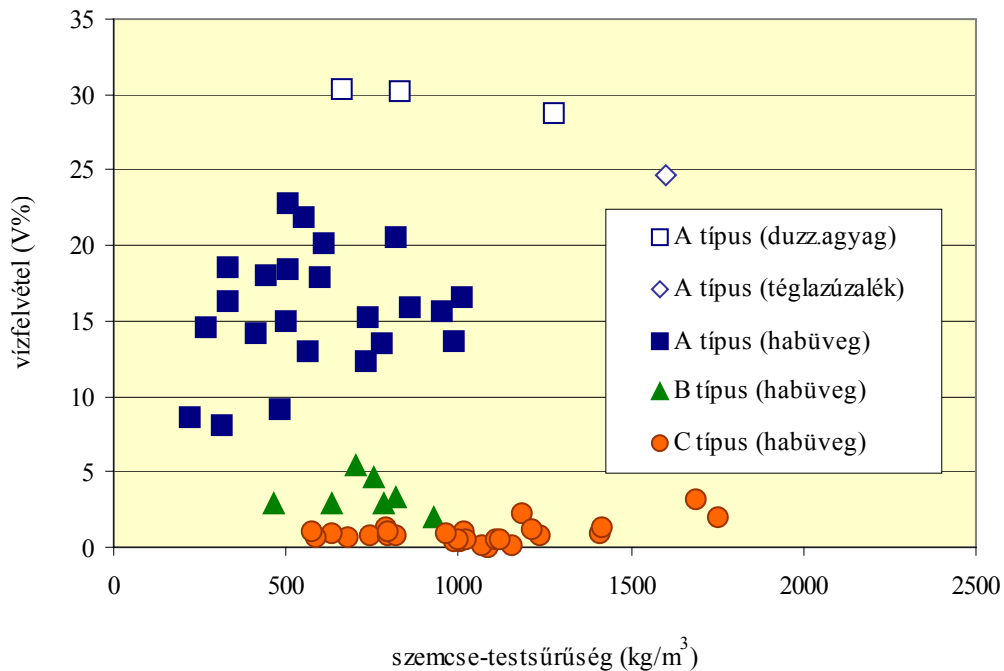
4.1.2. Adalékanyag vízfelvétele

A könnyű adalékanyagoknak rendszerint nagy a vízfelvevő képességük, amit nagy porozitásuk okoz. Ebből következik, hogy a testűrűségük csökkenésével – ami a porozitás

növelésével érhető el – azonos alapanyag esetén a vízfelvétel nő. Ez a hagyományos nyitott pórusú, általam „A-típusúnak” jelölt adalékanyagfajta (4.5. ábra).



4.4. ábra Adalékanyagok vízfelvételeinek (m%) és testsűrűségének összefüggése különböző típusok és anyagok esetén 1.

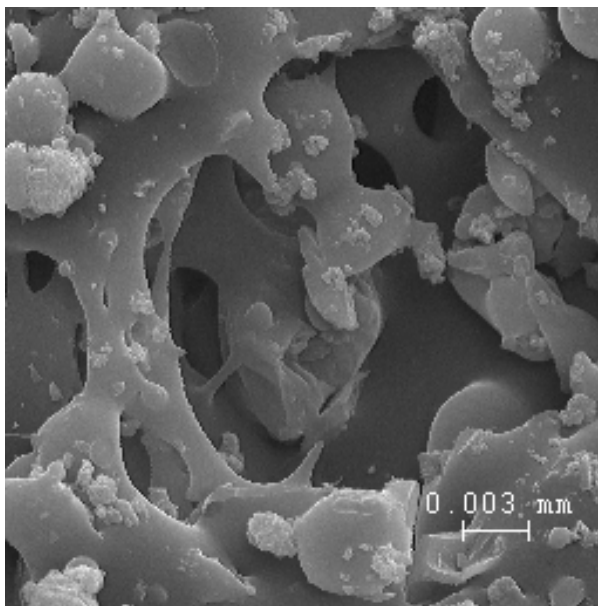


4.5. ábra Adalékanyagok vízfelvételeinek (V%) és testsűrűségének összefüggése különböző típusok és anyagok esetén 2.

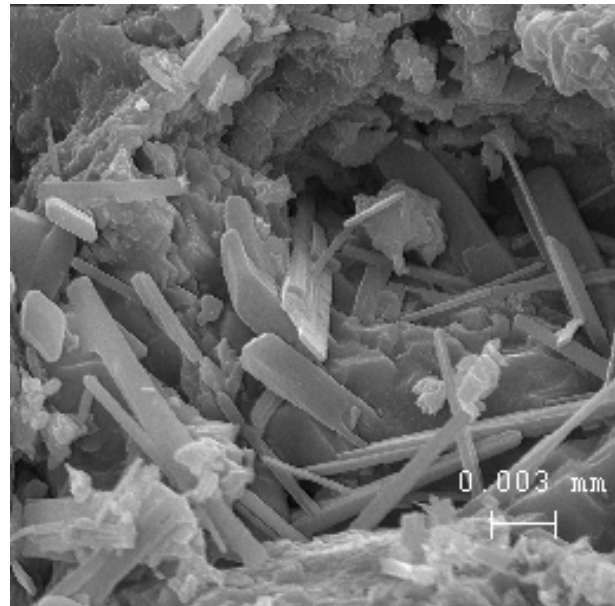
Ez a nagy vízfelvétel, amely elérheti az 50 m%-ot, is technológiai szempontból többnyire kedvezőtlen (például a szivattyúzhatóságot gátolja), bár belső utókezelő hatása miatt előnyös is lehet. Ez ellen agyagkavicsok esetén szokásos védekezési mód az adalékanyag szemcsék

híg cementpéppel való előzetes bevonása. Ez azonban külön technológiai lépést jelent, ami idő- és költségigényes. A habüveg adalékanyagok esetében ez a bevonási folyamat a gyártás során is elvégezhető. Így érhető el a „B-típus”, ahol a testsűrűség és a vízfelvevő képesség fordított arányossága valamint lineáris kapcsolata megmarad, de a maximális vízfelvétel korlátozható. Így a legnagyobb érték méréseim szerint 10 m% alatt marad. A felületi bevonattal akár függetleníthető is a vízfelvétel a testsűrűségtől, ez a „C-típus” (4.2. táblázat). Itt a nyomás alatti vízfelvétel is minimális, tehát a beton szivattyúba való besülésére nem kell számítani.

A duzzasztott agyagkavics és a habüveg közötti azonos szemcse-testsűrűséghez tartozó nagy vízfelvétel különbséget a felületi szerkezetükben való eltérés indokolja. Míg a habüveg szemcsék felületén többnyire félgömb alakú, jórészt zárt pórusok találhatók (4.6. ábra), addig az agyagkavics felülete szálkás (4.7. ábra), és ez csatornaszerűen a szemcse belsejébe vezeti a vizet.



4.6. ábra Egy habüveg szemcse felületének elektronmikroszkópos képe



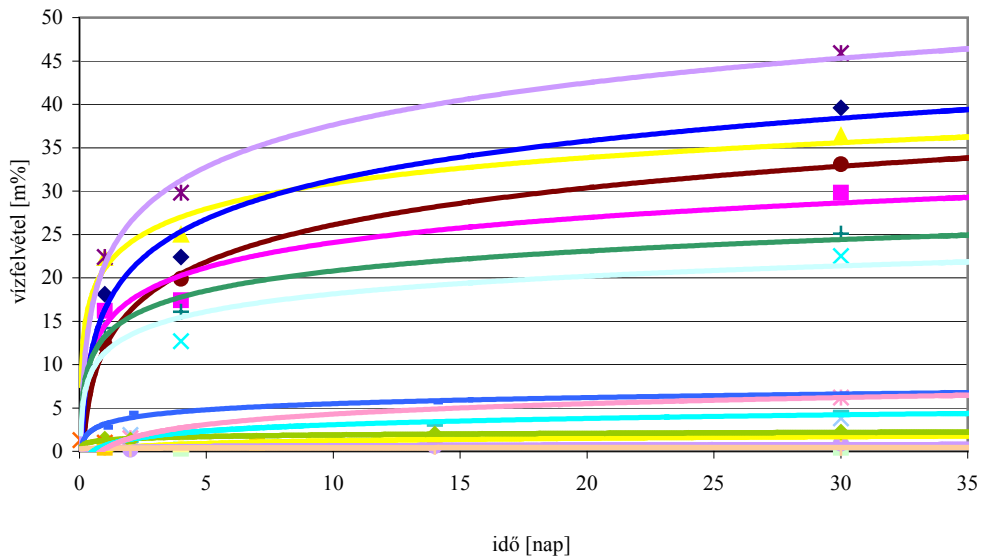
4.7. ábra Egy duzzasztott agyagkavics szemcse felületének elektronmikroszkópos képe

	vízfelvétel		ρ_T [kg/m ³] (habüveg esetén)	ρ_T [kg/m ³] (általában könnyű adalékanyagok esetén)	ρ_T [kg/m ³] (általában normál testsűrűségű adalékanyag esetén)
	m%	V%			
A-típus	10-60	8-30	200-1000	200-1800	
B-típus	2-10	2-5	450-1200		2000-2600
C-típus	< 2	< 3	500-2000		2600-3000

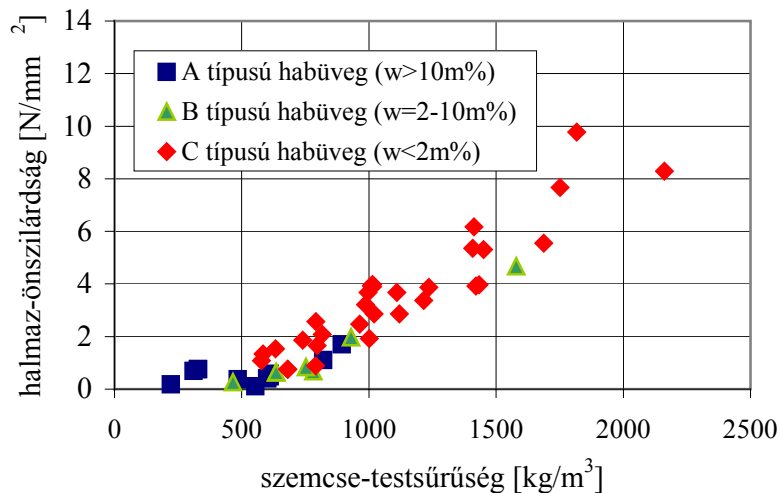
4.2. táblázat A különböző adalékanyagok testsűrűség-tartományai a vízfelvétel függvényében

A vízfelvétel kezdetben gyors, és minél porózusabb az adalékanyag, annál nagyobb a különbség a technológiai szempontból fontos néhány órás és a maximális vízfelvétel között (4.8. ábra).

Ha a vízfeltevő képességet nézve vizsgáljuk a habüveg adalékanyagok halmaz-önszilárdságát a szemcse-testsűrűség függvényében (4.9. ábra), akkor megállapítható, hogy a halmaz-önszilárdság független az adalékanyag vízfeltevő képességétől.



4.8. ábra A vízfelvétel időbeni lejátszódása különböző habüveg adalékanyagok esetén



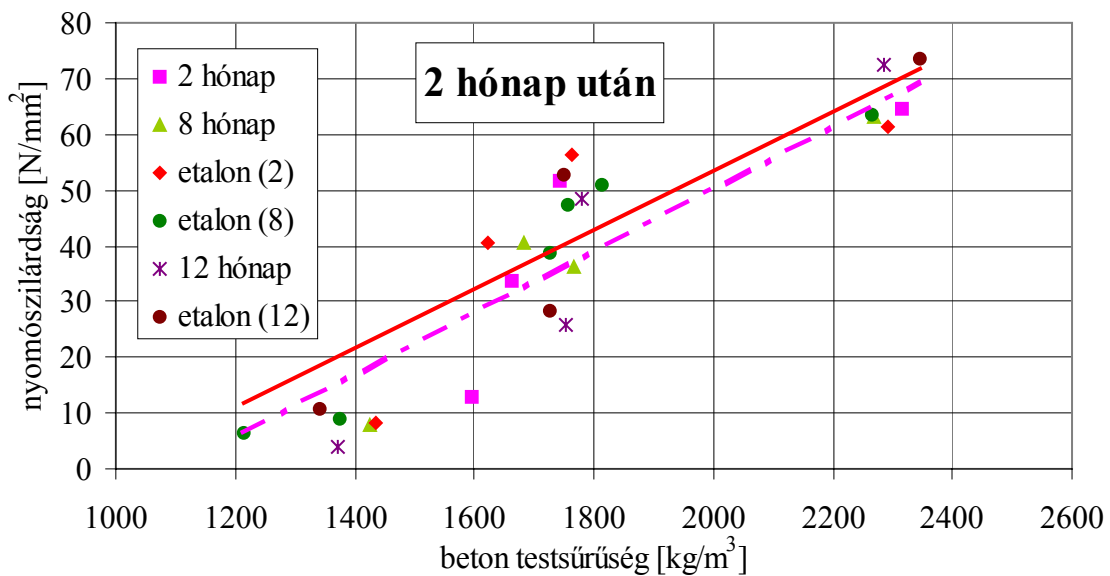
4.9. ábra A halmaz-önszilárdság – szemcse-testsűrűség összefüggése különböző vízfelveteli csoportba tartozó habüveg adalékanyagok esetén

4.1.3. Alkáliállóság

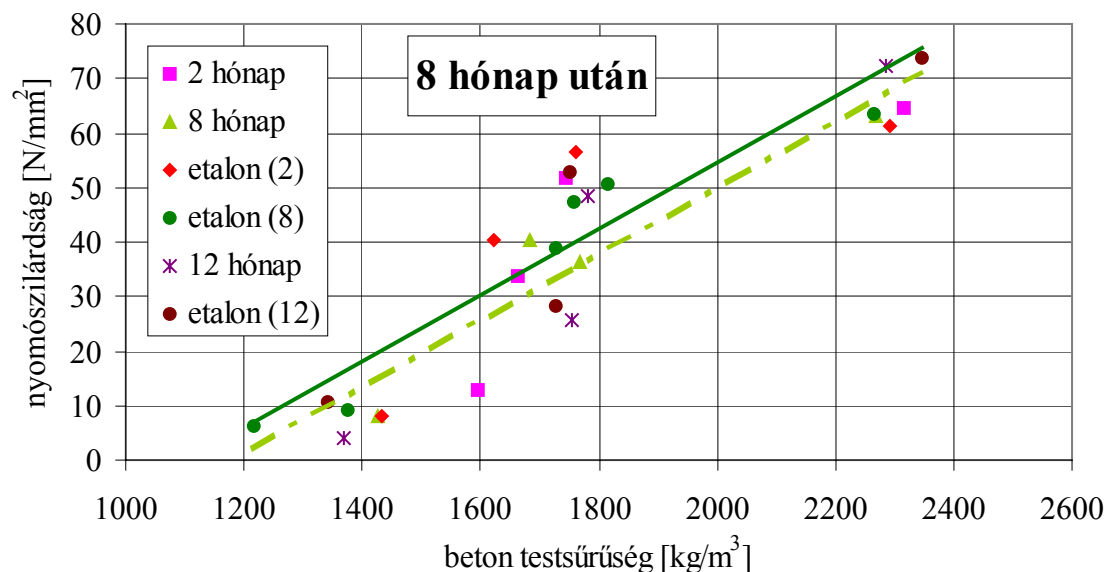
Egyik habüveg adalékanyag szemcse sem deformálódott vagy puhult fel a NaOH oldatban való hőkezelés hatására, ezért a DAfStb 12/86 szerint alkáli-állónak tekinthetők.

Az autoklávos (ASTM) vizsgálat esetén minden próbatest duzzadása 0,8 % alatt maradt, tehát ennek a követelménynek is megfelelt.

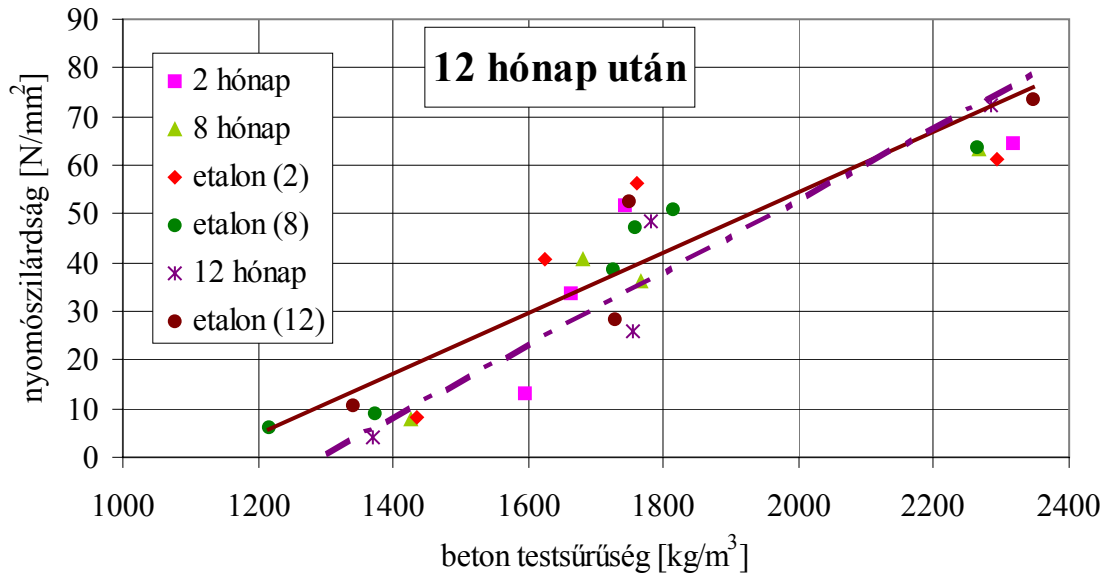
Az üvegszálak alkáliállóság vizsgálatának mintájára végzett kísérlet kimutatta, hogy a habüveg adalékanyagos betonok esetén a 65 °C-os vízben tárolt próbatesteken mért nyomószilárdság az első 8 hónapban 10-15 %-kal kisebbre adódott, mint a hozzá tartozó etalonon, a 2 és 8 hónapos mérés között változást nem tapasztaltam. A bevonat nélküli nyitott pórusos változaton viszont 12 hónap után jelentős szilárdságcsökkenés következett be (4.10-11-12. ábra). A kvarckavicsos gyakorlatilag nem veszített a szilárdságából.



4.10. ábra Különböző habüveg adalékanyagokkal készített könnyűbeton és közönséges beton próbatestek nyomószilárdsága 2 hónapon át tartó 65 °C-on való tárolást követően és az azonos korú végig víz alatt (20 °C-on) tárolt etalon próbatesteken (2. jelű habarcs, 47 % habüveg/kvarckavics tartalom)



4.11. ábra Különböző habüveg adalékanyagokkal készített könnyűbeton és közönséges beton próbatestek nyomószilárdsága 8 hónapon tartó át 65 °C-on való tárolást követően és az azonos korú végig víz alatt (20 °C-on) tárolt etalon próbatesteken (2. jelű habarcs, 47 % habüveg/kvarckavics tartalom)



4.12. ábra Különböző habüveg adalékanyagokkal készített könnyűbeton és közönséges beton próbatetek nyomószilárdsága 12 hónapon át tartó 65 °C-on való tárolást követően és az azonos korú végig víz alatt (20 °C-on) tárolt etalon próbatetekken (2. jelű habarcs, 47 % habüveg/kvarckavics tartalom)

4.2. A könnyűbeton szilárdsága

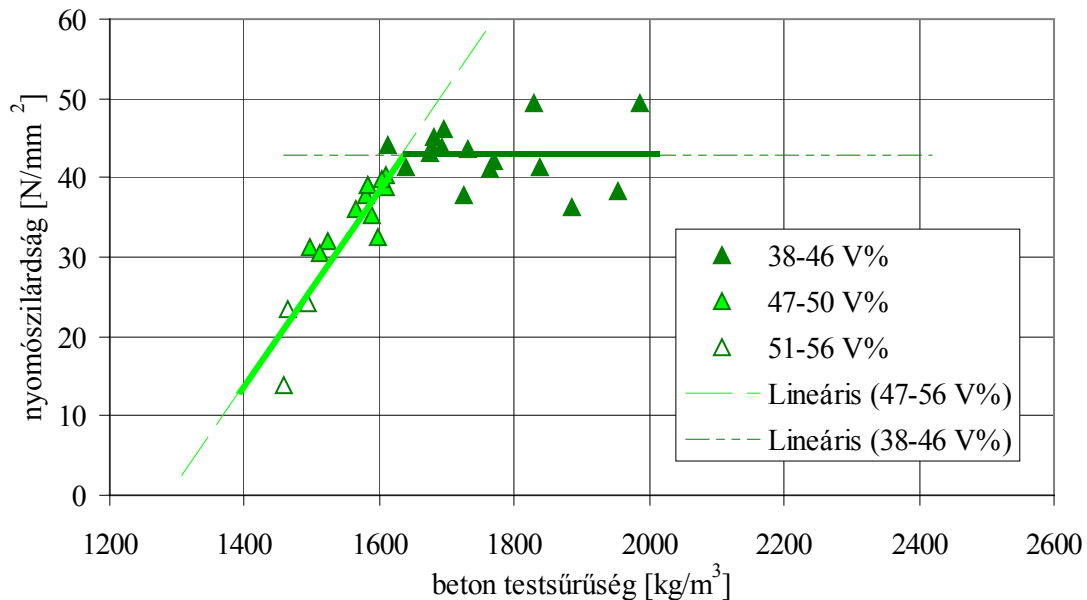
4.2.1. Az adalékanyag mennyiségének hatása

Közönséges betonok esetén az adalékanyag szilárdsága nagyobb, mint a cementkő szilárdsága. Adott összetételű cementpép alkalmazása esetén tehát a legnagyobb betonszilárdságot elméletileg a telített beton adja, a szilárdságot pedig a cementkő szilárdsága korlátozza.

Könnnyű adalékanyagoknál kellő szilárdságú habarcs alkalmazásakor a szilárdságot az adalékanyag szilárdsága korlátozza. A könnyű adalékanyag testsűrűsége kisebb, mint a cementhabarcsé (az MSZ EN 13055-1 szerint kisebb, mint 1200 kg/m³). Ennek következtében a könnyű adalékanyag mennyiségének (térfogatának) növelése csökkenti a beton testsűrűségét, ami kedvező. A könnyű adalékanyag szilárdsága kisebb, mint a hagyományos adalékanyagoké (kavics, zúzottkő), az adalékanyag mennyiségének növelése egyben a beton szilárdságát is csökkenti, ami viszont kedvezőtlen. E két ellentétes hatás optimumának ismerete betontervezési és gazdaságossági szempontból egyaránt fontos.

A vizsgált 24-es jelű habüveg adalékanyag esetén 56 V% volt az alkalmazható legnagyobb adalékanyag mennyiség (amely a hézagosságából és a könnyűbetonra jellemző teherviselési mód (2.5. ábra) létrejöttéhez minimálisan szükséges ~10% túltelítettségéből adódik). Ezzel az adalékanyaggal készítettem próbateteket rendre csökkenő könnyű adalékanyag tartalommal.

A 4.13. ábrán látható, hogy a csökkenő adalékanyag mennyiség hatására kezdetben a szilárdság és a testsűrűség egyaránt nő, az összefüggés lineáris. Viszont a könnyűbeton szilárdságának ily módon (a könnyű adalékanyag mennyiségének csökkentésével) való növelése csak egy, a könnyű adalékanyag önszilárdságával összefüggő értékig igaz.

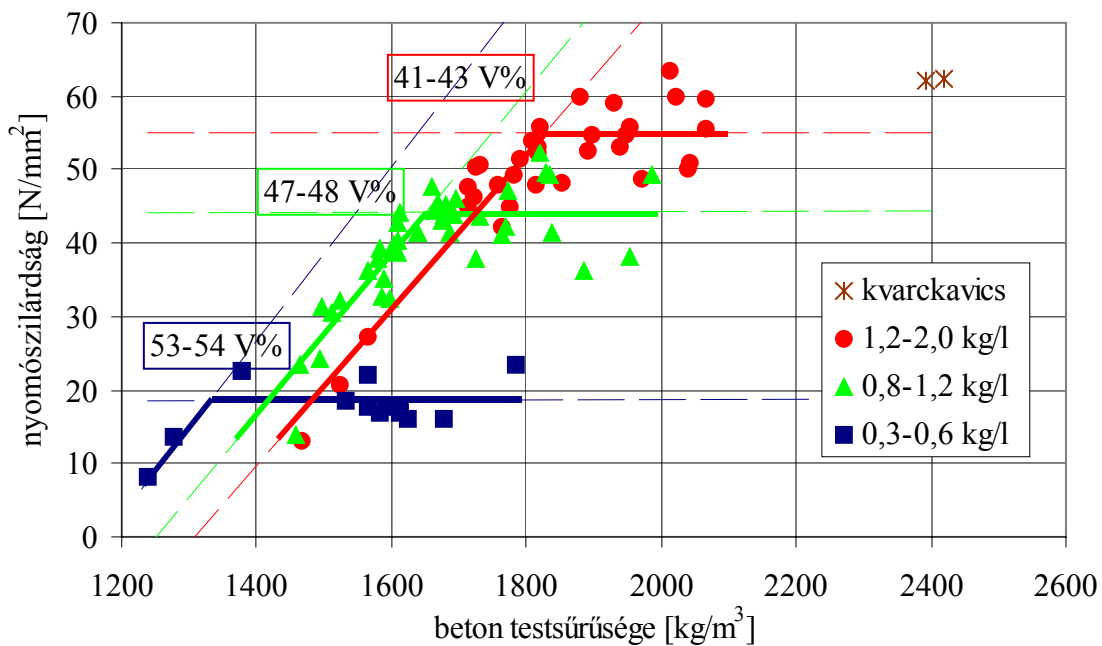


4.13. ábra A nyomószilárdság (150 mm-es kockán, 28 napos korban, egyedi értékkel megadva) és a beton testsűrűség összefüggése a 24-es jelű habüveg adalékanyag különböző adagolása esetén

Ezt követően (ebben az esetben 46 V %) hiába csökkentjük tovább az adalékanyag mennyiségét, a beton testsűrűsége ugyan növekszik, de szilárdságnövekedést nem tapasztalunk. Ebben a tartományban, azaz ahol a (könnyű-adalékanyag tartalom > 46 V %) már kedvezőtlen az adott adalékanyag-fajta alkalmazása ilyen szilárdságú cementhabarcsban. Így meghatározható, hogy egy adott adalékanyag esetén mekkora az az adalékanyag-mennyiség, amellyel optimálisan kihasználható a kérdéses adalékanyag, vagyis elérjük a legnagyobb szilárdságot, és még a legkönnyebb betont tudjuk készíteni. Például a 24-es jelű habüveg adalékanyag alkalmazásakor az optimumhoz kb. 1600-1700 kg/m³ beton testsűrűség és 40-45 N/mm² nyomószilárdság tartozik. A testsűrűség egyszerűen számítható az összetevők százalékos arányából és egyedi testsűrűségükből, tehát a meghatározott optimális testsűrűség alapján visszszámolható az ehhez tartozó adalékanyag mennyiség térfogata, majd az adagolása kg/m³-ben.

4.2.2. Az adalékanyag mennyiségének optimalizálása

Különböző testsűrűségű habüvegeket és duzzasztott agyagkavicsokat alkalmaztam különböző adagolásban, ugyanabban a habarcsban (1. jelű keverék (3.3. táblázat)). Az adalékanyagokat szemcse-testsűrűségük szerint csoportosítottam és így hasonló eredményt kaptam, mint a korábban vizsgált 24-es jelű adalékanyag esetén. A nyomószilárdság és a beton testsűrűsége egy lineáris és egy konstans szakaszra. Az optimum a két egyenes metszéspontjában található (4.14. ábra).

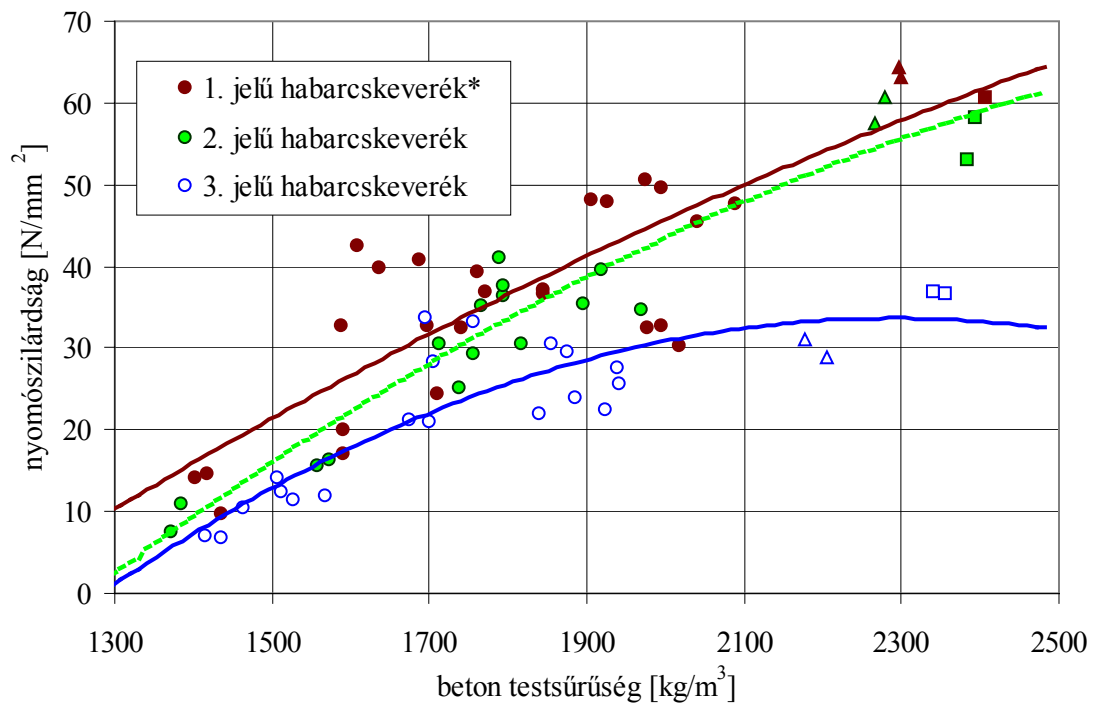


4.14. ábra A nyomószilárdság (150 mm-es kockán, 28 napos korban, egyedi értékkel megadva) és a beton testsűrűség összefüggése különböző könnyű és kvarckavics adalékanyagok esetén

Az adalékanyag testsűrűségének növekedésével csökken az optimális könnyű adalékanyag mennyiség a betonban, jelen esetben 43-54 V% között változik. Nagyszilárdságú habüveg adalékanyagok alkalmazásával (pl. „F4” jelű) elérhető az azonos habarccsal készült kvarckavics adalékanyagos beton szilárdsága is.

4.2.3. A cementkő szilárdságának hatása

A könnyűbeton elérhető szilárdságát a könnyű adalékanyag szilárdsága korlátozza, értékét az adagolás mennyisége alapvetően meghatározza. A könnyűbeton szilárdságának másik összetevője a habarcsváz. Ha a habarcsváz szilárdsága nem elegendő, akkor a habarcsváz jelenti a szilárdsági korlátot (4.15. ábra 3. jelű összetétel).



4.15. ábra A nyomószilárdság (70,7 mm-es kockán, 28 napos korban, egyedi értékkel megadva) és a beton testsűrűség összefüggése különböző habarcsösszetételek esetén, *:4.3 táblázat szerint (□ közönséges beton, Δ etalon habarcs, O könnyűbeton)

	homok/cement tömegaránya	víz/cement tömegaránya	cementtartalom a habarcsban [kg/m ³]	cementtartalom a betonban (47 V% könnyű-adalékanyag tartalom esetén) [kg/m ³]
1. jelű összetétel	1,25	0,35	868	460
2. jelű összetétel	2,0	0,43	638	338
3. jelű összetétel	3,0	0,55	494	262

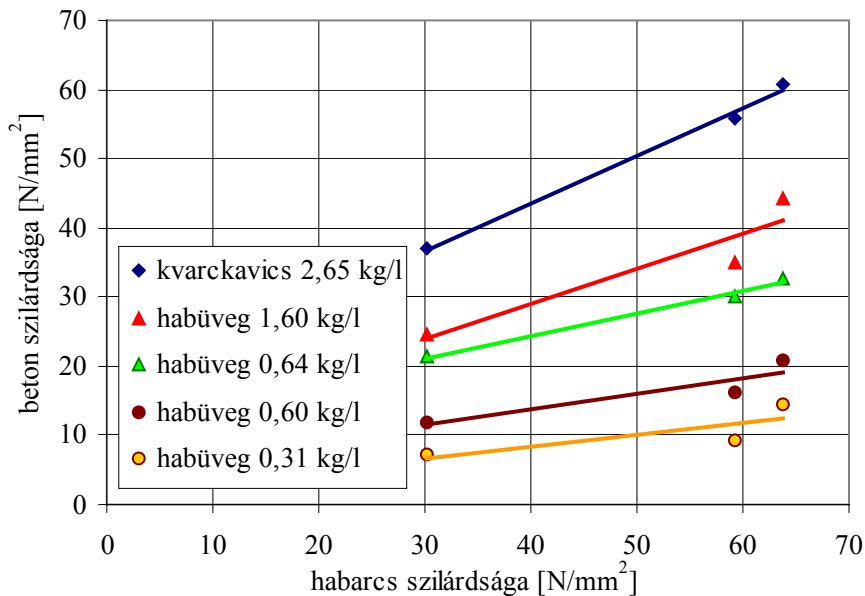
4.3. táblázat A három alkalmazott habarcsösszetétel

Ha a habarcs nyomószilárdságát kétszeresére növeljük, akkor azonos térfogat-százalékú adalékanyag tartalom mellett ez a szilárdság arány a különböző adalékanyag típusok esetén nem változik (4.16. ábra és 4.4. táblázat).

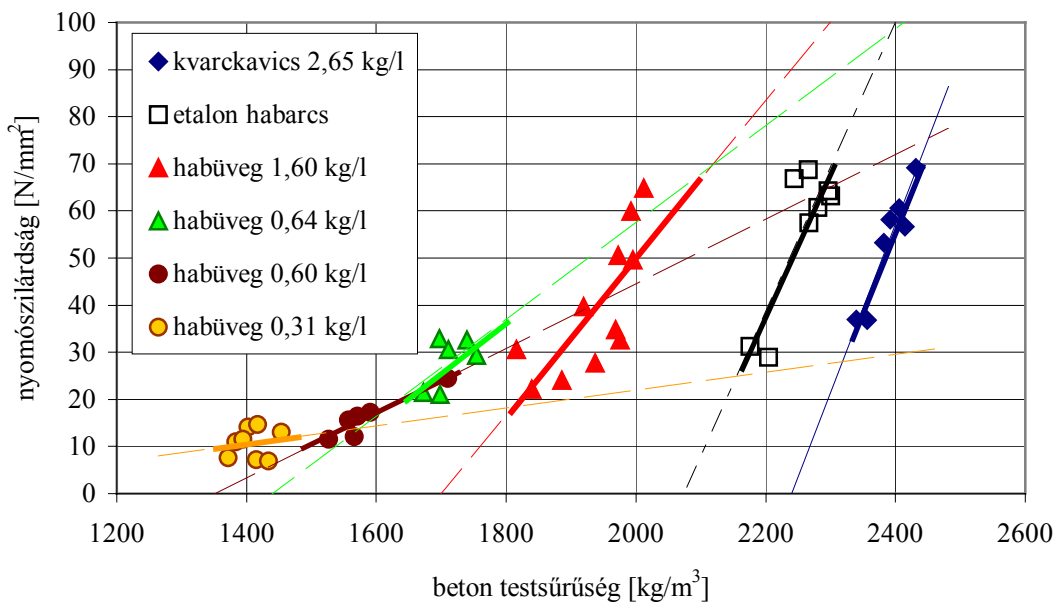
adalékanyagok jele →	habarcs	kavics	F	20	2	P	
beton átlagos testsűrűsége	2250	2400	2000	1700	1590	1400	
adalékanyag testsűrűsége	-	2650	1600	635	600	310	
nyomószilárdság [N/mm ²]	1. jelű	63,8	60,6	44,3	32,8	20,8	14,4
	2. jelű	59,2	55,7	35,0	30	16,1	9,3
	3. jelű	30,1	36,9	24,6	21,3	11,8	7,1

4.4. táblázat A mért nyomószilárdságok átlaga három különböző összetételű habarcs és különböző könnyű és kvarckavics adalékanyagok azonos adagolása mellett

Tehát minél nagyobb testsűrűségű és ennek következtében szilárdságú az adalékanyag, annál fontosabb a cementkő szilárdsága a beton szilárdsága szempontjából. Különböző habarccsal, de azonos fajtájú és mennyiségű adalékanyaggal készített próbatestek szilárdságát ábrázolva a beton testsűrűség függvényében, és adalékanyag fajtánként egy-egy egyenest fektetve rá; megfigyelhető, hogy a nagyobb szilárdságú adalékanyag felé haladva az egyenes meredeksége növekszik (4.17. ábra).

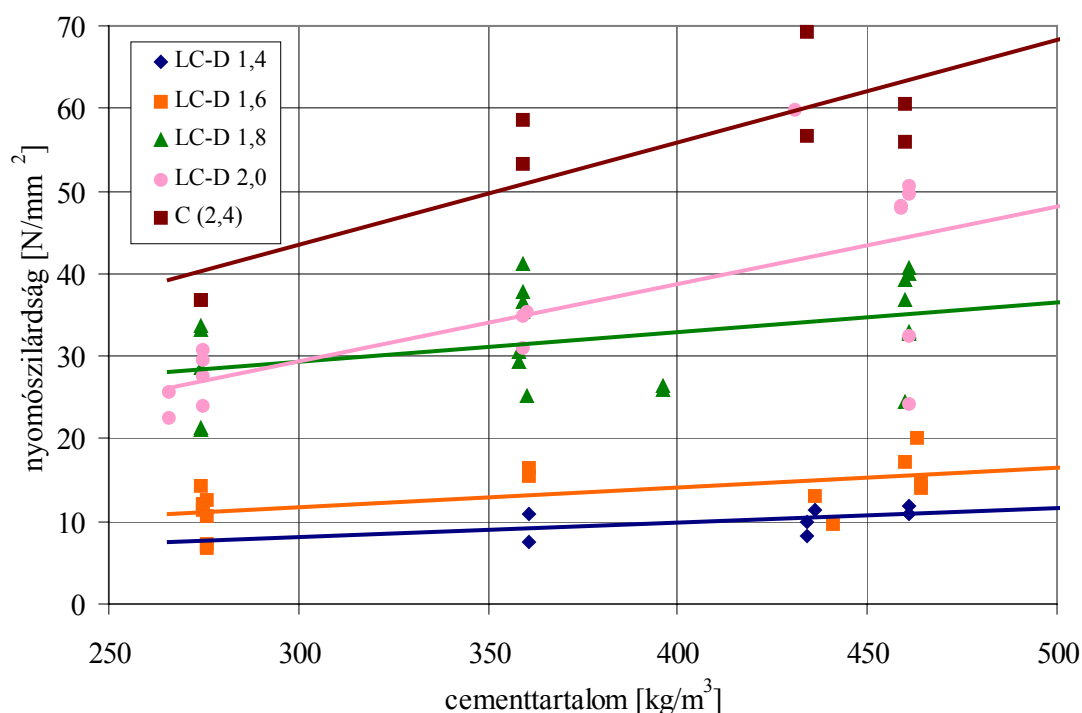


4.16. ábra A beton szilárdsága a habarcs szilárdságának függvényében különböző testsűrűségű habüveg adalékanyagos és kvarckavics-betonok esetén (47 V% adalékanyag tartalom mellett, 70,7 mm-es kockán, 28 napos korban, átlagértékkel számolva)



4.17. ábra A beton szilárdsága a testsűrűségének függvényében különböző szemcse-testsűrűségű habüveg és kvarckavics adalékanyagos betonok esetén (47 V% adalékanyag tartalom, 70,7 mm-es kockán, 28 napos korban, átlagérték)

Azonos etalon habarcs alkalmazása mellett változtattam az adalékanyag mennyiségét, így a beton testsűrűségét is. Azonos testsűrűségi osztályba tartozó könnyűbetonok esetén a beton nyomószilárdsága a cement tartalom növekedésével lineárisan nő (4.18. ábra).

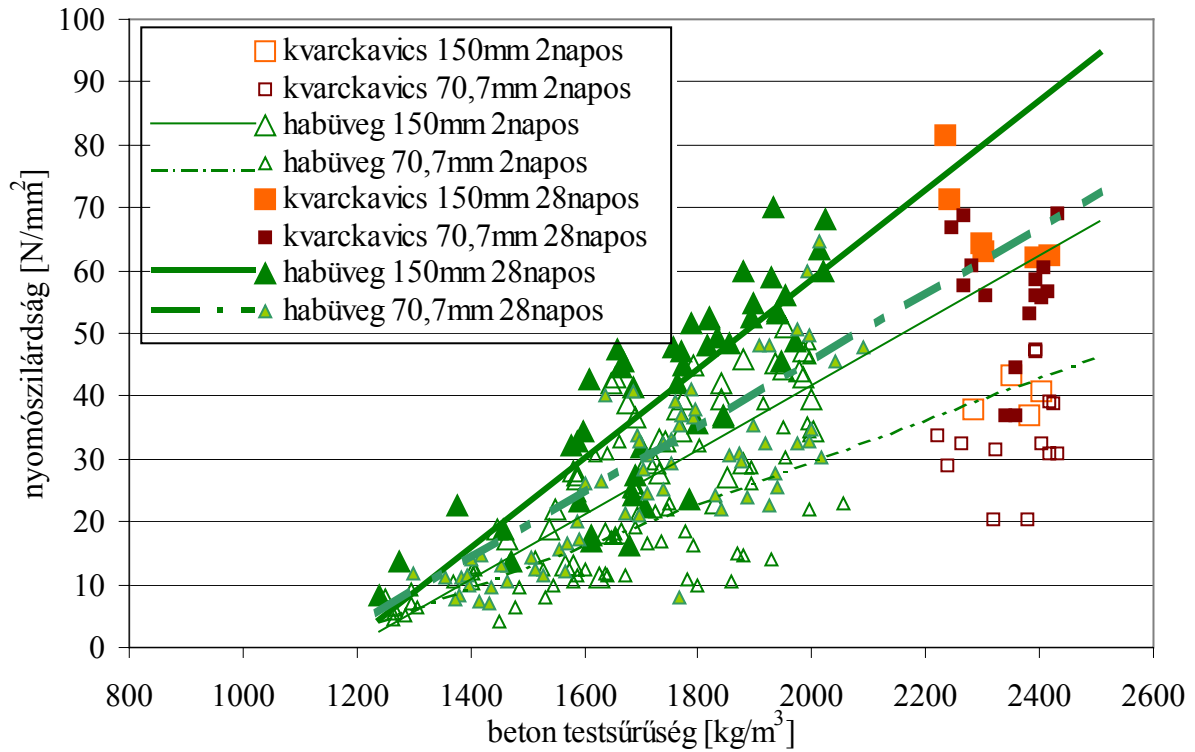


4.18. ábra A nyomószilárdság értéke a cementtartalom függvényében különböző testsűrűségi osztályba tartozó könnyűbetonok és közönséges betonok esetén azonos etalon habarcs (1. jelű) alkalmazása mellett (egyedi értékek)

4.2.4. A próbatest alakjának hatása

A habüveg adalékanyagok jelentős része kisméretű, a maximális szemcseátmérő 12-16 mm. Ez a szemcseméret lehetővé teszi, hogy a vizsgálatokat kisebb próbatesteken végezzük, így anyagot és tárolási helyet takarítva meg. Ha csak egyes tényezők hatását akarjuk összehasonlítani, akkor nem szükségesek hozzá a szabványos méretű próbatestek. A próbatest mérete viszont befolyásolja a mérés során kapott szilárdsági jellemzők értékét. Az egyéb jellemzők vizsgálata mellett gyakran csak kisméretű 70,7 mm élhosszúságú próbakockákat készítettem a nyomószilárdság ellenőrzéséhez. Ezért párhuzamosan végeztem nyomószilárdság vizsgálatokat szabványos 150 mm-es és 70,7 mm-es kockákon is. A vizsgálatok során a 70,7 mm-es kockákon kisebb szilárdságot mértem, mint a 150 mm-eseken. Ez ellentétes a közönséges betonoknál megszokottal (MSZ 4715/4), de kohóhabsalak- és horzsakőbeton esetére hasonló eredményeket mértek (2.4. táblázat). 28 napos korban a habüveg adalékanyagos könnyűbeton szilárdsága 150 mm-es kockán mérve 20 %-kal

nagyobb volt, mint 70,7 mm-es próbatesten mérve (4.19. ábra, különböző típusú vonalak és 4.5. táblázat). A 2 napos korban mért értékek kvarckavics és habüveg adalékanyag esetén nagyjából megegyeztek. Ez a könnyűbeton nagyobb szilárdulási sebességével magyarázható. Az eltérő mérethatás okozta különbségek pontosítása szükség esetén további részletes vizsgálatokat igényel majd, más méretű és készítési módú próbatestekkel is kiegészítve.



4.19. ábra A nyomószilárdság változása a beton testsűrűségének függvényében 70,7 és 150 mm-es élhosszúságú kockákon, 2 és 28 napos korban (egyedi értékek)

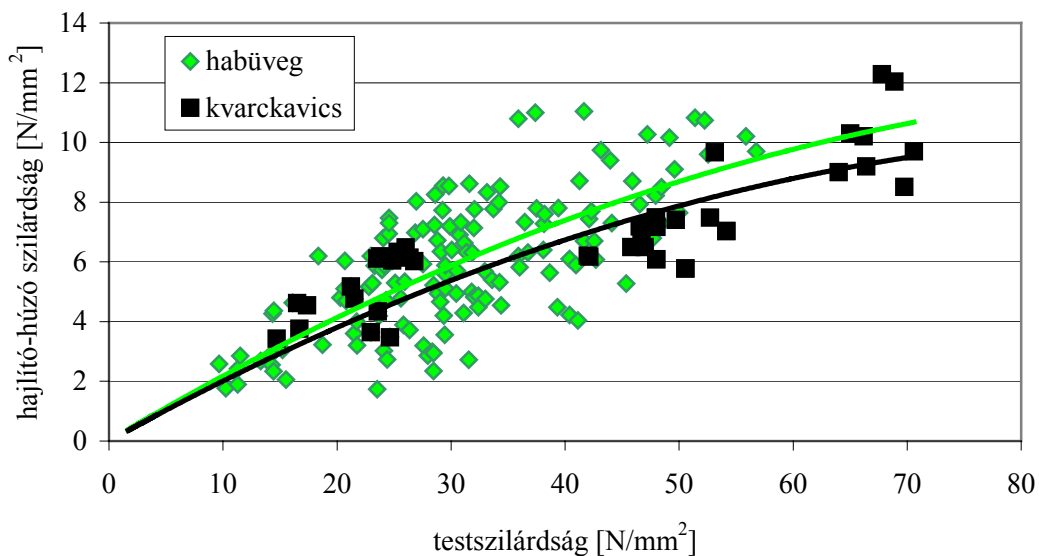
A 70,7 és a 150 mm-es kockaszilárdság aránya	28 napos %	2 napos %
1400 kg/m ³	69	68
1700 kg/m ³	68	67
2000 kg/m ³	72	63
2400 kg/m ³	86	64

4.5. táblázat A 70,7 és a 150 mm-es élhosszúságú kockákon mért nyomószilárdság értékek jellemző aránya különböző beton testsűrűségek esetén

4.2.5. A hajlító-húzó- és a nyomószilárdság aránya

A húzószilárdságot hajlító-húzó vizsgálattal meghatározva nem tapasztaltam, hogy a habüveg adalékanyagok esetén az irodalomban és a szabványokban ajánlott csökkenetű tényező indokolt lenne (4.20. ábra). Pontos húzószilárdsághoz tartozó értékek

meghatározása további vizsgálatokat igényel, ami figyelembe veszi a tiszta húzó-, a hasító- és hajlító-húzó szilárdságok viszonyát illetve az alak és mérethatást.



4.20. ábra A hajlító-húzó és a testszilárdság aránya habüveg adalékanyagú és közönséges betonok esetén (3.4. ábra szerinti vizsgálattal)

4.2.6. Törési kép a szilárdságok függvényében

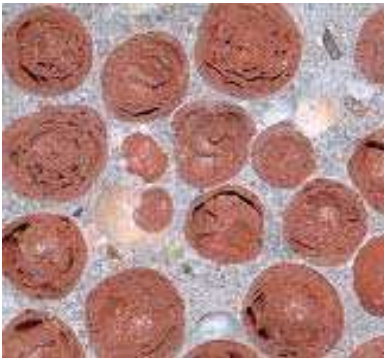
A hajlító vizsgálatok során a törési felületek jelentősen eltértek egymástól. Három jellegzetes törési kép figyelhető meg. Kis szilárdságú habüveg szemcsék alkalmazása esetén a hajlításkor az adalékanyag szemcsék elhasadtak (4.21. ábra). Ha az adalékanyag szilárdsága kellően nagy, az a hajlítás során nem törik el, a tönkremenetel a habüveg szemcsék kifordulásával jön létre (4.23. ábra). Ebben az esetben egyértelműen a cementkő szilárdsága korlátozza a könnyűbeton hajlítószilárdságát. Lehetséges a habarcs és az adalékanyag olyan megválasztása, amikor vegyes tönkremenetel jön létre (4.22. ábra), ilyenkor az adalékanyag szemcse és a habarcs teherbírása hasonló, mind az adalékanyag szemcse, mind a habarcs szilárdsága kihasználható.

A törési kép három fő tényezőtől függ:

- az adalékanyag szemcse hasító-szilárdsága
- az adalékanyag-szemcse felülete → tapadása a habarcsához
- a habarcs szilárdsága

Az adalékanyag szemcse két fent említett tulajdonsága a legtöbb esetben összefügg. A kisebb szemcse-testűrűség elérése, a porozitás növelésével jár és ekkor rendszerint a felületi

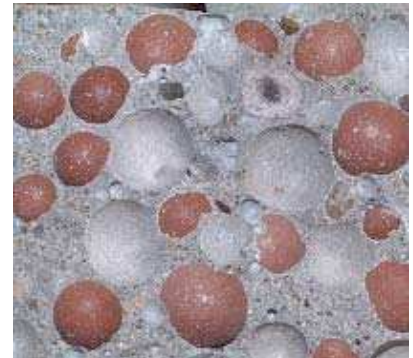
porózusság (érdesség) is nő, amivel nő a tapadás is. A kisebb szemcse-testsűrűséghez viszont kisebb szilárdság is tartozik, tehát ezek részben kiegyenlítik egymást.



4.21. ábra Törött szemcsék a hajlítás után



4.22. ábra Vegyes töréskép

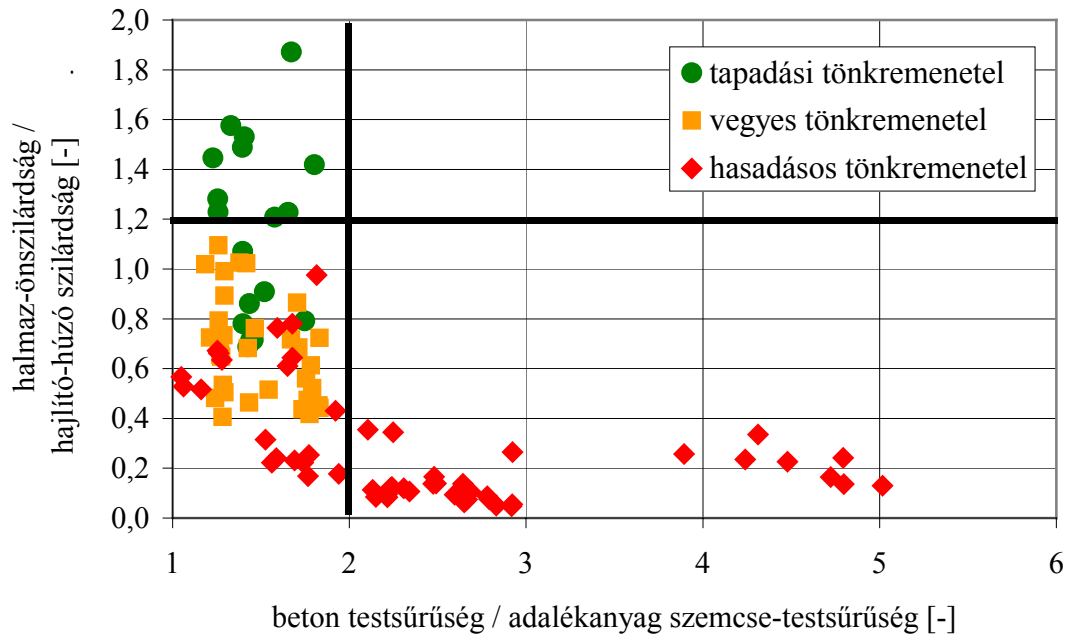


4.23. ábra Egész (kifordult) szemcsék a hajlítás után

A háromféle törési módot ábrázolva a szilárdságok és testsűrűségek arányában a tendencia jól megfigyelhető. Ha a habüveg szemcse halmaz-önszilárdsága (3.1.1. fejezet) legalább 1,2-szerese a könnyűbeton hajlító-húzó szilárdságának, a szemcsék kifordulnak a cementkővázból, tehát a tönkrementelben a habarcs szilárdsága a mértékadó. Ha a könnyűbeton testsűrűsége legalább kétszerese az alkalmazott adalékanyag szemcse-testsűrűségének, akkor a szemcsék a hajlítás során elhasadnak (4.24. ábra).

Nyitott pórusú adalékanyag esetén (A-típus) minden esetben az adalékanyag hasadása következett be testsűrűségtől függetlenül, mivel a pórusokba bejutó cementpép miatt a kötés a cementkő és az adalékanyag szemcsék között rendkívül jó.

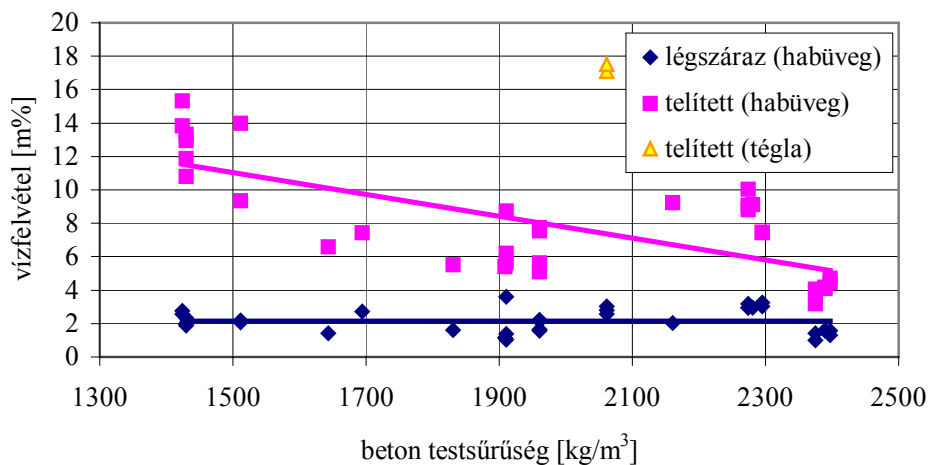
A törésképben általában a szilárdságon kívül fontos szerepet játszik még a szemcsealak is (a zömök szemcsék könnyebben kifordulnak a cementkőből), de ez a habüveg adalékanyagok esetén nem jelent különbséget, mivel a gyártás technológiájából következően (1.3. fejezet) a habüveg szemcsék gömb alakúak. A természetes kvarckavics és téglazúzalék vizsgálatánál is hasonló jelenség figyelhető meg, csak a számszerű értékek térnek el egymástól.



4.24. ábra A töréskép összefüggése a testsűrűségek és szilárdságok arányával habüveg adalékanyagok esetén

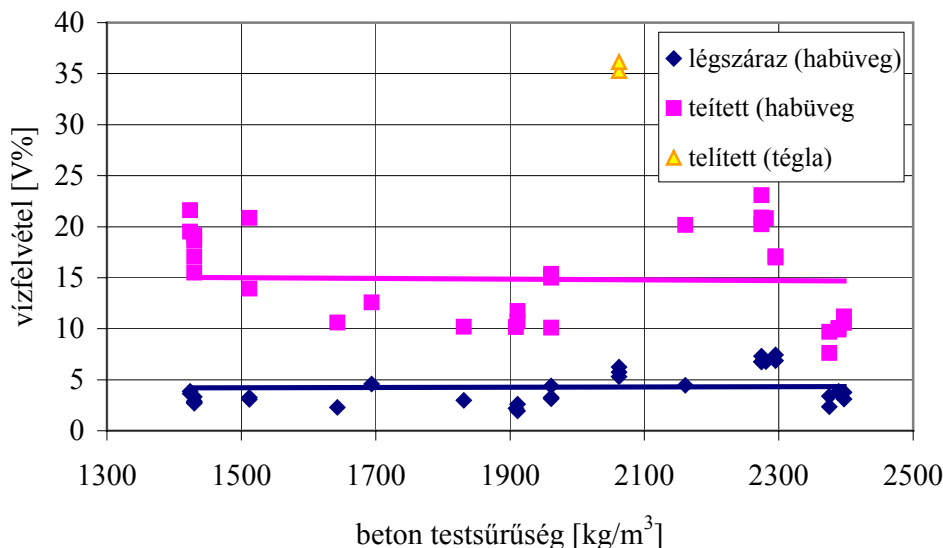
4.2.7. A próbatestek nedvességtartalma

A légszáraz állapotban mért nedvességtartalom azonosnak tekinthető minden vizsgált betonra az adalékanyag típusától és a beton testsűrűségétől függetlenül (4.25-26. ábra). Ha a nedvességtartalmat tömegszázalékban határozzuk meg (4.25. ábra), akkor a telített állapotban a nedvességtartalom a beton testsűrűségének növekedésével csökken, ez lineáris összefüggéssel közelíthető, de a szórás nagyobb, mint a légszáraz állapot esetén. A téglazúzalék adalékanyagos beton nem illeszkedik a többi minta (habüveg, duzzasztott agyagkavics és kvarckavics) által meghatározott egyenesre, vízfelvétele sokkal nagyobb.



4.25. ábra Légszáraz és telítési nedvességtartalom (m%) különböző testsűrűségű és adalékanyagú betonok esetén 1.

A nedvességtartalom értékeket térfogatszázalékban megadva viszont látható, hogy mind a légszáraz, mind a telített állapot közel azonos a testsűrűségtől függetlenül (4.26. ábra) Téglazúzalékot alkalmazva adalékanyagként itt is nagyobb értéket mértem.



4.26. ábra Légszáraz és telítési nedvességtartalom (V%) különböző testsűrűségű és adalékanyagú betonok esetén 2.

4.3. Alakváltozási jellemzők

4.3.1. Rugalmassági modulus

A szabványok lehetővé teszik a rugalmassági modulus nyomószilárdságból való számítását (CEB-FIP MODEL CODE 1990). Könnyűbetonoknál a közönséges betonnál alkalmazott számítással kapott rugalmassági modulus értékét még egy, a testsűrűség alapján – országoként/szabványonként eltérő értékben meghatározott – csökkentő tényezővel kell beszorozni. A könnyűbetonok nyomószilárdsága jelentős mértékben függ a testsűrűségétől, ezért ebből közvetlenül is becsülhető a rugalmassági modulus.

A rugalmassági modulus mért értékeit a 4.28. ábra tömör szimbólummal jelölt értékei mutatják a beton nyomószilárdsága függvényében. Azt a nyomószilárdságot vettem figyelembe az ábrázolás során, amit ugyanazon a próbatesten mértem, mint amin a rugalmassági modulus vizsgálatot végeztem (3.3.1. fejezet).

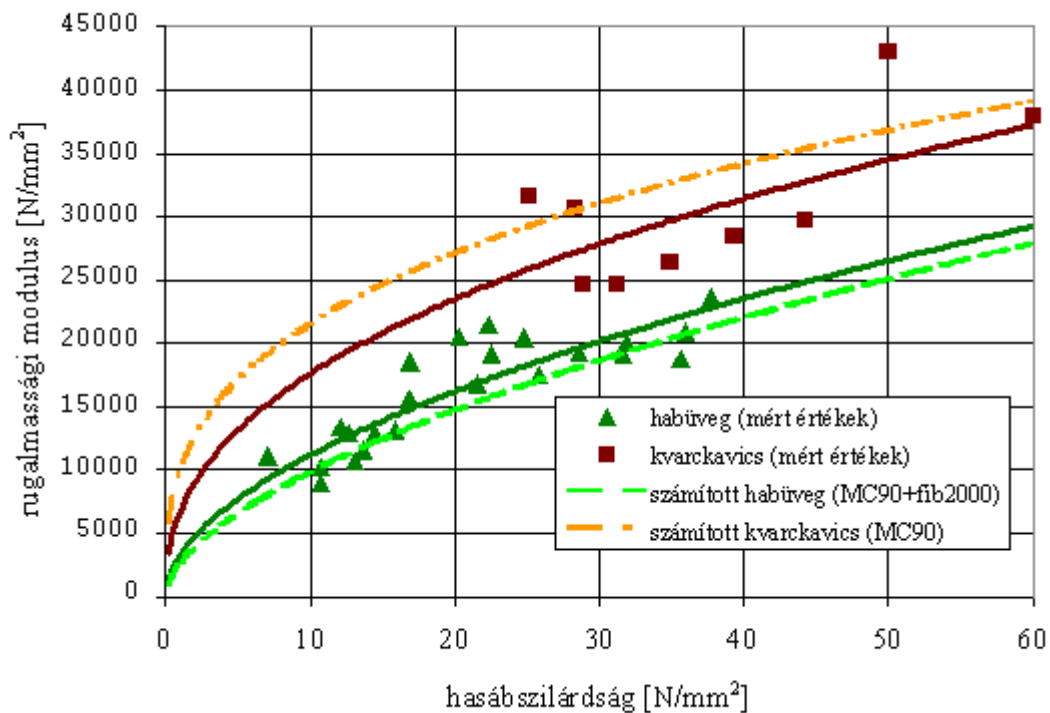
A számított (4.27. ábrán üres szimbólummal jelölt) értékeket a ModelCode 90 alapján határoztam meg, ami a rugalmassági modulus számítását a hengerszilárdság alapján végzi a 4.3. képlet szerint hagyományos betonokra. Ezt a *fib* ajánlása [*fib*, 2000] a 4.4. képlet szerinti testsűrűségtől függő csökkentő tényezővel egészíti ki (2.7. táblázat).

$$E_c = 2,15 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}, \text{ átrendezve: } E_c = 10 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (4.3.)$$

ahol: E_c a beton rugalmassági modulusa N/mm^2 -ben
 f_{cm} a beton hengersizlárságának átlagértéke N/mm^2 -ben

$$\eta = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \quad (4.4.)$$

ahol: η a könnyűbetonra vonatkozó csökkentő tényező
 ρ a beton testsűrűsége kg/m^3 -ben megadva

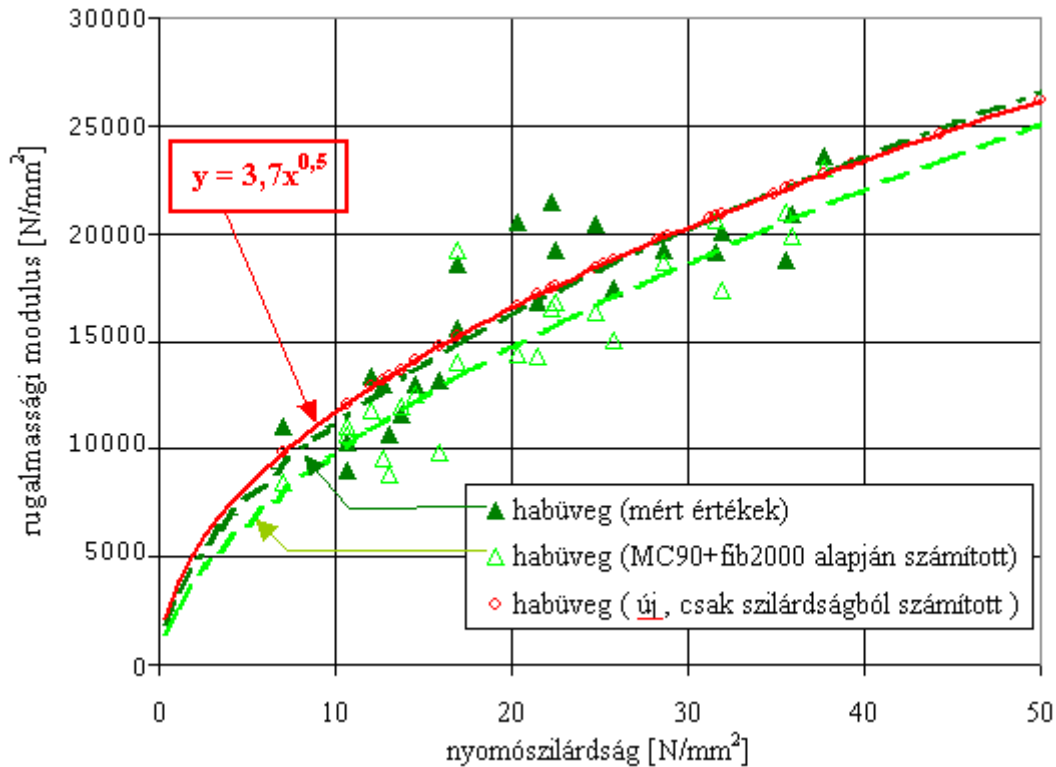


4.27. ábra A rugalmassági modulus a nyomószilárdság függvényében habüveg és kvarckavics adalékanyagok esetén (mért értékek és számított értékekre fektetett görbék)

Kísérleti eredményeim alapján új képletet javaslok a habüveges szerkezeti könnyűbetonok rugalmassági modulusának nyomószilárdságból történő számítására az alábbiak szerint (4.28. ábra):

$$E_m = 3,7 \sqrt{f_{cm}^*} \quad (4.5.)$$

ahol: E_m : a rugalmassági modulus átlagértéke [N/mm^2]
 f_{cm}^* : a 120x120x360 mm-es álló hasábon mért nyomószilárdság átlagértéke [N/mm^2]



4.28. ábra Habüveg adalékanyagú betonok rugalmassági modulusa a nyomószilárdság függvényében (mért és számított értékek)

A képletekben a szilárdsági értékek hengersizilárdságot jelentenek, mert ez az ami minden esetben ismert (tervezési alapadat). Én nyomószilárdságnak a rugalmassági modulus méréshez használt hasábon mért nyomószilárdságot tekintettem, mivel a nyomószilárdság értékét a próbatest karcsúsága jelentősen befolyásolja.

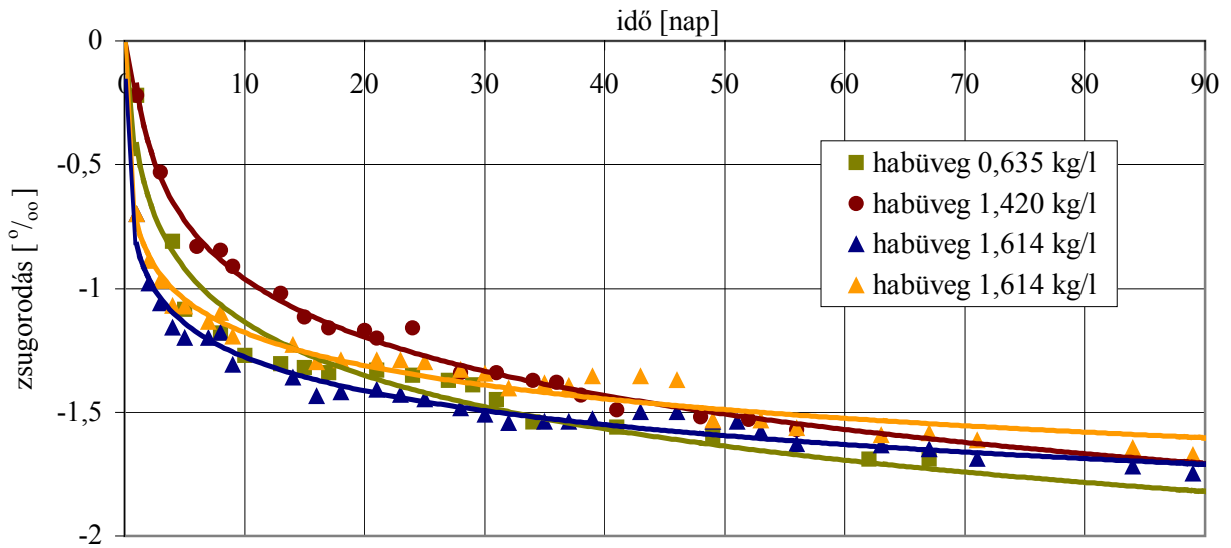
Így normál betonok esetén a 4.3. képlet szerint számított rugalmassági modulus értékek a mért értékek fölé esnek, ezért felmerül az ily módon kapott értékek figyelembe vehetőségének kérdése. A pontos értékek számításához szükséges egy átszámítási képlet hasábról hengerre, vagy külön vizsgálat a hengersizilárdság megállapítására. A könnyűbetonoknál viszont a számított és mért görbe gyakorlatilag egybeesik, és mivel a számított értékekhez tartozó ad kisebb rugalmassági modulus értékeket, ez biztonságosan alkalmazható.

4.3.2. Zsugorodás

4.3.2.1. A különböző adalékanyagok hatása

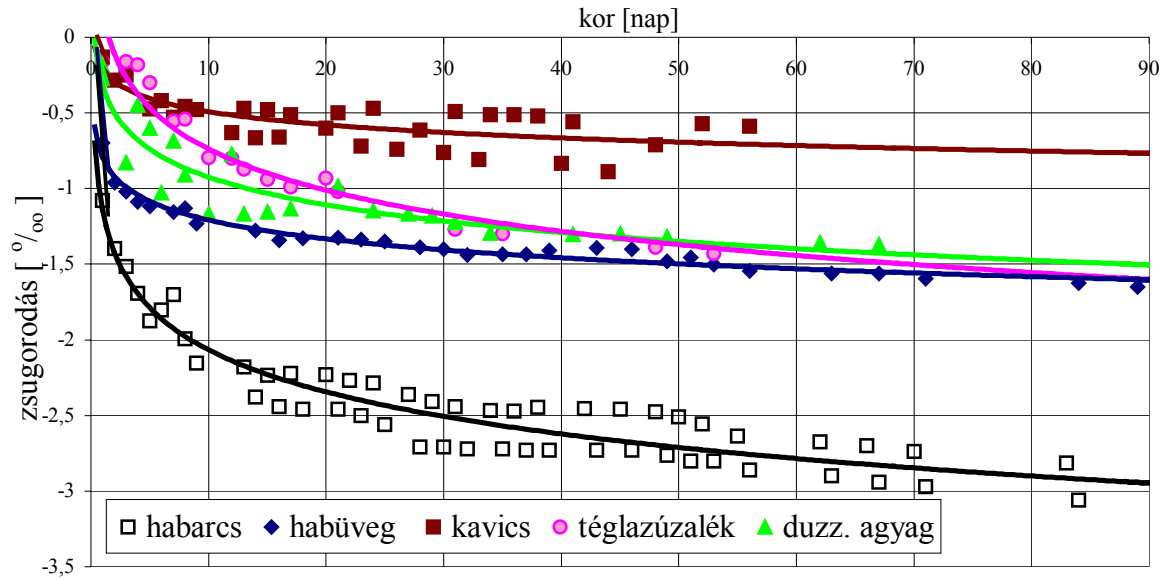
A különböző habüveg adalékanyagú betonok zsugorodás szempontjából hasonlóan viselkednek. A kísérleti eredményeket a 4.29. ábra szemlélteti. A habüveg adalékanyagok

különböző szemcse-testsűrűségének ellenére azonos összetételű habarcsban (1. jelű) (4.3. táblázat), azonos 47 V%-os adagolásnál a beton zsugorodása közel azonos: 1,6-1,8 ‰.



4.29. ábra Különböző habüveg adalékanyagok könnyűbetonok zsugorodása

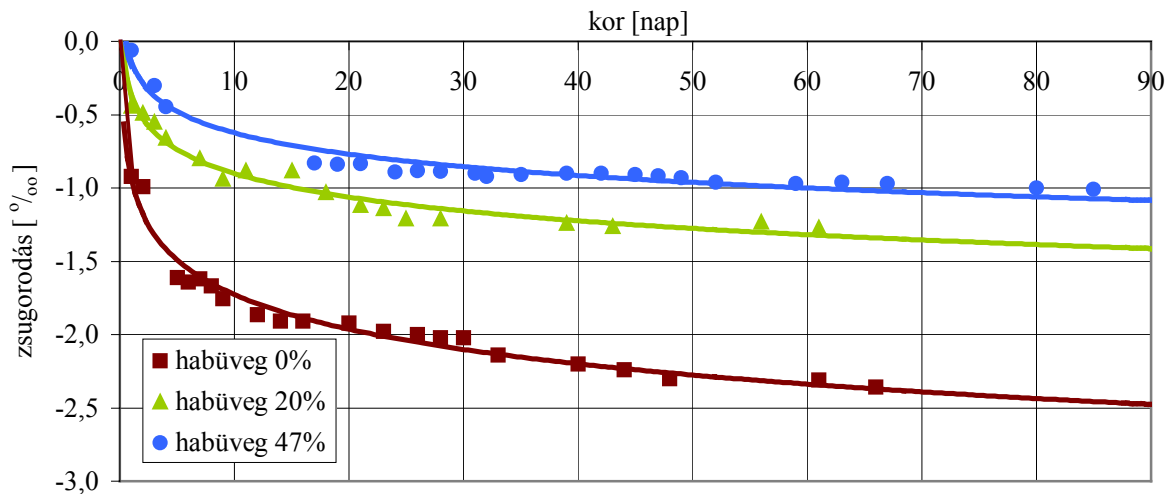
Különböző adalékanyag típusokat vizsgálva jól látható (4.30. ábra), hogy mindegyik vizsgált könnyű adalékanyag (habüveg, duzzasztott agyagkavics, téglazúzalék) alkalmazása esetén közel azonos a zsugorodás, és ez mintegy kétszerese az azonos habarcs összetételű és adalékanyag tartalmú kvarckavics beton zsugorodásának. Ez a különbség az adalékanyagok merevségének különbségére vezethető vissza, minthogy ebben az esetben a péptartalom azonos volt. A különböző könnyű adalékanyagok alkalmazásakor a képlékeny zsugorodás eltérő, habüveg esetén a legnagyobb. A kezdeti zsugorodás annál kisebb, minél nagyobb az adalékanyag vízfelvétele, tehát a különböző kezdeti zsugorodásnak oka lehet, hogy a nagy vízfelvételű adalékanyag a keverés során a cementpép víztartalmának egy részét elszívja, és azt a szilárdulás során folyamatosan adja le, ezzel belülről nedvesen tartva a betont. A habüveg esetén a zsugorodás időbeli lefolyása (a görbe alakja) hasonló a kvarckavics betonéhoz, csak a mértéke nagyobb. Összehasonlításképpen a 4.30. ábrán feltüntettem az adalékanyag nélküli habarcs zsugorodását is, ez nagyjából a könnyűbetonokon mért érték kétszeresére adódott, ami közelítően megfelel az adalékanyag-cementkő aránynak.



4.30. ábra Különböző adalékanyagok hatása a könnyűbeton zsugorodásra

4.3.2.2. Az adalékanyag adagolás mértékének hatása

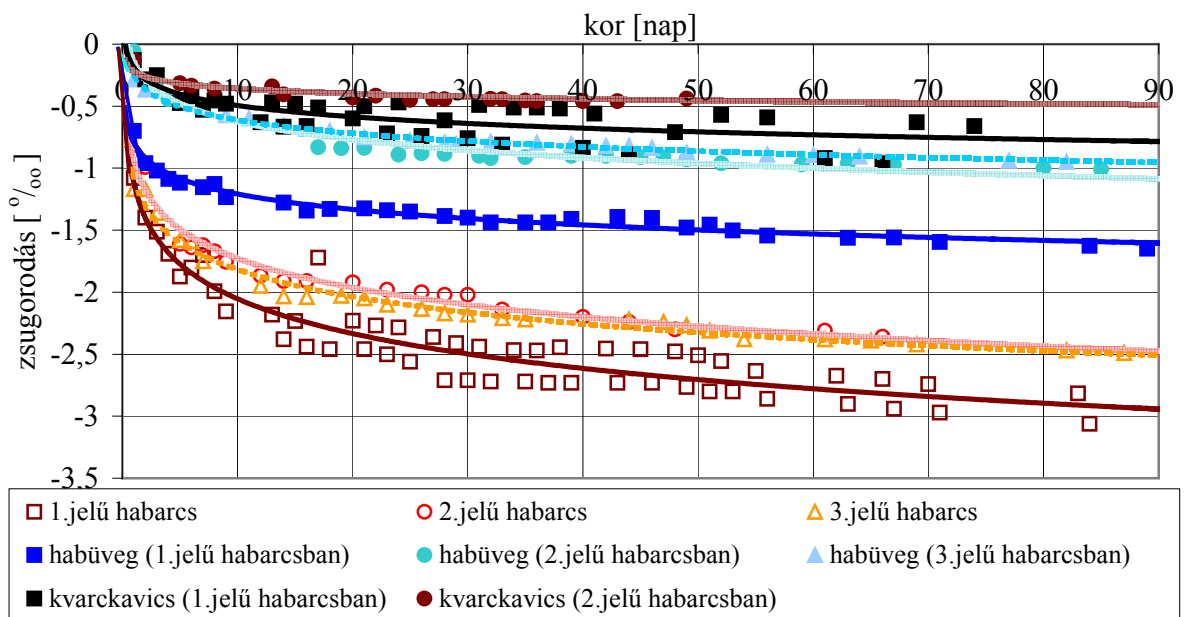
Ugyanazon adalékanyagok kisebb adagolása mellett természetesen nagyobb zsugorodást kaptam, de a növekedés nem volt arányos az adalékanyag mennyiségének csökkentésével (4.31. ábra). A hatás pontos leírásához a vizsgálat nem tartalmazott kellő számú próbatestet.



4.31. ábra Adalékanyag adagolás mennyiségének hatása a zsugorodásra

4.3.2.3. A habarcs összetételének hatása

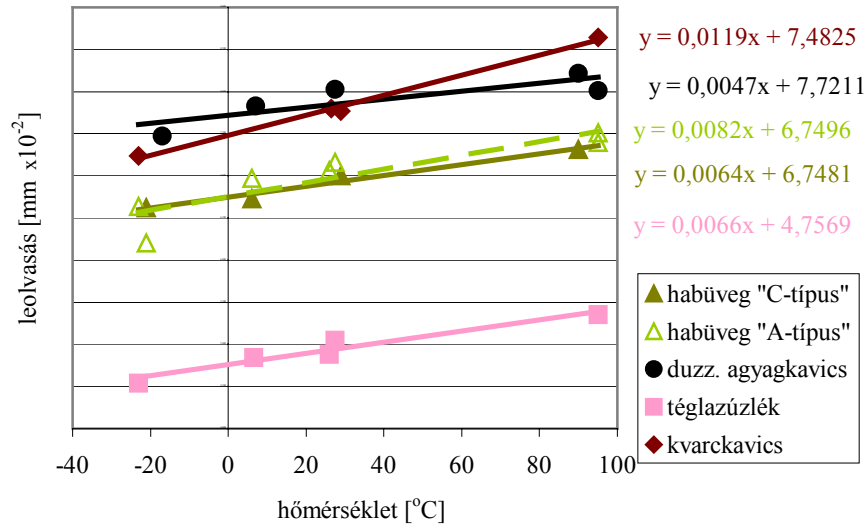
Mindhárom, már korábbiakban is alkalmazott habarcs zsugorodását megvizsgáltam. Megfigyelhető, hogy a 2. és 3. jelű keverékek esetén (3.4. táblázat) a cement és a víz-cement tényező ellentétes irányban történő változtatásának hatására hasonló mértékű zsugorodás játszódtott le (4.32. ábra). A cement és a víz adagolásának növelése egyaránt növeli a zsugorodást, így ebben az esetben a zsugorodásra gyakorolt együttes hatásuk azonos volt. Ez a jelenség minden adalékanyagfajta esetén megegyezett. A legnagyobb cementtartalmú keverék esetén $\sim 0,5$ ‰-kel nagyobb zsugorodást mértem, mint a másik két esetben. Ez a különbség ugyanekkora volt könnyűbeton esetén is, tehát arányaiban jobban nőtt a zsugorodás. Megállapítható, hogy a habüveg adalékanyagos könnyűbetonok zsugorodása – hasonlóan a közönséges betonokhoz – elsősorban a habarcs összetételétől függ, de a zsugorodás végértéke azonos habarcs alkalmazása esetén mintegy kétszerese a kvarckavics adalékanyagosénak.



4.32. ábra A habarcsösszetétel hatása a zsugorodásra

4.3.3. Hőtágulási együttható

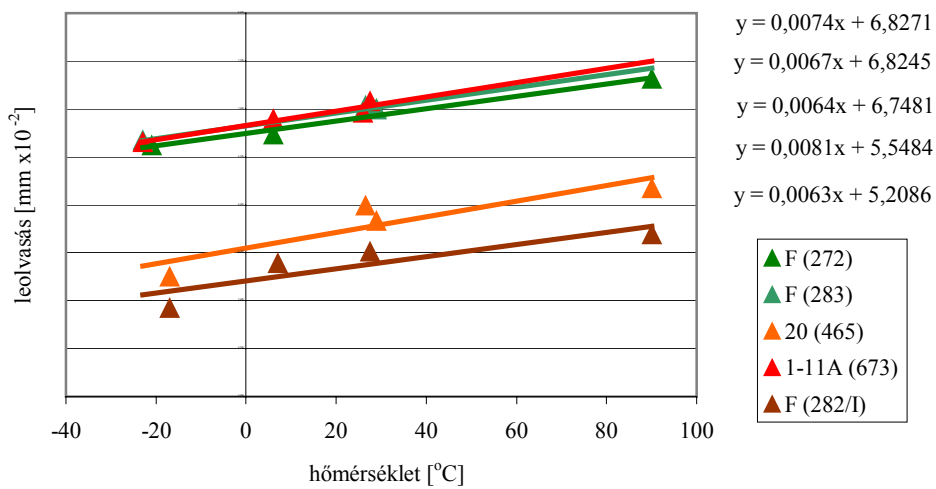
Különböző anyagú (habüveg, duzzasztott agyagkavics, téglazúzalék és kvarckavics) adalékanyag 47 V%-os adagolása esetén azonos habarcsösszetétel mellett változik a hőtágulási együttható (4.33. ábra).



4.33. ábra A hőtágulási együttható különböző adalékanyagok esetén azonos adalékanyag adagolás és azonos habarcsösszetétel mellett

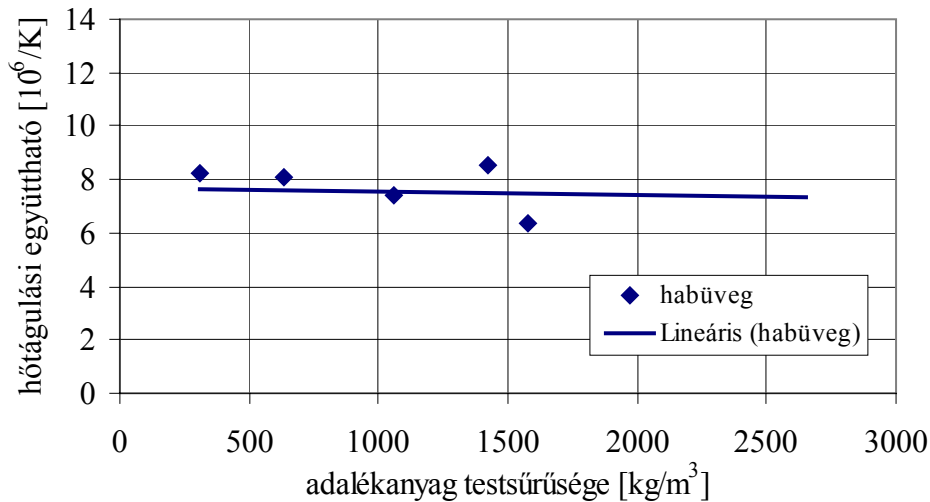
A kvarckavicsal készített betonokon mértem a legnagyobb hőtágulási együtthatót $11,9 \times 10^{-6}/K$ -t, ami megegyezik a szakirodalmi adatokkal. Minden könnyű adalékanyagfajta alkalmazása csökkentette a hőtágulási együtthatót.

Többféle habüveg adalékanyag típust is megvizsgáltam, és $6,3 \times 10^{-6}/K$ és $8,2 \times 10^{-6}/K$ közötti értékeket mértem (4.34. ábra).

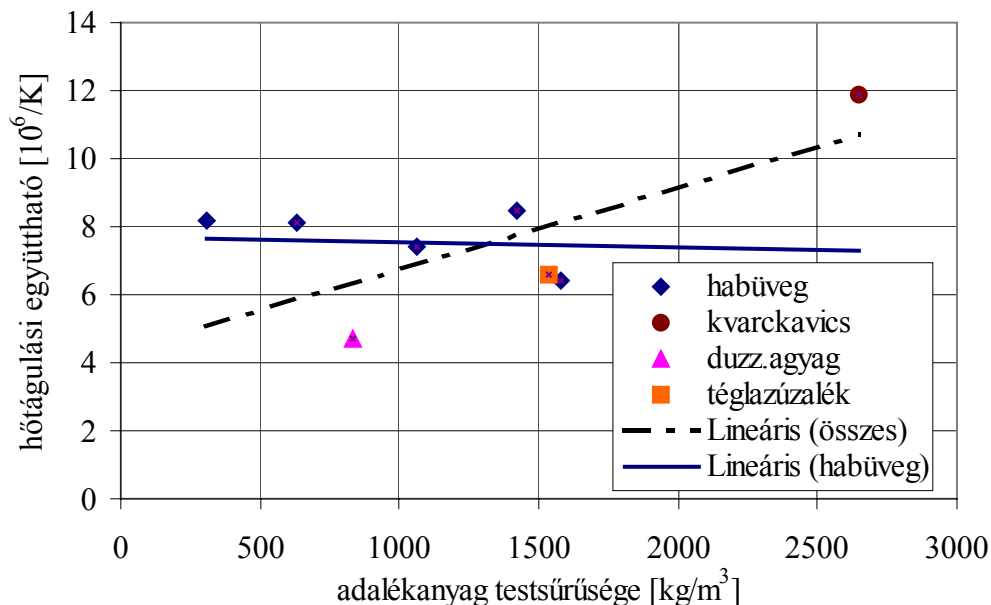


4.34. ábra A hőtágulási együttható különböző habüveg adalékanyagok esetén azonos adalékanyag adagolás és azonos habarcsösszetétel mellett

Habüveg adalékanyag alkalmazásakor azonos (1. jelű) habarcsösszetétel és azonos adalékanyag mennyiség (47 V%) mellett, a hőtágulási együttható értéke gyakorlatilag független az adalékanyag szemcse-testsűrűségétől (4.35. ábra). Ez általánosságban nem mondható el a különböző anyagú beton adalékanyagokról (4.36. ábra).



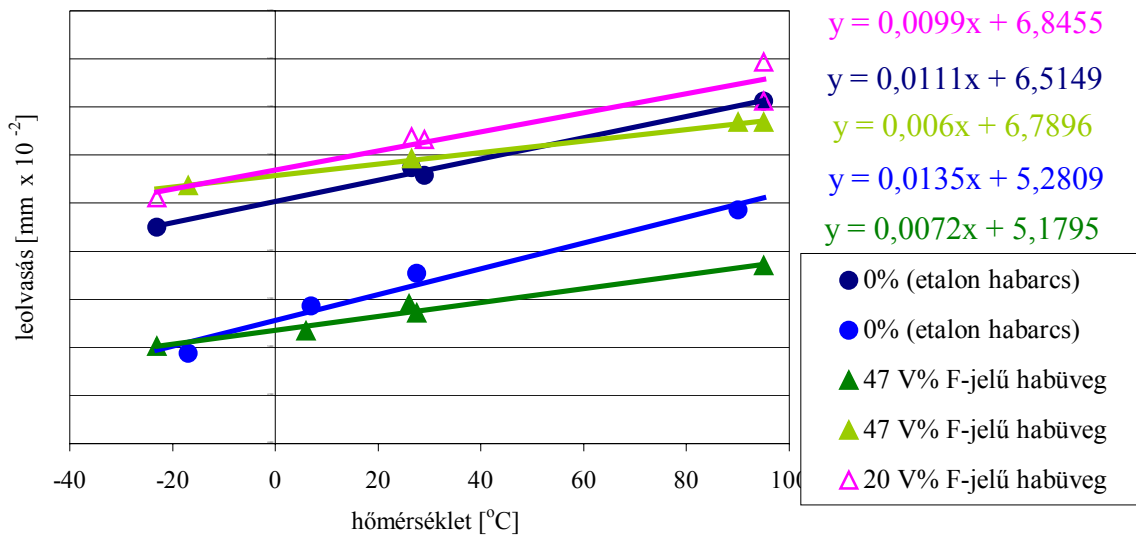
4.35. ábra A hőtágulási együttható változása különböző habüveg adalékanyagok esetén a szemcse-testsűrűség függvényében azonos adalékanyag adagolás és azonos habarcsösszetétel mellett



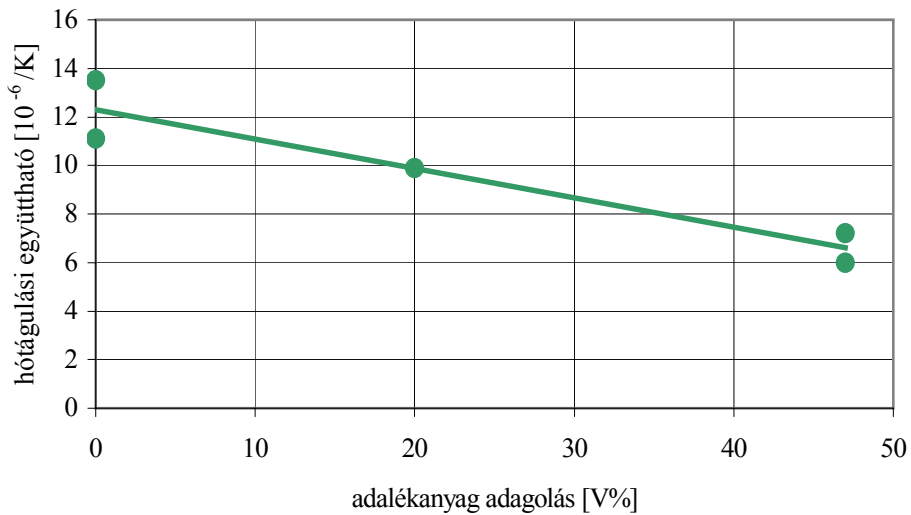
4.36. ábra A hőtágulási együttható változása különböző adalékanyagok esetén a szemcse-testsűrűség függvényében azonos adalékanyag adagolás és azonos habarcsösszetétel mellett

A könnyű adalékanyag mennyiségének hatását is megvizsgáltam: 0% (etalon habarcs), 20 és 47 V%-os adalékanyag adagolásokat ugyanabból az (F4 jelű) habüveg fajtából, azonos (2. jelű) habarcsvázsal. Az etalon habarcs esetén mért értékek megegyeztek a kvarckavics adalékanyagossal, vagyis a szemcseméret nem befolyásolja a hagyományos beton hőtágulási együtthatóját, ami 11-13 x 10⁻⁶/K. 20 V% habüveg adalékanyag tartalom mellett ez lecsökkent kb. 10 x 10⁻⁶ -ra, míg 47 V%-nál 6-7 x 10⁻⁶/K adódott (4.37. ábra). Gyakorlatilag lineáris az összefüggés az adott adalékanyag mennyiségének változtatása és a mért hőtágulási együttható között (4.38. ábra). Ez megfelel annak a szakirodalmi adatnak is, hogy a beton

testsűrűségének növekedése (a víz-cement tényező csökkentése) a hőtágulási együttható növekedését okozza [Neville, 1995].



4.37. ábra A hőtágulási együttható változása különböző mennyiségű adalékanyag adagolás mellett



4.38. ábra A hőtágulási együttható változása adott habüveg adalékanyag változó adagolása mellett azonos habarcsösszetétel esetén

5. ALKALMAZÁSOK

5.1. Tervezési kérdések

A könnyűbeton szilárdsága és testsűrűsége mellett más követelmények is megjelennek. Elsősorban a környezeti/kitéti osztályoknak való megfelelés befolyásolja a habarcs összetételét. A piacon jelenleg elérhető könnyű adalékanyagok kis választéka is korlátot jelenthet a tervező számára. Ezeket alapadatnak tekintve el lehet végezni a tervezést, keresve az optimális megoldást. Az összetétel megtervezésekor azonban még további tényezőket is figyelembe kell venni.

Az adalékanyag mennyiségének számításakor a legfontosabb különbség, hogy könnyűbetonok esetén nem a telített beton elérése a cél, nem ekkor kapjuk a legnagyobb szilárdságot, ugyanis ekkor nem tud létrejönni a könnyűbetonokra jellemző erőjáték (2.5. ábra). Az adalékanyag mennyiségének meghatározásához ki kell számítani az adalékanyag hézagosságát. A leggyakoribb eset, amikor közel egyszemcsés a könnyű adalékanyag, akkor az elméleti hézagosság 23 %. Ehhez hozzá kell adni az ajánlott 20 %-os túltelítettséget, és így kapható meg a habarcsrész minimális aránya a könnyűbetonban, ami például egyszemcsés esetben $(0,2+0,23 \cdot 0,8) = 36 \%$. Az így megkapható maximális adalékanyag mennyiség kb. 64 %. A minimális mennyiség reálisan ennek körülbelül a fele. Az általam meghatározott optimális értékek (4.2.2. fejezet) 41-54 V % közöttire adódtak habüveg és duzzasztott agyagkavics adalékanyagok esetén.

5.2. Kivitelezési kérdések

A könnyűbeton készítés és bedolgozás során a leglényegesebb eltérés a normál betonokhoz képest általában az adalékanyag nagy vízfelvevő képessége. A normál testsűrűségű betonokhoz alkalmazott adalékanyagoknak (kvarckavics, zúzottkő) gyakorlatilag nincs vízfelvétele, csak a homok esetén kell figyelembe venni a felületi vízmennyiséget. Könnyű adalékanyagok esetén vagy gondoskodni kell a vízfelvevő képesség függvényében a többletvíz adagolásról (különben a habarcsból elszívott vízmennyiség miatt bedolgozhatatlanná válik a keverék), vagy meg kell akadályozni a porózus adalékanyag vízfelvételét. Ezeknek több módszere is ismert:

1. Az adalékanyag vízfelvevő képességének csökkentése:

- 1.1. gyártás során készülő bevonat

- 1.2. előkeverés híg cementpéppel felületi bevonatnak
2. többletvíz adagolás
 - 2.1. a cementpéphez (ebben az esetben többlet keverési idő is szükséges)
 - 2.2. az adalékanyag előzetes beáztatásával
 - 2.3. a keverés kezdetén csak az adalékanyagot előkeverni vízzel

Ezek közül a legmegfelelőbb kiválasztása a keverési módszer és az alkalmazott adalékanyag függvénye. A szükséges többlet vízmennyiség megválasztásakor nem az adalékanyag teljes vízfelvétele, hanem a ½-1 órás vízfelvétel a mértékadó. Ez gyakran nincs megadva a terméklapon, tehát szükség esetén a vizsgálatot külön el kell végezni (3.1.2. és 4.1.2. fejezet).

Kis mennyiségek keverése esetén nem okoz gondot a hagyományostól eltérő adalékanyag alkalmazása. Bár a szakirodalom könnyűbeton keveréséhez kényszerkeverőt ajánl, megoldható a keverés ejtőkeverővel is, csak ebben az esetben javasolt a cementpépet előkeverni, az adalékanyagot csak ezután hozzáadni. (5.1. ábra)



5.1. ábra Könnyű-adalékanyagos beton keverése ejtőkeverőben

Nagy mennyiség esetén felmerül a betongyári keverés kérdése, viszont Magyarországon a legtöbb betongyár nem készít könnyűbetont, mert a megrendelt kis mennyiségek miatt nem gazdaságos. Ebben az esetben is alkalmazható az előzőhöz hasonló megoldás, vagyis hogy megkevert habarcshoz a mixerkocsiba adagoljuk a könnyű adalékanyagot, például egy betonozó tölcser segítségével. Ez akár az építési helyszínen is megoldható, ekkor azonban be kell tartani a többlet keverési időre vonatkozó előírásokat. (5.2-5.4. ábra)



5.2., 5.3., 5.4. ábra Könnyű adalékanyag adagolása a mixerkocsiban lévő habarcszhoz (Readymix, Klosterneuburg)

A bedolgozási mód megválasztásakor korlátot jelenthet az adalékanyag típusa. Például a szivattyús szállítási mód csak olyan adalékanyagok esetén alkalmazható, ahol a maximális vízfelvétel 1-2 m%.

A nem megfelelő konzisztencia illetve tömörítés során nem a cementpép, hanem az adalékanyag felúszása várható (5.5. ábra), ami a későbbiekben nem javítható.



5.5. ábra A könnyű adalékanyag felúszása nem megfelelő konzisztencia és tömörítés esetén

Nem megfelelő keverés okozhatja a nagyon könnyű, kis szilárdságú adalékanyag szemcsék összetöredezését. Ennek hatására a beton testsűrűsége növekszik, de egyúttal nő a nyomószilárdság is. Az így megkevert beton csak abban az esetben építhető be, ha a szerkezet a nagyobb önsúly mellett is megfelel.

A szakirodalom alapján ismert, hogy a nagy vízfelvételű adalékanyagok alkalmazásának előnye a belső utókezelő hatás, ez viszont nem jelenti azt, hogy a könnyűbetonok nem igényelnek utókezelést.

5.3. Az értekezés eredményeinek hasznosítási lehetőségei

Kísérleti eredményeim alapján a habüveg adalékanyagos könnyűbetonok optimális adalékanyag tartalma és a könnyű adalékanyag és a habarcsváz szilárdságának aránya meghatározható, illetve adott betonszilárdság – testsűrűség igényhez az ideális szemcse-testsűrűség megválasztható. A könnyű adalékanyag okozta eltérő alakváltozási jellemzőket pontosítottam, illetve számszerűsítettem a habüveg adalékanyag esetére.

Eredményeim hasznos információkat nyújtanak mind a kutatás, mind a gyakorlati alkalmazás területén. Kis számú további kísérlettel hasonló összefüggések állíthatók föl más cement vagy homok alkalmazása esetén is. További kutatási területek jelölhetők ki, és a megállapítások egy része adaptálható más könnyű adalékanyag fajtákra is.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Szerkezeteink jelentős része épül betonból. A beton előnye a többi szerkezeti anyaghoz képest, hogy tetszőleges méretben és formában alakítható ki, a helyszínen is elkészíthető. Hátránya viszont a szilárdsághoz képest viszonylag nagy testsűrűsége. Ez a betonok testsűrűségének csökkentésével, illetve szilárdságának növelésével jelentősen javítható. Ennek egy módja a könnyűbetonok alkalmazása.

A könnyűbeton készítésének egyre nagyobb a jelentősége, különösen az egyre „monumentálisabb” szerkezeteknél, illetve ahol az önsúly jelentős része a teljes tehernek. 2000 kg/m³ alatti testsűrűségű betonok esetén könnyűbetonokról beszélünk. Teherhordó szerkezetek anyagaként a könnyűbetonok közül az adalékanyagos könnyűbetonok jöhetnek számításba (1.3. ábra).

Könnyű adalékanyagként különféle természetes, illetve mesterséges anyagok alkalmazhatók, amelyek szemcse-testsűrűsége nem haladja meg a 2000 kg/m³-t (2.1. táblázat). Napjaink legelterjedtebb könnyű adalékanyaga a duzzasztott agyagkavics. Számos szerkezet készült ennek felhasználásával, főként hidak, magasházak, fűrotornyok és héjszerkezetek.

A gazdaság fejlődésével egyre több terméket állítunk elő, és ezzel együtt növekszik a hulladékok mennyisége is. Gazdaságossági és környezetvédelmi szempontból egyre jelentősebb a hulladékanyagok újrahasznosítása, és ebben az építőiparnak is növekszik a szerepe. Magyarországon a 2000. évi adatok szerint 20,4 millió m³ hulladék keletkezett, aminek 2,5 %-a üveg. A habüveg (1.11. ábra) mint könnyű adalékanyag már régebb óta ismeretes, de korábban csak kis testsűrűségű, kis szilárdságú változata létezett (2.7. ábra). Az elmúlt néhány évben (magyar szabadalom alapján) megkezdődött egy olyan habüveg adalékanyag termékcsoport gyártása, amely a könnyű adalékanyagok között nagyszilárdságúnak tekinthető, és tömegeloszlási jellemzői széles tartományban változtathatók, felületi bevonatuk javítja az alkáliállóságot és korlátozza a vízfellevő képességet. Azonban a tartószerkezeti betonokhoz is alkalmas habüveg adalékanyagok használatához szükséges a műszaki jellemzők részletes ismerete.

Kutatásaim során több gyártótól származó különböző habüveg adalékanyagokat vizsgáltam meg, majd csoportosítottam azokat főbb jellemzőik szerint. Ezt követően összehasonlítottam a legelterjedtebben alkalmazott könnyű adalékanyaggal, a duzzasztott agyagkavicsal, a szintén hulladékhasznosításból származó téglazúzalékkal és az

építési-bontási hulladékból származó adalékanyagokkal (bontott téglá és bontott vegyes törmelék), illetve a hagyományos betonok adalékanyagával, a kvarckavicssal. Vizsgálataim célja a szerkezeti betonok tervezéséhez szükséges paraméterek főbb összefüggéseinek megadása volt.

Kísérleti eredményeimmel pontosítottam a habüvegek önszilárdsága és testsűrűsége közötti összefüggéseket (4.2. ábra), valamint az adalékanyag szilárdságának és mennyiségének a könnyűbetonra gyakorolt hatását (4.14. ábra). Eredményeim lehetővé teszik az adalékanyag mennyiségének optimalizálását a szilárdságra és az önsúlyra vonatkozó követelmények figyelembevételével. Meghatároztam a cementkő és az adalékanyag szilárdságának a könnyűbeton szilárdságára (4.17. ábra) és tönkremeneteli módjára gyakorolt hatását (4.24. ábra). Megállapításokat fogalmaztam meg a habüveg adalékanyagok vízfelvételével és alkáliállóságával kapcsolatban. Vizsgálatokat végeztem a hajlító-húzó- és a nyomószilárdság kapcsolatának illetve a próbatestek mérethatásának pontosítása céljából.

Mivel a könnyűbetonok alakváltozási jellemzői lényegesen eltérhet a közönséges betonokétól, és ez elsősorban az adalékanyag tulajdonságaitól függ, ezért ellenőriztem habüveg adalékanyagok esetén a különböző szabványok által ajánlott rugalmassági modulus számítási módszerek alkalmazhatóságát, és új módszert javasoltam. Meghatároztam a jellemző zsugorodási értékeket és a hővezetési tényezőt, illetve ezek befolyásoló tényezőit, különböző habarcsváz és adalékanyag-tartalom mellett.

Értekezésem utolsó fejezetében összefoglaltam a könnyűbetonok tervezése és kivitelezése során felmerülő legfontosabb sajátságokat és eltéréseket a közönséges betonokhoz képest, rámutattam a jövőbeni hasznosítási lehetőségekre.

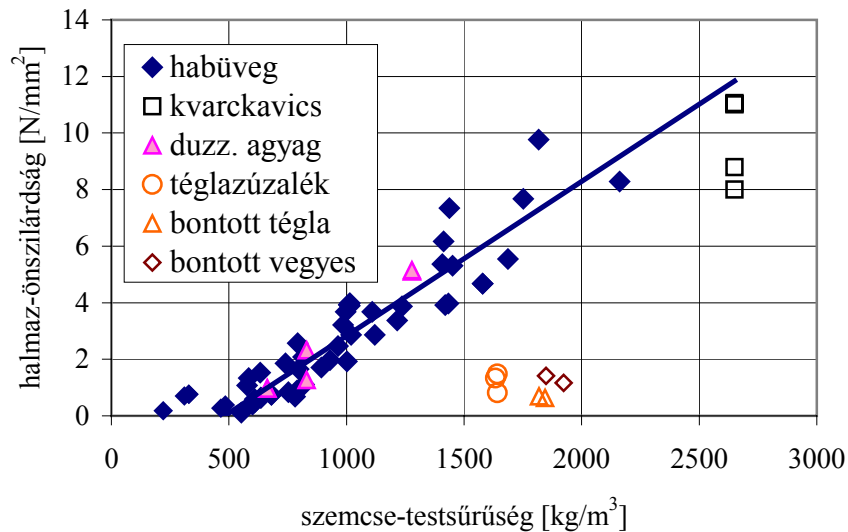
7. AZ ÉRTEKEZÉS ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI – TÉZISEK

A vastagon szedett szövegrészek ismertetik az új megállapításokat, a nem vastagon szedetttek azok bevezetését és értelmezését adják.

1. téziscsoport: A habüveg adalékanyagok önszilárdsága

1.1. tézis

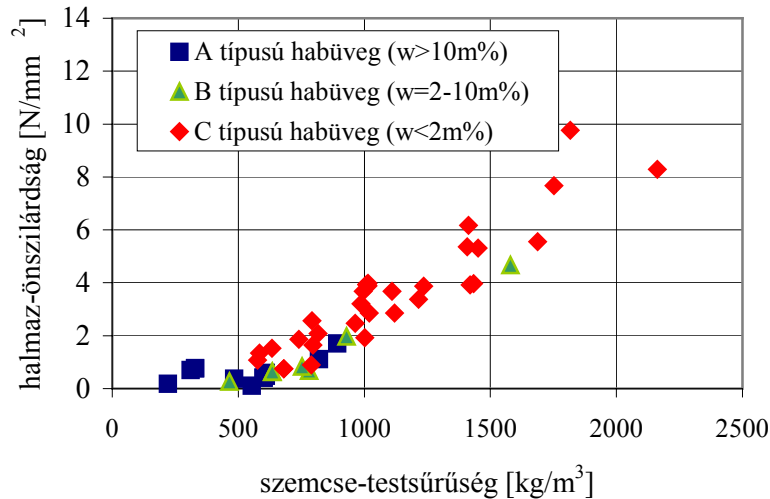
A habüveg adalékanyagok halmaz-önszilárdsága a szemcse-testsűrűség növekedésével növekszik. A szerkezeti beton készítéséhez alkalmas, 500 kg/m^3 -nél nagyobb szemcse-testsűrűségű habüveg adalékanyagok esetén a halmaz-önszilárdság és a szemcse-testsűrűség összefüggése gyakorlatilag lineárisnak tekinthető (7.1. ábra). Az így felvett egyenesre a kvarckavics is megközelítőleg illeszkedik, így ennek százalékában adható meg a habüveg szilárdsága. Az egyenesre a duzzasztott agyagkavicson mért értékek szintén jól illeszkednek.



7.1. ábra Adalékanyagok halmaz-önszilárdságának és testsűrűségének összefüggése

1.2. tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy a habüveg adalékanyagok szemcse-testsűrűség és halmaz-önszilárdság összefüggése független az adalékanyag vízfelvevő képességétől (7.2. ábra).

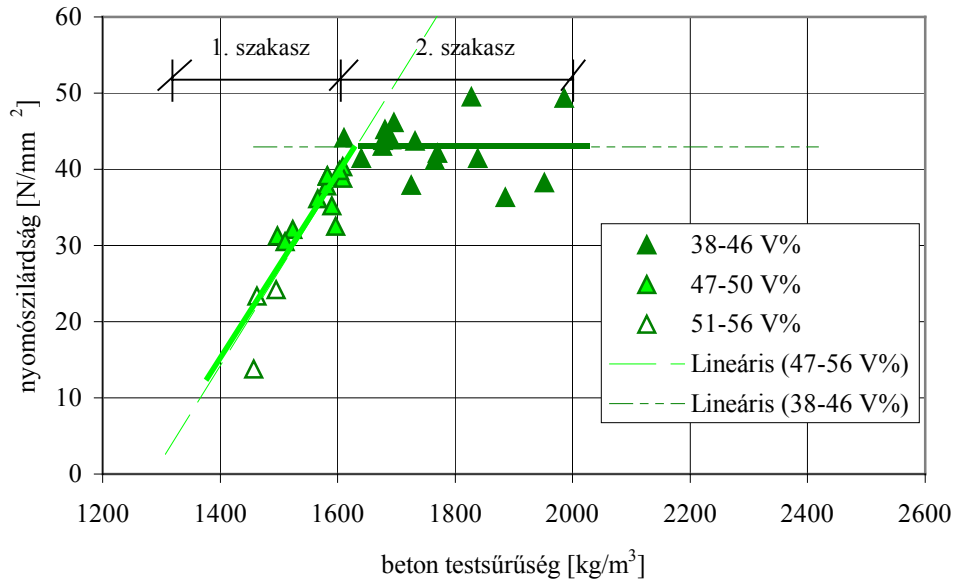


7.2. ábra A halmaz-önszilárdság – testsűrűség összefüggés különböző vízfelvételi csoportba tartozó habüveg adalékanyagok esetén

2. téziscsoport: A habüveg adalékanyagos könnyűbetonok szilárdsága

2.1. tézis

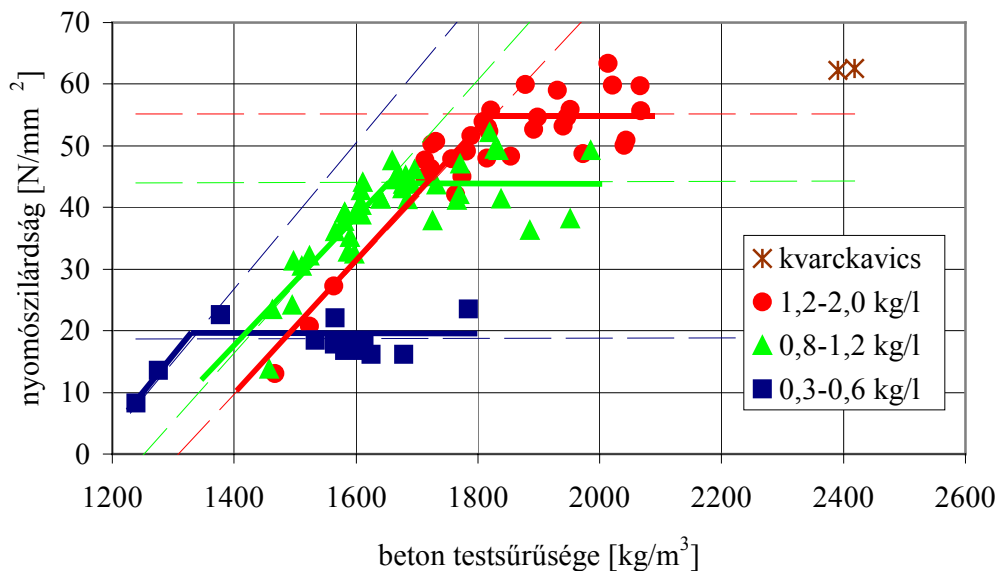
Ismeretes, hogy ha a könnyű adalékanyag mennyiségét (térfogatát) csökkentjük a betonban, az a testsűrűség és a szilárdság együttes növekedését eredményezi, mert a nagyobb testsűrűségű teherviselő habarcsváz aránya növekszik. Ez az összefüggés viszont nem érvényes az adott könnyű adalékanyaggal elérhető beton teljes testsűrűségi tartományban. Kísérletileg igazoltam, hogy ha **azonos összetételű cementhabarcs alkalmazásakor a habüveg mennyiségét a lehetséges legnagyobb adagolásról fokozatosan csökkentjük, akkor kezdetben a könnyűbeton nyomószilárdsága a testsűrűség növekedésével lineárisan növekszik (7.3. ábra 1. szakasz). Ha a könnyű adalékanyag mennyiségének csökkentése elér egy kísérletileg meghatározható, az adalékanyag szilárdságára jellemző értéket, akkor az adalékanyag mennyiségének további csökkentése reális határon belül (a legnagyobb adagolás feléig) csupán a beton testsűrűség növekedését okozza, gyakorlatilag változatlan nyomószilárdság mellett (7.3. ábra 2. szakasz). A két egyenes metszéspontja adja az adott adalékanyagra az optimumot, azaz az adott könnyű adalékanyaggal elérhető legnagyobb betonszilárdság mellett elérhető legkisebb beton testűrűséget.**



7.3. ábra A nyomószilárdság (150 mm-es kockán, 28 napos korban, egyedi értékkel megadva) és a beton testsűrűség összefüggése a 24-es jelű habüveg adalékanyag különböző adagolása és azonos cementhabarcs alkalmazása esetén

2.2. tézis

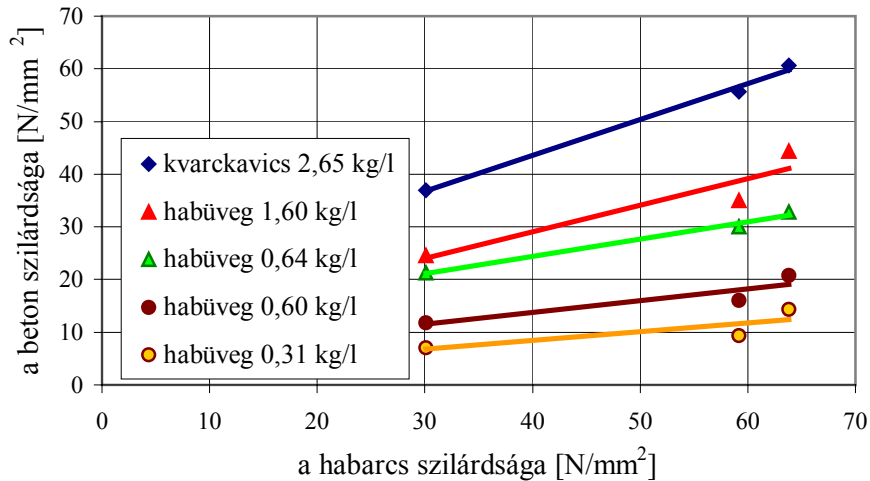
A könnyű adalékanyag szemcse-testsűrűségének növekedésével az optimumhoz tartozó betonszilárdság nő (7.4. ábra), az optimumhoz tartozó adalékanyag tartalom csökken.



7.4. ábra A nyomószilárdság (150 mm-es kockán, 28 napos korban, egyedi értékkel megadva) és a beton testsűrűség összefüggése különböző testsűrűségi osztályba tartozó könnyű adalékanyagok és kvarckavics esetén

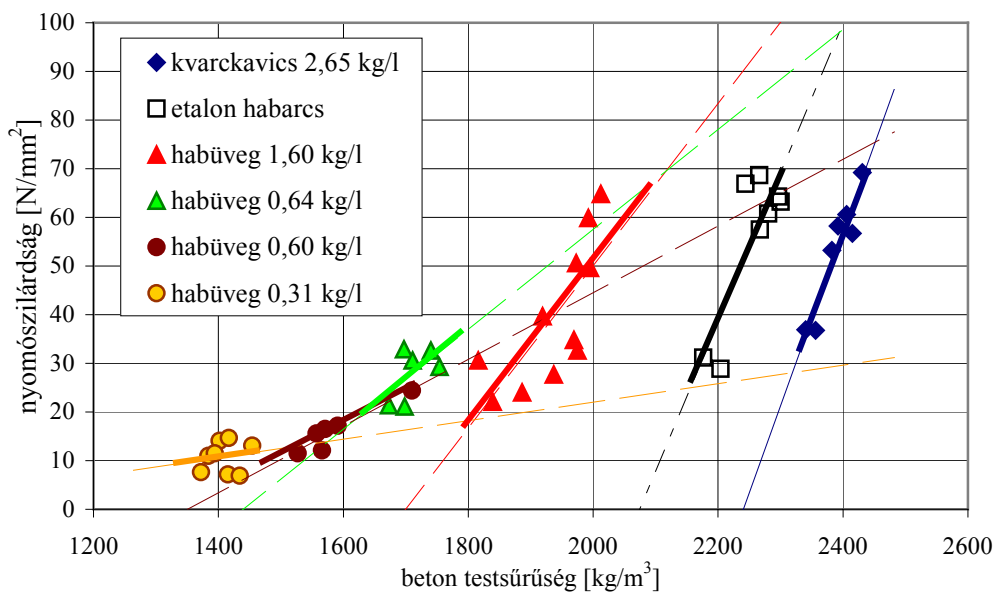
2.3. tézis

Adalékanyagos könnyűbetonok esetén az elérhető betonszilárdságot az adalékanyag jellemzői és a cementhabarcs összetétele határozzák meg. Kísérletileg igazoltam, hogy **optimális adalékanyag tartalmú, habüveg adalékanyagos betonok esetén a habarcs szilárdságának a növelésével arányosan nő a könnyűbeton szilárdsága (7.5. ábra).**



7.5. ábra A beton szilárdsága a habarcs szilárdságának függvényében különböző testsűrűségű habüveg adalékanyagos és kvarckavics betonok esetén (47 V% adalékanyag tartalom mellett, 70,7 mm-es kockán, 28 napos korban, átlagérték)

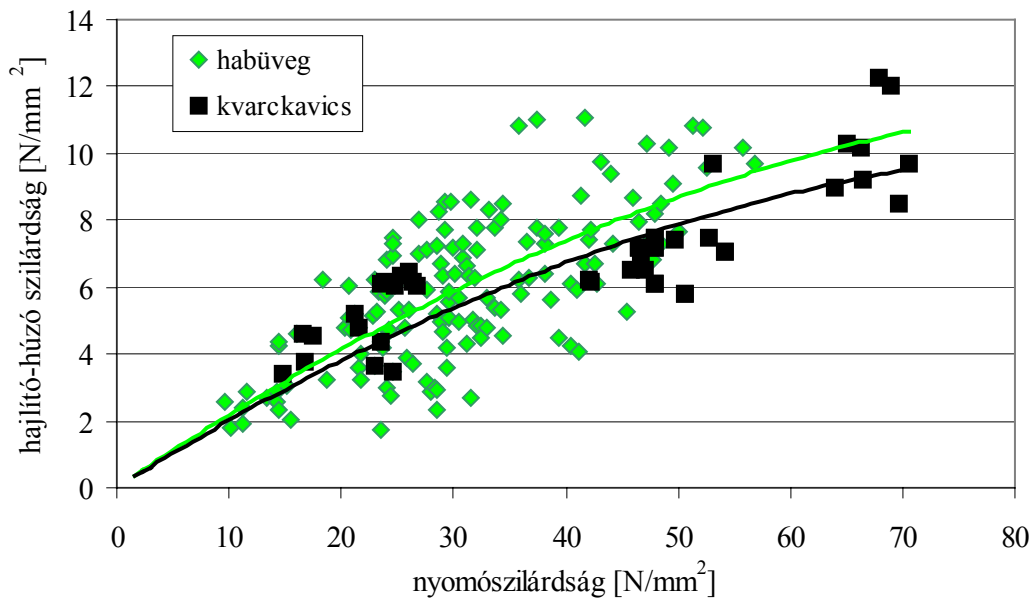
Ez a megegyezik a kvarckavics adalékanyagos beton viselkedésével, de különböző testsűrűségű habüvegek esetén más-más szilárdsági tartomány érhető el (7.6. ábra).



7.6. ábra A beton szilárdsága a beton testsűrűségének függvényében különböző szemcse-testsűrűségű habüveg és kvarckavics adalékanyagos betonok esetén (47 V% adalékanyag tartalom, 70,7 mm-es kockán, 28 napos korban, átlagérték)

2.4. tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy a **habüveg adalékanyagos könnyűbetonok hajlító-húzó szilárdsága nem kisebb a kvarckavics adalékanyagos betonok hajlító-húzó szilárdságánál a szerkezeti betonok tartományában** (nyomószilárdság: 10-60 N/mm²) (7.7. ábra).



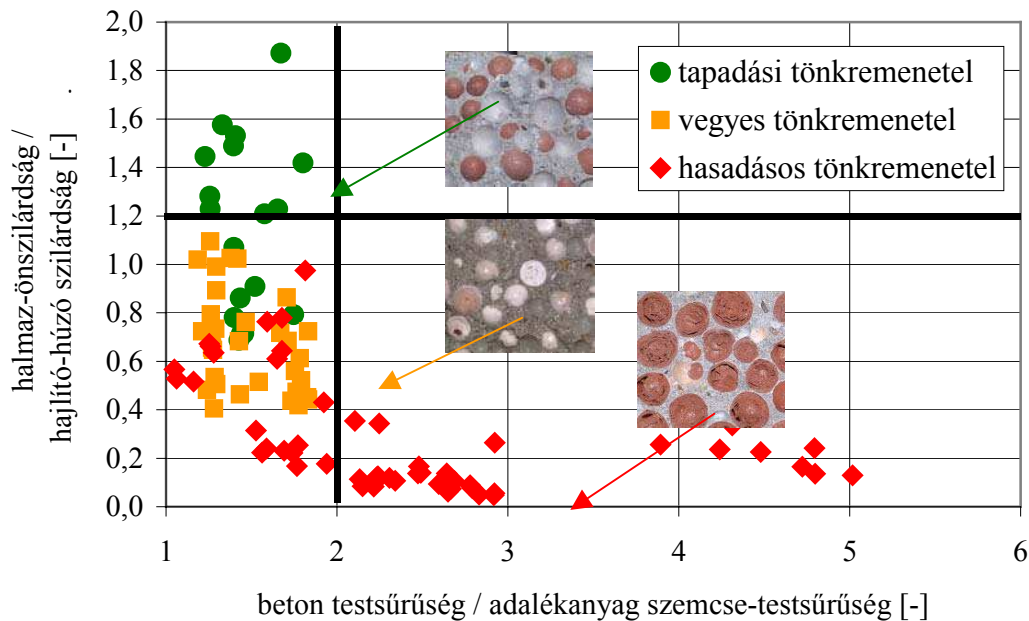
7.7. ábra A nyomószilárdság és a hajlító-húzó szilárdság összefüggése különböző habüveg és kvarckavics adalékanyagos betonok esetén (28 napos korban, 70x70x250 mm-es hasábokon)

2.5. tézis

A könnyű adalékanyagos betonok tönkremenetelét a szakirodalom szerint az adalékanyag tönkremenetele okozza (lásd 2.5. ábra). Kísérletileg igazoltam, hogy a **habüveg adalékanyagos könnyűbetonok esetén a tönkremeneteli mód az adalékanyag szemcse-testsűrűség és a könnyűbeton testsűrűség hányadosának, továbbá az adalékanyag halmaz-önszilárdság és beton hajlító-húzó szilárdság hányadosának függvényében a következőképpen alakul** (7.8. ábra):

- ha a beton testsűrűsége legalább kétszerese az adalékanyag szemcse-testsűrűségének, akkor a hajlítási törés az adalékanyag tönkremenetelével (hasadásával) következik be;
- ha az adalékanyag halmaz-önszilárdságának és a könnyűbeton hajlító-húzó szilárdságának hányadosa legalább 1,2, akkor az adalékanyag törés nélkül fordul ki a habarcsvázból (tapadási tönkremenetel);

- a műszakilag legkedvezőbbnek tekinthető vegyes tönkremenetel– ahol a habarcs és a könnyű adalékanyag szilárdságát kihasználhatjuk – csak a köztes esetekben jöhet létre.



7.8. ábra A töréskép összefüggése a testsűrűségek és szilárdságok arányával habüveg adalékanyagok esetén

3. téziscsoport: A habüveg adalékanyagos könnyűbetonok alakváltozással összefüggő jellemzői

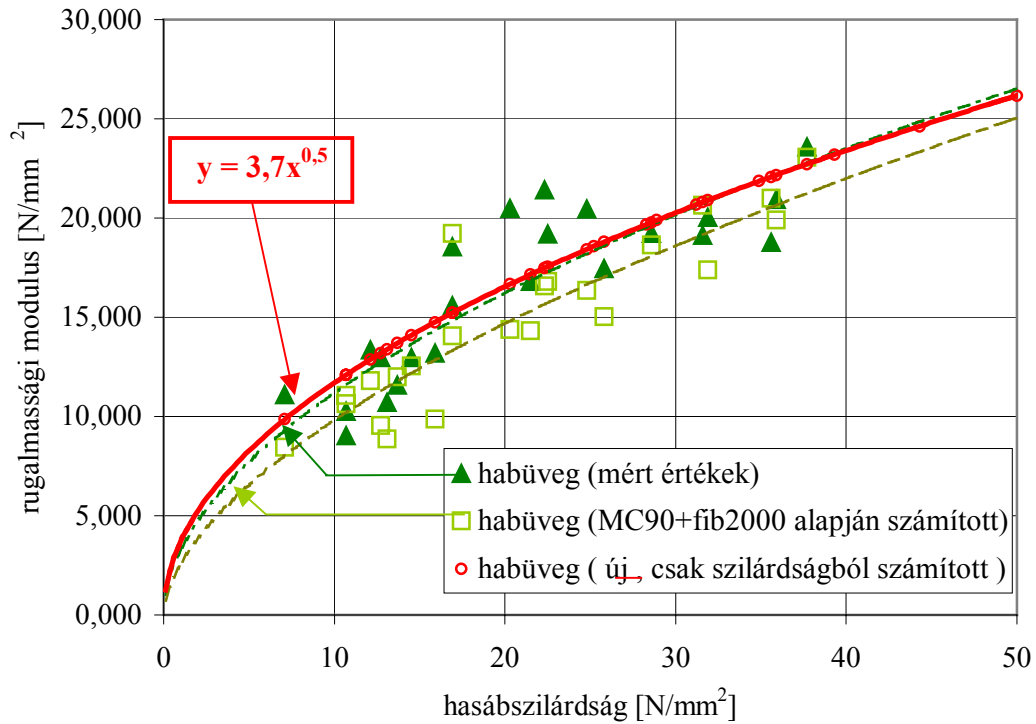
3.1. tézis

A szabványok lehetővé teszik a rugalmassági modulusnak a nyomószilárdságból való számítását (CEB-FIP MODEL CODE 1990). Könnyűbetonoknál a közönséges betonnál alkalmazott számítással kapott rugalmassági modulus értékét még egy, a testsűrűség alapján – országonként/szabványonként eltérő értékben meghatározott – csökkentő tényezővel kell beszorozni. A könnyűbetonok nyomószilárdsága jelentős mértékben függ a beton testsűrűségétől, ezért ebből közvetlenül is becsülhető a rugalmassági modulus (7.9. ábra). Kísérleti eredményeim alapján **új képletet javaslok (7.1. képlet) a habüveges szerkezeti könnyűbetonok rugalmassági modulusának nyomószilárdságból történő számítására az alábbiak szerint:**

$$E_m = 3,7\sqrt{f_{cm}^*} \quad (7.1.)$$

ahol: E_m : a rugalmassági modulus átlagértéke[N/mm²]

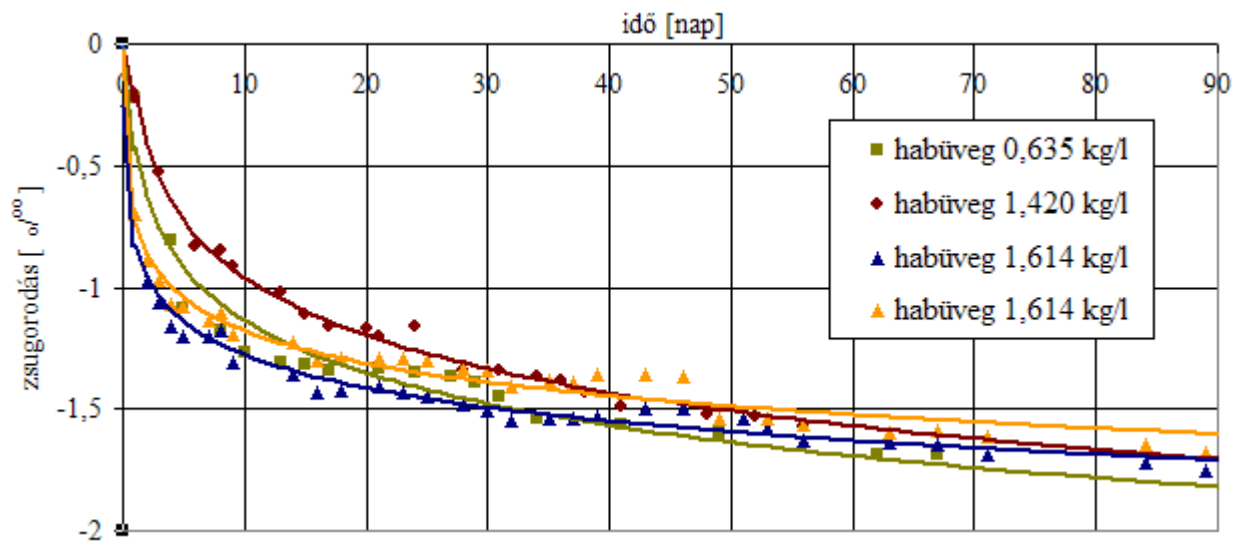
f_{cm}^* : a 120x120x360 mm-es álló hasábon mért nyomószilárdság átlagértéke[N/mm²]



7.9. ábra Habüveg adalékanyagok rugalmassági modulusa a nyomószilárdság függvényében (mért és számított értékek)

3.2. tézis

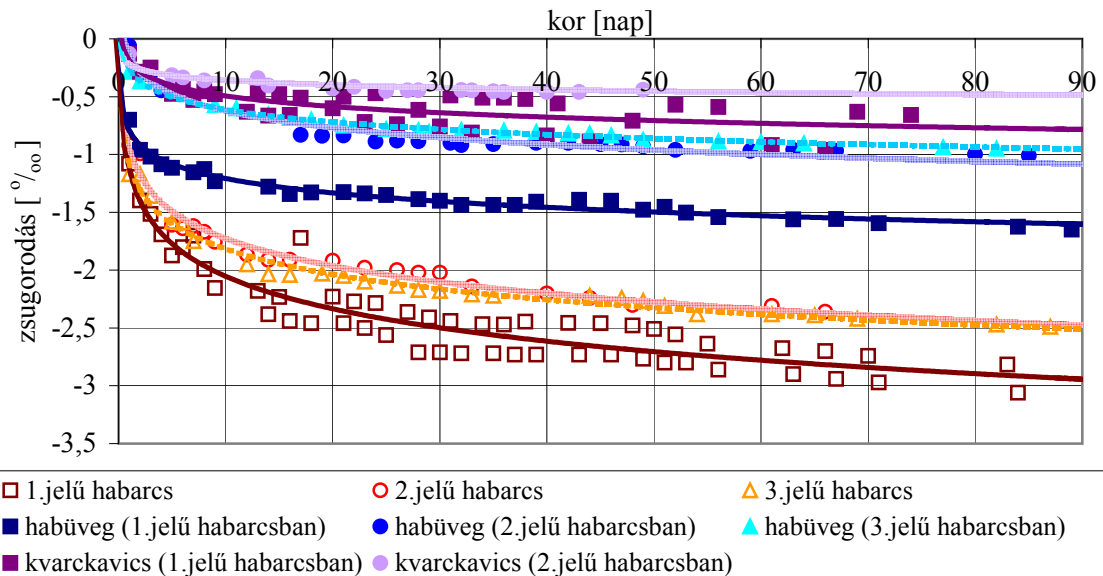
Kísérletileg igazoltam, hogy különböző szemcse-testsűrűségű habüveg adalékanyagokkal készített azonos habarcs összetételű és azonos könnyű adalékanyag tartalmú betonok zsugorodása közel azonos, tehát **a habüveg adalékanyagok zsugorodása független az adalékanyag szemcse-testsűrűségétől (7.10. ábra).**



7.10. ábra 1. jelű habarcsban 47 V% könnyű adalékanyag tartalmú betonok zsugorodása különböző szemcse-testsűrűségű habüveg adalékanyagok esetén

3.3. tézis

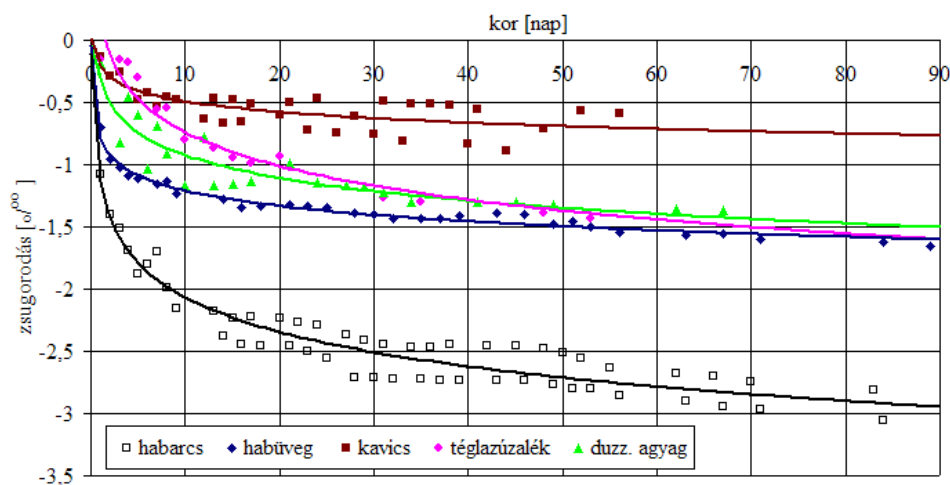
Kísérletileg igazoltam, hogy a **habüveg adalékanyagos könnyűbetonok zsugorodása** – hasonlóan a közönséges betonokhoz – **elsősorban a habarcs összetételétől függ, de a zsugorodás végértéke azonos habarcs alkalmazása esetén mintegy kétszerese a kvarckavics adalékanyagos betonénak (7.11. ábra).**



7.11. ábra Habüveg és kvarckavics adalékanyagos betonok zsugorodása különböző zsugorodású (1-3. jelű) habarcsokban 47 V% adalékanyag tartalom mellett

3.4. tézis

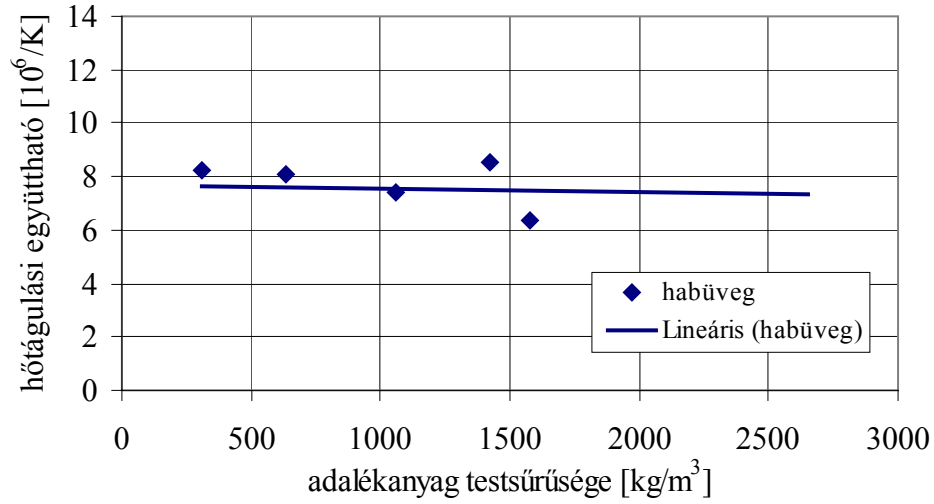
Kísérletileg igazoltam, hogy azonos habarcs alkalmazása esetén a **habüveg adalékanyagos könnyűbetonok zsugorodása azonos a többi általam vizsgált könnyű adalékanyagos (duzzasztott agyagkavics, téglazúzalék) betonok zsugorodásával (7.12. ábra).**



7.12. ábra Különböző adalékanyagokkal készült betonok zsugorodása (1. jelű habarcs, 47 V% adalékanyag tartalom)

3.5. tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy **habüveg adalékanyag alkalmazása esetén a könnyűbeton lineáris hőtágulási együtthatója független az adalékanyag szemcse-testsűrűségétől.** (7.13. ábra).



7.13. ábra A hőtágulási együttható változása különböző habüveg adalékanyagok esetén a szemcse-testsűrűség függvényében azonos adalékanyag adagolás és azonos habarcsösszetétel mellett

LIGHTWEIGHT CONCRETE MADE OF EXPANDED GLASS AGGREGATE

SUMMARY

of PhD Thesis by Rita NEMES

Structural concrete is the most important building material in structural engineering. Advantage of concrete is that it can be constructed on site in any shape and dimension providing high compressive strength. Disadvantage is the relatively high body density related to its high strength. However, body density can be decreased or strength can be increased considerably, tailoring the concrete properties. Lightweight aggregate concretes (LWAC) can be applied also for load bearing structures.

Lightweight aggregates can be natural or artificial bulk materials having bulk density less than 2000 kg/m^3 . By the development of economy and increasing production of consumer goods the amount of waste materials is increasing. Recycling of wastes has considerable importance both economically and environmentally. The role of construction industry in recycling is also important. Expanded glass lightweight aggregates are used for decades in the construction industry, however, only low strength, low density types were available up to now. New types of expanded glass lightweight aggregates having high compressive strength and particle densities are available nowadays in a wide range. Special surface covering provides high resistance in alkaline environment and low water absorbing capacity.

Expanded glass lightweight aggregate products of several manufacturers were studied in present PhD research. Material characteristics were analysed and compared to other lightweight aggregates, such as expanded clay, crushed brick or demolition waste. Reference studies on conventional sand and gravel were also carried out.

My experimental results give new information on the ratio between particle strength and particle density of expanded glass lightweight aggregates and on the influences of aggregate strength and volumetric ratio on the properties of lightweight concretes. My results make it possible to optimise the amount of aggregate taking into consideration the strength and density requirements. Influences of strength of cement stone and that of aggregate on the strength of lightweight concrete and on the failure modes were studied. Alkaline resistance of aggregates and water absorbing capacities were studied in details. Relationships between flexural strength and compressive strength of LWAC were analysed. Size effect of specimens was also studied.

Deformation capacity and Young's modulus of lightweight concrete is considerably different from that of normal concrete, caused by the lightweight aggregate. Detailed analysis is given on the Young's modulus of lightweight concrete covering literature review of code formulas, laboratory tests and numerical analysis, resulting in a newly developed formula for the estimation of Young's modulus of lightweight concrete. Shrinkage and thermal expansion of lightweight concretes were also studied for various concrete mixtures.

Present PhD thesis introduces specifications for the design and mixing of lightweight concretes as well as construction specialities. Possibilities for future applications are highlighted.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is köszönöm mindazoknak akik segítettek és támogatták munkámat.

Külön szeretnék köszönetet mondani

- a kísérletek során alkalmazott adalékanyagok biztosításáért
 - Hoffmann Lászlónak és a Geofil Kft.-nek (Geofil habkavics)
 - Gerhard Madlnak és a Solvadis Austria-nak (Poraver habkavics)
 - Kiss és Társa Kft.-nek (bontott téglá és beton)
- Falk Györgynek és Zsíros Józsefnek (Varinex Kft.) az adalékanyag vizsgálatokhoz használt szilikon sablon elkészítéséért
- Doroszlai Dénesnek (Sto Építőanyag Kft.) a műgyanata biztosításáért
- Gáspár Bélának (Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet) a speciális sablonok és kiegészítők elkészítéséért

- Kovács József Gábor laborvezetőnek (BME Polimertechnika Tanszék) a műgyanta és szilikon próbatestek készítésénél és vizsgálatoknál nyújtott segítségét
- Szegőné Kertész Éva laborvezetőnek (Cemkut Kft. Betonlabor) sablonok biztosításáért és az eredményes együttműködésért
- Tóth Juditnak (SZIKKTI) az elektron mikroszkópos vizsgálatokért
- Berényi Szabolcsnak, Fenyvesi Olivérnek, Gyömbér Csabának, Mayer Árpádnak és Varga Ákosnak a betonozások során nyújtott segítségért
- Damokos Ádámnak a rugalmassági modulus mérések során nyújtott segítségéért

- BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Anyagvizsgáló és Kőzetfizika laborjának minden dolgozójának, akik naponta segítettek munkámat

- Dr. Balázs L. György, Dr. Erdélyi Attila, Dr. Kausay Tibor és Dr. Ujhelyi János tanár uraknak a konzultációkért

- Dr. Borosnyói Adorjának, Gyömbér Csabának és Simon Tamásnak az irodalomgyűjtésért és fordításért

- a kísérletekhez nyújtott anyagi támogatásért
 - Geofil Kft.-nek
 - Dr. Gallus Rehm Alapítványnak

- a külföldi tartózkodásaimat lehetővé tevő
 - Pelegrinatio Alapítványnak
 - Bécsi Collegium Hungaricumnak
 - Johann Kolleger professzor úrnak (TU Wien, Institut für Tragkonstruktionen)

Végül nagyon köszönöm témavezetőmnek Dr. Józsa Zsuzsannának az éveken át nyújtott támogatását és szakmai segítségét.

SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Árpás E. – Emszt Gy. – Gálos M. – Kárpáti L. (2002) Los Angeles-vizsgálat az európai szabványosítás rendszerében *Építőanyag* 2002/4
- Balázs Gy. (1994) *Építőanyagok és kémia, Műegyetemi Kiadó, Budapest*
- Balázs Gy. (1996) *Beton és vasbeton III. Akadémiai Kiadó*
- Bergmeister, K. – Wörner, J.-D. (2005) *BetonKalender 2005 Fertigteile-Tunnelbauwerke, Ernst & Sohn*
- Beton – Baustoff des Jahrhunderts, Festschrift 100 Jahre Deutscher Betonverein 1898-1998. *Deutscher Betonverein E.V., Eigenverlag 1998*
- Bölcskei E. - Dulácska E. (1974) *Statikusok könyve – 9. fejezet: Könnyűbeton szerkezetek (Ujhelyi, Dulácska), Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974*
- Bramshuberm, W. (2000) *Architekten 1., Univesität Aachen*
- Briscoe, D. – Philpott, R. *A világ 100 építészeti csodája, Alexandra Kiadó*
- Dehn, F. – Holschemacher, K. (2001) *Selbstverdichtender Leichtbeton für den Brückenbau, Selbstverdichten Beton Innovationen in Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft, Bauwerk*
- Ducan, V. – Mladenovič A. – Šuput, J.S. (2002) *Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity Cement and Concrete Research 32*
- Dulácska E. (1995) *Kisokos - Segédlet tartószerkezetek tervezéséhez*
- Eibl, J. (1996) *BetonKalender 1996 Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer, Ernst & Sohn, Berlin*
- 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.*

- Faust, T. (2000a) Herstellung, Tragverhalten und Bemessung von konstruktivem Leichtbeton – Dissertation, *Universität Leipzig*
- Faust, T. (2000b) Properties of Different Matrixes and LWAs and their Influences on the Behaviour of Structural LWAC, *Proceedings of Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, 18-22 June 2000, Kristiansand, Norway*
- Faust, T. (2003) Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau, *Ernst&Sohn 2003*
- fib (1999) bulletin 4 Lightweight Aggregate Concrete - Codes and Standards –State-of-art report prepared by Task Group 8.1, *Sprint-Druck Stuttgart*
- fib (2000) bulletin 8 Lightweight Aggregate Concrete - Recommended extensions to Model Code 90 - Case studies, *Sprint-Druck Stuttgart*
- Grübl, P. – Klemm, K. (2000) Optimierte Betonzusammensetzung beim Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge, *Beton- und Stahlbetonbau 95, 2000, Heft 7*
- Józsa, Zs. – Ujhelyi, J. E. (2000) “Lightweight Aggregate Concrete in Hungary” *Proceedings of Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, 18-22 June 2000, Kristiansand, Norway*
- Hamann, H. (1953) Über die Druckfestigkeit von Leichtbeton *Betonstein-Zeitung 1953/9*
- Hiroaki, O. – Suzuki, K. – Ichinomiya, T. – Yamamma, M. (2004) Planning and design of a pedestrian bridge made of low shrinkage ultra-high-strength concrete (120 N/mm²): Akihabara Pedestrian Bridge, *Proceedings of fib Symposium 2004 – April 26-28 – Avignon (France)*
- Kausay T. (2002a) Könnnyübeton. *Beton X. évf. 10. szám 2002 október*
- Kausay T. (2002b) Könnnyü-adalékanyag. *Beton X. évf. 11. szám 2002 november*
- Kelemen M. (1995) Normál- és könnnyüadalékanyagós betonnal készült öszvérszerkezetű gyalogos hidak összehasonlító statikai vizsgálata *Diplomamunka Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest 1995*
- Kocsis G. (1994) A habüveg granulátum gyártási módszere, *Építőanyag 46. évf. 1994/2*
- Kollár L. (1997) Vasbetonszerkezetek I., *Műegyetemi Kiadó, Budapest*

- Laister, C. (2000) Vorspannung von vorgefertigten Leichtbetondecken, *Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2000* - Gröbl, P.: *Druckfestigkeit von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge*. In: *Beton*, 1979. Heft 3 alapján
- Machida, A. (1993) Stat-of-the-Art Report on Continuous Fiber Reinforcing Materials, *JSCE, Tokyo, 1993*
- Machida, A. (1997) Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fibre Reinforcing Materials, *JSCE, Tokyo, 1997*
- Mihailich Gy. – Haviár Gy. (1966) A vasbetonépítés kezdete és első létesítményei Magyarországon, *Budapest*
- Müller, H. S. – Haist, M. (2005) Pumpable Self Compacting Lightweight Concrete *Proceeding of fib Symposium Keep Concrete Attractive, 23-25 May 2005, Budapest, Hungary*
- Müller, H. S. – Haist, M. – Mechtcherine, V. (2001) Selbstverdichtener Leichtbeton mit Blähtonzuschlägen, *Selbstverdichten Beton Innovationen in Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft, Bauwerk*
- 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*
- Náray-Szabó J. (1967) Az üveg definíciója, *Építőanyag, XIX. évf. 1967. 7. szám*
- Neunast, A. – Lange, F. (2001) Leichtbeton Handbuch, *Verlag Bau + Technik*
- Neumann, M. – Reuschel, M. – Sahlman, H. (1998) Plattenbauten aus haufwerkporigem Leichtbeton – Beurteilungen · Baustoffe · Statik Berechnungsprogramm · Bauphysik · Sanierungskonzepte · Befestigungstechnik, *Werner Verlag Düsseldorf*
- Német F. (2002) Üvegbeton – dokumentálás és kivitelezés – Technológia Norvégiából, *Beton X. évf. 10. szám 2002 október*
- Nevill, A. M. (1995) Properties of Concrete, *Longman Group Limited 1995*
- Orlowsky, J. – Raupach, M. Tensile Tests to Study the Long-term Behaviour of Textile Reinforced Concrete *Proceeding of 1st International Symposium Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration, Eds.: La Tegola, A. – Nanni, A., 6-9 June 2004, Lecce*
- Reinhardt, H. W (1993) Werkstoffe im Bauwesen, *Universität Stuttgart 1993/94 WS*

- Romić, S – Lazić M. (1985) Armirani lakoagregatni beton *IRO Gradevinska knjiga, Beograd*
- Rudnai, Gy.(1966) Leichtbeton Baukonstruktionen *Akadémiai Kiadó*
- Schorn, H. – Butler, M. (2004) Long term Bending tests on glass fibre reinforced concrete specimens, *Proceeding of 1st International Symposium Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration, Eds.: La Tegola, A. – Nanni, A., 6-9 June 2004, Lecce*
- Scholz – Hiese (1999) Baustoffkenntnis 14. Auflage, *Werner Verlag 1999*
- Sobó J. (1898) Középítéstan I. *Országos Erdészeti Egyesület*
- Talabér J. – Borján J. – Józsa Zs. (1979) Betontechnológiai paraméterek hatása a roncsolásmentes szilárdságbecslő összefüggésekre, *Közlekedési Dokumentációs Vállalat Budapest*
- Ujhelyi J. (1959) Mesterséges adalékanyagok felhasználásával készülő könnyűbetonok technológiájának kidolgozása *ÉTI-jelentés 6. Budapest, 1959*
- Ujhelyi J. (1960) A könnyűadalékos beton fajtái összetételének tervezése és a beton készítése, (Mérnöki Továbbképző Intézet 3797), *Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1960*
- Ujhelyi J. (1995) Műszaki előírás – Beton és vasbeton készítése (MÉÁSZ ME-04.19:1995) 14. fejezet – Könnyűbetonok, *Magyar Építőipari Szövetség, Budapest, 1995*

www.geofil-bubbles.com

www.kukabuvar.hu/kukabuvar/kb30/kb30_23.html

FELHASZNÁLT SZABVÁNYOK ÉS IRÁNYELVEK

ACI 318-95 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-95) and Commentary -ACI 318 RM-95

ASTM C 151-89 Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement

BBK 94 Concrete Structure (Sweden)

CEB-FIP (1993) CEB-FIP MODEL CODE 1990, Thomas Telford Services Ltd. 1993

CUR Rec. 39: CUR Recommendation Aanbereling 39 Beton met grove lichte toeslagmaterialen – Redactionele bijlage bij cement 1994 nr. 718 (Hollandia)

DAfStb (1986) “Recommendation for checking the alkali-aggregate reaction in concrete” (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie Alkalireaktion im Beton (12/86))

DIN 1045-1 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton

DIN 1052-1 (10.96) Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung

DIN 4028 : 1982 Stahlbetondielen aus Leichtbeton mit Haufwerkporigem Gefüge, Anforderungen, Prüfung, Bemessung, Ausführung, Einbau

DIN 4219 T.2. Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge 1979 Teil 2 Bemessung und Ausführung

DIN 53454 Prüfung von Kunststoffen, Druckfersuch

EN 206-1 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, 2000

EN 1097-6 : 2000 Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption

EN 1992-1-4 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings

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

ENV 1992-1-4 : 1994 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-4: General rules – Lightweight aggregate concrete with closed structure 1994

JSCE Chapter 19. Lightweight Aggregate Concrete 1986 Revised 1996 (JSCE: Japan Society of Civil Engineers)

MÉÁSZ ME-04.19 : 1995 Beton és vasbeton készítése

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

MSZ 4715-4 : 1987 Megszilárdult beton vizsgálata. Mechanikai tulajdonságok roncsolásos vizsgálata

MSZ 4719 : 1982 Betonok

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

NS 3473 Concrete structures Design rules 5th edition 1998 (Norveg)

NZS 3103 : 1995 Concrete Structure Standard Part 1: The Design of Concrete Structure (New Zealand)

A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓI A TÉMAKÖRBE

- 2001 Nemes R.** – Gyömbér Cs. „Könnnyűbeton adalékanyagok összehasonlító vizsgálata”, BME Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest, 2001. november 14., OTDK Műszaki Tudományi Szekció, Debrecen, 2003. április 15-17. 28 p. – Kivonat: *XXVI. Országos Tudományos Diákköri Konferencia Műszaki Tudományi Szekció Tartalmi kivonatok* Debreceni Egyetem Műszaki Főiskolai Kar, Debrecen 2003 p. 134 ISBN 963 472 731 X
- 2002 Nemes R.** „Hulladékfelhasználás könnyűbetonokban”, IV. Határon Túli Műszakis Magyar Diákok Tudományos Diákkonferenciája, Temesvár (Románia), 2002. május 17-19. 19 p. – Kivonat: p. 15
- Józsa, Zs.– **Nemes, R.** „Recycled Glass Aggregate for Lightweight Concrete”, *Journal of Concrete Structures*, 2002, pp. 41-46. ISSN 1419 6441
- Józsa, Zs. – **Nemes, R.** “Bond of a New Recycling Glass Lightweight Aggregate”, *Proceeding of 3rd International Symposium on Bond in Concrete – From Research to Standards*, Eds.: Balázs – Bartos – Cairns - Borosnyói, 20-22 November 2002, Budapest, pp. 420-427. ISBN 963 420 714 6
- 2003 Hoffmann L.** – Józsa Zs. – **Nemes R.** „Üveghulladékból könnyűbeton adalékanyag”, *Építőanyag 55. évf. 2003. 1. szám*, pp. 13-17. ISSN 00 13-970x
- Erdélyi A. – **Nemes R.** „A beton tartóssága, új szilárdsági és konzisztencia osztályok az MSZ EN 206-1:2002 szerint”, *Építési Piac XXXVII. évf. 2003/3. szám*, pp. 20-25 ISSN 1218-0084
- Hoffmann L. – Józsa Zs. – **Nemes R.** „Üveg egy kicsit másképp”, *Építési Piac XXXVII. évf. 2003/5. pp. 51-52. ISSN 1218-0084*
- 2004 Nemes R.** „Hulladékok felhasználásával készült könnyűbetonok zsugorodása” *Anyagvizsgálók Lapja* 2004. 1. szám pp. 6-7. ISBN 1215-8410
- Fenyvesi, O. – Gyömbér, Cs. – **Nemes, R.** – Józsa, Zs. “Adalékanyagok könnyűbeton roncsolásmentes vizsgálata”, *Konferencia kiadvány ÉPKO 2004 – Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*, Szerk.: Köllő G., 2004. június 3-6., Csíksomlyó, (Románia) pp. 106-112. ISBN 973-86852-1-4
- Józsa, Zs. – **Nemes, R.** “An Innovative Material from Recycled Glass to Lightweight Concrete”, *Proceeding of 1st International Symposium Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration*, Eds.: La Tegola, A. – Nanni, A., 6-9 June 2004, Lecce, (Olaszország) pp. 229-240. ISBN 88-207-36780

- Nemes, R.** “Expanded glass pellets as an aggregate for lightweight concrete”, *Proceeding of 5th International PhD Symposium in Civil Engineering*, Eds.: Walraven – Blaauwendraad – Scarpas – Snijder, 16-19 June 2004, Delft, (Hollandia) pp. 679-685. ISBN 9058096769
- Nemes, R.** – Józsa, Zs. “Betonul ușor – însemnătate și scurt istoric” – „The History and Significance of Lightweight Concrete” – „A könnyűbeton története és öröksége”, *Konferencia kiadvány Történeti Tartószerkezetek 8. Tudományos Ülésszak – Történeti Tartószerkezetek Öröksége*, Szerk.: Kirizsán I. – Szabó B., 2004. október 27-30., Kolozsvár (Románia), pp. 134-141 ISBN 973-9377-38-6
- 2005** Kollegger, J – **Nemes, R.** – Preisinger, C. – Kratochvill, A. – Torghele, H. „Reinforced concrete shells without formwork - a new approach to the construction of RC – shells” *Proceeding of fib Symposium Keep Concrete Attractive* Eds.: Balázs, L.Gy. – Borosnyói, A., 23-25 May 2005, Budapest, Hungary pp. 217-222. ISBN 963 420 838 X
- BV-MI 01:2005 (H)”Beton- és Vasbetonépítési Műszaki Irányelv, Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával” Kidolgozta és kiadta a *fib* Magyar Tagozatának Műszaki Irányelv Bizottsága (A Szakértői Bizottság elnöke: Kausay T., tagjai: Alvincz A., Boromissza T., Deres Sz., Dubrovsky G., Erdélyi A., Fejes I., Hikisch L., Karsainé L. K., Kiss P. B., Liptay A., **Nemes R.**, Pankhardt K., Rác K., Somogyi G., Tápai A., Vadász E., Várkonyi E., Várkonyi G. 120p ISBN 963 420 846 0
- 2006** **Nemes, R.** – Józsa, Zs. „Strength of Lightweight Glass Aggregate Concrete”, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering (USA)* (megjelenés alatt)

Az értekezés témakörében elhangzott előadások (kiadvány nélkül)

- Nemes R.** „Eigenschaften von Leichtbetonzuschlag aus rezykliertem Altglas”, Hochschulkolloquium Werkstoffe im Bauwesen, Budapest, 2002. március 20-22.
- Nemes R.** „Recycled Glass Aggregate for Lightweight Concrete” *fib* TG 9.3 meeting 22-23 November 2002, Budapest
- Nemes R.** – Paláncz B. “Csiszolati minták morfológiai elemzése” BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, Tanszéki szeminárium 2003. május 14.

Nemes R. „Könnýű-adalékanyagok tervezési kérdései” Tudományos ülészak Palotás László születésének 100. évfordulójára, Budapest, 2005. január 26-27.

Nemes R. „Könnýű-adalékanyagok tervezése” Szilikátipari Tudományos Egyesület, Beton Szakosztályi Ülés, Budapest, 2005. május 12.

Az értekezés témakörében a közreműködésemel készült kutatási jelentések

Kutatási jelentés – Geofil habkaviccsal végzett kísérletekről, Hulladéküveg újraháznosítás hő- és hangszigetelő építőipari szerkezeti elem, gyártástechnológiai és alkalmazástechnikai fejlesztés, OM Környezetvédelmi műszaki-fejlesztési pályázata 00053/2000 (Témafelelős: Dr. Józsa Zsuzsanna) 2001-2002

Tanulmány – Új páncélszekrény töltet kifejlesztése könnyűbetonból (Témafelelős: Dr. Balázs L. György) 2002

Kutatási jelentés – Geofil habkavics anyagú könnyűbeton, OM Kutatás-fejlesztési Helyettes Államtitkárság pályázata ALK-00199/02 (Témafelelős: Dr. Józsa Zsuzsanna) 2003-2004