



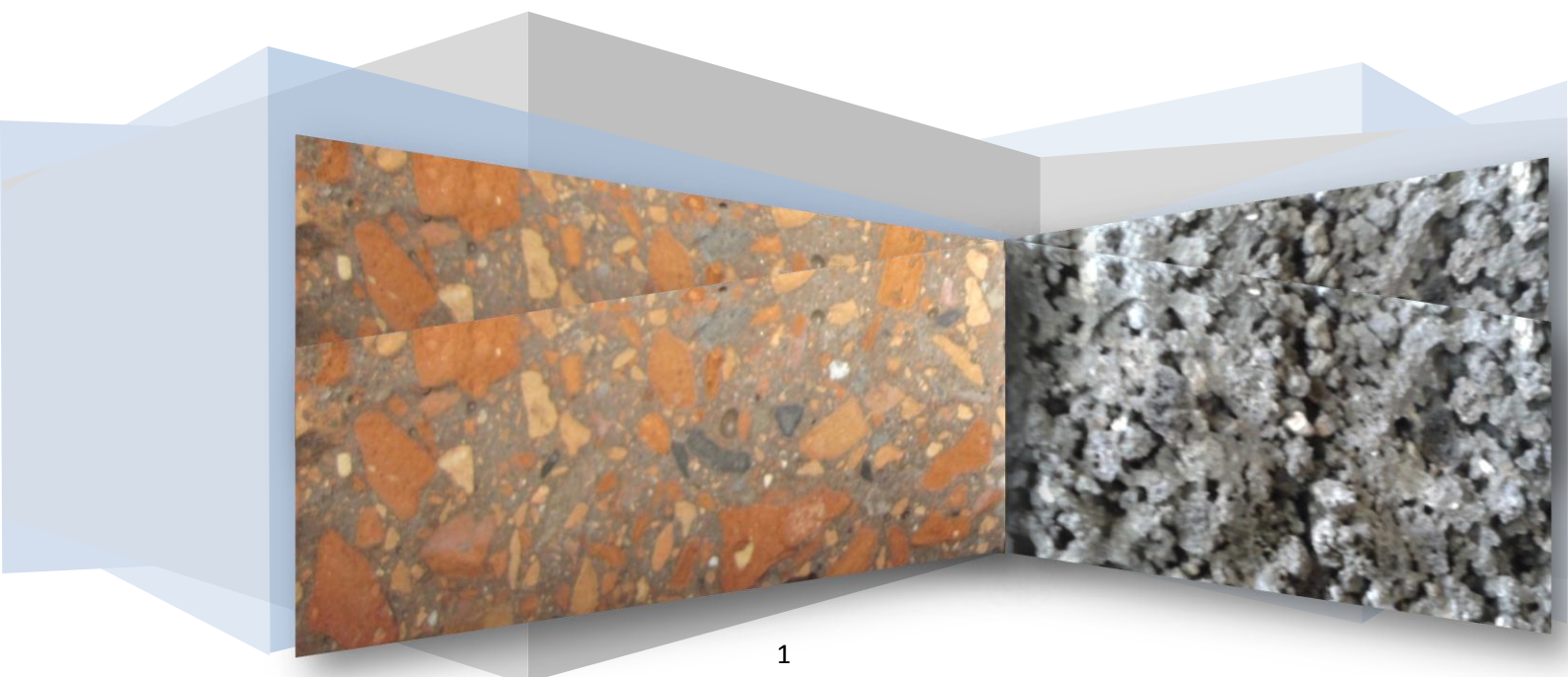
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar

Könnyűbeton előregyártott hídszerkezeti elemekhez

Tudományos Diákköri Konferencia 2013.

Készítette: Kenéz Ágnes, Kovács Éva, Rác Annamária

Konzulens: Dr. Fenyvesi Olivér adjunktus



Tartalomjegyzék

Jelölések és rövidítések-----	2
Fogalom-meghatározások-----	2
1. fejezet: Bevezetés-----	3
1.1. Kutatási téma bemutatása, célkitűzések-----	3
1.2. Szakirodalmi áttekintés-----	3
2. fejezet: Felhasznált anyagok és kísérleti módszerek -----	6
2.1. Adalékanyagok fajtái és jellemzői -----	6
2.1.1. Duzzasztott agyagkavics-----	6
2.1.2. Kohósalak-----	6
2.1.3. Téglazúzalék-----	7
2.2. Kiegészítő anyagok -----	7
2.2.1. Szilikapor -----	7
2.2.2. Metakaolin -----	7
2.3. A folyósító adalékszer általános jellemzői-----	8
2.4. Cement általános jellemzői -----	8
2.5. Laboratóriumi kísérletek -----	10
2.5.1. Adalékanyag vizsgálatok -----	10
2.5.1.1. Szemrevételezés -----	10
2.5.1.2. Szemeloszlás -----	12
2.5.1.3. Halmazszilárdság-----	13
2.5.1.4. Halmazsűrűség-----	13
2.5.1.5. Vízfelvétel-----	13
2.5.1.6. Szemcse-testsűrűség -----	14
2.5.2. Könnyűbeton vizsgálatok-----	14
2.5.2.1. Konzisztencia -----	14
2.5.2.2. Frissbeton testsűrűség -----	16
2.5.2.3. Szilárdságvizsgálatok -----	16
2.5.2.4. Víztartalom-----	18
2.6. Könnyűbeton összetétel tervezés-----	18
2.7. Próbatetek készítése és tárolása -----	19

3. fejezet: Vizsgálati eredmények és értékelésük	21
3.1. Adalékanyag vizsgálati eredmények	21
3.1.1. Szemeloszlás	21
3.1.2. Halmazsűrűség	22
3.1.3. Vízfelvétel	22
3.1.4. Szemcse-testsűrűség	23
3.1.5. Halmazszilárdság	24
3.2. Frissbeton	26
3.3. Megszilárdult beton	27
3.3.1. Nyomószilárdság vizsgálati eredmények	27
3.3.2. Hajlító-húzó szilárdság vizsgálati eredmények	35
4. fejezet: Összefoglalás	37
Köszönetnyilvánítás	39
5. fejezet: Szakirodalmi hivatkozások	40
Függelék	42

Jelölések és rövidítések

DA	duzzasztott agyagkavics
DIN	Deutsches Institut für Normung (magyarul: Német Szabványügyi Intézet)
HSC	high-strength concrete = nagyszilárdságú beton
KS	kohósalak
LWA	lightweight aggregate = könnyűbeton
LWAC	lightweight aggregate concrete = könnyű adalékanyagos beton
MK	metakaolin
MSZ	Magyar Szabvány
PS	polisztirol
SCC	self-compacting concrete = önterülő/öntömörödő beton
SZP	szilikapor
TZ	téglazúzalék

Fogalom-meghatározások

Könnyű adalékanyag (lightweight aggregate, LWA): természetes vagy mesterséges porózus szemhalmaz, melynek szemcse-testsűrűsége nem több mint 2000 kg/m^3 , laza állapotban mért halmazsűrűsége pedig nem haladja meg az 1200 kg/m^3 -t. [9]

Könnyűbeton (lightweight aggregate concrete, LWAC): könnyű adalékanyagból készült, kiszáritott állapotban 2000 kg/m^3 -nél kisebb testsűrűségű beton. [12]

Nagyszilárdságú beton (high-strength concrete, HSC): MSZ 4798-1:2004 szabvány szerint C55/67 – C100/115 közötti nyomószilárdsági osztályú közönséges beton, a HC55/67 – HC100/115 közötti nehézbeton, illetve az LC55/60 – LC80/88 közötti nyomószilárdsági osztályú könnyűbeton. A gyakorlatban a $60\text{--}130 \text{ N/mm}^2$ közötti átlagos nyomószilárdsági értékű betont nevezzük nagyszilárdságú betonnak. [14]

Granulált kohósalak: nagyolvasztók mellékterméke, nyersvas termelésekor keletkező szilikátolvadék hideg vízzel való hűtésével állítják elő. [9]

Duzzasztott agyagkavics: a bányászott agyagot magas hőfokon (1200 °C) égetik. Ennek következtében a benne lévő szerves anyagok elégnék, az agyagdarab felfújódik. A duzzadt térfogat az eredeti két-nyolcszorosa is lehet. Az így keletkező anyag kerek alakú, barnás színű, belül porózus, kívül klinkeres. [16]

Téglazúzalék: hulladék téglát a megadott/kívánt szemnagyságra zúzva. Különböző téglafajtákból készülhet, tartalmazhat habarcsot (saját kísérleteinknél kis méretű tömör téglát használtunk, mely tartalmazott habarcsot is). [12]

1. fejezet: Bevezetés

1.1. Kutatási téma bemutatása, célkitűzések

A közönséges beton egyik hátránya a nagy önsúly. Hídszerkezetek esetében az önsúlyból származó teher teszi ki a terhelés nagy részét, ezért előnyös minél kisebb súlyú elemek alkalmazása. A tanszéken folyó könnyűbeton hídgerenda kutatási projekthez kapcsolódtunk. A projekt során főleg duzzasztott agyagkavics került felhasználásra. Gazdaságossági és környezetvédelmi szempontokat figyelembe véve inkább a kohósalak és a téglazúzalék adalékanyagú betonokat részesítettük előnyben.

Az általunk tervezett betonreceptúrákból készített könnyűbetonok három különböző adalékanyagot tartalmaztak: duzzasztott agyagkavics, granulált kohósalak, és téglazúzalék. Gazdasági és környezetvédelmi szempontok figyelembevételével az utolsó két adalékanyagot előnyösebb alkalmazni betonkeverék elkészítéséhez, mivel azok ipari melléktermékek, míg a duzzasztott agyagkavics előállítás nyersanyag- és energiaigényes. Éppen ezért törekedtünk a kohósalak és a téglazúzalék adalékanyagú könnyűbetonok esetében is minél nagyobb szilárdság elérésére.

A beton nyomószilárdságát nagyban befolyásolja az adalékanyag halmazszilárdsága és a habarcs szilárdsága, testsűrűsége, a finomrész mennyisége a keverékben, illetve a beton testsűrűsége. Ezért először az adalékanyagok fizikai tulajdonságait vizsgáltuk (vízfelvétel, halmazszilárdság, halmazsűrűség, szemcse-testsűrűség, szemeloszlás). Ezután állítottuk össze a betonkeverékeket, melyek testsűrűségét mértük és számítottuk, konzisztencia vizsgálatokat végeztünk, majd a megszilárdult próbatesteken nyomó/hajlító-húzószilárdsági vizsgálatokat végeztünk.

A szilárdsági, testsűrűségi eredmények alapján megállapítható, hogy milyen szerkezeti elem gyártásához használhatóak. A cél az volt, hogy olyan szilárdságú könnyűbetont állítsunk elő, amiből előregyártott hídszerkezeti elemek gyártása lehetséges, illetve, hogy kísérleti eredményekkel bizonyítsuk, hogy a könnyűbetonok fő profilja nem csak a hőszigetelés, emellett más, előnyös tulajdonságaik is hasznosak lehetnek.

1.2.Szakirodalmi áttekintés

A könnyűbetonoknak pórusképzés szerint három főcsoportja van: egyszemcsés könnyűbeton, pórusbeton, illetve adalékanyagok könnyűbeton [9]. Az első két típusú betonból nehezen állítható elő nagyszilárdságú beton, ezért mi kizárólag adalékanyagok könnyűbetonokat készítettünk. A nagy szilárdság elengedhetetlen, ha hídépítéshez használható betont szeretnénk kifejleszteni.

A könnyűbetonok összetételének tervezése különbözik a közönséges betonokétól. Ennek oka, hogy a könnyű adalékanyagok vízfelvétele jelentős, így azok vízigényét is bele kell kalkulálni a vízadagolásba. Ezen kívül a könnyűbeton adalékanyagok testsűrűsége nem mindig egyezik meg. Ilyenkor térfogatosan kell a szemeloszlást megtervezni.

Ujhelyi (1960) a könnyűbetonok tervezésére illetve előállítására vonatkozólag a következő szabályokat állapította meg: ha az adott adalékanyag halmazszilárdsága (önszilárdsága) növekszik, akkor azonos tömörítés mellett növekszik a könnyűbeton nyomószilárdsága és testsűrűsége. A könnyűbeton nyomószilárdságát azonos betonösszetétel esetén az adalékanyag halmazsűrűsége és a beton testsűrűsége együttesen határozza meg. Általában nagyobb mennyiségű finomrészre van szükség, mint közönséges beton esetében. A legkedvezőbb 0-1 mm finomrész tartalom–adalékanyag fajtától függően – 20-50 tömegszázalék. A testsűrűség/nyomószilárdság viszony azonos betonösszetétel mellett akkor a kedvezőbb, ha az adalékanyag finomrész tartalma kevés, nagyobb készítési testsűrűség mellett akkor, ha az adalékanyag finomrész tartalma, 0-1 mm-es frakciók mennyisége nagyobb. Nagyobb szilárdságú könnyűbetonok esetében adott tömörítési mód mellett a vízadagolásnak határozottan kimutatható optimuma van. Azonos nyomószilárdságú könnyűbetonok testsűrűsége csökken a cementadagolás növelésével, mely alól kivételt képeznek a kis halmazsűrűségű adalékanyaggal készített könnyűbetonok, amelyeket 300-800 kg/m³ készítési testsűrűség között csak egyetlen cementadagolással lehet a legkedvezőbb nyomószilárdságúra készíteni. Könnyűbetont kényszerkeverőgépből kell keverni, és minél hosszabb ideig, de legalább egy hétig nedvesen kell tartani. [1]

Malajziában ipari szemétnek számít a kókuszhéj, melynek nagyszilárdságú könnyűbeton adalékanyagként való felhasználását javasolták. A 28 napos mérési eredmények alapján a mészkőporral vagy anélkül kevert betonok nyomószilárdságának minősítési értékei 38-43 MPa, a száraz testsűrűség 1870-1990 kg/m³volt. Ezen betonok vízfelvétele 3,1 m% és 6,2 m% között változik, ami kiválónak mondható.[2]

Yang et al. (2010) kutatásai azt mutatták, hogy az alkáli-aktivált kötőanyagot tartalmazó beton nyomószilárdsága erősen visszaesett, ha a finomszemcséjű, könnyű adalékanyag túllépi a 30 térfogatszázalékot. Minél nagyobb a víz-cement tényező, annál nagyobb a csökkenés.[3]

Chen és Liu (2008) kutatásai alapján a kohósalak, mint kötőanyag, és a szilikapor számottevően javítja a betonkeverék korai és késői szilárdságát. A szilikapor ezenkívül akadályozza a szétosztályozódást, viszont a beton szívósságát csökkenti. A kohósalak alkalmazása mind a szívósság, mind a szilárdság szempontjából előnyös. Ebből következően a két vizsgált kiegészítő anyag kombinációját ajánlják könnyűbeton előállításához.[4]

A téglazúzalék nagy vízfelvevő képessége miatt jelentős a belső utókezelő hatás. Ez lassítja a kezdeti zsugorodást, ezzel csökkenti a kötési, zsugorodási repedés érzékenységet, és növeli a beton szilárdságát. Ezt a feltevést számos kutatás alátámasztja, köztük Suzuki et al. (2009) által végzett mérések.[5]

A szerkezeti könnyűbeton kategória határai vitatottak, több kutatás készült ebben a témában, többek között Bogas et al. (2013) azt a következtetést vonták le, hogy az 1200 kg/m^3 -nél nagyobb testsűrűségű könnyűbetonból lehet szerkezeti betont készíteni. E sűrűségi érték alatti betonok pórustartalma túl nagy, ezért a szilárdságuk nem megfelelő, leginkább hőszigetelésként érdemes felhasználni az ilyen típusú betonokat. [6] Ezen kívül az 1600 kg/m^3 -es határ is elterjedt. [24] A lényeg, tehát, hogy a 2000 kg/m^3 testsűrűséget minél jobban megközelítsük, de ne lépjük túl.

Az Egyesült Államokban és Kanadában több mint 50 éve készítenek könnyű adalékanyagos betonból hidakat (pl. Napa folyó híd, Amerika), Európában már az 1960-as évektől (pl. közúti híd a Rajnán, Köln; Négynyílású híd, Belgium; Tricastin híd, Franciaország, New Eindsvoll híd Norvégia, etc.). Ezeknél a hidaknál az önsúly-megtakarítás akár 30%-os is lehet, a betonacél megtakarítás elérheti a 17%-ot, így a relatív anyagköltséget figyelembe véve a teljes megtakarítás kb. 15%. A tapasztalatokból kiindulva a 28 napos kockaszilárdság karakterisztikus értéke $39\text{--}73 \text{ N/mm}^2$ közötti érték duzzasztott agyagpala adalékanyagú betonnal.[7]

A nagyszilárdságú öntömörödő könnyűbetonok mechanikai és tömörödési tulajdonságait Choi et al. (2006) kutatta. A könnyűbetonok e típusánál (zúzott riolittufa az adalékanyag), a 28 napos nyomó és hasító szilárdság közötti kapcsolat lineáris. Ezenkívül az eredmények azt mutatták, hogy ha a beton adalékanyagának 75%-a könnyű adalékanyag, akkor csak 6%-kal esik vissza a szilárdság a közönséges betonhoz képest, míg 100%-os könnyű adalékanyag tartalom esetén már 31%-ot esik a szilárdság.[12]

A közönséges betonból készített nagyszilárdságú vasbetonszerkezetek sok kényes tulajdonsággal rendelkeznek. Ez leginkább a keverékekhez adott kiegészítő anyagok miatt van.

Ennek a problémának a megoldása lehet, ha ezeknek az anyagoknak a felhasználása nélkül tudunk nagyszilárdságú betont előállítani.[23]

2. fejezet: A felhasznált anyagok és kísérleti módszerek

2.1. Adalékanyagok fajtái és jellemzői

2.1.1. Duzzasztott agyagkavics

Az agyagot magas hőfokon (1200 °C), forgócsöves kemencében égetve a benne levő szerves anyag kiég, a keletkező gázok hatására az agyagkavics megduzzad. A duzzadt térfogat az eredeti két-nyolcszorosa is lehet. A szilárd külső klinker burkolat belsejében pórusos belső szerkezet jön létre, s a közel gömbalak (1. ábra) nagy halmazsilárdságot eredményez (2-10 N/mm²). [16]



1.a ábra

Duzzasztott agyagkavics, ömlesztve



1.b ábra

Duzzasztott agyagkavics, zsákban

2.1.2. Kohósalak

Nagyolvasztók mellékterméke, nyersvas előállításakor keletkezik. Ha a folyékony nagyolvasztó salakot 1-7cm vastagságú rétegekben nagyméretű ágyba öntik, és egyenletesen, lassan (8-10 napig) hagyják lehűlni, akkor darabos kohósalakot nyernek. Ennek szerkezete tömör, és a hűtés során az önsúly-nyomás hatására átkristályosodik. Ebből töréssel és osztályozással beton-adalékanyag állítható elő. (2.ábra) [9]



2. ábra

Kohósalak: durva és finom frakció



3. ábra

Téglazúzalék 8-16 mm-es frakció

2.1.3. Téglazúzalék

Épületek bontásakor keletkező téglahulladék a kívánt méretre zúzva. Kísérleteink során kisméretű tömör téglából készült, habarcsot is tartalmazó téglazúzalékot alkalmaztunk. A téglazúzalék tulajdonságait meghatározza a téglá minősége, amelyből a zúzalékot előállítottuk. Az általunk felhasznált téglá átlagos nyomószilárdsága 32 N/mm^2 . A téglatörmelék anyaga általában igen változó minőségű, a belőle készített beton egyenletessége sem érhető el egykönnyen. [1] (3.ábra)

2.2. Kiegészítő anyagok

2.2.1. Szilikapor

Puccolános tulajdonságú, aktivizáló, amorf, kvarc anyag, a (félfém) szilícium és a szilíciumötvözetek gyártásánál keletkező por formájú melléktermék. A szemek gömb alakúak, átlagos nagyságuk: $0,1-0,3 \mu\text{m}$, a cementszemcsék átlagos szemnagyságának nagyjából a fele. A beton szulfát- és kloridállóságát javítja, illetve csökkenti a vízáteresztő-képességét, növeli a beton tapadó képességét az acélbetétekhez és az alapréteghez. Fontos figyelembe venni, hogy a kedvező tulajdonságai nem a kezdeti szakaszban, hanem később érvényesülnek, viszont 2 év elmúltával hatása újból elhanyagolhatóvá válik. [10]

Az általános gyakorlatban a cementkő és az adalékanyag határfelületi kapcsolatának javítására kiegészítő anyagként mikroszilikátot alkalmazhatunk, szilikapor vagy szilika szuszpenzió formájában. (5. ábra). A finom mikroszilika szemcsék kitöltik a cementkő pórusüregeit, így a betont tömörebbé, külső hatásokkal szemben ellenállóbbá teszik. A szilikapor adagolása a szilárdulás első három napjában a beton nyomószilárdságára alig van hatással. Nagyszilárdságú betont (C70/85

nyomószilárdsági osztály felett) szilikapor vagy egyéb finomrész tartalom növelés nélkül általában nem lehet készíteni.

A nagyszilárdságú beton nyomószilárdsága egyaránt függ a víztartalomtól és a szilikapor tartalomtól. Minél nagyobb nyomószilárdságú betont kívánunk előállítani, annál kisebb v/c tényezőt és több szilikaport célszerű alkalmazni. A maximális adagolás 11 tömegszázalék a cement tömegére vonatkoztatva. Ezt a mennyiséget azért nem lehet meghaladni, mert ha túl sok Ca(OH)_2 -ot köt meg a szilikapor, akkor a posztoporlandit keletkezése miatt a beton szétesik, szilárdságát már nem növeli a szilikapor, a beton elveszti a lúgosságát, ami a betonacélok korróziójához vezet. [13] Chen és Liu is a szilikaport ajánlja nagyszilárdságú betonok készítéséhez.[4]

2.2.2. Metakaolin

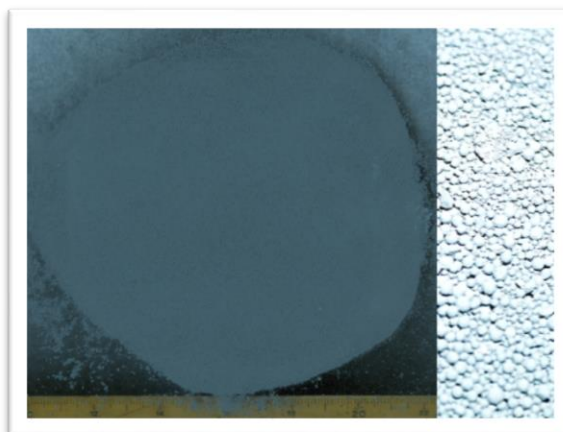
A metakaolint természetes kaolinból, 450-800°C hőmérsékleten, zsugoröntéssel állítják elő. Puccolános aktivitása a szilikaporénak mintegy kétszerese. [10] Átlagos szemnagysága az őrlésfinomságtól függően a szilikapor és a cement szemnagysága (3-30 μm) között helyezkedik el. A metakaolinnak a 99,9 %-a kisebb szemnagyságú, mint 16 μm , így kitölti a betonban lévő apró hézagokat. Hatása a beton korai és végső nyomó- és hajlítószilárdságára, valamint az áteresztőképességére jelentős (pl.: kloridion). Ezenkívül csökkenti a kivirágzás lehetőségét, a zsugorodást, javítva a bedolgozhatóságát, így a beton tömörebb szerkezetű. További előnye, hogy jobb végső megjelenést ad a betonfelületnek, növeli a beton testsűrűségét, fokozza a beton tartósságát. [8]

2.3. A folyósító adalékszer általános jellemzői

Az általunk alkalmazott adalékszer az MSZ EN 934-2: t 3.1/3.2 szabvány szerint, poliéter-karboxilát alapú, nagy teljesítményű folyósító szer (4. ábra), magas szilárdanyag tartalmú vizes oldat, mellyel sokkal jobb reológiai tulajdonság érhető el. [20] Alkalmazható öntömörödő (SCC) betonok és nagy teljesítőképességű betonok gyártásánál is. A segítségével kisebb az esély a szétosztályozódásra, gyorsabb a szilárdulási ütem, kisebb kizsaluzási idő érhető el, csökken a zsugorodási hajlam, kisebb v/c alkalmazható azonos konzisztencia eléréséhez. Ajánlott adagolás közönséges beton esetén a kötőanyag tömegének 0,2-0,7 tömegszázaléka. [15]



4.ábra
Folyósítószer kimérése

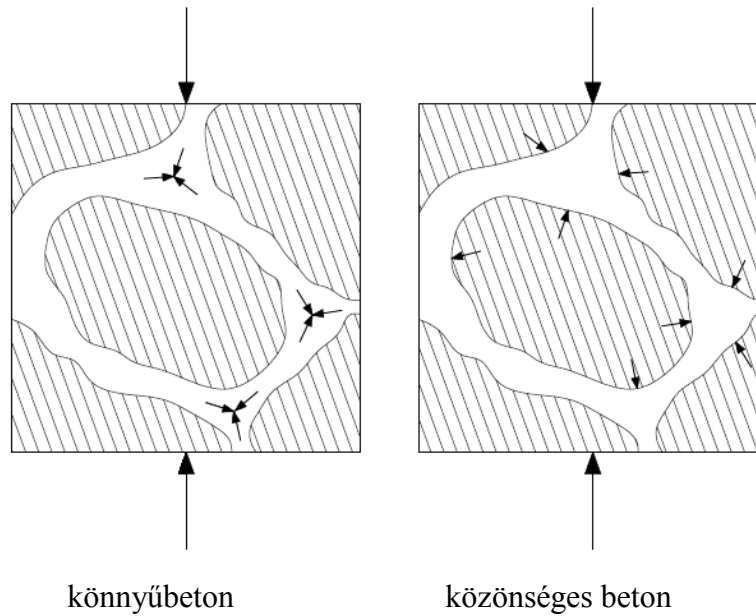


5.ábra
Szilikapor ömlesztve/szemcsék közelről [21]

2.4. Cement általános jellemzői

A betonról általában elmondható, hogy a megszilárdult cementpép (cement+víz) és az adalékanyag közül az veszi fel nagyobb mértékben a feszültséget, amelyiknek nagyobb a merevsége (6. ábra). A keverékeket túltelítetre kell tervezni, hogy a cementpép összefüggő rendszert tudjon alkotni, az adalékszemcsék között, így elősegítve az erőátadást. [10]

Mivel a cementkő szilárdsága döntő a könnyűbetonoknál, és a hídszerkezetek előregyártásában ez a legelterjedtebb, így a kutatásunk során CEM I 52,5 R típusú cementet használtunk (7. ábra). Az MSZ EN 197-1 szabvány szerint ez a cementfajta főalkotórészként portlandklinkert, max. 5% mellékalkotórészt, valamint kötésszabályozó anyagot tartalmaz. Nagy a Ca(OH)_2 tartalma, mert tiszta portlandcement. További jellemző tulajdonságai: nagy fajlagos felület, nagy kezdő- és végszilárdság, jelentős hőfejlesztés, gyors szilárdulási ütem. [17]



6. ábra

Nyomásra igénybe vett betonok erőjátéka [9]



7. ábra

Cement adagolása

2.5. Laboratóriumi kísérletek

A betonkeverékek összeállításához szükséges az adalékanyagok vizsgálatából eredményéből származó adatok. Ezért először szemcse-testsűrűséget, vízfelvételt illetve halmazszilárdságot mértünk. Ezek alapján próbakeveréseket végeztünk, majd az ezekből származó tapasztalatokat is felhasználtuk a további keverékek összeállításánál. A kész próbatesteken végül nyomó- és hajlító-húzóvizsgálatokat végeztünk, majd ezeket az adatokat összehasonlítottuk, illetve az adalékanyagok fizikai jellemzőivel is összevetettük őket.

2.5.1. Adalékanyag vizsgálatok:

2.5.1.1 Szemrevételezés

Agyagkavics: (8-9. ábra)

Kis méretű, gömb-alakú, felülete matt, színe világosbarna, nehezen törik, törésfelülete fekete.



8. ábra

Duzzasztott agyagkavics 9

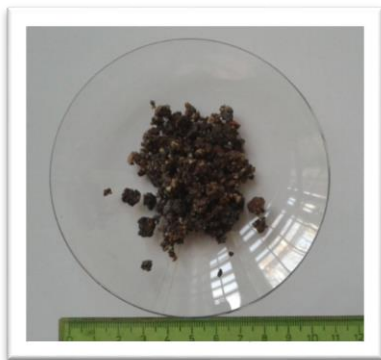


9. ábra

Duzzasztott agyagkavics 7

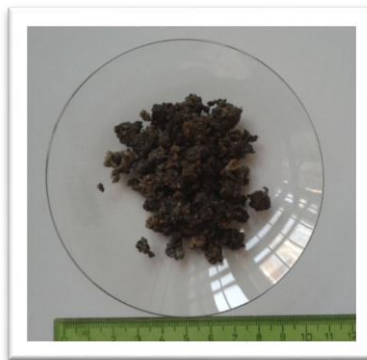
Kohósalak: (10-11. ábra)

Kis méretű, szabálytalan alakú, durva felületű matt, színe a szürke és barna árnyalatai közt változik, könnyen törik, törésfelülete sötétszürke.



10. ábra

Finom kohósalak



11. ábra

Durva kohósalak

Téglazúzalék: (12-15. ábra)

Éles szemalak, matt felületű, téglavörös színű, törésfelülete vörös, az elégtelen égetés miatt ritkán fekete.



12. ábra
4-8 frakciójú téglazúzalék



13. ábra
8-16 frakciójú téglazúzalék



14. ábra
0-1 frakciójú téglazúzalék



15. ábra
1-4 frakciójú téglazúzalék

2.5.1.2. Szemeloszlás

A szitavizsgálatokat az MSZ 4798-1:2004 szabványban leírt módon végeztük. A szemeloszlási görbét szitavizsgálattal határoztuk meg. A szitálás során (16. ábra) folyamatosan csökkenő lyukbőségű szitasoron ráztuk át az adalékanyag mintát, majd az egyes szitákon fennmaradt adalékanyag tömegét lemértük (17-18. ábra). A következő lyukbőségű szitákat használtuk: 16, 8, 4, 2, 1, 0,5; 0,25; 0,125; 0,063 mm. Az egyes lyukbőségeken fennmaradt anyag tömegét ábrázolva megkaptuk a vizsgált könnyű adalékanyag szemeloszlási görbéjét. [9] A betonkeverék tervezésénél a szemeloszlás tervezését az eltérő szemcse-testsűrűségek figyelembevételével térfogatosan számoltuk.

A téglazúzalékot szétszitáltuk 0-1, 1-4, 4-8 és 8-16-os frakciókra (a téglazúzalék szemeloszlási görbéjét ez alapján készítettük el), és frakciónként adagoltuk a betonhoz, így nem volt szükség a szitavizsgálatra. A duzzasztott agyagkavicsot osztályozva, zsákolva kaptuk, ezért nem volt szükség a szitavizsgálatra ennél az adalékanyagnál.



16. ábra

Az MSZ 4798-1:2004 szerinti szitasor



17. ábra

Kohósalak adalékanyag mérése mérlegen



18. ábra

Adalékanyag kiöntése méréshez

2.5.1.3. Halmazszilárdság

A halmazszilárdsági vizsgálatokat az MSZ EN 13055-1:2003 szabvány szerint végeztük. A kőanyagok legfeljebb 48 mm legnagyobb szemnagyságú halmazait 113 mm átmérőjű (1 dm² felületű), 200 mm magasságú henger alakú acél mozsárba helyeztük (19. ábra), majd elmozdulás vezérelt INSTRON típusú géppel, 30 (illetve 10) mm/perc előtolási sebességgel folyamatosan 10%-os fajlagos alakváltozásig összenyomtuk (20. ábra). Az ehhez tartozó nyomófeszültség a halmazszilárdság. [18]



19. ábra
Acélmozsár töltése adalékanyaggal



20. ábra
Adalékanyag terhelése

2.5.1.4. Halmazsűrűség

A vizsgálatokat az MSZ EN 13055-1:2003 szabvány alapján végeztük. A halmazsűrűség az egységnyi térfogatú, laza állapotú, száraz szemhalmaz tömege. Az adott térfogatú edényt (V_a) megtöltjük adalékanyaggal, majd az össztömegből (edény+adalékanyag) kivonjuk az edény tömegét. Így ismerjük az adalékanyag térfogatát (V_a) és tömegét (m_{sz}), melyekből a halmazsűrűség (Q_h) a következő képlettel számítható: $Q_h = \frac{m_{sz}}{V_a}$. [19]

2.5.1.5. Vízfelvétel

A vízfelvétel vizsgálatokat az MSZ EN 13055-1:2003 szabvány alapján végeztük. A beton vízigénye függ az adalékanyag vízfelvevő képességétől, ezért szükség van a rendelkezésünkre álló adalékanyagok tömegére. Először a tömegállandóságig szárított, majd a 24 órán át víz alatt tartott minta tömegére, melyből számítható a beérkezett anyag, a kiszáritott és a telített minta nedvességtartalma. A mérés a következőképpen történt: lemértük az adalékanyagból vett minta tömegét (m), majd tömegállandóságig szárítottuk (m_{sz}). Ezután vízbe raktuk úgy, hogy teljesen ellepje a folyadék. Fél óra múlva kivettük a vízből a mintát, a szemek felületén lévő vizet letöröltük, és lemértük a tömegét ($m_{n,0,5h}$), ezután visszaraktuk a vízbe. Ezt a mérést elvégeztük 24 órás korban ($m_{n,1n}$), majd a tömegállandóság elérésekor (m_n) is. Ezek alapján a vízfelvétel a következő képlet segítségével számítható: $n_n = \frac{m_n - m_{sz}}{m_{sz}} * 100$ (%). A rendelkezésünkre álló adalékanyag víztartalma pedig: $n = \frac{m - m_{sz}}{m_{sz}} * 100$ (%). [10]

2.5.1.6. Szemcse-testsűrűség

Az MSZ EN 13055-1:2003 szabvány alapján végeztük a vizsgálatot 300 ml-es piknométerrel, vízkiszorításos elven. A mérés menete: először a száraz, tiszta piknométer tömegét (m_p) mérjük meg (21.a ábra), majd a piknométer és a benne levő tömegállandóságig szárított anyag együttes tömegét (m_{p+a}) (21.b ábra). Ezután megmérjük a desztillált vízzel a jelig töltött, a szilárd anyagot is tartalmazó piknométer tömegét (m_{p+a+v}) (21.c ábra), és az üres piknométert a folyadékkal megtöltve (m_{p+v}). Az adalékanyag sűrűségét tömegének, valamint térfogatának hányadosaként számítjuk, amit úgy kapunk, hogy a piknométer térfogatából [$V_p = \frac{m_{p+v} - m_p}{\rho_{\text{víz}}}$] levonjuk az adalékanyagot kiegészítő folyadék térfogatát [$V_v = \frac{m_{p+a+v} - m_{p+a}}{\rho_{\text{víz}}}$]. Ebből $V_a = V_p - V_v$. Ezután a minta tömegállandóságig szárított tömegét (m_{sz}) is lemérjük (ha eddig nem tettük meg). Ezekből az adatokból számolható a testsűrűség: $\rho_t = \frac{m_{sz}}{V_a}$. [9]



21.a ábra



21.b ábra



21.c ábra

Piknométeres mérés

2.5.2. Könnyűbeton vizsgálatok:

2.5.2.1. Konzisztencia

A frissbeton konzisztenciájának megállapításához az MSZ 4798-1:2004 és az MSZ EN 12350-5 szabványban leírt területmérést alkalmaztuk. Eszközei az ejtőasztal, a döngölő, egy csonkakúp alakú forma és egy mérőszalag. Az ejtőasztal 70x70 cm-es acél lapból áll. Az acél sablon üreges, csonkakúp alakú, alsó belső átmérője 200 ± 2 mm, felső belső átmérője 130 ± 2 mm és magassága 200 ± 2 mm. A 4x4 cm-es keresztmetszetű csömöszölő rúd keményfából készült. [1] A mérés menete a következő: az előnedvesített formába a frissbetont két adagban (egyenlő rétegek) dolgozzuk be (24. ábra). Egy adag után 10 ütéssel tömörítjük a betont (22. ábra), a tetejét lesimítjuk, majd 30 másodperc múlva eltávolítjuk a kúpot. Ezután tizenötször leejtjük a beállított 40 mm magasságból. A szétterült mintának megmérjük a legnagyobb átmérőjét és a rá merőleges átmérőt (23. ábra).



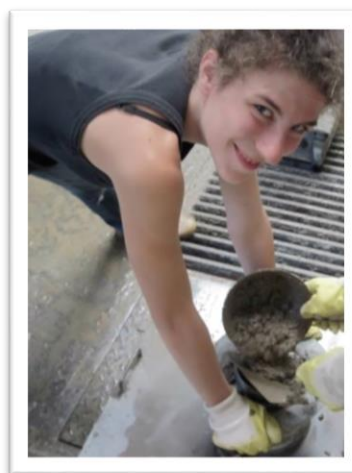
22.ábra

Beton csömöszölés



23.ábra

Területmérés



24.ábra

Beton bedolgozása

A kapott eredmények átlagának (területi mérték) segítségével a 1. táblázatból megkapjuk, hogy milyen konzisztenciájú betont kevertünk az MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint:

Területi osztály Konzisztencia osztály az MSZ EN 206-1:2001 szabvány szerint	Területi mérték [mm] MSZ EN 12350-2:2000
F1*	≤ 340
F2	350-410
F3	420-480
F4	490-550
F5	560-620
F6*	630≤

Megjegyzés: A *-gal megjelölt osztályokban a vizsgálati módszer kevésbé érzékeny.

1. táblázat Területi osztályok [22]

2.5.2.2. Frissbeton testsűrűség

A beton bedolgozása előtt az üres zsaluk (m_{zs}), majd a tömörített betonnal teli sablonok tömegét is lemérjük (m_{zs+b}) (25. ábra). Ezek különbsége a beton tömege: $m_b = m_{zs+b} - m_{zs}$. A beton térfogata a zsaluforma térfogatával egyezik meg: $V_b = 15 \times 15 \times 15 = 3375 \text{ cm}^3$. Ebből kapjuk a frissbeton testsűrűségét: $\rho_{\text{frissb}} = \frac{m_b}{V_b}$. [9]



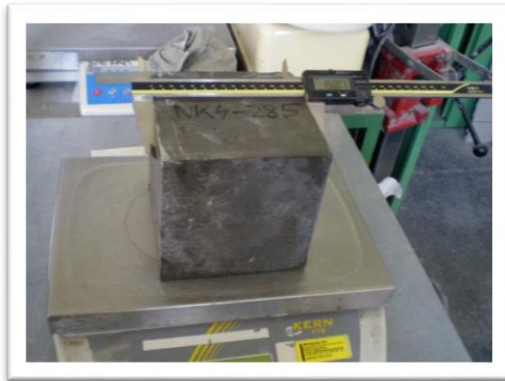
25. ábra

Frissbeton tömegének mérése

2.5.2.3. Szilárdságvizsgálatok

Ahhoz, hogy teljes képet kapjunk a beton szilárdságának időbeli változásáról szilárdságvizsgálatot végeztünk 1, 2 valamint 28 napos kockákon.

A (150mm-es) kockákat és a (70x70x150 mm-es) hasábokat egy napos korban kizsaluztuk, majd ezt követően meszes vízben tároltuk, utókezeltük, egészen a szilárdságvizsgálatig (26. ábra). A kockákat az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerint (11,25kN/s sebességgel) terheltük (28.ábra), amiből nyomószilárdsági értékeket határoztunk meg. A hasábokat hajlító-húzó szilárdság vizsgálatnak vetettük alá (27.ábra), valamint a félhasábokat 70x70 mm-es nyomólap segítségével vizsgáltuk a nyomószilárdságot (29.ábra), hogy minél több szilárdsági adat álljon rendelkezésünkre (30. ábra). [9]



26.ábra

Próbatestek tényleges
méreteinek mérése



27.ábra

Hajlító-húzószilárdság vizsgálata



28.ábra

Nyomószilárdság vizsgálat szabványos kockán



29.ábra

Nyomószilárdság vizsgálat félhasábon



30.ábra

Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú beton

2.5.2.4. Víztartalom

A beton szilárdsága függ a víztartalmától is, ezért szükség van a törés után mért szobahőmérsékleti, valamint a tömegállandóságig szárított minta tömegének ismeretére. A víztartalom az $n_n = \frac{(m_n - m_{sz})}{m_{sz}} * 100$ képlettel számítható (31-32. ábra). [10]



31.ábra

Törés utáni tömeg mérése



32.ábra

Szárítószekrényben
tömegállandóságig szárítás

2.6. Könnyűbeton összetétel tervezés

Az 2. táblázatban láthatóak a kutatás során tervezett és megkevert betonösszetételek változó paraméterei. A szürkével jelölt keverékek a tanszéki kutatáshoz tartoznak, melyben mi is segédkeztünk, a feketék a saját keverékeink. A baloldali oszlop az adalékanyagok tömegszázalékát tartalmazza a homok frakció (0-4) nélkül.

Az utolsó három sor a metakaolin (MK) és az szilikapor (SZP) adagolását is tartalmazza a cement tömegére vonatkoztatva [m%-ban].

A 19h és 20 jelű keverék egyaránt 40% téglazúzalékot tartalmaz. A különbség az, hogy az egyikben a 4 mm alatti frakció csak téglazúzalék a másikban fele téglazúzalék, fele pedig kvarchomok (19h jelű). A keverékeket igyekeztünk úgy kiválasztani, hogy meg lehessen figyelni a kiegészítő anyagok (metakaolin, szilikapor) hatását az eredeti betonokhoz viszonyítva. A téglazúzalék esetében a homoktartalom változtatásával kísérleteztünk. A duzzasztott agyagkavicsnál az adalékanyag tartalom hatását is vizsgáltuk.

A kutatás során elkészített adalékanyag nélküli és a polisztirolgyöngy adalékanyagot tartalmazó cementhabarcs keverékeket nem tüntettük fel a táblázatban.

A részletes betonösszetételeket a függelék 3. melléklete tartalmazza.

Durva adalékanyag és kiegészítő anyag tartalom	Duzzasztott agyagkavics 7 (~8 N/mm² halmazszilárdságú)	Duzzasztott agyagkavics 9 (~12 N/mm² halmazszilárdságú)	Téglazúzalék	Kohósalak
35%	4			
40%	1	9	19h, 20	
45%	2,3	8	6	12,13
50%	5	18		21
45%+MK20%	7	17		23
45%+MK10%		10		22
45%+SZP10%		11		24

2. táblázat

Összetétel tervezési mátrix

2.7. Próbatetek készítése és tárolása

A próbatetek készítése és tárolása az MSZ 4798-1:2004 szabványban leírt módon történt. A keverékek elkészítéséhez kényszerkeverőgépet alkalmaztunk, ahogy ezt Ujhelyi is javasolta [1]. A megfelelő mennyiségű adalékanyagot és cementet a keverőgépben összekevertük, az adalékanyag vízfelvételének megfelelő mennyiségű vizet hozzáadtuk, majd az adalékanyag típusától függően adott ideig megkevertük. Duzzasztott agyagkavics esetében 4 percig, téglazúzaléknál és kohósalaknál körülbelül 8 percig tartott a keverés (33-34. ábra). A keverékek bedolgozhatóságának javítása a konzisztencia beállítása céljából volt szükség ekkora keverési idő eltérésekre.

Terülmérést végezve megállapítható, hogy a duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 45,5-53,5 cm, míg a téglazúzalékos adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 52-64 cm, illetve a kohósalak adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 38-46 cm volt.

Nyomószilárdsági szempontot is figyelembe véve a beton megfelelő tömörítése könnyűbetonok esetében is meghatározó tényező. A vibrálás duzzasztott agyagkavicsnál kb. 2x15 másodpercig, téglazúzaléknál kb. 2x10 másodpercig, kohósalaknál kb. 2x20 másodpercig tartott (35. ábra). A betonozások közben a levegő hőmérséklete 30-33°C között, a páratartalom megközelítőleg 70%-os volt.

A próbateteket egy napos korban zsaluztuk ki. Ez után a szilárdságvizsgálatok elvégzéséig meszes vízben tároltuk (36. ábra). [1]



33. ábra

Betonkeverés után



34. ábra

Betonkeverő



35. ábra

Vibrálás



36. ábra

Meszes vízből kivett próbatestek

3. fejezet: Vizsgálati eredmények

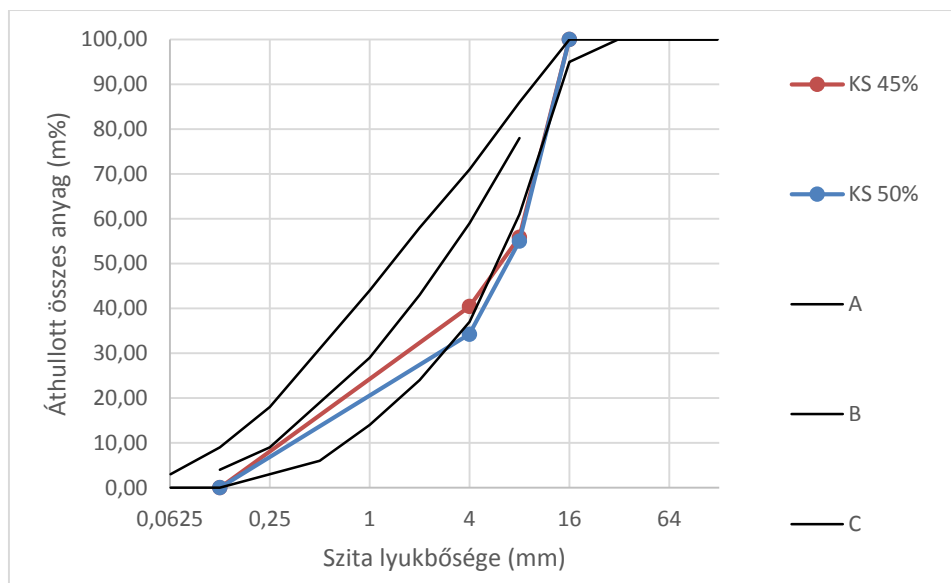
3.1. Adalékanyag vizsgálati eredmények

3.1.1. Szemeloszlás

A beton szilárdságát befolyásolja a benne lévő szemcsék méretének megoszlása. Ezért van szükség olyan szemeloszlást összeállítani, ami valamelyik határgörbére illeszkedik. Ha az alkalmazott adalékanyagok testsűrűsége nem egyezik meg, akkor térfogatosan kell az egyes keverési mennyiségeket meghatározni. A szemeloszlási görbén a tömeg szerinti megoszlás látható.

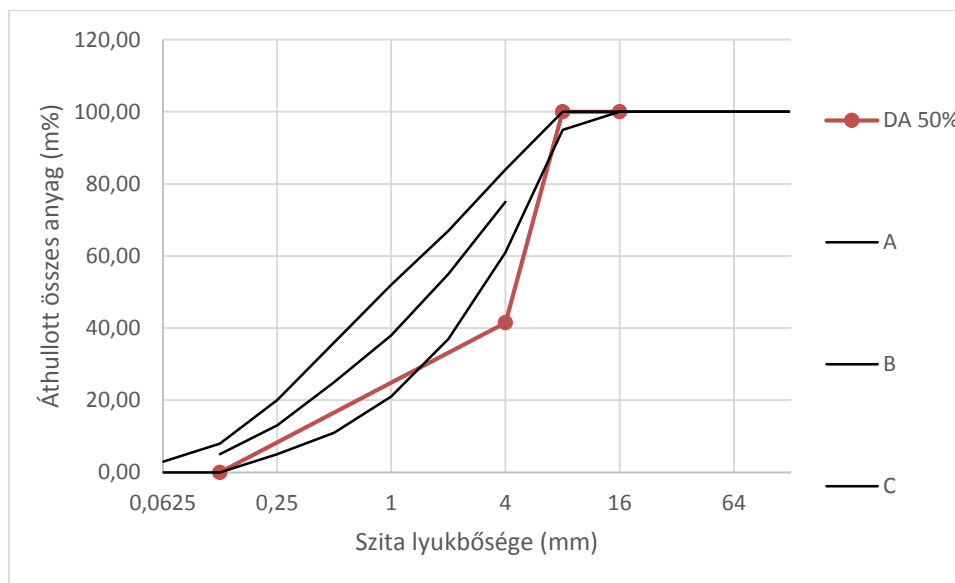
(37-39. ábra)

Részletes szitavizsgálati eredményeket a függelék 1. melléklete tartalmazza.



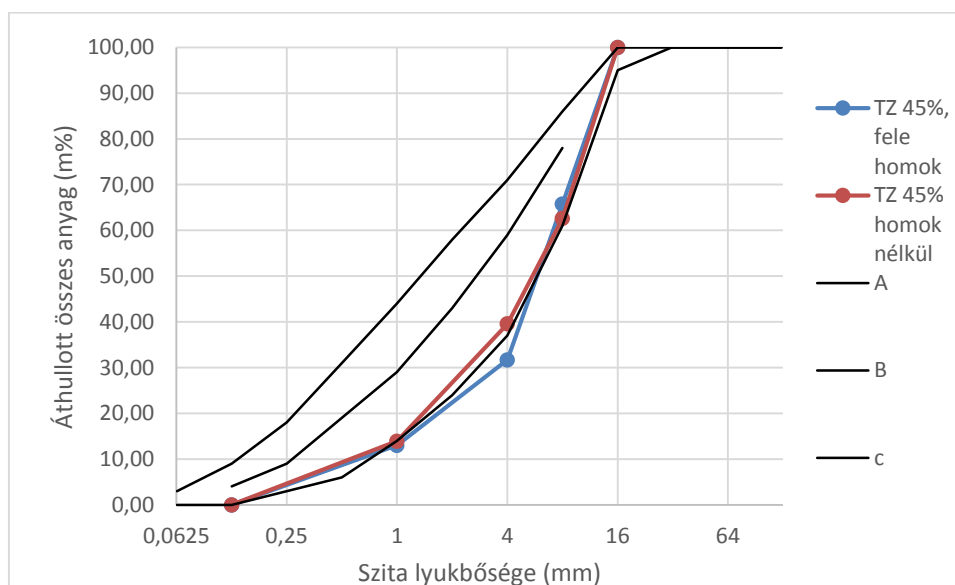
37. ábra

Kohósalak szemeloszlási görbék



38. ábra

Duzzasztott agyagkavics szemeloszlási görbék



39. ábra

Téglazúzalék szemeloszlási görbék

3.1.2. Halmazsűrűség

Az eltérő szemnagyságú adalékanyagok esetében megfigyelhető, hogy általában a nagyobb szemcséjű frakciónak kisebb a halmazsűrűsége (3. táblázat). Ez abból következik, hogy a nagyobb szemnagyság nagyobb hézagosságot eredményez.

Adalékanyag	Halmazsűrűség [kg/m ³]
Duzzasztott agyagkavics 9	990
Téglazúzalék 0-1 mm	998
Téglazúzalék 1-4 mm	718
Téglazúzalék 4-8 mm	668
Téglazúzalék 8-16 mm	757
Kohósalak 0-4 mm	919
Kohósalak 4-8 mm	792
Kohósalak 8 feletti	788

3. táblázat

Adalékanyagok halmazsűrűsége

3.1.3. Vízfelvételi

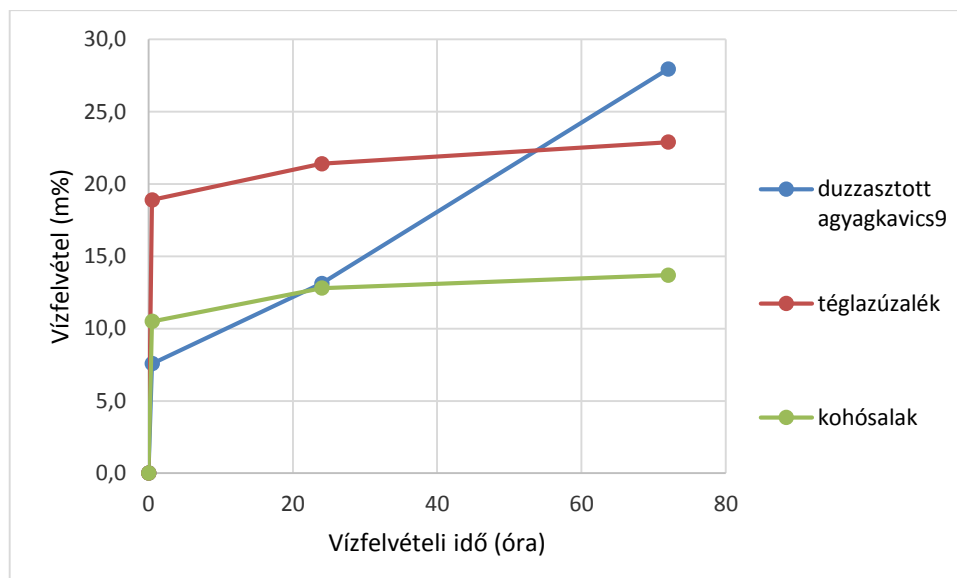
A mérési eredmények azt mutatták, hogy a téglazúzalék és a duzzasztott agyagkavics 9 vízfelvétele számottevő, míg a kohósalaké valamivel alacsonyabb (4. táblázat). Ezek alapján mindegyik keveréknél többletvíz hozzáadása szükséges, hogy az adalékanyag ne a cement kötéséhez szükséges vizet szívja magába. Ezt figyelembe is vettük a keverékek víztartalmának meghatározásakor. (40. ábra)

Részletes vízfelvételi eredményeket a függelék 2. melléklete tartalmazza.

Adalékanyag	ρ (g/ml)	Beérkezett anyag víztartalma	Vízfelvétel [m%]		
			0,5 óra	24 óra	végleges
Duzzasztott agyagkavics9	1,4	26,2	7,6	13,1	28,0
Téglazúzalék	1,6	1,5	18,9	21,4	22,9
Kohósalak	1,9	2,1	10,5	12,8	13,7

4. táblázat

Adalékanyagok vízfelvétele



40. ábra

Adalékanyagok vízfelvétele

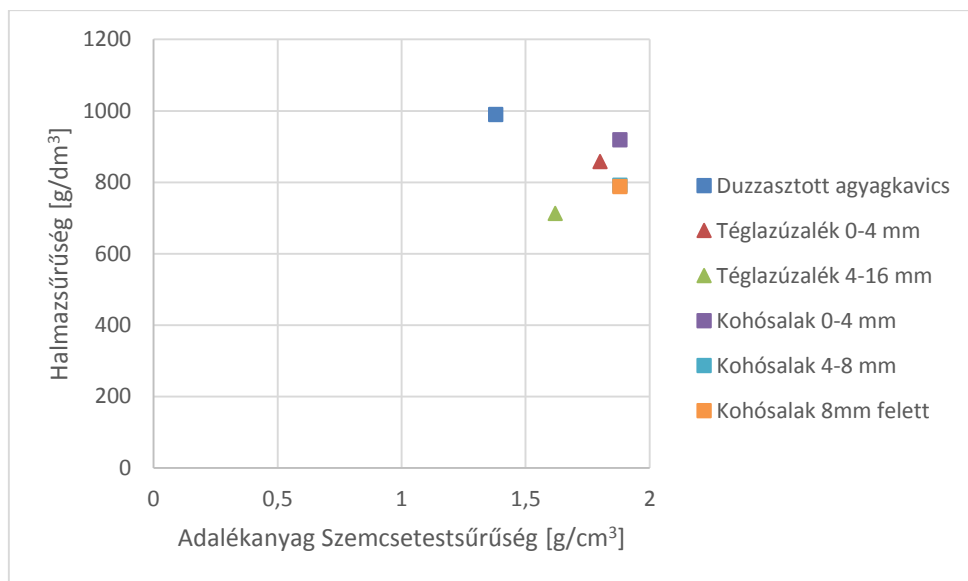
3.1.4. Szemcse-testsűrűség

A vizsgálatok eredményei a 5. táblázatban találhatóak. A legkisebb testsűrűségű a duzzasztott agyagkavics, aztán a téglazúzalék, végül a kohósalak. A betonok testsűrűségét megfigyelve ugyanezt a sorrendet kapjuk. Tehát minél nagyobb az adalékanyag testsűrűsége, annál nagyobb lesz a belőle készített beton testsűrűsége is (41. ábra).

Vizsgált adalékanyagok	Testsűrűség [g/ml]
Duzzasztott agyagkavics	1,38
Téglazúzalék 0-4 mm	1,80
Téglazúzalék 4-16 mm	1,62
Kohósalak	1,88

5. táblázat

Adalékanyagok testsűrűsége

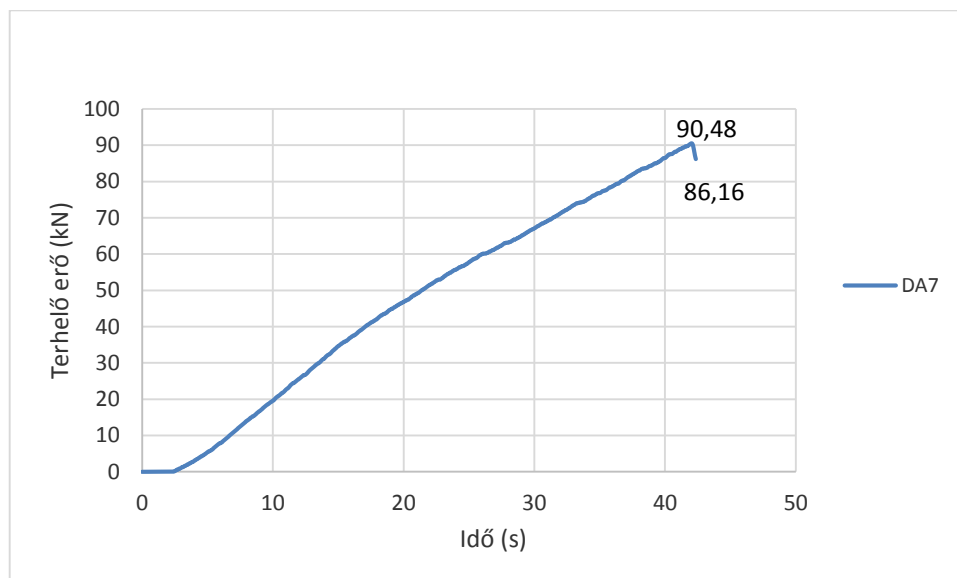


41. ábra

Adalékanyag szemcse-testsűrűség - halmazsűrűség diagram

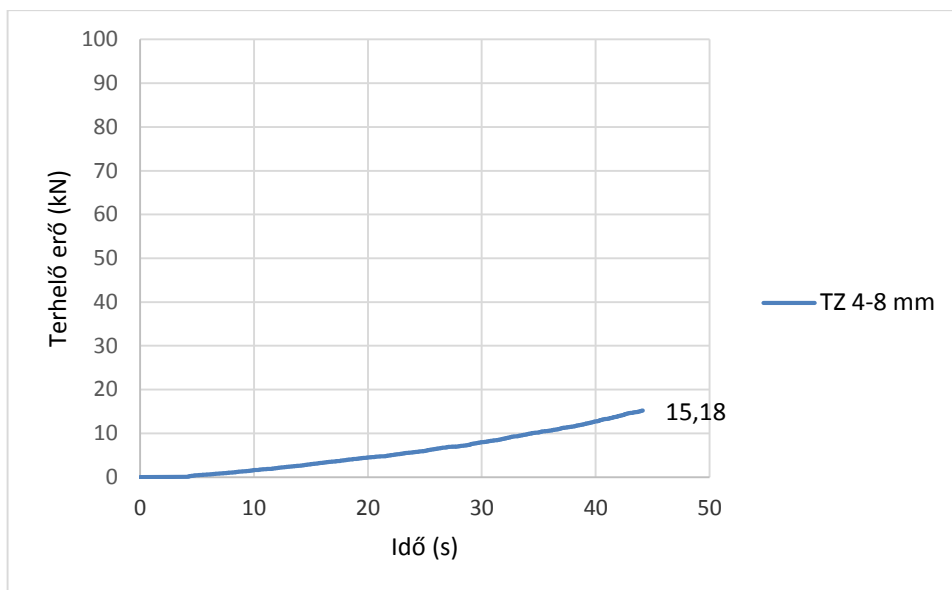
3.1.5. Halmazszilárdság

A 42-45. ábrákon a halmazszilárdsági mérés eredményei láthatók. Az egyes anyagoknál kirajzolódó görbékről (10%-os összenyomódásnál/alakváltozásnál) lehet leolvasni a halmazszilárdságot.



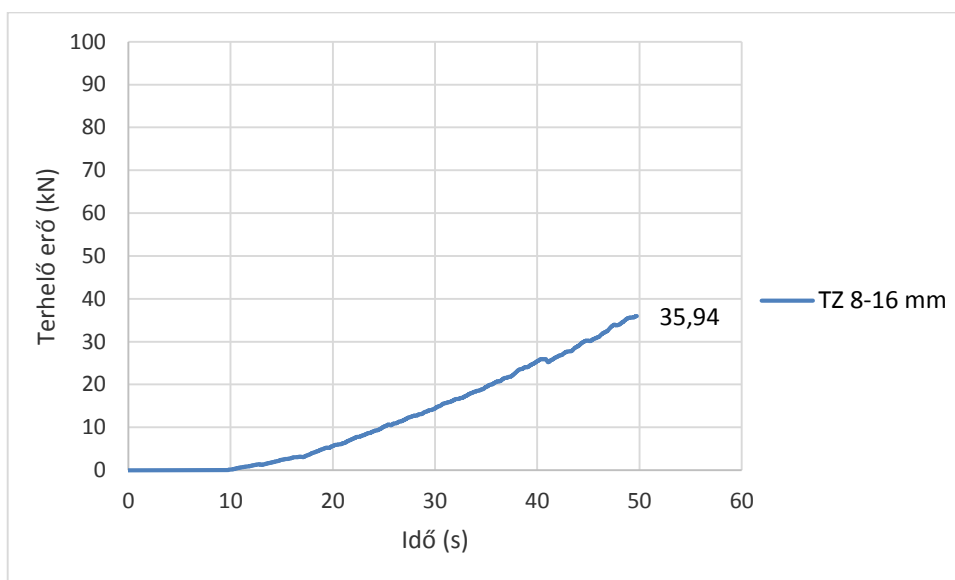
42. ábra

Duzzasztott agyagkavics halmazszilárdsági diagram



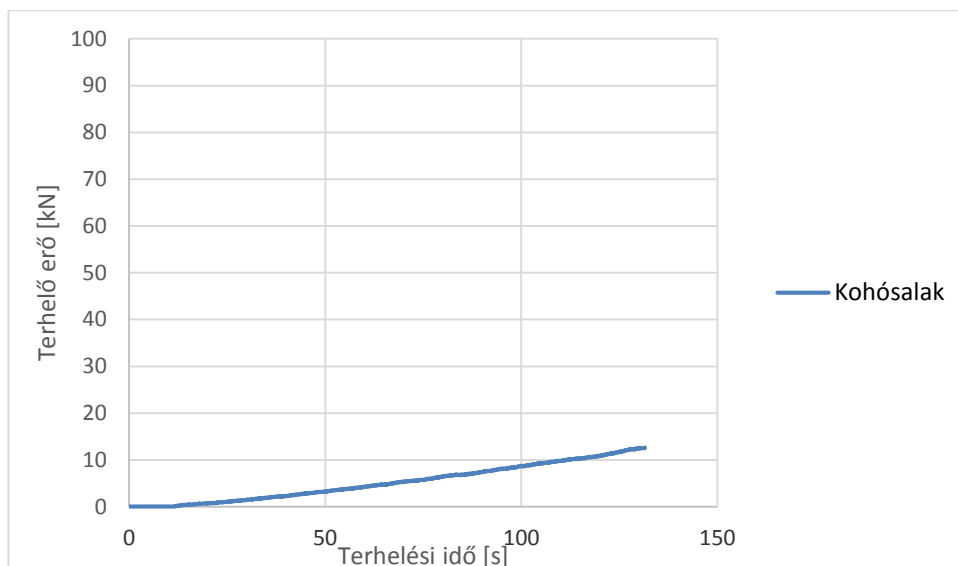
43. ábra

Téglazúzalék (4-8 mm) halmazszilárdsági diagram



44. ábra

Téglazúzalék (8-16 mm) halmazszilárdsági diagram



45. ábra

Kohósalak halmazszilárdsági diagram

Az adalékanyagok (10%-os összenyomódáshoz tartozó) halmazszilárdsága összefoglalva a 3. táblázatban található. A legnagyobb halmazszilárdsága a duzzasztott agyagkavicsnak van, mely elérte a $12,52 \text{ N/mm}^2$ értéket (6. táblázat). Ez részben annak köszönhető, hogy az adalékanyag szemcsék gömb alakúak, ami a feszültségelvezetés szempontjából előnyös, a duzzasztott agyagkavics 7 nem gömb, ezért kisebb szemcse-testsűrűségű ($8,59 \text{ N/mm}^2$). A 8-16 frakciójú téglazúzaléknak is kiemelkedő a halmazszilárdsága. A nagyobb téglaszemek kevésbé érzékenyek a zúzásra, ezért is lehet a halmazszilárdsága a nagyobb szemcsenagyság ellenére.

Adalékanyag	Halmazszilárdság [N/mm^2]
Duzzasztott agyagkavics9	12,52
Duzzasztott agyagkavics7	8,59
Téglazúzalék 4-8 mm	1,54
Téglazúzalék 8-16 mm	3,31
Kohósalak (finom)	1,19

6. táblázat

Adalékanyagok halmazszilárdsága

3.2. Frissbeton

Terülmérést végezve megállapítható, hogy a duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 45,5-53,5 cm, míg a téglazúzalékos adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 52-64 cm, illetve a kohósalak adalékanyagú betonkeverékek területi mértéke 38-46 cm, a kisebb terület esetén hosszabb vibrálási időt alkalmaztunk.

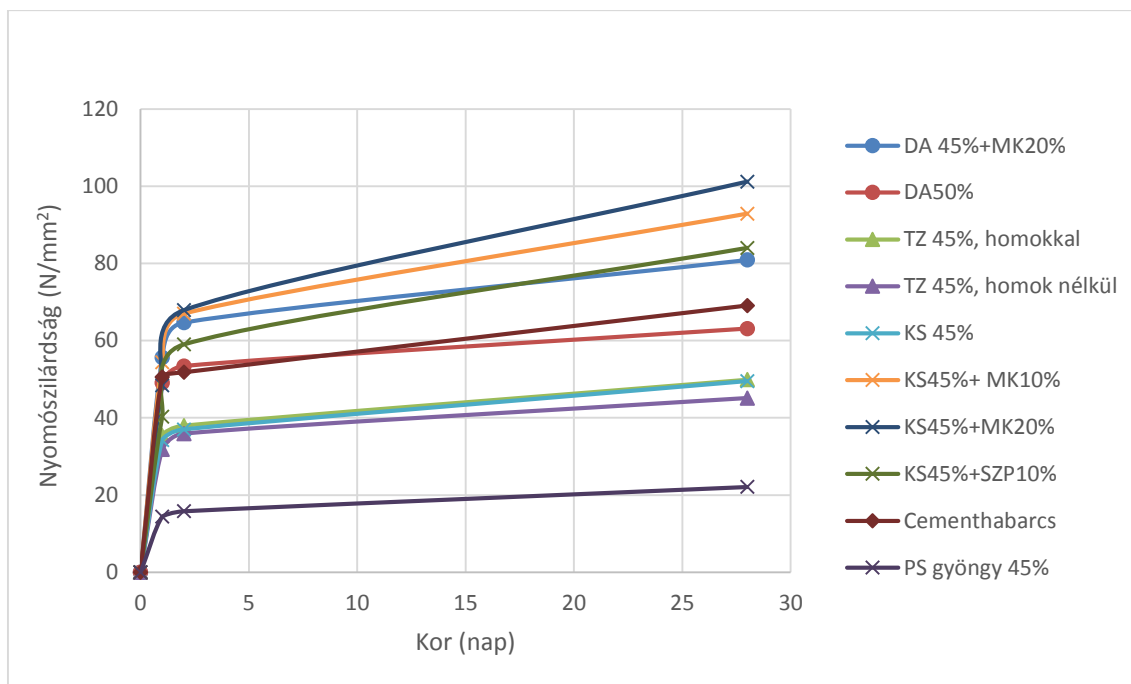
A 20.-as téglazúzalékos keveréknél több terület mérést hajtottunk végre, hogy bizonyítsuk a hipotézisünket, miszerint a téglá bedolgozást követően jelentős vizet szív el a betontól, ez a tulajdonsága eltarthatóság szempontjából hátrányos. Az első mérés (15 perces kor) eredménye F5 területi osztályba sorolható (57/52), a második mérés 45 perc múlva történt, az eredmény F1 területi osztály (26/25).

3.3. Megszilárdult beton

3.3.1. Nyomószilárdság-vizsgálati eredmények

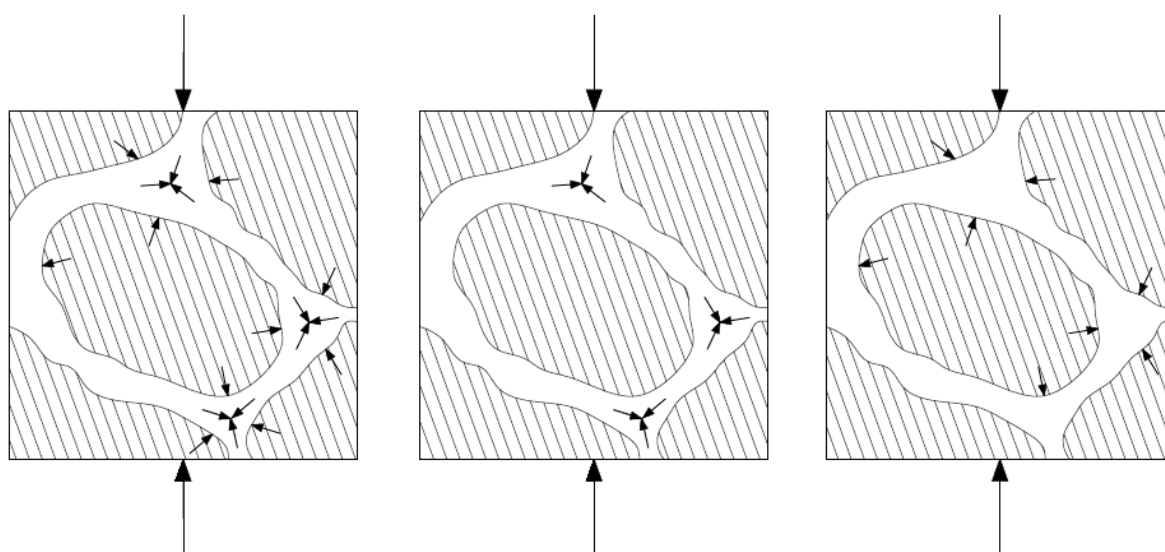
A kockákon végzett nyomószilárdság vizsgálatok a 46. ábrán látható eredményeket adták. Egyes keverékekhez metakaolint vagy szilikaport adtunk. Ezek az anyagok részt vesznek a kötési folyamatban, növelik a cementkő szilárdságát, kitöltik a kisebb pórusokat. Ez által nagyobb szilárdság érhető el. Mindegyik adalékanyag esetén metakaolinnal nagyobb szilárdságot értünk el, mint ugyanannyi szilikaporról. A szilikapor maximális adagolása 10 tömegszázalék a cement tömegére vonatkoztatva, a keverések során ezzel dolgoztunk, hogy biztosan ne érjük el a maximális 11 tömegszázalékot. (Ezt túllépve a szilikapor túl sok portlanditot köt meg, aminek következtében nagy mennyiségű portporlandit keletkezik, mely csökkenti a beton lúgosságát.)

A cementhabarcs-mátrix szilárdságát a polisztirol gyönggyel készített betonokkal tudjuk modellezni, mivel a gyöngyök szilárdsága elhanyagolható. A kiegészítő anyag nélküli betonok szilárdsága a polisztirol gyönggyel készített beton és a csak cementhabarcsból készített minta szilárdsága között van. Ebből látható, hogy a hagyományos könnyűbetonokkal ellentétben esetünkben nem csak a cementkő váz vesz részt a teherhordásban, viszont nem is csak az adalékanyag, mivel a halmazszilárdságuk jóval kisebb a betonok szilárdságánál. A 47. ábrán jól látszik, hogy a közönséges beton erőjátéka miben hasonlít az általunk vizsgált beton erőjátékára, előnyösebbé téve a könnyűbeton teherviselési módját.



46. ábra

Nyomószilárdsági eredmények, szabványos kockán mérve



általunk vizsgált könnyűbeton

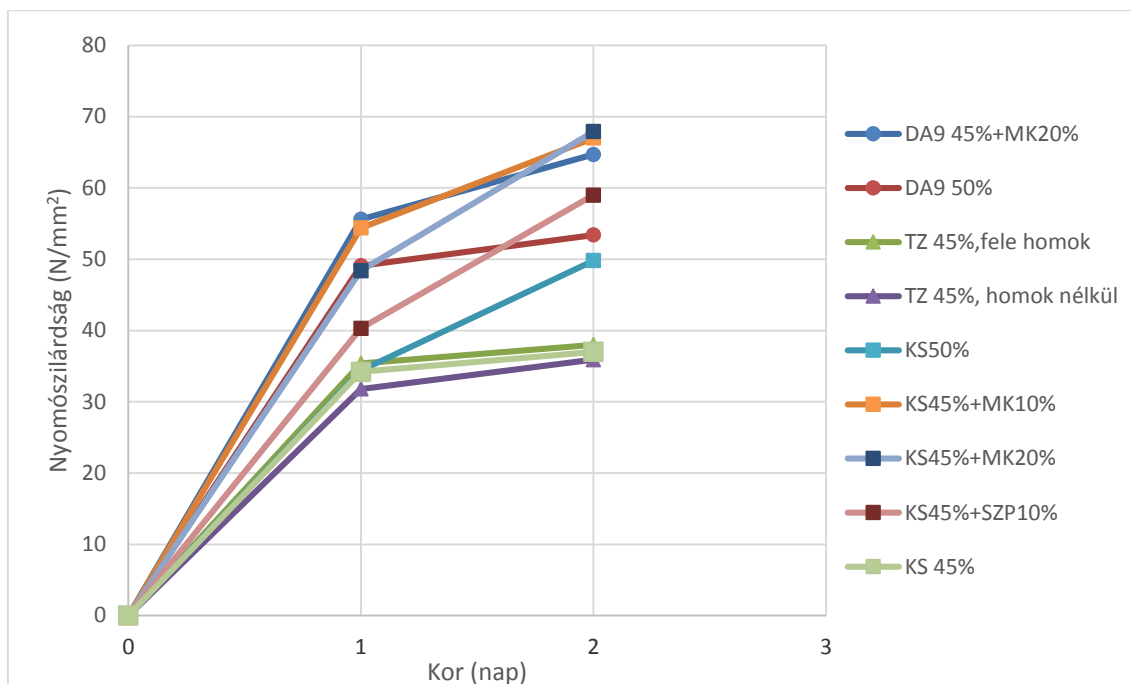
könnyűbeton

közönséges beton

47. ábra

Nyomásra igénybe vett betonok erőjátéka

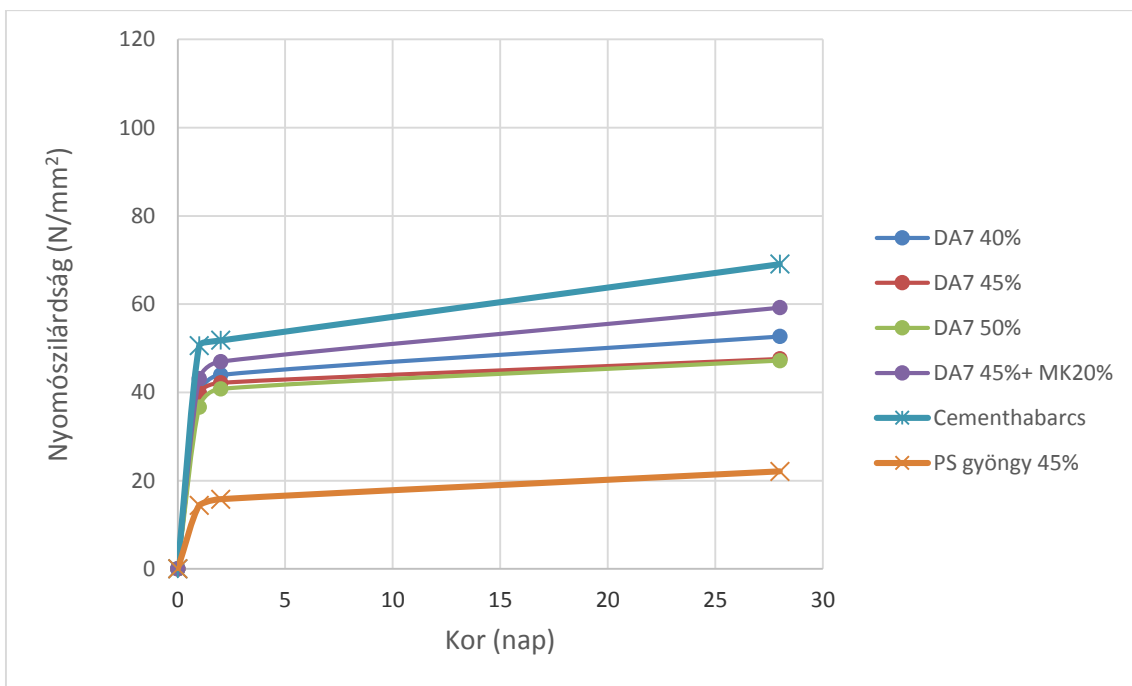
Előregyártott vasbeton elemek esetében fontos a kizsaluzásig eltelt idő, a zsaluforgás gyorsítása. A 48. ábrán látható, hogy mindegyik betonkeverék már egy naposan alkalmas a kizsaluzásra, tehát a zsaluforgási idő akár egy napnál is kevesebb lehet. Ennek megállapítására további kísérleteket lehetne végezni.



48. ábra

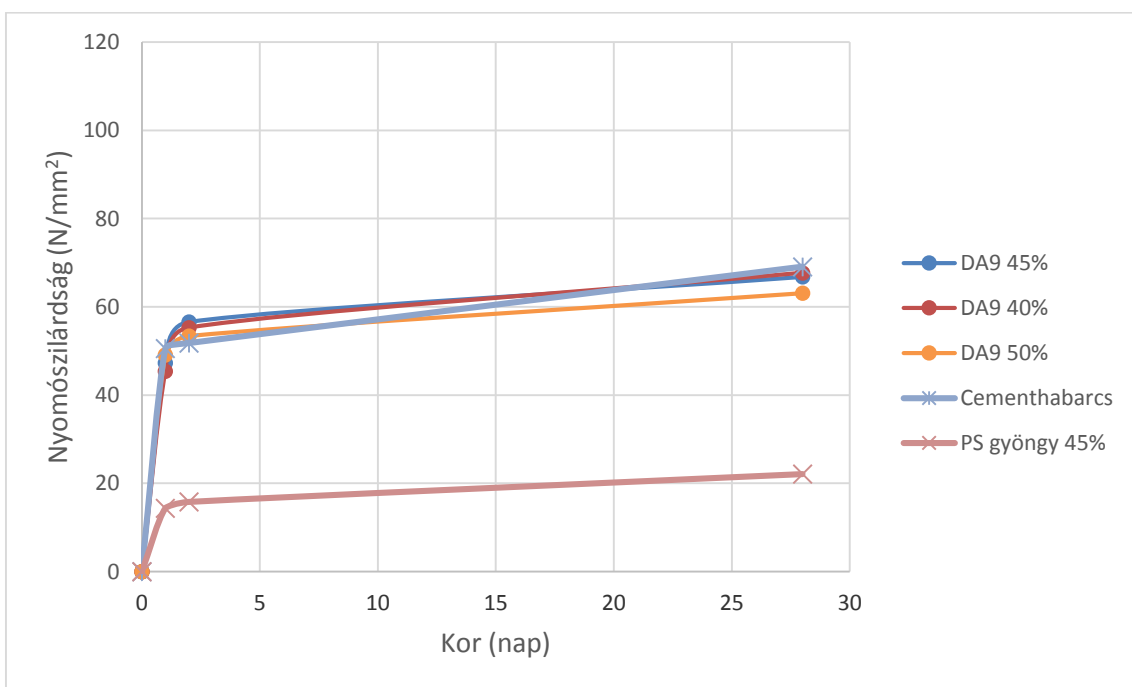
1-2 napos nyomószilárdsági értékek

Az adalékanyag tartalom változtatásával arányosan változott a beton szilárdsága is, de összességében nem volt nagy hatással a nyomószilárdsági eredményekre. Ez a hatás kisebb és nagyobb halmazszilárdságú duzzasztott agyagkavics 40%, 45% és 50%-os keverések esetében a 49. és 50. ábrán figyelhető meg. A kisebb halmazszilárdságú duzzasztott agyagkavicsú adalékanyag esetében a 45 és 50%-os betonok szilárdsága volt azonos, míg a nagyobb halmazszilárdságú duzzasztott agyagkavics esetében a 40 és 45%-os keverékekről mondható el ugyanez. A könnyű adalékanyag tartalom növelésével csökken a nyomószilárdság. Inkább a habarcs szilárdsághoz van közel, mint a polisztirolhab adalékanyag betonhoz. 20%-os metakaolin adagolással tudtuk elérni a legnagyobb szilárdságot.



49. ábra

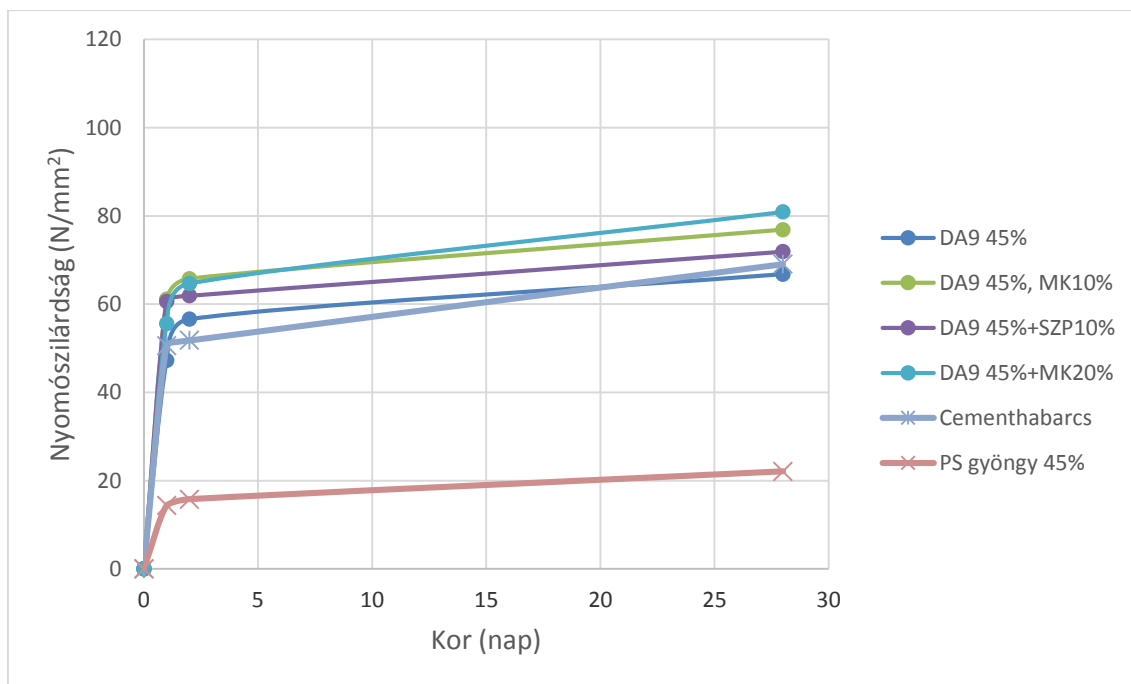
Duzzasztott agyagkavics nyomószilárdsági értékek, szabványos kockán mérve



50. ábra

Duzzasztott agyagkavics nyomószilárdsági értékek, szabványos kockán mérve

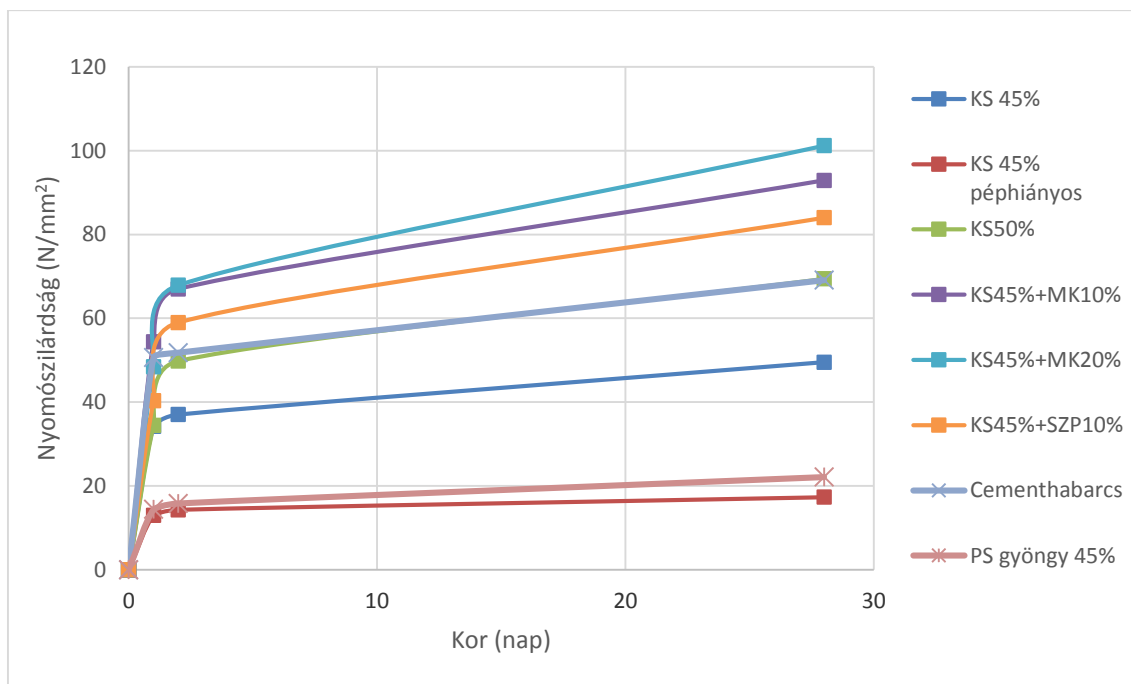
Adalékanyag tartalom változtatása mellett



51. ábra

Duzzasztott agyagkavics nyomószilárdsági értékek, szabványos kockán mérve
adalékszerek hozzáadása mellett

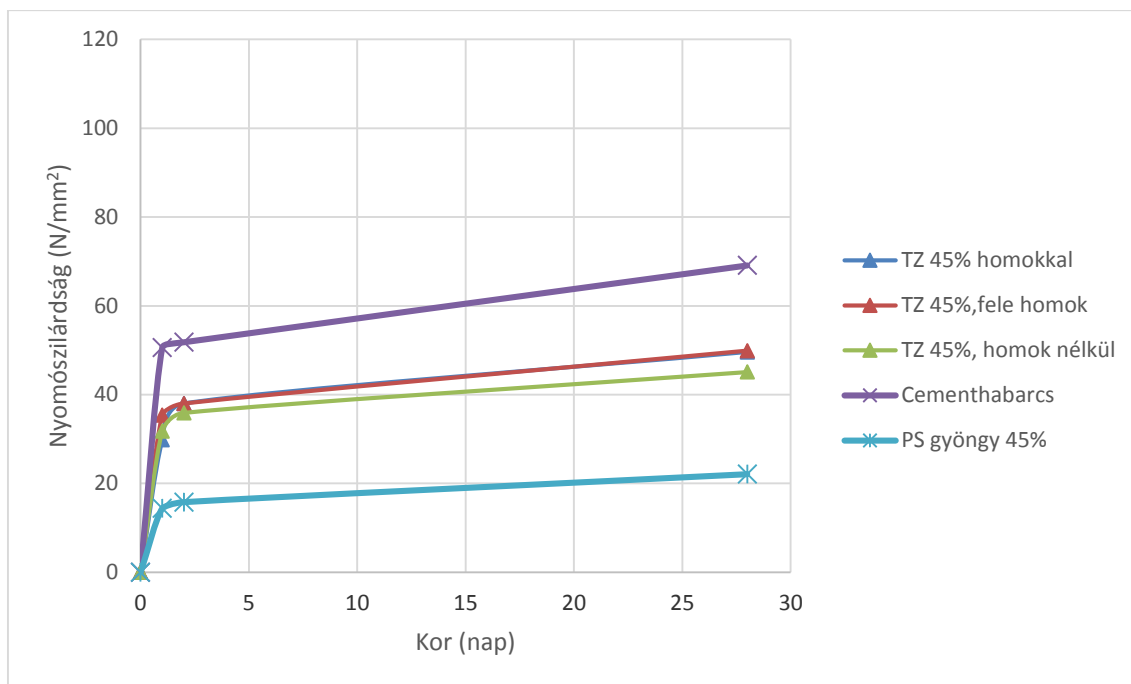
Az 51. ábrán a kohósalak adalékanyagú betonok nyomószilárdsága látható. A metakaolin nagyobb mértékben növelte a szilárdságot, mint ugyanannyi tömegszázaléknyi szilikapor. Viszont egyik anyag sem növelte olyan mértékben a szilárdságot, mint a duzzasztott agyagkavics esetében. A kohósalak adalékanyagból az egyik 45 %-os keverék szilárdsága azért lett sokkal alacsonyabb, mint a többié, mert péphiányos beton volt, nem tartalmazott elég finom adalékanyagot. Ebből következően a testsűrűsége is alacsony, tehát ez a fajta beton más felhasználásra alkalmas (pl. falazóelem). A többi beton szilárdsága azonban elég magas, a 20 m% metakaolint tartalmazó 100 MPa-t is eléri. Ez elég jó teljesítmény a kohósalak alacsony halmazszilárdságához képest (a sorrend, hogy melyik mennyire jól növelte: SZP10%, MK10%, MK20%).



52. ábra

Kohósalak nyomószilárdsági értékek, szabványos kockán mérve

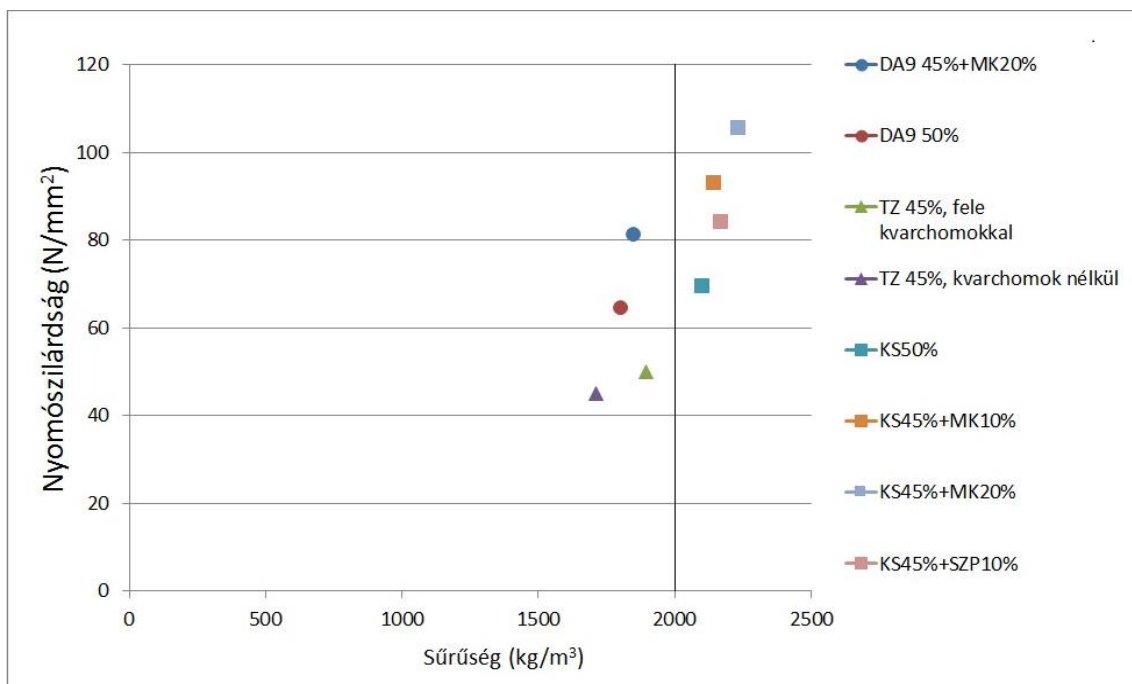
A téglazúzalék esetében a homoktartalom változtatásának hatásai figyelhetők meg az 52. ábrán. A 45%-os téglazúzalék adalékanyagú, homokkal arányosan kevert beton több homokot tartalmaz, mint a fele homokkal készített keverék, mégsem lett nagyobb a szilárdsága, viszont a homok nélkül készített beton szilárdsága kb. 5 MPa-lal kisebb. Tehát a homoktartalom növelése egy bizonyos szintig növeli a szilárdságot, viszont utána nem változtat rajta számottevően a vizsgált adalékanyag tartalom mellett.



53. ábra

Téglazúzalék nyomószilárdsági értékek, szabványos kockán mérve

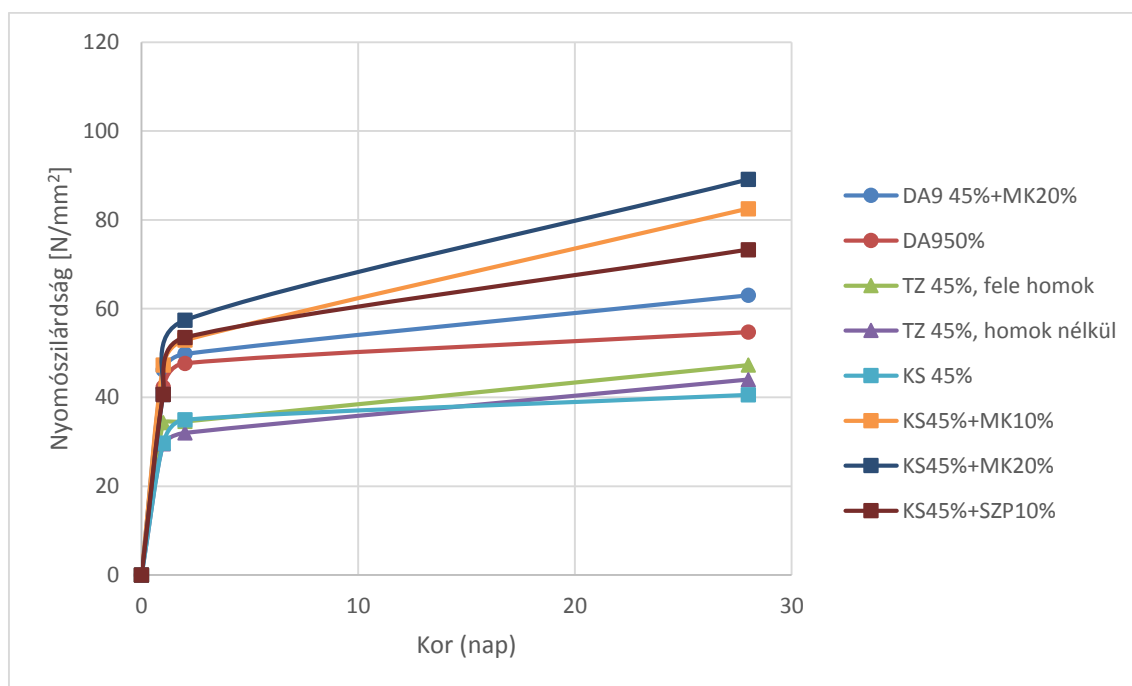
Az általános szabály, miszerint nagyobb testsűrűséggel nagyobb nyomószilárdság érhető el az 53. ábrán is észrevehető. A kohósalak esetében azonban nem ez a tendencia észlelhető. Ez annak köszönhető, hogy a szilikapor és a metakaolin segítségével úgy tudtuk növelni a szilárdságot, hogy közben a beton testsűrűsége ne változzon számottevően. A KS45%+MK20% jelű keverék testsűrűsége jóval nagyobb lett, mint a többié, meghaladta a könnyűbeton határsűrűségét, viszont ez a szilárdság növekedésével együtt következett be. Tehát a kohósalak adalékanyagú betonnal sikerült nagyobb szilárdságot elérni, mint duzzasztott agyagkaviccsal. Ezzel egy fontos célkitűzést valósítottunk meg.



54. ábra

Beton testsűrűség- nyomószilárdság

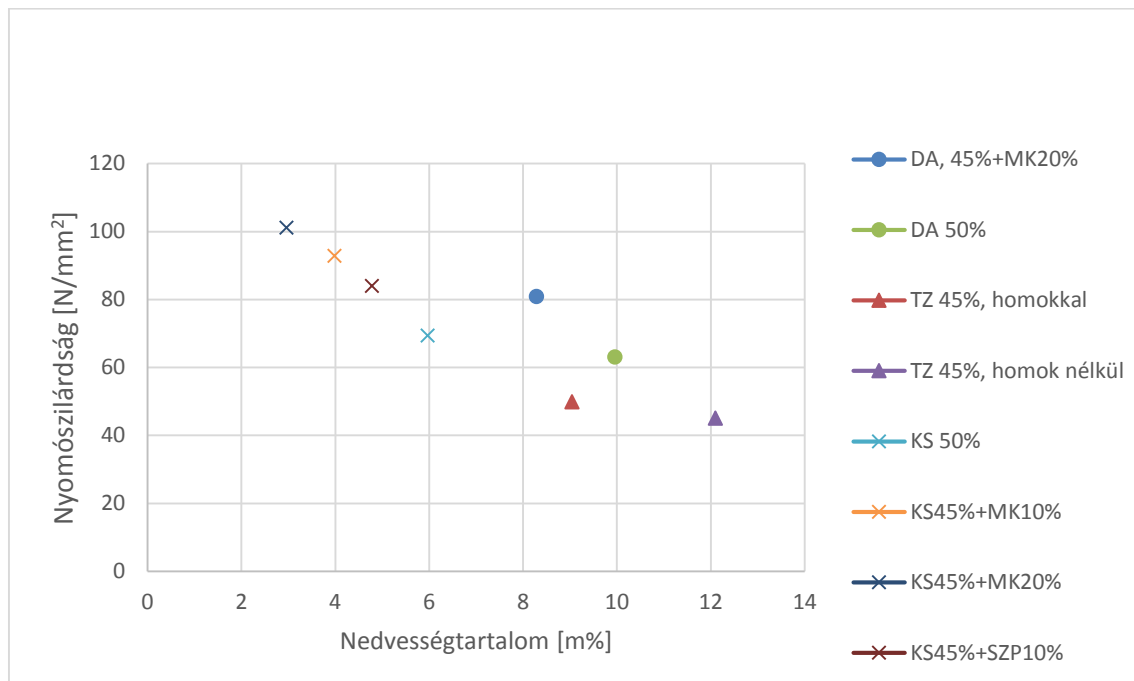
A félhasábokon mért szilárdsági értékek alátámasztják a kockákon mért eredményünket a szilikapor és a metakaolin tekintetében a sorrend azonos. A homoktartalom változtatásának hatása is látható a TZ 45%-os jelű keverékeknél az 54. ábrán.



55. ábra

Nyomószilárdsági értékek, hasábon mérve

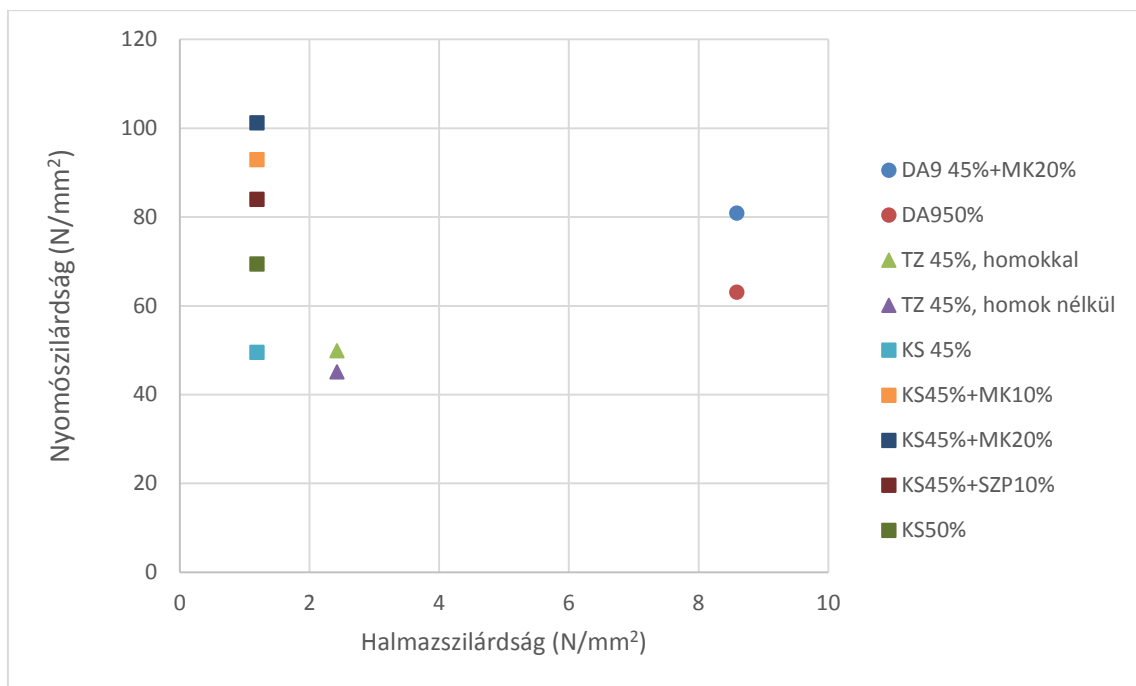
A beton nedvességtartalma is hatással van a nyomószilárdságra. Minél nagyobb a nedvességtartalom, annál kisebb a szilárdsága az azonos adalékanyagú betonnak. Az adalékanyag porozítása is hatással van a nedvességtartalomra: minél porózusabb egy anyag, annál több vizet tud felvenni és annál kisebb lesz a nyomószilárdsága; nem csak a magas nedvességtartalom, hanem a nagy pórustartalom miatt is. Az 55. ábrán láthatók az általunk mért eredmények, melyek teljes mértékben tükrözik ezt a tendenciát. Az azonos adalékanyaggal készített betonok nedvességtartalma fordítottan arányos a nyomószilárdsággal.



56. ábra

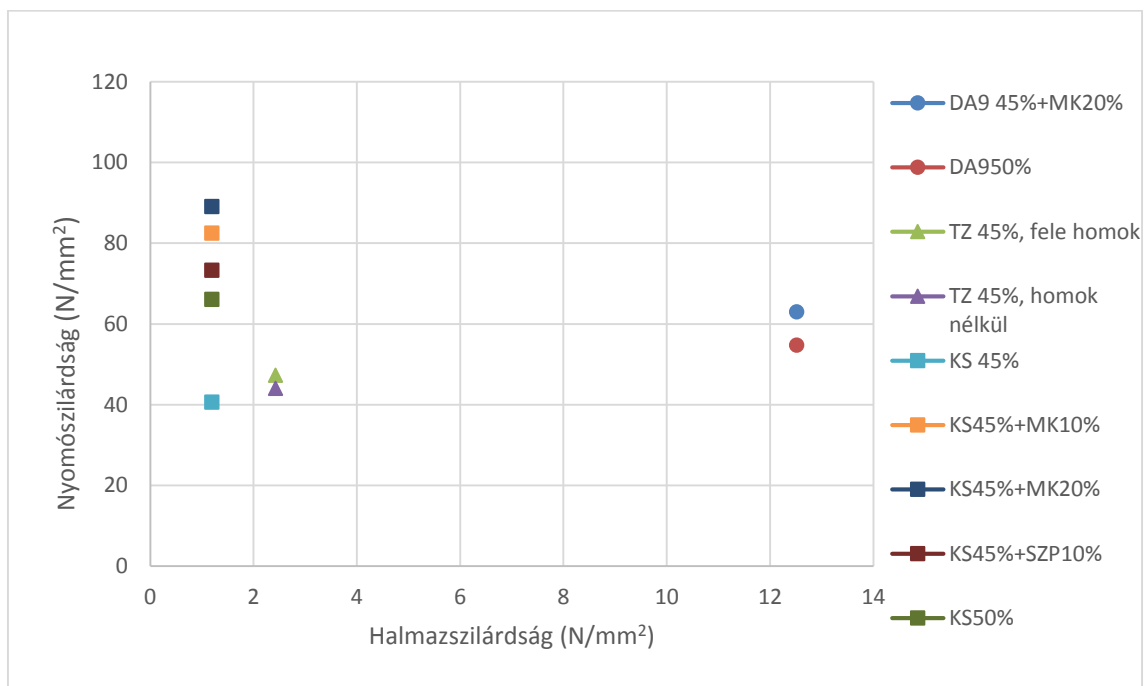
Beton nedvességtartalom- nyomószilárdság

Általában elmondható, hogy a nagyobb halmazszilárdságú anyagból nagyobb nyomószilárdságú beton készíthető (56. ábra). Ezen a tendencián a hozzáadott metakaolin és szilikapor változtatható. A kohósalak adalékanyagú keverékek kiugróan magas nyomószilárdságát az okozhatta, hogy elég nagyok a pórusai ahhoz, hogy a cementpép befolyjon és kitöltse azokat. Így a cementpép és a kohósalak együttdolgozása sokkal hatékonyabb volt, mint a többi adalékanyag esetében. Az 57. ábrán felfedezhető, hogy a félhasábon végzett kísérletek eredményei is alátámasztják ezt a feltevést.



57. ábra

Adalékanyag halmazszilárdság - beton nyomószilárdság (kocka)

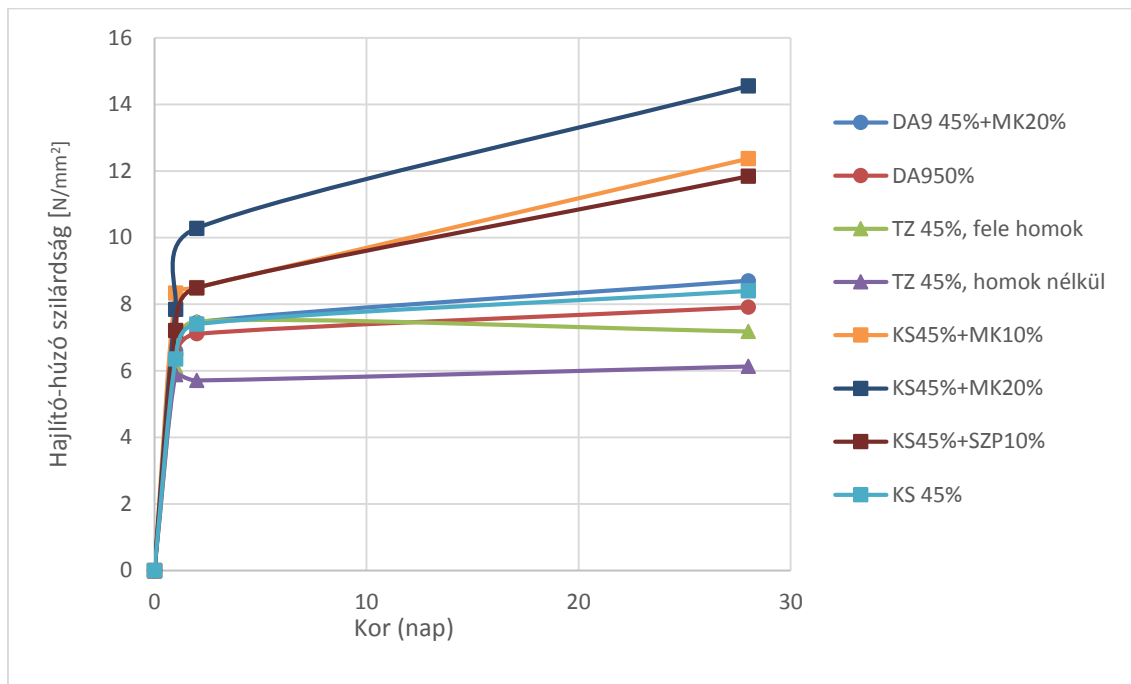


58. ábra

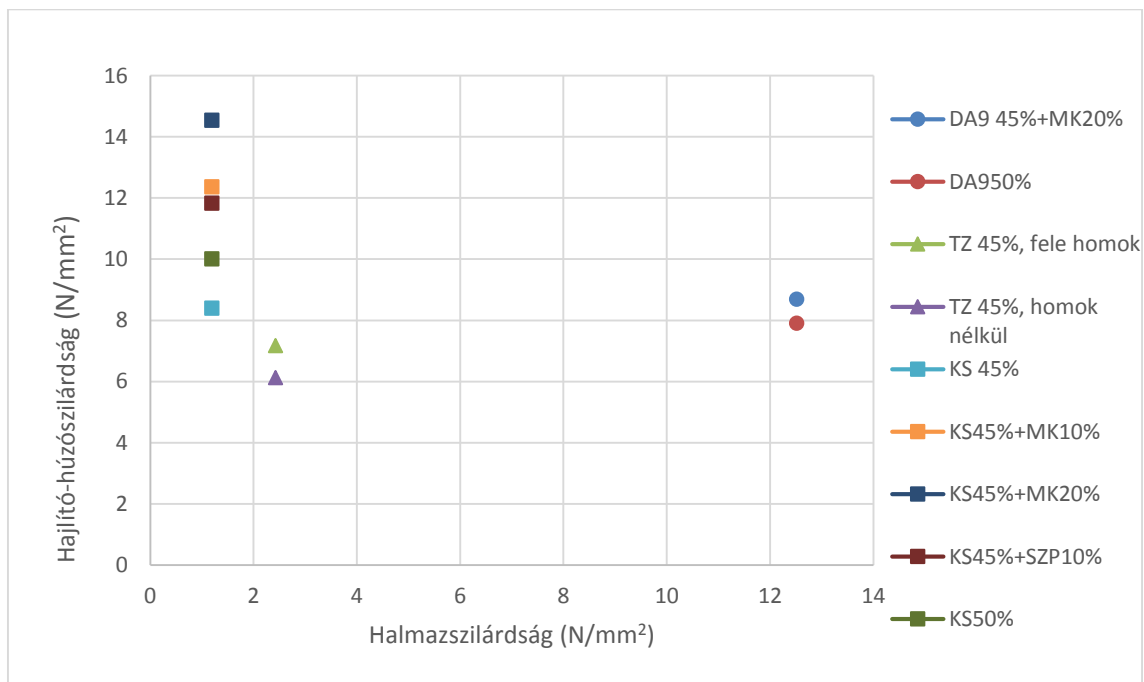
Adalékanyag halmazszilárdság - beton nyomószilárdság (félhasáb)

3.3.2. Hajlító-húzó szilárdság vizsgálati eredmények

A metakaolinra vonatkozó tendencia itt is igaz: jobban növeli a hajlító-húzó szilárdságot, mint a szilikapor, bár a különbség kisebb, mint a nyomószilárdság esetén. (58. ábra) A legnagyobb hajlító-húzó szilárdságot a 20% metakaolin tartalmú kohósalak betonnal tudtuk elérni.

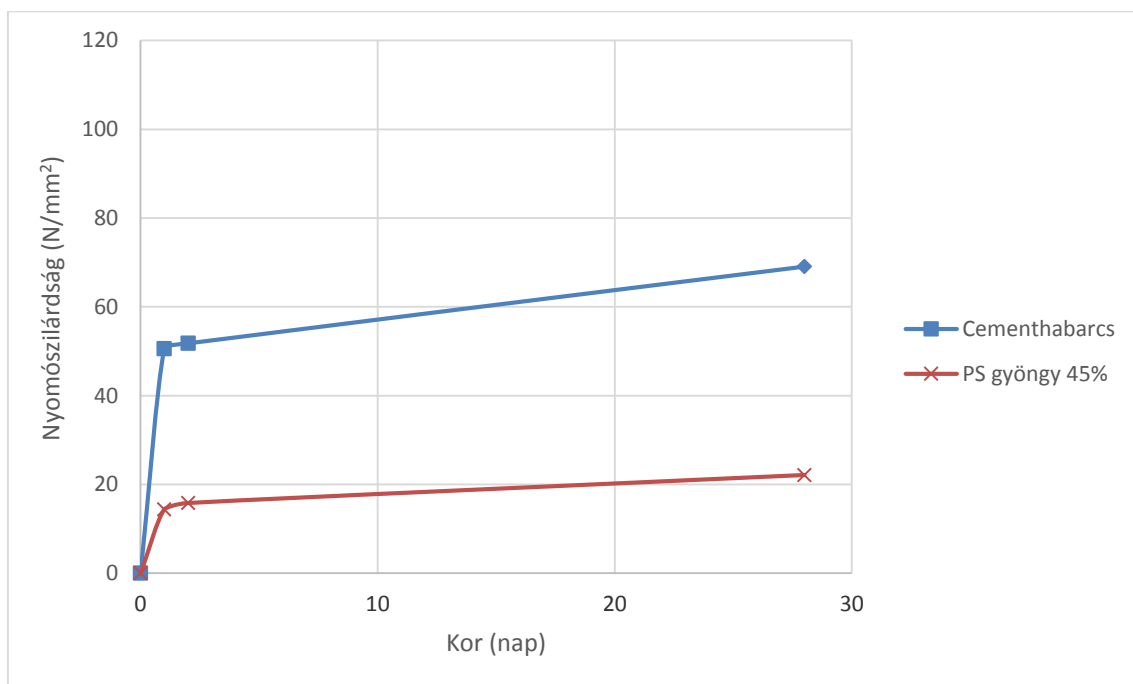


59. ábra
Hajlító-húzó szilárdsági értékek



60. ábra
Adalékanyag halmazszilárdság - hajlító-húzószilárdság (hasáb)

Mivel a könnyűbetonban felhasznált adalékanyag kisebb húzószilárdságú (59. ábra), mint a habarcs (nagyságrendi különbség), a beton tönkremenetele – leegyszerűsítve – akkor következik be, ha a nagyobb szilárdságú megszilárdult kötőanyag tönkremegy. Amíg a terhelés okozta betonfeszültség kisebb, vagy egyenlő az adalékanyag önszilárdságával, az adalékanyag és a habarcs feszültsége azonos és egyenlő a beton átlagos feszültségével (60. ábra). Abban a pillanatban, amikor a beton átlagos feszültsége meghaladja az adalékanyag önszilárdságát, az adalékanyag plasztikus állapotba kerül, további terhet felvenni nem képes, a kiadódó többletterhelés a habarcsban többletfeszültséget okoz. A terhelés növekedésével a többletfeszültség rohamosan növekszik s elérve a habarcs szilárdságát, a beton tönkremenetele bekövetkezik. [1] Ennek következtében a habarcs mátrix szilárdságának vizsgálata elengedhetetlen. Az eredmények a 60. ábrán láthatók. A habarcsmátrix nyomószilárdsága nagyobb, mint az adalékanyagok halmazszilárdsága, tehát esetünkben is a kért módon történt a tönkremenetel, amit az előző ábrákon is nyomon követhetünk. Kis különbség azonos cementpép esetén, de a metakaolin, szilikapor növeli a cementkő szilárdságát, így nő a beton hajlító-húzószilárdsága.



61. ábra

Cementhabarcs, és a polisztirol gyönggyel kitöltött habarcsváz nyomószilárdsági értékei

Részletes törési eredményeket a függelék 4. melléklete tartalmazza.

4. fejezet: Összefoglalás, kutatási eredmények

Kutatásunk témája az újrahasznosított adalékanyagokból készült könnyűbetonok szilárdságának vizsgálata hídépítési célra alkalmas tartószerkezeti elemek gyártásához. Egy tanszéki kutatáshoz kapcsolódtunk, mely során főleg duzzasztott agyagkavics került felhasználásra. Mivel a hulladék anyagok újrahasznosítása egyre szükségesebbé válik, a célunk az volt, hogy a kohósalak és a téglazúzalék tartalmú betonok is nagy szilárdságot érjenek el, bizonyítva, hogy alkalmazhatóak előre gyártott hídszerkezeti elemek előállításához.

A könnyűbeton alkalmazása az előregyártás során is előnyös, mivel a kisebb súlyú beton kizsaluzásakor kisebb erő keletkezik az elemek felszakításánál. A felhasználás során pedig kisebb a szállítási költség, kevesebb vasalást igényel és kisebb alapozás kialakítása szükséges.

A betonösszetételek tervezését az adalékanyagok fizikai tulajdonságainak vizsgálatával kezdtük. A mérések eredményei mellett iránymutatást adtak a korábbi tanszéki kutatási eredmények, melyek szerint a legmagasabb nyomószilárdsági értéket (az adalékanyag tartalom változtatása esetén) a 45%-os adalékanyag tartalom mellett lehet elérni a vizsgált duzzasztott agyagkavics esetén. Ezért a kohósalak és a téglazúzalék tartalmú betonösszetételek tervezésénél a kiegészítő agyagok vagy a homok arányát változtattuk, azonos adalékanyag tartalom mellett.

A lehető legnagyobb szilárdság eléréséhez szükséges, hogy az adalékanyag frakciók megfelelő mennyiségben legyenek összekeverve. Ezért a szemeloszlást úgy terveztük mind a téglazúzalék, mind a kohósalak esetén, hogy az A határgörbére illeszkedők legyenek.

A halmazszilárdsági vizsgálatok eredményeként a duzzasztott agyagkavics értéke kimagasló volt. Ezen eredmények alapján arra következtettünk, hogy az ebből készült betonnak lesz a legoptimálisabb nyomószilárdság-testsűrűség értéke, és ebből az adalékanyagból lehet a legnagyobb szilárdságú betont készíteni.

Vízfelvétel szempontjából a duzzasztott agyagkavics és a téglazúzalék értéke hasonló lett (duzzasztott agyagkavics: 28 m%, téglazúzalék: 22,9 m%). A kohósalaké valamivel alacsonyabb (13,7 m%). A kohósalak keverék készítésénél észrevettük, hogy bár a kohósalak felveszi ezt a vízmennyiséget, nem tartja magában, ezért a konzisztenciája nem lett megfelelő. A többi keverék víztartalmát ezen észrevétel szerint módosítottuk.

A nagy vízfelvétel előnyös lehet olyan szempontból, hogy az adalékanyag a betont belülről hidratálja, ami a kezdeti zsugorodási repedések csökkenését, így nagyobb szilárdság kialakulását eredményezi. Ez különösen igaz a téglazúzalékra, amit Suzuki M. mérései is alátámasztanak. [5] Ennek a hátulütője azonban az, hogy a sok vízfelvétel következtében a beton eltarthatósága kedvezőtlen, ezért a téglazúzalék alkalmazását kifejezetten előregyártás esetében ajánljuk, ahol

rövidebb eltarthatósági idő szükséges és jobban tervezhető az adalékanyag vízfelvétele miatt szükséges hozzáadott vízmennyiség.

Az adalékanyagok szemcse-testsűrűségének sorrendje ugyanúgy alakult, mint a betonok testsűrűsége. A legnagyobb sűrűségű a kohósalak, a legkisebb a téglazúzalék. A nyomó-, illetve a hajlító-húzó szilárdságok is ezt a tendenciát követik.

A kiegészítő anyagok közül a metakaolin kis mértékben jobb szilárdságot eredményezett, mint a szilikapor. További szilárdságnövekedést tudtunk elérni a metakaolin 20%-os adagolásával.

A duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonok testsűrűsége lett a legkisebb. Szilárdságuk meglehetősen jó, a 80MPa-t is eléri.

A kohósalak tartalmú betonok voltak a legnagyobb nyomó-, és hajlító-húzószilárdságúak, annak ellenére, hogy annak a halmazszilárdsága volt a legkisebb. Az 50%-os adalékanyag tartalom esetén 20 N/mm²-rel növekedett a nyomószilárdság a 45%-os adalékanyag tartalmú keverékhez képest, ami magyarázható azzal, hogy a kohósalak pórusaiba a cementpép be tud hatolni, ami jobb együttdolgozást biztosít.

A kohósalak keverék esetében 10% metakaolin hozzáadásával majdnem kétszeresére növekedett a nyomószilárdság (50 MPa-ról 90MPa-ra), a 20%-os metakaolin adagolás viszont csak további 10 N/mm²-nyi nyomószilárdság növekedést eredményezett, ami arányait tekintve nem olyan számottevő. A szilikapor hozzáadásával hasonló eredményeket kaptunk, mint a 10% metakaolin tartalmú keverékeknél, azonban a szilikaporról készült beton nyomószilárdsága mindig egy kissé alacsonyabb volt.

A téglazúzalékkal készített keverékek átlagos nyomószilárdsága eléri a kb. 50MPa értéket, mely az általunk mért eredmények közül a legalacsonyabb, viszont általánosságban véve nem számít rossznak. A kvarchomok tartalom növelése egy szintig növeli a szilárdságot, viszont afelett már nem változtat rajta.

A könnyűbetonok szilárdsága a polisztirol gyönggyel készített beton szilárdságát meghaladták, tehát az adalékanyagok is részt vettek a teherhordásban. Ebből következik, hogy a vizsgált könnyű adalékanyagok esetén cementváz és az adalékanyag is részt vesz a teherhordásban.

Mindegyik betonkeverék alkalmas a kizsaluzásra már egy napos korban, tehát a szükséges zsaluforgási idő meglehetősen rövid, egy napnál is kevesebb. Ez igen kedvező a gyártó szempontjából.

Kísérleteink és számításaink eredményként elmondható, hogy az eredeti *célkitűzésünknek megfelelően sikerült* kohósalakból nagyobb szilárdságú betont készíteni, mint a duzzasztott agyagkavicsból, metakaolin vagy szilikapor hozzáadása nélkül is. Ezt az adalékanyag-váz

szemeloszlásának helyes beállításával, az adalékanyag különleges vízfelvételi tulajdonságait figyelembe véve tudtuk elérni.

Kutatási kitekintés:

Vizsgálataink eredményei alapján, a további kutatási célkitűzéseket fogalmaztuk meg:

Hídszerkezetek esetén nem csak a szilárdság, hanem a tartósság (fagyállóság, vízzáróság, kloridállóság, karbonátosodás, stb.) vizsgálatok is szükséges.

A kohósalak adalékanyag tartalom optimalizálásával akár még nagyobb szilárdságú beton készítése válna lehetővé.

A téglazúzalék eltarthatóságának javítása elképzelhető további vízmennyiség hozzáadásával, illetve a konzisztencia beállításával, amit a különböző folyósító adalékszerek alkalmazásával érünk el. Az egy napnál fiatalabb betonok szilárdságának vizsgálatával a zsaluforgási idő optimuma megállapítható.

Köszönetnyilvánítás:

Először is köszönjük mindazoknak, akik segítették és támogatták a kutatásunkat.

Külön szeretnénk köszönetet mondani:

- BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, Anyagvizsgáló és közetfizika laborjában minden dolgozónak, akik segítették a munkánkat
- Józsa Zsuzsannának és Dr. Nemes Ritának a lektorálásért
- Takács Krisztiánnak a kísérletek során nyújtott nagylelkű segítségéért
- a kísérletek során alkalmazott anyagok biztosításáért:
 - LAFARGE Cement Magyarország Kft.
 - Liabau Építőipari Kft.
 - BASF Hungária Kft.

Szeretnénk megköszönni a konzulensünknek, Dr. Fenyvesi Olivérnek a szívmelengető támogatását és szakmai segítségét.

Felhasznált irodalom, szabványok:

- [1] Ujhelyi J., A könnyű adalékanyag beton fajtái, betonösszetételének tervezése és a beton készítése, Mérnöki továbbképző Intézet előadássorozatából: 3797, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, (1960) Budapest, pp 14-27.
- [2] Shafigh P. – Mahmud H. B. –Jumaat M. Z., Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete Materials and Design ISSN: 0261-3069 (2010) 43. szám pp. 650-654.
- [3] Yang K.-H. – Song J.-K. – Lee J.-S., Properties of alkali-activated mortar and concrete using lightweight aggregates, Materials and Structures ISSN: (2010) 43. szám pp. 403-416.
- [4] Chen B. – Liu J., Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high-strength and workability, Construction and Building Materials ISSN: 09500618 (2008) 22. szám pp. 1108-1113.
- [5] Suzuki M. – Meddah M. S. – Sato R., Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete, Cement and Concrete Research Institute ISSN: 0346-6906 (2009) 39. szám pp. 373-381.
- [6] Bogas J. A. – Gomes A., Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction, Materials and design ISSN: 0261-3069 (2013) 46. szám pp. 832-841.
- [7] Raithby K. D. – Lydon F. D., Lightweight concrete in highway bridges, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete ISSN: 0262-5075 (1981 may) Volume 2 Number 3 pp. 133-146.
- [8] R. Siddique – J. Klaus, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, Applied Clay Science ISSN: 1872-9053 (2009) 43. szám pp. 392–400
- [9] Balázs Gy., Építőanyagok és Kémia Tankönyv, Műegyetemi Kiadó J94493 (1994), pp. 243. + 251-259. + 283-290. + 301. + 320-322. + 357-363. + 420-424.
- [10] Kausay T., Beton, A betonszabvány néhány fejezetének értelmezése, Mérnöki Kamara Nonprofit Kft. ISBN: 978-963-88358-4-0 (2013), pp. 39.+ 228-230. +270.
- [11] Ujhelyi J., Beton Ismeretek, Műegyetemi Kiadó ISBN: 963 420 833 9 (2005), pp. 8-10. + 69-70.
- [12] Choi Y. W. – Kim Y. J. – Shin H. C. – Moon H. Y., An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete, Cement and Concrete Research Institute ISSN: 0346-6906 (2004) 36. szám pp. 1595-1602.
- [13] Czoboly O. – Harman B. –Lublóy É. –Balázs L. Gy. – Nehme S. G.: Szilikaport hatása a beton tűzállóságára. Építőanyag, 64. évf. 1–2. szám (2012), pp.22-26.
- [14] Kausay T., Nagyszilárdságú beton, Beton szakmai havilap ISSN 1218 – 4837, 2009. szeptember havi, 9. szám pp. 14-17.
- [15] basf-cc.hu, BASF Hungária Kft., Glenium C300 műszaki adatlap (2013.09.05.)
- [16] Liapor.hu, Liabau Kft., A Liapor, mint talaj (2013.09.05.)

- [17] Holcim.hu, Holcim Kft., CEM I 52,5 R Portlandcement Termékismertető EN 197-1 (2013.09.05.)
- [18] MSZ EN 13055-1:2006 Könnyű kőanyaghalmozatok. 1. rész: Könnyű kőanyaghalmozatok (adalékanyagok) betonhoz, habarcsához és injektálóhabarcsához
- [19] MSZ EN 1097-3:2000 Kőanyaghalmozatok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 3. rész: A halmazsűrűség és a hézagterfogat meghatározása
- [20] EN 934-2: t 3.1/3.2 Folyósító adalékszerre vonatkozó szabvány
- [21] Kausay T., Szilikapor, mikroszilika szuszpenzió (2013.09.05.)
<http://www.betonopus.hu/notesz/fogalomtar/60-szilikapor.pdf>
- [22] Kausay T., A friss beton konzisztenciájának mérése a területi mérték meghatározásával (2013.09.05.)
<http://www.betonopus.hu/notesz/labor-ismeret/terules.pdf>
- [23] Farkas Gy., Kovács T., Keleti I., Kiss R., Gács S., Bán L., Farkas J. (2006), „A 2007-08. évi üzleti kutatás-fejlesztési programot megalapozó tanulmány 2006”. Hidak (építési technológia), BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke
- [24] MSZ 4798-1:2004 Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfeleléség valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon

Függelék

1. Szitavizsgálat

Finom kohósalak

Szita	Fennmaradt anyag [g]	Fennmaradt anyag [m%]	Áthullott összes anyag [m%]
125	0	0	100
63	0	0	100
32	0	0	100
16	0	0	100
8	28	0	100
4	3699	36	64
2	2418	24	40
1	2007	20	21
0,5	1306	13	8
0,25	641	6	2
0,125	163	2	0
0,063	15	0	0
tálca	6	0	0
Összes	10278	100	

Durva kohósalak

Szita	Fennmaradt anyag [g]	Fennmaradt anyag [m%]	Áthullott összes anyag [m%]
125	0,00	0	99
63	0,00	0	99
32	0,00	0	99
16	18,70	0	99
8	3308,80	39	60
4	3398,10	40	20
2	766,30	9	11
1	382,70	5	6
0,5	250,00	3	3
0,25	156,20	2	2
0,125	84,80	1	1
0,063	44,80	1	0
tálca	49	0	0
Összes	8459	99	

2. Vízfelvételi eredmények

Duzzasztott agyagkavics 9

Minta	m beérkezett (g)	m p+száraz (g)	m p+nedv fél órás (g)	m p+nedv 24 órás (g)	m p+nedv végleges (g)	M p+w+a
3	351,5	524,2	546,0	561,0	570,5	994,6
6	530,4	666,9	698,1	722,4	737,0	1058,0
2	559,4	684,6	-	-	807,9	1111,2
7	537,2	666,6	-	-	784,6	1102,3

Téglazúzalék

Minta	m beérkezett (g)	m száraz (g)	m nedv fél órás (g)	m nedv 24 órás (g)	m p+nedv végleges (g)	M p+w+a
1	230,0	226,7	277,8	280,4	1010,7	1860,2
2	204,2	200,6	235,0	239,4	952,0	1852,0
3	273,9	269,6	320,5	326,3	999,4	1880,3

Kohósalak

Minta	m beérkezett (g)	m száraz (g)	m nedv fél órás (g)	m nedv 24 órás (g)	m p+nedv végleges (g)	M p+w+a
13	346,9	338,3	372,5	383,4	629,0	1078,1
14	528,2	514,4	564,3	586,7	729,9	1097,2
15	793,5	780,8	862,4	884,4	1122,7	1537,0
16	464,6	456,9	456,9	504,7	767,4	1140,1

3. Könnyűbeton összetétel tervezés

Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú könnyűbetonok

17. jelű duzzasztott agyagkavics 45% + metakaolin 20%				
Összetevők	Adagolás			Sűrűség
	kg/m ³	kg/keverék	l/m ³	kg/l
CEM I 52,5 R	460	16,6	148	3,1
metakaolin	92	3,3	35	2,6
v/c=0,35	160	5,8	160	1,0
homok 0/4	528	19,0	200	2,6
d. agyagkavics 4/8	621	22,4	450	1,4
d. agyagkavics 8/16	0	0,0	0	2,6
folyósító adalékszer	1,2	0,04	1	1,1
levegő	-		5	-
Σ	1863		1000	

18. jelű duzzasztott agyagkavics 50%				
Összetevők	Adagolás			Sűrűség
	kg/m ³	kg/keverék	l/m ³	
CEM I 52,5 R	460	16,6	148	3,1
v/c=0,35	160	5,8	160	1,0
homok 0/4	528	17,6	185	2,6
d. agyagkavics 4/8	621	24,8	500	1,4
d. agyagkavics 8/16	0	0,0	0	2,6
folyósító adalékszer	1,2	0,04	1	1,1
levegő	-		5	-
Σ	1801		1000,0	

Téglazúzalék adalékanyagú betonok

19. jelű téglazúzalék (fele kvarchomokkal)				
Összetevők	Adagolás			Sűrűség
	kg/m ³	kg/keverék	l/m ³	
CEM I 52,5 R	460	16,6	148	3,1
v/c=0,35	160	5,8	160	1,0
homok 0/4	332	12,0	125	2,7
téglazúzalék 0/1	79	2,9	44	1,8
téglazúzalék 1/4	146	5,3	81	1,8
téglazúzalék 4/8	263	9,5	163	1,6
téglazúzalék 8/16	427	15,4	264	1,6
folyósító adalékszer	4,2	0,2	4	1,1
levegő			10	
Σ	1871		1000	

20. jelű téglazúzalék (homok nélkül)				
Összetevők	Adagolás			Sűrűség
	kg/m ³	kg/keverék	l/m ³	
CEM I 52,5 R	460	16,6	148	3,1
v/c=0,35	160	5,8	160	1,0
homok 0/4	0	0,0	0	2,7
téglazúzalék 0/1	159	5,7	88	1,8
téglazúzalék 1/4	293	10,5	163	1,8
téglazúzalék 4/8	263	9,5	163	1,6
téglazúzalék 8/16	427	15,4	264	1,6
folyósító adalékszer	4,15	0,2	4	1,1
levegő			10	
Σ	1765		1000	

Kohósalak adalékanyagú betonok

21. jelű Kohósalak 50% - 460				
Összetevők	Adagolás			Sűrűség
	kg/m ³	kg/ keverék	l/m ³	
CEM I 52,5 R	460	16,56	148	3,1
v/c=0,35	160	5,76	160	1,0
homok 0/4	489	17,59	185	2,6
kohósalak finom	296	10,64	158	1,88
kohósalak durva	643	23,14	343	1,88
folyósító adalékszer	1,15	0,04	1	1,1
levegő	-		5	-
Σ	2048		1000	

22. jelű Kohósalak 45% +10 m% metakaolin				
Összetevők	Adagolás			Sűrűség
	kg/m ³	kg/ keverék	l/m ³	
CEM I 52,5 R	460	16,56	148	3,10
metakaolin	46	1,656	18	2,60
v/c=0,35	160	5,76	160	1,00
homok 0/4	573	20,63	217	2,64
Kohósalak finom	219	7,89	117	1,88
Kohósalak durva	626	22,54	334	1,88
folyósító adalékszer	1,15	0,04	1	1,10
levegő	-		5	-
Σ	2085		1000	

23. jelű Kohósalak 45%+20 m% metakaolin				
Összetevők	Adagolás			Sűrűség
	kg/m ³	kg/ keverék	l/m ³	
CEM I 52,5 R	460	16,56	148	3,10
metakaolin	92	3,31	35	2,60
v/c=0,35	160	5,76	160	1,00
homok 0/4	532	19,15	202	2,64
kohósalak finom	232	8,34	124	1,88
kohósalak durva	609	21,94	325	1,88
folyósító adalékszer	1,15	0,041	1	1,10
levegő	-		5	-
Σ	2086		1000	

24. jelű Kohósalak 45%+10 m% szilikapor				
Összetevők	Adagolás			Sűrűség
	kg/m ³	kg/ keverék	l/m ³	kg/l
CEM I 52,5 R	460	16,56	148	3,10
metakaolin	46	1,66	17	2,65
v/c=0,35	160	5,76	160	1,00
homok 0/4	582	20,96	220	2,64
kohósalak finom	213	7,67	114	1,88
kohósalak durva	626	22,55	334	1,88
folyósító adalékszer	1,15	0,04	1	1,10
levegő	-		5	-
Σ	2089		1000	

4. Vizsgálati jegyzőkönyv

Szilárdsági vizsgálat

17. jelű duzzasztott agyagkavics 45%+metakaolin 20%

Keverék száma	Próbatest sorszám	Törés kora	Friss tömeg	Szilárd tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség		Nyomó			Testsűrűség (víztelített)	
		nap	kg	kg	mm			kg/m ³		kN	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	
17	17H1	1	6,750	6,685	149,9	148,5	150,2	2000	1996	1296	58,1	55,6	2009	1987
	17H2		6,813	6,747	149,8	151,5	150,2	2019	1977	1207	53,1			
	17H3	2	6,821	6,764	150,2	151,9	149,8	2021	1981	1429	62,8	64,7	2040	1994
	17H4		6,948	6,871	149,8	152,8	149,7	2059	2008	1524	66,6			
	17H5	28	6,946	6,869	151,2	150,3	150,7	2058	2012	1828	80,7	80,9	2046	2032
	17H6		6,767	6,713	150,2	149,5	149,7	2005	2003	1827	81,6			
	17H7		6,999	7,044	150,6	150,7	149,6	2074	2080	1809	80,2			

Keverék száma	Próbatest sorszám	Törés kora	Törési tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség	Hajlítási			Nyomó			
		nap	kg	mm			kg/m ³	N	N/mm ²	N/mm ²	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²
17	17H10	1	6,685	70,9	72,1	250,3	2028	7820	6,79	6,59	202,0	224,0	43,5	46,2
	17H11		6,747	70,5	73,5	251,7	2008	7400	6,39		236,0	243,0	48,9	
	17H12	2	6,764	70,7	72,2	249,9	2042	8650	7,55	7,45	247,0	256,0	51,3	49,8
	17H13		6,871	70,7	72,9	252,4	1999	8500	7,35		225,0	248,0	48,3	
	17H14	28	6,869	71,2	72,0	250,6	2024	10150	8,76	8,70	307,0	319,5	63,9	63,0
	17H15		6,713	70,9	73,6	252,8	2013	10150	8,65		305,0	304,0	62,1	

18. jelű duzzasztott agyagkavics 50%

Keverék száma	Próba- test sor- száma	Törés kora	Friss tömeg	Szilárd tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség		Nyomó		Átlag	Testsűrűség (víztelített)	
								Friss	Törési	erő	szilárdság	nyomó	Friss	Szilárd
		nap	kg	kg	mm			kg/m ³		kN	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	
18	18H1	1	6,686	6,625	150,1	151,1	150,0	1981	1949	1098	48,5	49,1	1985	1954
	18H2		6,710	6,650	149,9	151,0	150,0	1988	1959	1124	49,6			
	18H3	2	6,625	6,566	149,3	150,7	149,4	1963	1957	1249	55,5	53,4	1964	1958
	18H4		6,635	6,570	149,8	150,2	149,6	1966	1958	1152	51,3			
	18H5	28	6,741	6,675	150,8	150,7	150,4	1997	1961	1371	60,5	63,1	2011	1976
	18H6		6,727	6,673	150,1	151,7	150,5	1993	1952	1439	63,0			
	18H7		6,892		150,7	150,2	149,7	2042	2015	1479	65,8			

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Törési tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség	Hajlítási			Nyomó			
								Erő	Szilárdság	Átlag	Erő		Szilárdság	Átlag
		nap	kg	mm			kg/m ³	N	N/mm ²	N/mm ²	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²
18	18H10	1	2,551	70,7	72,0	251,5	1993	7500	6,57	6,49	205,5	200,0	41,4	42,3
	18H11		2,48	70,8	71,2	250,1	1966	7270	6,41		201,0	222,5	43,2	
	18H12	2	2,594	70,7	72,2	251,5	2022	7700	6,73	7,11	219,0	228,0	45,6	47,7
	18H13		2,485	70,6	71,6	250,0	1965	8500	7,50		247,0	241,0	49,8	
	18H14	28	2,565	71,0	72,0	251,3	1996	9150	7,94	7,91	261,0	272,0	54,4	54,7
	18H15		2,506	70,7	72,0	250,1	1969	9000	7,88		269,5	270,0	55,1	

19. jelű téglazúzalék (fele kvarchomokkal)

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Friss tömeg	Szilárd tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség		Nyomó			Testsűrűség (víztelített)	
								Friss	Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Friss	Szilárd
		nap	kg	kg	mm			kg/m ³		kN	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	
19	19H1	1	7,058	6,963	150,2	151,2	150,1	2091	2037	807	35,6	35,4	2089	2047
	19H2		7,045	6,965	149,8	150,3	149,9	2087	2058	794	35,2			
	19H3	2	7,000	6,929	149,5	150,3	149,5	2074	2068	877	39,0	38,0	2074	2065
	19H4		7,002	6,945	150,1	149,9	150,1	2075	2061	832	37,0			
	19H5	28	7,010	6,954	149,8	150,2	150,3	2077	2069	1131	50,1	49,9	2099	2067
	19H6		7,103	7,028	150,1	151,1	149,8	2105	2082	1138	50,3			
	19H7		7,135	7,049	150,3	152,9	150,7	2114	2049	1137	49,3			

Keverék száma	Próba-test sor-száma	Törés kora	Törési tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség	Hajlítási			Nyomó			
		nap	kg	mm			Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Erő		Szilárdság	Átlag
											kN	kN		
19	19H1 0	1	2,656	70,5	73,7	250,8	2036	7120	6,11	6,12	167,0	165,0	33,9	34,3
	19H1 1		2,568	70,7	70,8	250,4	2049	6460	5,75		152,0	171,0	33,0	
	19H1 2		2,636	70,8	71,5	250,6	2079	7370	6,48		175,0	177,0	35,9	
	19H1 3	2	2,708	71,0	73,7	250,6	2066	8800	7,47	7,48	169,0	158,0	33,4	34,6
	19H1 4		2,619	70,7	70,8	252,0	2076	8500	7,56		175,0	172,5	35,5	
	19H1 5		2,613	70,8	71,5	250,5	2061	8450	7,42		168,5	173,0	34,8	
	19H1 6	28	2,673	70,7	72,8	250,5	2073	8500	7,36	7,18	228,9	235,3	47,4	47,3
	19H1 7		2,66	70,6	73,2	250,0	2058	8200	7,07		237,6	214,6	46,1	
	19H1 8		2,642	71,0	71,7	251,3	2066	8150	7,11		236,6	236,9	48,3	

20. jelű téglazúzalék (homok nélkül)

Keverék száma	Próba-test sor-szám	Törés kora	Friss tömeg	Szilárd tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség		Nyomó			Testsűrűség (víztelített)	
						Nyomott felület		Friss	Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Friss	Szilárd
		nap	kg	kg	mm		kg/m³		kN	N/mm²	N/mm²	kg/m³		
20	20H1	1	6,606	6,522	151,0	153,2	150,3	1957	1899	736	32,0	31,8	1977	1913
	20H2		6,740	6,629	149,8	152,5	149,9	1997	1927	724	31,7			
	20H3	2	6,625	6,526	150,1	153,4	149,9	1963	1901	836	36,4	35,9	1956	1908
	20H4		6,581	6,489	150,1	152,1	149,9	1950	1916	806	35,4			
	20H5	28	6,764	6,67	150,1	151,1	150,0	2004	1938	960	42,4	45,1	1986	1947
	20H6		6,627	6,537	150,2	151,9	150,5	1964	1961	1018	44,5			
	20H7		6,722	6,64	150,1	149,7	150,1	1992	1943	1086	48,3			

Keverék száma	Próba-test sor-szám	Törés kora	Törési tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség	Hajlítási			Nyomó			
		nap	kg	mm			Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Erő		Szilárdság	Átlag
											kN	kN		
20	20H10	1	2,479	70,3	71,6	253,1	1948	6400	5,71	5,88	143,0	152,0	30,1	29,6
	20H11		2,503	71,1	71,9	250,4	1956	6920	6,00		144,0	137,0	28,7	
	20H12		2,492	69,9	72,7	249,7	1964	6700	5,94		151,0	142,0	29,9	
	20H13	2	2,472	70,3	71,2	252,1	1959	6850	6,14	5,71	154,0	157,0	31,7	32,0
	20H14		2,427	70,0	70,5	24,8	19828	7150	6,52		164,0	145,0	31,5	
	20H15		2,505	70,7	71,9	250,4	1969	5100	4,47		161,0	160,5	32,8	
	20H16	28	2,491	70,2	71,1	251,2	1986	7300	6,56	6,13	210,4	210,9	43,0	44,0
	20H17		2,539	71,1	71,8	251,0	1983	7100	6,17		218,2	213,2	44,0	
	20H18		2,509	70,6	71,7	249,9	1985	6400	5,65		225,0	215,6	45,0	

21. jelű Kohósalak 50%

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Friss tömeg	Szilárd tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség		Nyomó			Testsűrűség (víztelített)	
						Nyomott felület		Friss	Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Friss	Szilárd
		nap	kg	kg	mm			kg/m³		kN	N/mm²	N/mm²	kg/m³	
21	21H1	1	7,701	7,584	150,2	151,5	150,3	2282	2207	802	35,2	34,4	2255	2193
	21H2		7,518	7,441	150,0	150,7	150,2	2228	2179	758	33,5			
	21H3	2	6,458	7,471	149,9	149,4	150,0	1913	2231	1064	47,5	49,8	2086	2228
	21H4		7,625	7,54	150,2	150,9	150,1	2259	2224	1179	52,1			
	21H5	28	7,568	7,472	149,9	150,7	150,1	2242	2229	1478	65,3	69,4	2255	2231
	21H6		7,692	7,555	150,1	152,0	149,8	2279	2236	1621	71,2			
	21H7		7,572	7,487	150,6	150,6	150,0	2244	2227	1622	71,8			

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Törési tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség	Hajlítási			Nyomó			
							Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Erő		Szilárdság	Átlag
		nap	kg	mm			kg/m ³	N	N/mm ²	N/mm ²	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²
21	21H10	1	2,754	70,0	71,4	249,9	2205	7650	6,89	6,79	177,0	181,0	36,5	35,7
	21H11		2,747	70,6	70,2	251,7	2202	7430	6,69		171,0	170,0	34,8	
	21H12	2	2,767	69,9	69,7	249,9	2272	8900	8,23	8,27	216,0	226,5	45,4	45,0
	21H13		2,77	70,6	70,4	251,1	2221	9250	8,32		226,0	210,5	44,5	
	21H14	28	2,762	70,1	70,8	250,1	2224	10850	9,81	10,02	334,5	294,4	64,2	66,1
	21H15		2,813	71,1	71,4	250,3	2215	11700	10,22		317,4	349,2	68,0	

22. jelű Kohósalak 45% +10MK

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Friss tömeg	Szilárd tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség		Nyomó			Testsűrűség (víztelített)	
						Nyomott felület		Friss	Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Friss	Szilárd
		nap	kg	kg	mm			kg/m³		kN	N/mm²	N/mm²	kg/m³	
22	22H1	1	7,657	7,597	150,0	152,5	150,0	2269	2209	1260	55,1	54,4	2265	2207
	22H2		7,629	7,575	149,9	152,2	150,2	2260	2206	1226	53,7			
	22H3	2	7,528	7,482	149,7	150,4	149,7	2231	2223	1477	65,6	67,0	2255	2225
	22H4		7,693	7,632	150,2	152,5	149,9	2279	2226	1563	68,4			
	22H5	28	7,821	7,525	150,0	150,4	150,1	2317	2230	2176	96,4	92,9	2253	2230
	22H6		7,429	7,6	149,9	152,0	149,8	2201	2234	2081	91,4			
	22H7		7,566	7,509	149,9	150,7	149,8	2242	2227	2051	90,9			

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Törési tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség	Hajlítási			Nyomó			
							Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Erő		Szilárdság	Átlag
		nap	kg	mm			kg/m ³	N	N/mm ²	N/mm ²	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²
22	22H10	1	2,836	70,5	71,9	249,8	2239	9550	8,42	8,33	239,0	240,5	48,9	47,3
	22H11		2,785	70,7	71,0	250,6	2212	9300	8,25		250,5	197,0	45,7	
	22H12	2	2,845	71,2	71,9	250,4	2218	10200	8,81	8,50	264,0	257,4	53,2	52,9
	22H13		2,805	70,7	71,6	251,4	2206	9300	8,20		247,5	268,0	52,6	
	22H14	28	2,876	70,9	73,1	250,1	2218	15000	12,86	12,37	414,7	386,5	81,8	82,5
	22H15		2,863	70,8	71,9	251,7	2234	14550	12,72		418,7	401,6	83,7	
	22H16		2,871	72,2	72,0	250,3	2209	13750	11,55		398,1	406,4	82,1	

23. jelű Kohósalak 45% +20MK

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Friss tömeg	Szilárd tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség		Nyomó			Testsűrűség (víztelített)	
						Nyomott felület		Friss	Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Friss	Szilárd
		nap	kg	kg	mm		kg/m³		kN	N/mm²	N/mm²	kg/m³		
23	23H1	1	7,690	7,685	149,8	151,2	149,7	2279	2260	1104	48,8	48,4	2270	2258
	23H2		7,632	7,593	149,9	149,2	150,1	2261	2256	1075	48,0			
	23H3	2	7,653	7,612	149,7	149,5	149,9	2268	2274	1466	65,4	67,9	2269	2271
	23H4		7,662	7,6	150,0	149,3	149,9	2270	2268	1577	70,5			
	23H5	28	7,668	7,609	149,5	149,4	149,8	2272	2286	2388	106,7	101,2	2269	2284
	23H6		7,642	7,585	149,9	148,3	149,8	2264	2288	2064	92,9			
	23H7		7,667	7,604	150,0	148,7	150,2	2272	2280	2319	103,8			

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Törési tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség	Hajlítási			Nyomó			
							Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Erő		Szilárdság	Átlag
		nap	kg	mm			kg/m ³	N	N/mm ²	N/mm ²	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²
23	23H10	1	2,833	70,3	70,7	250,0	2282	8750	7,90	7,84	193,0	211,0	41,2	40,7
	23H11		2,896	70,8	72,8	250,4	2245	9000	7,77		203,5	189,5	40,1	
	23H12	2	2,781	70,2	70,2	250,1	2256	11200	10,20	10,28	290,0	284,0	58,6	57,4
	23H13		2,877	70,7	71,2	250,1	2284	11700	10,35		265,5	285,0	56,2	
	23H14	28	2,759	70,4	68,7	250,1	2280	15550	14,37	14,55	455,9	393,3	88,3	89,1
	23H15		2,914	71,0	71,9	250,2	2282	16950	14,74		458,4	423,3	90,0	

24. jelű Kohósalak 45%+10SP

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Friss tömeg	Szilárd tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség		Nyomó			Testsűrűség (víztelített)	
		nap	kg	kg	mm	mm	mm	Friss	Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Friss	Szilárd
								kg/m ³	kg/m ³	kN	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	
24	24H1	1	7,628	7,562	149,4	150,6	149,4	2260	2242	871	38,7	40,3	2280	2250
	24H2		7,763	7,692	150,1	150,6	150,1	2300	2258	945	41,8			
	24H3	2	7,629	7,567	149,9	149,9	150,5	2260	2246	1404	62,2	59,0	2241	2234
	24H4		7,500	7,431	150,0	149,3	149,8	2222	2223	1247	55,8			
	24H5	28	7,580	7,517	149,8	147,4	150,0	2246	2283	1943	87,9	84,0	2259	2275
	24H6		7,600	7,572	150,2	148,4	149,7	2252	2285	1770	79,7			
	24H7		7,628	7,562	149,9	151,3	149,9	2279	2256	1916	84,5			

Keverék száma	Próba- test sor- szám	Törés kora	Törési tömeg	Magas	Széles	Hossz	Testsűrűség	Hajlítási			Nyomó			
		nap	kg	mm	mm	mm	kg/m ³	Törési	Erő	Szilárdság	Átlag	Erő		Átlag
								kg/m ³	N	N/mm ²	N/mm ²	kN	kN	N/mm ²
24	24H10	1	2,766	70,2	69,5	249,8	2270	7150	6,57	7,21	197,5	194,5	40,3	40,7
	24H11		2,767	69,9	70,4	249,5	2257	8550	7,85		213,0	189,5	41,2	
	24H12	2	2,76	69,9	69,6	249,8	2272	8600	7,97	8,49	276,0	269,5	56,1	53,5
	24H13		2,772	70,1	70,9	249,8	2235	9950	9,01		248,5	250,5	50,9	
	24H14	28	2,809	70,2	71,6	250,0	2236	12050	10,77	11,84	338,8	298,2	65,0	73,3
	24H15		2,859	70,1	71,5	249,9	2282	14400	12,90		412,6	386,6	81,6	