



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék

***Finomrész hatása az öntömörödő beton
mechanikai és egyéb tulajdonságaira***

***The effect of the fine aggregate on the
mechanical and other properties of the self-
compacting concrete (SCC)***

Tudományos Diákköri Dolgozat

Készítette:

Konzulens:

Sik Gergely Attila
IV. évf. hallgató

Dr. Salem G. Nehme PhD.
egyetemi docens
BME Építőanyagok és
Mérnökgeológiai Tanszék

„A kb. 30 évvel ezelőtti „betonválság” napjaiban Japánban a legnagyobb kutatási aktivitás a betonkárosodások tanulmányozására irányult. Én azonban elhatároztam magam, hogy más utat, a beton tartósságának javítását kívánom feltárni...

...Alapvetően úgy tudunk tartós betonszerkezeteket készíteni, hogy jó minőségű anyagokat használunk, és azokat szakszerűen dolgozzuk fel. Egy rossz feldolgozás kompenzálható az alkalmazott anyagok javításával.

Ez az ötlet - erősséget használni a gyengeség megszüntetésére – vezetett az öntömörödő beton kifejlesztéséhez.”

H. Okamura 1997.

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS.....	5
1.1. CÉLKITŰZÉSEK	5
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	7
2.1. ÁLTALÁNOS BETONISMERETEK.....	7
2.1.1. A beton fogalma	7
2.1.2. Az öntömörödő beton kialakulása.....	7
2.1.3. Az öntömörödő beton fogalma	8
2.1.4. A beton összetevői.....	9
2.1.4.1. Adalékanyag.....	9
2.1.4.2. Kötőanyag	10
2.1.4.3. Keverővíz.....	12
2.1.4.4. Adalékszer	13
2.1.4.5. Levegő	14
2.1.4.6. Kiegészítő anyagok.....	14
2.1.5. Fajlagos felület	17
2.1.6. Az öntömörödő beton alkalmazása	18
2.1.6.1 Az öntömörödő beton előnyös tulajdonságai	18
2.1.6.2 Megvalósult szerkezetek.....	20
2.1.7. Konzisztencia, vízzáróság és fagyállóság vizsgálati eszközök	24
2.1.7.1 Blokkoló-gyűrű (J-Ring) vizsgálat	24
2.1.7.2 Kifolyási idő (V-Funnel) vizsgálat	24
2.1.7.3 Vízzáróság	25
2.1.7.4 Fagyállóság.....	25
3. KÍSÉRLETI TERV, MÓDSZER	26
3.1 A KUTATÁS CÉLJA.....	26
3.2 HIPOTÉZISEK	26
3.3 A KUTATÁS FOLYAMATA	27
3.3.1. Receptúrák, kísérleti paraméterek	27
3.3.2. Fajlagos felület meghatározása	28
3.3.3. Betonkeverés, alkalmazott beton összetételek.....	29

3.4. PRÓBATESTEK	31
3.5. VIZSGÁLATI, KÍSÉRLETI ELRENDEZÉSEK ÉS MÉRÉSI MÓDOK.....	32
3.5.1. Nyomószilárdság	32
3.5.2. Vízzáróság	32
3.5.3. Fagyállóság.....	33
4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS AZOK KIÉRTÉKELÉSE, FELDOLGOZÁSA	34
4.1 KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK, ÉRÉKELES.....	34
4.1.1. Frissbeton tulajdonságai	34
4.1.2. Megszilárdult beton tulajdonságai	36
4.1.3. Nyomószilárdság	38
4.1.3.1. Mészkeőliszt adagolás hatása	38
4.1.3.2. Víz-finomrész (cement, mészkeőliszt, metakaolin) tényező és a 28 napos nyomószilárdság összefüggése	42
4.1.4. Vízzáróság	43
4.1.5. Fagyállóság.....	46
5. MEGÁLLAPÍTÁSOK, KONKLÚZIÓ	49
6. JÖVŐBENI KUTATÁSOK	51
7. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS	52
8. HIVATKOZÁSOK	53
9. JELÖLÉSEK.....	54
10. SUMMARY IN ENGLISH	55
11. FÜGGELÉK.....	56

1. BEVEZETÉS

Abstract:

Nowadays the demand for concrete with high quality is permanent. The claim to build aesthetic reinforced concrete structures is increasing. In the last decade the development of the new concreting procedures became faster, so the concrete was made economical and multi-faceted. The self-compacting concrete is used in the precast concrete industry, because only these factories have the possibility to measure the aggregate precise enough. Mostly prestressed concrete pieces are built in the factories, so the high early strength is the most important requirement. The production became profitable and quicker with this new technology.

Manapság tartósabb betonok iránt állandó a kereslet, ahogy a vasbeton építmények esztétikus megjelenésére irányuló igény is megnövekedett. Az utóbbi évtizedben a beton költségtakarékos és sokoldalúan alkalmazott építőanyaggá vált az új betonozási eljárások gyors fejlődésének köszönhetően. Az öntömörödő beton előregyártó üzemekben történő felhasználása jelentős méreteket ölt az építőiparban, hiszen itt adottak a lehetőségek a pontos és ellenőrzött adagolásra. Ezekben az üzemekben elsősorban feszített szerkezeteket hoznak létre, melyek gyártása során az egyik leglényegesebb követelmény a magas korai szilárdság, ezáltal a termelés gazdaságossá és gyorsabbá válik a kizsaluzási idő csökkenésével párhuzamosan.

1.1. Célkitűzések

Kutatásom keretében arra a kérdésre kerestem a választ, hogy a ma már egyre közkedveltebbé váló öntömörödő betonok mechanikai és egyéb tulajdonságait milyen módon, illetve milyen mértékben befolyásolja a finomrész-tartalom változtatása. A dolgozat célja ennek a kérdéskörnek a tisztázása, s a kapott eredmények összevetése különös tekintettel a nyomószilárdsági, a vízzárósági, s a fagyállósági tulajdonságokra.

A cél érdekében 12 – egymástól eltérő és egyedi – beton receptúra került kialakításra, figyelembe véve a finomrész mennyiségének és arányának folyamatos növelését, melyhez mészkőliszt és metakaolin került felhasználásra. A receptúrák kiszámolása során alapvető koncepció volt a – finom frakció mennyiségi módosításán túl – víz-cement tényező változtatása is.

A betonkeverést követően a próbatesteket 7 napig vízben tároltam. A beton nyomószilárdságára vonatkozó vizsgálatokat 2, 7, és 28 napos korú próbatesteken végeztem el, mindegyikhez külön-külön 3-3 db-ot felhasználva. Ez alapján megállapítható, hogy az egyes változók (kiegészítő adalékanyag, cementtartalom, víz-cement tényező és a finomrész-tartalom) hogyan befolyásolják az öntömörödő beton nyomószilárdságát, vízzáróságát és fagyállóságát.

A vízzárósági és fagyállósági vizsgálatokhoz 28 napos korú próbakockákat használtam fel, ezáltal az eredmények megfelelő pontossággal kerülhetnek összehasonlításra.

A dolgozatomban részletesen bemutatom a Tudományos Diákköri Munka keretében elvégzett vizsgálatokat, a kísérletekből kapott eredményeket, és azok összehasonlító elemzését.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Általános betonismeretek

2.1.1. A beton fogalma

„A beton mesterséges építőanyag, melyet kötőanyag, víz, adalékanyag, adalékszer és kiegészítő anyagok keverékéből állítanak elő. Készítésekor lágy, alakítható, majd a kötőanyag és a víz közt meginduló fizikai és kémiai folyamatok hatására előbb megköt, majd fokozatosan szilárdul és mesterséges kővé alakul.” [1], [2]

A mérnöki gyakorlatban egyéb kötőanyaggal, pl. műgyantával vagy bitumennel készített betonokat (plasztbeton, aszfaltbeton stb.) is alkalmaznak, de itt kizárólag a cement kötőanyagú betonokkal foglalkoztam.

2.1.2. Az öntömörödő beton kialakulása

Az öntömörödő beton készítésének gondolata először 1986-ban merült fel egy japán professzor, *Okamura* javaslatára, s az első világviszonylatban is ismertté vált kísérletek is az ő nevéhez fűződnek. Azonban az első prototípus csak 1988-ban készült el. Az öntömörödő betonok tulajdonságaival kapcsolatos vizsgálatokat *Ozava* és *Maekawa* végezték a Tokyo Egyetemen. [3]

Kezdetben csak az ún. háromkomponensű (adalékanyag, cement, víz) beton volt ismert, ahol a konzisztencia csak a cementpép állagától függ. Ebből következően folyékonyabb beton csak a víz-cement tényező változtatásával (növelésével) állítható elő, ami szilárdságcsökkenést okoz. Abból az okból kifolyólag, hogy a szerkezetek méretezésénél a szilárdsági követelmények voltak elsődlegesek, a beton tulajdonságát is ehhez igazították. Így nehezebben bedolgozható és egyben szárazabb betonkeverékek kerültek ki az iparba.

Az öntömörödő beton kialakulásához nagyban hozzájárult a folyósítószeres fejlődése, hiszen ezek használata lehetőséget ad a kívánt konzisztencia szabályozására a szilárdság változtatásától függetlenül.

Az igényeknek köszönhetően és a fejlődés révén sikerült létrehozni egy olyan betont, mely zsaluzatba töltésekor bármilyen tömörítési energia közlése nélkül, csupán a nehézségi erő hatására üregmentesen tudja kitölteni a tetszés szerint kialakított zsaluzatot. Ezen kívül a betonacélokat telítetten körülvetzi, felülete vízszintes és szinte tökéletesen egyenletes.

Meg kell említenünk, hogy Magyarországon 1976 augusztusában összesen 12 óra folyamatos betonozással készült el az ÉTI szentendrei kísérleti csarnokának egy méter vastag födémje vibrálást nem igénylő betonnal. Tehát öntömörödő képességű betont már *Okamurat* megelőzően is készítettek Hazánkban. [3]

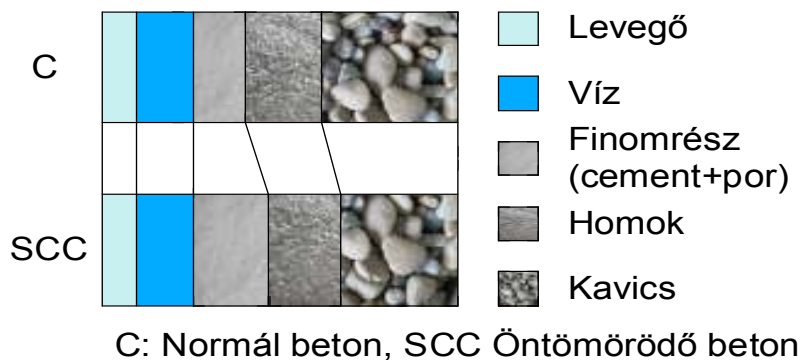
2.1.3. Az öntömörödő beton fogalma

Az öntömörödő betonban általában a legnagyobb szemcseátmérőjű adalékanyag 16 mm, kivételes esetekben 32 mm. Összetétele a hagyományosan tömörített betonoktól jellemzően a nagyobb finomrész tartalmában ($d \leq 0,125$ mm), a magasabb kötőanyagtartalmában, a kisebb kavics/homok arányában tér el. Ezen felül szükséges még nagyteljesítményű folyósítószer és viszkozitás-szabályozó adagolása is.

A megszilárdult öntömörödő beton jellemzői közel állnak a hagyományosan tömörített betonéhoz, viszont az öntömörödő beton különleges frissbeton tulajdonságokkal rendelkezik, melyek egyedi vizsgálatokkal és értékekkel minősíthetők:

- önkiegyenlítő képesség
- önlégtelenítő képesség
- szerkezeti stabilitás
- zárványképződési hajlam
- folyósság (viszkozitás)

Az öntömörödő beton különböző előnyös tulajdonságaihoz hozzátartozik még a kiemelkedő folyósságon túl a tartósság fokozódása, a bedolgozási teljesítmény növekedése, az építéshelyi körülmények javulása, továbbá az, hogy a betonozás különleges környezeti és tervezési feltételek és követelmények között is megoldható. Ezek a 2.1.6.1.-es fejezetben kerülnek részletes kifejtésre. [4]



1. kép: A normál beton és az öntömörödő beton összetétele V% [3]

2.1.4. A beton összetevői

A beton alkotórészei, alapanyagai: *az adalékanyag, a kötőanyag, a víz, az adalékszer* és a pórusokat kitöltő *levegő*, illetve egyéb kiegészítő anyagok. [5] A következő (2.1.4.1-2.1.4.6) alfejezetekben kerülnek ismertetésre az egyes alkotóelemek a megfogalmazásban található sorrendnek megfelelően.

2.1.4.1. Adalékanyag

A beton térfogatának legnagyobb részét az adalékanyag tölti ki és alkotja annak szilárd vázát. [6]

A betontechnológiában adalékanyagnak hívjuk a természetes és mesterséges eredetű, a természetben aprózódott, vagy iparilag aprított (tört), esetleg granulált szemhalmazokat, melyek a kötőanyagon, a vízen, az adalékszeren túl képezik a beton fő alkotórészeit, továbbá összességükben a betonok üregmentes térfogatának legalább 50-60 %-át kitöltik.

„A beton adalékanyag legnagyobb szemnagysága nagyobb, mint 4 mm, általában legalább 8 mm.” [7]

Az adalékanyag - kiszáritott állapotban - testsűrűsége szerint lehet *nehéz (sugárvédő)* ($> 3000 \text{ kg/m}^3$), *közönséges (normál)* ($2001\text{-}3000 \text{ kg/m}^3$), vagy *könnyű adalékanyag* ($\leq 2000 \text{ kg/m}^3$). Ha az adalékanyag laza, kiszáritott állapotban mért halmazsűrűsége nem több, mint 1200 kg/m^3 , akkor szintén könnyűnek tekinthető (MSZ EN 206-1:2002). A különleges tulajdonságú betonban betöltött szerepe alapján beszélünk *különleges adalékanyagról*.

Általában a közönséges (normál) adalékanyag természetes, ritkán mesterséges eredetű. A természetes eredetűek kőzetek, míg a mesterséges eredetűek ipari hulladékok lehetnek:

- **Kausay**[7] szerint a legelterjedtebben használt természetes eredetű beton adalékanyag a laza törmelékes kőzetek csoportjába sorolható homok, kavics, homokos kavics. Ezek természetes módon aprózódtak a víz (ritkán a szél, esetleg a gleccser) szállító hatásának köszönhetően, ezért általában törés nélkül, mosás és osztályozás után, ritkábban ezek nélkül is alkalmas beton készítésére. A homok szemnagysága kisebb, mint 4 mm, a kavicsé pedig nagyobb, mint 4 mm. A kavics a víz görgető munkája hatására legömbölyödött alakkal rendelkezik, és a homokhoz hasonlóan lehet folyami kavics vagy bányakavics. A kavics

önmagában ritkán, általában homok jelenlétében fordul elő, ilyenkor homokos kavicsnak nevezzük.

- „Összetöredezett, természetes aprózódású, szögletes szemalakú, laza törmelékes kőzet a murva (például dolomitmurva, gránitdara), amely ha időálló, akkor törés nélkül, közönséges (normál) adalékanyagként beton készítésére alkalmas lehet.” [7]
- A robbantással kitermelt (jövesztett) mélységi (például gránit), kiömlési (például bazalt, andezit, dácit, riolit, diabáz), összeálló törmelékes (például grauwacke), és vegyi üledékes (például tömött mészkő, dolomit) kőzetekből származó adalékanyagot először aprítani (törni, zúzni, őrölni), majd osztályozni kell. Ezek szemalakja jellemzően szögletes. A szemnagyságtól függően osztályokba sorolhatjuk ezeket így: zúzottkőnek, kőpornak (legnagyobb szemnagysága legfeljebb 4 mm), kőlisztnek (legnagyobb szemnagysága legfeljebb 0,63 mm) nevezzük. Általában mészkő vagy dolomit alkotja a kőpor és a kőliszt anyagát.
- „Mesterséges eredetű, közönséges (normál) adalékanyag az építőipari bontási törmelék, mint a betontöret, esetleg a vegyes (beton + téglá) töret.” [7]

Különleges adalékanyag például:

- A vízzáróságot fokozó töltőanyaga a kőliszt (például *mészkőliszt*)

„Az adalékanyag jellemzése eredete, ásványi vagy kémiai összetétele, hidrotechnikai tulajdonságai (például vízfelvétel), szilárdsági, kőzetfizikai tulajdonságai, szemszerkezete (szemmegoszlás, szemalak, érdesség), időállósága, tisztasága alapján történik. A beton adalékanyaga általában többféle szemhalmaz (frakció) keveréke.” [7]

2.1.4.2. Kötőanyag

A különféle építési célú keverékek aktív összetevőit nevezzük kötőanyagnak. Ezek tartós kohéziót adnak - fizikai vagy kémiai folyamat révén - az inert adalékanyag, a kötőanyag és egyéb anyagok (leggyakrabban víz) keverékéből előállított építőanyagnak. A kötőanyagokat csoportba sorolása többféle szempont szerint is lehetséges, a kötőanyag lehet [7]:

- *természetes* (pl. agyag, bitumen, gyanta), *mesterséges* (pl. égetett mész, gipsz, magnézia, cement, kátrány, műanyag);
- *szervetlen* (pl. agyag, mész, gipsz, magnézia, cement), *szerves* (pl. bitumen, kátrány, enyv, gyanta, műanyag);
- *folyékony* (pl. bitumen, kátrány, nátron-vízüveg), *szilárd* (pl. égetett mész, gipsz, magnézia, cement);
- *fizikai folyamattal kötő* (pl. agyag, bitumen, enyv, nátron-vízüveg), *kémiai folyamattal kötő* (pl. mész, gipsz, magnézia, cement);
- *levegőn szilárduló* (pl. agyag, mész, gipsz, magnézia, nátron-vízüveg, műanyag), *hidraulikus*, azaz víz alatt is szilárduló (pl. cement), *gyengén hidraulikus* (pl. hidraulikus mész, románcement vagy románmész, mészpuccolán), *hidraulit* vagy *hidraulikus kiegészítő anyag* (pl. trasz, kohósalak, pernye).

A továbbiakban már csak a cement-kötőanyagú betonokkal foglalkozunk.

A *cement* - a kötőanyagok közül - a beton legaktívabb eleme, vízzel elkeverve kötőanyagként az adalék laza halmazát erős felületi kötéssel szilárd testté alakítja. [6]



2.-3. kép: CEM II A-S 42,5 N
(balra-alul)

4. kép: CEM II A-S 42,5 N
használat közben
(jobbra)



A cement alapanyaga, illetve kémiai összetétele szerint szilikátcementeket vagy eredeti nevükön portlandcementeket és aluminát cementeket vagy hazai nevükön bauxitcementeket különböztetünk meg.

Portlandcement [5]:

A portlandcementek fő alkotói a megfelelő mennyiségű mészkő és agyag zsugorodásig való égetése által előállított klinker és a kötőszabályozás céljából hozzáadott gipszkő, melyet együttesen finomra őrölnek. A portlandcementklinker és a kb. 4-5 m% gipszkő együttesen adja a tiszta portlandcementet. Azokat a portlandcementeket, amelyek legalább 10 m% hidraulikus pótlékot tartalmaznak, heterogén cementnek nevezzük és a cement fajtájának megadásakor a hidraulikus pótlék mennyiségét és minőségét is meg kell adni.

2.1.4.3. Keverővíz [1]

A lakosság ivóvízellátására szolgáló víz – kivéve a gyógyvizet, ásványvizet, hévizet – keverővíz céljára vizsgálat nélkül is megfelel. A *természetes víznyerő helyek* vizét felhasználás előtt meg kell vizsgálni. Keverővízként olaj-, zsír-, kálisó- és cukortartalmú vizek nem használhatók, ezért különösen gondosan kell megvizsgálni azokat a vizeket, amelyekbe *ipari vagy mezőgazdasági szennyvíz* juthat.

A víz a betonban lehetővé teszi a cement kémiai átalakulását, nagy fajlagos felületű kötőképes hidrátvegyületek kialakulását, továbbá csökkenti a friss betonkeverék belső sűrűlódását, ezáltal könnyebbé teszi annak kezelését és tömörítését. A jelenlegi tömörítési módszerek mellett a cement hidratációjához szükséges vízmennyiség sokkal kisebb (általában a cement tömegének 20-25%-a), mint amennyit a beton jó bedolgozhatósága igényel. Világszerte a *Powers–Brownyard* modellel jellemzi a megszilárdult cement-víz keverék (a cementkő) szerkezetét. E modell szerint a cementkő pórusos anyag, amelynek szilárd része nagyon finom eloszlású kolloid méretű szemcsékből álló gél, továbbá ebbe beágyazott lényegesen nagyobb méretű kristályok alkotják. A cementkőben a víz háromféleképpen helyezkedhet el, tekintsük át ezeket [6]:

- **kémiailag kötött víz**, amely beépül a hidrátvegyületek szerkezetébe;
- **adszorbeált víz**, amely fizikailag kötött állapota miatt lehetővé teszi a nagy felületű gélek egymáshoz tapadását;
- a cementkő kapillárisaiban elhelyezkedő **szabad víz**.”

A keverő víznek meg kell felelnie az MSZ EN 1008 szabvány hatályos követelményeinek.

2.1.4.4. Adalékszer

A betonjavító szereket két fő csoportba sorolhatóak: adalékszerek és felületi kezelőszerek.

Adalékszereknek nevezzük az olyan folyadékokat és por alakú vegyi készítményeket, amelyek a beton egyes tulajdonságait (fő hatás) kedvezően befolyásolják. Azonban más tulajdonságait (mellékhatás, járulékos hatás) legfeljebb kismértékben rontják. Ezeket a betonba kis mennyiségben keverjük. Az olyan adalékszereket nevezzük kettős hatásúaknak, amelyekkel egyidejűleg kétféle fő hatás is elérhető.

Az adalékszerekkel kapcsolatos alapkövetelmény, hogy az adalékszemek a cement tömegére vonatkoztatott javasolt mennyisége esetén a cement az MSZ 523 (jelenleg hatályos: MSZ EN 196-3:1990) szerint vizsgálva legyen térfogatállandó. A kötési időt csak az adagolás céljának megfelelően befolyásolhatja, károsan nem. A bebetonozott acélbetétben a szer kétszeres adagja sem okozhat elektrokémiai korróziót. A kloridmentesként forgalomba hozott szer legfeljebb 0,2 m% kloridiont tartalmazhat a cementre vonatkoztatva.

Az adalékszereket rendeltetésük szerint a következő csoportokba soroljuk:

- konzisztenciajavítók: képlékenyítők és folyósítók;
- vízzáróságot fokozók;
- fagyállóságot fokozók (légpórus képzők);
- kötés- és szilárdulás-gyorsítók;
- kötéskésleltetők, illetve kötésgátlók;
- színezőanyagok;
- elektromosan vezetőanyagok;
- gázképzők, habképzők.

„A felületi kezelőszerek olyan folyadékok vagy pépszerű vegyi anyagok, amelyekkel a bedolgozott frissbeton (párazárás), illetve megszilárdult beton (tapadásjavítás, víztaszítás stb.) felületi tulajdonságait befolyásoljuk. Rendeltetésük szerint ebbe a csoportba soroljuk: a párazárókat, a formaleválasztókat, a víztaszító bevonatokat, a felületi színezékeket.” [1]

2.1.4.5. Levegő

A levegő a betonnak azon alkotója, amelynek jelenléte - különleges esetektől eltekintve - nem kívánatos, azonban kis mértékben többnyire minden normál betonkeverékben megtalálható. Minden esetben tartalmaznak levegőt az ún. péphiányos és bizonyos kis víztartalmú betonok. Előbbiekben a víz és a cement együttes térfogata nem elegendő ahhoz, hogy az adalékszemcsék közti hézagokat kitöltse, utóbbiakat pedig a szükségesnél kisebb tömörítési munkával dolgozták be.

A beton levegőtartalma a szilárdságra csökkentő hatással van.

Kiemelkedő jelentőséggel bír a beton sajátosságainak alakulása szempontjából, hogy milyen formában és eloszlásban található meg a levegő benne. Az utóbbi évtizedek betontechnológiai kutatásai kimutatták, hogy a beton fagyállósága és időállósága számottevő mértékben javul. Ez a javulás akkor teljesül, ha a betonban lévő néhány térfogat-százaléknyi levegő olyan buborékok formájában helyezkedik el, amely a kapillárisok folyamatos hálózátát megbontja, és a keresztmetszetét megnövelve a víz, illetve folyadékok felszívódását megnehezíti.

Számos országban ennek a felismerésnek következményeként adagolnak az időjárás hatásának erősen kitett szerkezetek betonjába légpórusképző vegyi anyagokat. Ilyen módon létrehozott levegőtartalmát „*bevitt levegőnek*”; még a tömörítés, illetve a nem megfelelő összetétel miatt kialakuló levegőtartalmat „*eredő levegőtartalomnak*” nevezi a külföldi szakirodalom. [6]

2.1.4.6. Kiegészítő anyagok

Ebben a fejezetben bemutatom a különböző kiegészítő anyagokat, hiszen a kutatásom célja ezen anyagok, különösképpen ezen anyagok fajlagos felületének hatása az öntömörödő beton mechanikai és egyéb tulajdonságaira.

Ismeretes, hogy öntömörödő beton készítéséhez a kis szemcseátmérőjű és nagy fajlagos felületű kiegészítő anyag alkalmazása elengedhetetlen. A magas cement adagolás esetén jelentős problémát jelenthet a megszilárdult beton zsugorodása és az esetlegesen abból létrejövő repedések veszélye, ezért a megnövelt finomrész tartalmat célszerűen bizonyos kiegészítő anyagok adagolásával lehet elérni.

Öntömörödő beton készítésére alkalmazható kiegészítő anyagok az alábbiak lehetnek:

- pernye
- kohósalak
- kvarcliszt
- mészkőliszt
- dolomitliszt
- baritliszt
- szilikapor
- metakaolin
- trasz



5. kép: Mészkőliszt saját használat során

Kiegészítő anyagként mészkőlisztet és metakaolint használtam kísérleteim során.

A mészkőliszt cementre gyakorolt hatása a következő:

A mészkőliszt hatására beindul a karbo-aluminátok és a kristálygocók összekapcsolódása, felgyorsítva ez által a trikálcium-aluminát (C_3A) és a trikálcium szilikát (C_3S) hidratációját a cement hidratációja közben. Ez jelentős mértékben elősegíti a kalcium-szilikát-hidrát (C-S-H) jobb eloszlását, és így a térhálósodást is.

A mészkőliszt hatása a beton tulajdonságaira az alábbiakban mutatkozik meg:

- a beton felület esztétikusabbá válik a mészkőliszt használatával, könnyebb így látszóbetont létrehozni.
- a mészkőliszt megfelelő adagolásával csökkenthetjük a porozitást, illetve a betonvázban a szemcseméret eloszlás optimalizálása révén – különös tekintettel az apró frakciókra – kedvezően befolyásolhatjuk a beton tulajdonságait.

A friss beton bedolgozhatóságára gyakorolt hatása [8]:

- az egyik cél a beton minőségét illetően az önthetőség javítása anélkül, hogy a beton mechanikai tulajdonságai valamint a költségek kedvezőtlenül változnának,
- a mészkőliszt rácpontok közötti masszára gyakorolt kenőhatása, a szükséges vízmennyiség csökkenését eredményezi változatlan bedolgozhatóság mellett,
- a frissbeton konzisztenciája is javul a mészkőliszt adagolásával,

-
- az előnyös folyási jellemzők jobb kenhetőséget eredményeznek, továbbá megmutatkoznak a jobb bedolgozhatóságban, illetve csökkentik a tömörítési és szivattyúzási időt,
 - a zsugorodási repedések és a hidratációs hővel kapcsolatos problémák is minimalizálhatók a cementadagolás optimalizálásával,
 - a szétosztályozódás elkerülésében segít a jó szemcseméret-eloszlás, megelőzve ezzel a beton szilárdságának és esztétikumának csökkenését.

A megszilárdult betonra gyakorolt hatása [8]:

- a beton színe világosabbá válik a mészköliszt használatának következményeként,
- a tömörség megmutatkozik a fagyállóságban, a vasalás korrózióval szembeni nagyobb védelmében, valamint a kivirágzás és az alkáli-szilika reakció esélyének minimalizálásában.

Összességében a beton minőségét illetően alapvető cél ötvözni a nagyobb tartósságot a tetszetősebb végső megjelenéssel anélkül, hogy a beton mechanikai tulajdonságai romlanának, valamint a költségek növekednének.

A metakaolin tulajdonságait az alábbiakban ismertetem:

A 2.1. táblázat mutatja a metakaolin főbb jellemzőit!

„A metakaolint természetes kaolinból 450-800 °C hőmérsékleten, zsugoröntéssel állítják elő. Puccolános aktivitása a szilikaporénak mintegy kétszerese. Átlagos szemnagysága az őrlésfinomságtól függően a szilikapor és a cement szemnagysága (5-30 µm) között helyezkedik el. Hatása a beton nyomószilárdságára és klorid-állóságára jelentős.” [9]

„Az amorf metakaolin a cement hidratációja során keletkező kalcium-hidroxiddal (portlandittal) másodlagos kalcium-szilikát-hidrát fázist képez, miáltal a beton nyomószilárdsága csak kevéssé tér el a szilikapor-tartalmú ultra nagy szilárdságú beton szilárdságától.” [10]

Francia és amerikai szerzők tanulmányozták a metakaolin cementpépre gyakorolt hatását. Két fajta metakaolint használtak, melyek főleg fajlagos felületben különböztek. A vizsgálat módszere az izotermikus kalorimetria, ahol a víz/cement arány 0,50 volt, és a metakaolint 8 % cement kiegészítésként használták. Az eredmények által bebizonyosodott, hogy a metakaolin határozottan gyorsította a hidratációt. Erősen exoterm reakciót tapasztaltak, ha a cementet metakaolinnal helyettesítették (ez főleg 24 óra alatt következett be). A reakció nagymértékben függ a cement alkáli tartalmától. [11]

2.1. táblázat: Aktív kiegészítő anyagok főbb jellemző, kiemelten a Metakaolin.[9]

Összetétel, tömeg%	Szilikapor	Nanoszilika	Metakaolin	Köszénpernye
SiO ₂	91 – 97	100	51 – 55	40 – 60
Al ₂ O ₃	1,0 – 1,4	–	40 – 42	23 – 24
Fe ₂ O ₃	0,2 – 1,2	–	0,5 – 4,6	2 – 16
CaO	0,2 – 0,4	–	0,1 – 0,34	0,6 – 8,5
Átlagos szemnagyság, µm	~ 0,1	~ 0,015	1,3	~ 10 – 20
Fajlagos felület, m ² /g	18 – 22	180 – 230	10,0 – 16,8	0,3 – 0,8
Előállítási alak	Por, szuszpenzió	Kolloid oldat, por	Por	Por

2.1.5. Fajlagos felület

Kausay[17] szerint: A tulajdonképpeni fajlagos felület az egységnyi tömegű szemhalmaz szemeinek felületösszege, és mértékegysége m²/kg, ami 10³ mm²/g, vagy 10⁻³ m²/g értéknek felel meg. A fajlagos felület értéke az anyag testsűrűségének is függvénye, ezért nem kifejezetten szemeloszlás- (szemmegoszlás-) jellemző.



6.-7. kép: Blaine készülék saját használat közben

Nagyságát általában a Blaine-féle légáteresztő képesség vizsgálattal (MSZ EN 196-6:1992) határozzák meg. A Blaine-féle fajlagos felületre követelmény értéket a visszavont MSZ 4702-2:1981 cement termékszabvány tartalmazta, az érvényes MSZ EN 197-1:2000 cement termékszabvány csak bizonyos főalkotórész (mészkő) vizsgálati feltételül írja elő.

2.1.6. Az öntömörödő beton alkalmazása

Az öntömörödő beton fogalmát a 2.1.3. fejezetben bemutattam, ebben a fejezetben felsorolásra kerül az öntömörödő beton alkalmazásának területei: előregyártásban, magas épületek és alagutak építésében, hídépítésben illetve felújítási munkálatok során.

Az utóbbi évtizedben az öntömörödő beton használata a betonépítésben rohamos fejlődésnek indult Japánban és Európában, különösképpen Franciaországban és Svédországban.

2.1.6.1 Az öntömörödő beton előnyös tulajdonságai

Az öntömörödő beton számtalan előnyös tulajdonsággal rendelkezik [4]:

- **Jobb tartósság**
Homogénebb, tömörebb betonszerkezet állítható elő öntömörödő beton alkalmazásával. A túl rövid, vagy túl hosszú idejű vibrálás miatti hibahelyek kialakulása kizárt. Az építmények élettartama növelhető a helyes összetételű és egyenletes minőségű beton használatával.
- **Jobb felületminőség**
Az öntömörödő betonnal végzett betonozási munkák eredménye tetszetős, egyenletes és kiváló minőségű betonfelület. További munkaerő- és költségmegtakarítást tesz lehetővé, hogy utólagos javításokra nincs szükség.
- **Különlegesen jó folyósság**
Az öntömörödő beton folyóssága kiváló, ennek köszönhetően üregmentesen tölt ki bármilyen alakú zsaluzatot, szorosan körülveszi az elhelyezett betonacélokat, és szinte tökéletesen kiegyenlítődik. Alkalmazása különösen ott célszerű, ahol bonyolult alakú, sok sarokkal és éllel formázott zsaluzat szükséges. Ide tartoznak továbbá a dombormintás látszóbeton felületek, a karcsú épületszerkezetek, és a sűrűn vasalt szerkezetek is.
- **A tömörítés elmaradása**
A betonacélok közti hézagokat maradéktalan kitöltése érdekében - a szokásos módon bedolgozott betont - többfajta vibrátorral (pl. lap, merülő, zsalu) kell tömöríteni. Kimondottan nehéznek bizonyul ez a művelet sűrűn és erősen vasalt szerkezeteknél. Ez a folyamat rendkívül időigényes nagyobb betonozási szakaszok esetében. Öntömörödő beton alkalmazásakor a tömörítési munka szükségtelen.

- ***Nincs zajártalom***

A tömörítő berendezések zaja ártalmas az emberre és a környezetre egyaránt. A zajszint csökkentésével, ill. kiküszöbölésével javulnak a kommunikációs lehetőségek, ami a biztonságot növeli.

- ***Nagy betonozási teljesítmény***

Az öntömörödő beton egyszerű bedolgozhatósága növeli a betonozási teljesítményt és csökkenti a munkaigényt. Ezzel lerövidül az építési idő. Az élőmunka igény csökkenése miatt bérköltség takarítható meg.

2.1.6.2 Megvalósult szerkezetek

Szerkezet megerősítése és felújítása:

A szegediek által kedvesen csak Öreg Hölgynek becézett, szegedi Szent István téri víztorony felújítása során öntömörödő betont alkalmaztak. A karbonátosodás következményeként a betonacél védelme, a passziválást biztosító réteg megszűnt, a fedést biztosító betonrészek helyenként leváltak, a betonacél keresztmetszet csökkenése a korrózió miatt egyre jelentősebb lett. Ezek a károsodások gyakorlatilag mindenütt jelentkeztek a torony vasbeton felületein, szerkezetein. A károsodás mértéke elsősorban a felület helyzetétől függ, a legsúlyosabb károsodások a kültéri részeken, valamint a párás víztér környezetében adódtak. A beltéri, párával nem terhelt felületek megjelenése lényegesen kedvezőbb volt. A külső felületeken a károsodás mértéke közvetlen a víztér mellett és felett, a toronydobnál és a kilátószint alatti falfelületnél volt a legjelentősebb. A felület tisztítását követően a javításnál illetve a zászlótartó helyszíni előregyártásakor öntömörödő betont alkalmaztak. [14]



8. kép: Szegedi víztorony [14]



9. kép: Pillér károsodása [14]

Látszóbeton:

Napjainkban az építészek egyre bonyolultabb és merészebb szerkezeti elemeket és formákat álmodnak meg: íves és egyben csavarodó falak, szabálytalan alakban áttört födémmezők, nem megszokott formájú pillérek. Ezen igények kielégítése hagyományos betonozási technológiákkal – szakszerű bedolgozással egyetemben – egyre nehezebb, azonban az öntömörödő beton segítségével ezek a kivitelezési hibák elkerülhetőek. Igényes felületek és bonyolult formák miatt használtak öntömörödő betont a Wolfsburgi Phaeno múzeum esetén is!



10.-11. kép: Phaeno múzeum (Wolfsburg) öntömörödő beton használata

Nagyszilárdságú öntömörödő beton:

Japánban egy cseppfolyós földgáz tárolására alkalmas, szabadtéri feszített betontartály építéséhez nagy szilárdságú ($f_c=60 \text{ N/mm}^2$) öntömörödő betont alkalmaztak. A cél a nagyteljesítményű betonozás megvalósítása volt. A tartály külső fala 10, egyenként 4,4 m magasságú betonozási szakaszban készült. Az öntömörödő betont egyenletesen és megszakítás nélkül, körben 267 m kerülethosszban, csővezetékrendszeren át

öntötték be. A betonozási teljesítmény kb. 5 óra alatt 1000 m^3 volt.



12. kép: Szabadtéri feszített betontartály, Japán

A paksi atomerőmű Kiegészített Kazetták Átmeneti Tárolójának (KKÁT) építése:

A kutatás és a dolgozat sikeres elkészítése érdekében 2011. augusztus 11.-én (csütörtökön) szakmai kirándulást tettem Dr. S. G. Nehme Tanár Úrral a paksi atomerőműnél zajló KKÁT III. ütem, II. fázisának építésénél, illetve azt közvetlenül megelőzően a DANUBIUS BETON paksi üzemében. Itt került elkészítésre a KKÁT-nál használt öntömörödő beton!



13. kép: Beton keverése



14. kép: Terület mérés

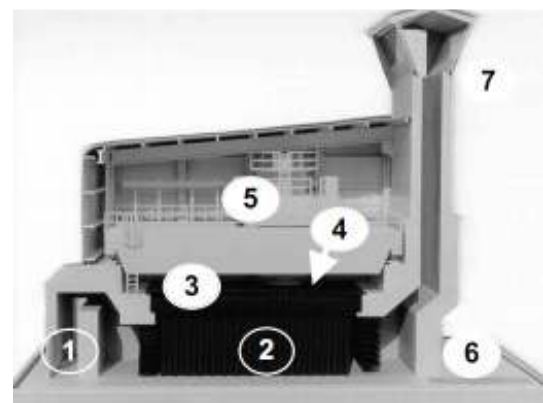


15. kép: Paksi betonüzem



16. kép: Paksi betonüzem

A tároló épület 5 kamrás, rendkívül merev vasbeton doboz szerkezet.



17.-18. kép: KKÁT keresztmetszet [16]

Az alaplemez 1,5 m vastagságú, míg a felmenő falak alatt a síkalap konzolosan túlnyúlik. Az alaplemez alatt - alulról felfelé - 7 cm vastag szerelőbeton, azon 30 cm vastag vasalt szigetelés aljzatbeton van. Erre került a kétrétegű CARBOFOL szigetelés, majd a 13 cm

vastag szigetelést védő beton, amely egyben az 1,5 m vastag alaplemez szerelőbetonja is. A teherhordó, ill. térelhatároló falak monolit vasbeton szerkezetűek. A határoló falak vastagsága 1,50-1,80 m. Erre sugárvédelmi szempontból van szükség. A tároló kamrák egyenként 450 db kiégett üzemanyag kazetta tárolására alkalmasak. Az I. és II. ütem esetén nem öntömörödő betont alkalmaztak, hanem normál vibrálást igénylőt. Azonban ez nehézkes, hiszen rendkívül sűrű vasalás található a szerkezetben, ezért került előtérbe az öntömörödő beton alkalmazása.

A 18. képen találhatóak a szerkezet különböző részei: 1. beszívó nyílás (levegő belépés), 2. tároló csövek, 3. sugárvédő záródugók, 4. biztonsági burkolat, 5. üzemanyag átrakó gép, 6. vasbeton épületszerkezet, 7. kürtő lefedés (levegő kilépés). [16]



19. kép: KKÁT III. ütem II fázis¹



20. kép: Beszerelt betonacél¹



21. kép: Betöltő fedélzet építése¹



22. kép: Betonzás öntömörödő betonnal¹



23. kép: Betöltő fedélzet alulról¹

¹ A paksi atomerőmű Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolójánál készült képek Dr. S. G. Nehme-től származnak, és az Ő engedélyével vált lehetségessé az itteni használatuk.

2.1.7. Konzisztencia, vízzáróság és fagyállóság vizsgálati eszközök

Az öntömörödő frissbeton konzisztencia vizsgálata eltér a normál betonoknál megszokottétól, a frissbeton jellemzőit a következő vizsgálatokkal határoztam meg: Blokkoló-gyűrű (J-Ring) vizsgálat, kifolyási idő (V-Funnel) vizsgálat. Ezeken felül lehetőség van még más vizsgálatokra is.

2.1.7.1 Blokkoló-gyűrű (J-Ring) vizsgálat

A zárványképződési hajlam meghatározása:

Az adagolótölcsért centrikusan a J-Ring (gyűrű) belsejébe állítjuk és megtöltjük frissbetonnal. A tölcser felemelését követően a beton szétömlik az akadályt képező vasalatszálak irányában.



24. kép: J-Ring saját használat közben



25. kép: Blokkoló-gyűrű (J-Ring)

- Mélni kell a frissbeton terülés maximális átmérőjét:
 - *célzott méret: $d_{max} \geq 65 \text{ cm}$*
- Szemrevételezéssel kell értékelni a zárványképződési hajlamot:
 - *nem halmozódhat fel durva adalékanyag a vasalatszál közelében*

2.1.7.2 Kifolyási idő (V-Funnel) vizsgálat

A viszkozitás meghatározása:

A lapos tölcser pereméig frissbetonnal töltik fel. Ez után a tölcser alján levő zárókupakot felnyitják úgy, hogy a beton szabadon ki tud folyni.

- Meg kell határozni a kifolyási időt:
 - *célzott érték: $t = 5\text{-}15$ másodperc*



26. kép: V- tölcsér (V-Funnel)



27. kép: V-tölcsér használat közben

2.1.7.3 Vízzáróság

Az öntömörödő beton vízzárósági vizsgálatát WE 6 MM készülékkel történt 5 bar nyomással 3 (3x24 óra) napig.



28. kép: WE 6 MM készülék



29. kép: WE 6 MM készülék használata

2.1.7.4 Fagyállóság

A fagyállósági vizsgálat (f50) 50 fagyasztás-olvadási ciklussal (-20 °C légtérben fagyasztással és + 20 °C olvasztással vízben) történt.



30. kép: Fagyasztó szekrény



31. kép: Fagyasztó szekrény

3. KÍSÉRLETI TERV, MÓDSZER

3.1 A kutatás célja

Tudományos Diákköri munkám keretében arra a kérdésre kerestem a választ, hogy a ma már egyre közkedveltebbé váló öntömörödő betonok mechanikai és egyéb tulajdonságait milyen módon, illetve milyen mértékben befolyásolja a finomrész-tartalom változtatása. Ennek érdekében a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék Laboratóriumában vizsgálatokat végeztem. Vizsgálataim közvetlen célja a cement, a mészkőliszt és a metakaolin adagolási mennyiségének hatását kimutatni a megszilárdult beton nyomószilárdságára, vízzáróságára és fagyállóságára.

3.2 Hipotézisek

1. hipotézis:

A frissbeton konzisztencia jellemzőinek mérése során, a Blokkoló-gyűrűvel (J-Ring) végzett vizsgálatoknál szétosztályozódás és blokkolódás nem jön létre. A frissbeton terület értéke 650 mm-nél nagyobbra várható. A V-tölcsérrel történő mérésnél a kifolyási idő 5-15 sec. között várható.

2. hipotézis:

Öntömörödő betonnál a 2 napos nyomószilárdság értéke növekvő tendenciát mutat a mészkőliszt adagolás függvényében. A mészkőliszt mennyiséget 40 kg/m^3 -es lépcsőkben emelve ~5% szilárdságnövekedés várható. A finomrész kiegészítése mészkőliszt adagolás mellett metakaolinnal további szilárdságnövekedést okoz.

A mészkőliszt túlzott mértékű adagolása szilárdság csökkenéshez vezet, mely a 28 napos nyomószilárdságban lesz értékelhető. Feltételezhetően 40 kg/m^3 mészkőliszt adagolás esetén ~4% szilárdság csökkenés következik be. Ez a tendencia nem érvényes azokra a betonösszetételekre, ahol metakaolin is felhasználásra kerül.

Az azonos finomrész, víz tartalommal és változó cement tartalommal rendelkező, olyan betonösszetételeket, ahol csak mészkőliszt került kiegészítő adalékanyagként felhasználásra, jól leírható tendencia mutatkozik meg a v/c tényező és a nyomószilárdság értéke között.

Állandó finomrész tartalom és állandó vízmennyiség, azonban változó v/c tényező esetén a legnagyobb nyomószilárdság ott várható, ahol a v/c tényező értéke a legalacsonyabb.

Állandó víz, cement tartalom és v/c tényező illetve állandó mennyiségű metakolin mellett, továbbá változó mészkőliszt tartalom esetén a legnagyobb nyomószilárdság ott figyelhető meg, ahol a legnagyobb a finomrész tartalom a betonösszetételben.

3. hipotézis:

Vízzárosági vizsgálat során a vízbehatolás mélysége 20 mm-nél kisebbre várható, ami XV3(H) környezeti osztálynak felel meg, az MSZ-EN 12390-8:2001 szabvány szerint.

4. hipotézis:

Fagyállósági vizsgálatkor tömegveszteség nem következik be, míg szilárdságcsökkenés lép fel, melynek értéke várhatóan ~5-10%.

3.3 A kutatás folyamata

3.3.1. Receptúrák, kísérleti paraméterek

A cél érdekében 12 – egymástól eltérő és egyedi – beton receptúra került kialakításra, figyelembe véve a finomrész mennyiségének és arányának folyamatos növelését, melyhez mészkőlisztet és metakaolint használtam fel. Ezek közötti összefüggést a 3.1. táblázat tartalmaz:

Állandó paraméter:

- víz mennyiség: 180 liter/m³
- szemmegoszlási görbe azonos
- cement fajta: CEM II A-S 42,5 N

Változó paraméter:

- a cement mennyisége:
 - 320 kg/m³; 360 kg/m³; 400 kg/m³
- a mészkőliszt mennyisége:
 - 100 kg/m³ - 300 kg/m³ (40 kg/m³ lépcsőben)
- a metakaolin mennyisége:
 - 0 kg/m³, 40 kg/m³

3.1. táblázat: finomrész adagolás

		Mészkeőliszt adagolása [kg/m ³]					Mészkeőliszt és Metakaolin adagolása [kg/m ³]		
		140	180	220	260	300	100+40	140+40	180+40
Cement-adagolás [kg/m ³]	320			540 ⁹	580 ³	620 ⁶			
	360		540 ⁸	580 ¹	620 ⁵				
	400	540 ⁷	580 ²	620 ⁴			540 ¹²	580 ¹¹	620 ¹⁰

Az egyes felső indexek jelölik a receptúrákat, melyek részletesen kifejtve a *fűggelékben* találhatóak meg.

3.3.2. Fajlagos felület meghatározása

A betonkeverés előtt a finomrésznek használt mészkeőliszt és metakaolin, illetve a cement fajlagos felületét határoztam meg Csányi Erika tudományos munkatárs segítségével. A vizsgálat elvégzése vegyészmérleg, piknométer, és Blaine készülék segítségével történt. A kapott eredményeket a 3.2. táblázatban találhatóak meg.



32.-33.-34. kép: Piknométer és C₂HCl₃ használata a fajlagos felület meghatározása során

3.2. táblázat: mészkeőliszt, metakaolin és cement sűrűsége, fajlagos felülete:

Anyag	sűrűség [g/ml]	fajlagos felület [m ² /kg]
Mészkeőliszt	2,7455	658
Metakaolin	2,6105	2280
Cement	3,11	348

3.3.3. Betonkeverés, alkalmazott beton összetételek

Adalékanyagként mosott, osztályozott és szárított homokot, ill. kavicsot alkalmaztam, melyet három frakcióból kevertem. A finomabb frakció szemcseátmérője 0,063-4 mm között, a durvább frakció szemcseátmérője 4-8 mm, ill. 8-16mm között változott. Ezeken felül a finomrész tartalom növelése érdekében használtam még mészkölisztet és metakaolint, mint azt már 3.3.1. fejezetben bemutattam.

Kötőanyagként CEM II A-S 42,5 N cementtípust alkalmaztam, ahogy az a 2.1.4.2. fejezetben lévő képeken is látható és a vizsgálati eredményeket a 3.3. táblázatban foglaltam össze.

3.3. táblázat: cementpép tulajdonságai

Vizsgálat	Eredmény	mértékegység
vízigény	0,286	[-]
Kötés kezdete	2:47	óra:perc
Kötés vége	4:15	óra:perc

A kísérlet szempontjából lehető legjobb konzisztencia elérése érdekében Glenium 51 nagy hatékonyságú vízszükségletet csökkentő szuperfolyósító szert alkalmaztam.

A hagyományos szuperfolyósítókhoz képest a Glenium 51 eltérő kémiai szerkezeti tulajdonságokkal rendelkezik: karboxiléter polimerből áll, melyeknek hosszú oldalláncai vannak.

A hagyományos szuperfolyósítókhoz hasonlóan - a beton keverésének kezdeti fázisában - ezek ugyanazon elektrosztatikus szétválasztási mechanizmussal működnek, viszont a főlánchoz kapcsolódó oldalláncok sztérikus (térbeli) gátlással is csökkentik a cementrészecskék ütközését. Így nagyban stabilizálják a cementrészecskék különválását és diszpergálódását. Ez az ún. sztérikus gátlás biztosítja a fizikai korlátot (az elektrosztatikus korlát mentén) a cementrészecskék között. Ezzel az eljárással folyós beton jóval kevesebb víztartalommal érhető el.



35. kép: Glenium 51, saját használat közben

A próbatesteket az alábbi folyamat révén készítettem:

1. az acél sablonok előkészítése, formaleválasztó olaj segítségével,
2. az adalékanyagok, a cement és a víz kimérése, folyósító hozzáadagolása után a Zyklos típusú betonkeverőben történő keverés minimum 1 percig,



36.-37. kép: adalékanyagok a keverőben

38. kép: öntömörödő beton

3. konzisztencia mérése: terület és kifolyási idő meghatározása J-Ring és V-tölcsér segítségével, ahogy azt már a 2.1.7.1. és 2.1.7.2. fejezetekben leírtam,
4. az acél sablonok megtöltése, melyek közül 3 darabnak üres és a betonnal telített állapotban is megmértem a tömegét, erre a testsűrűség meghatározása miatt volt szükség



39. kép: acél sablon tömegének mérése

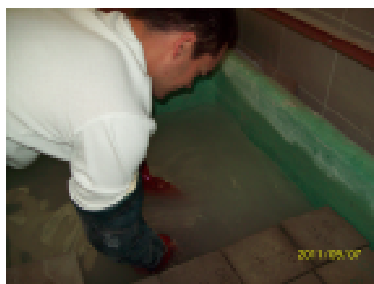


40. kép: J-Ring vizsgálat



41. kép: kizsaluzás

5. betonnal teli acél sablonok tárolása 1 napig,
6. kizsaluzás, és a sablonok újbóli előkészítése,
7. próbatestek megfelelő, érthető megjelölése, majd 7 napig vízben tárolása



42. kép: vízben tárolás



43. kép: kivétel vízből



44. kép: 7 napig vízben tárolás

Az ezt követő kísérleti elrendezéseket és mérési módokat a 3.5. fejezetben fogom bemutatni.

3.4 Próbatestek

Mind a 12 különböző betonösszetételhez 12 db 150 mm élhosszúságú, próbakockát készítettem. Mivel öntömörödő betonról van szó, ezért semmilyen tömörítést nem használtam, így a próbatestek csak a nehézségi erő hatására tömörödtek és légtelenítődtek, tehát tömörítésből adódó különbségek nem léphetnek fel az azonos összetételű (keverésből származó) próbatestek között.

A próbakockákat a 2. és 7. napos törés esetén a kizsaluzástól a törés előtti 15. percig vízben tároltam, míg 7 vízben töltött nap után a próbatesteket kivettem a vízből, és 28 napos korukban már szárazon törtem el azokat.

3.5 Vizsgálati, kísérleti elrendezések és mérési módok

3.5.1. Nyomószilárdság

A beton nyomószilárdsági vizsgálatát akkor végeztem, amikor a próbatestek 2, 7, és 28 napos korúak voltak, minden betonösszetételhez külön 3 darab próbatestet eltörve. A nyomószilárdsági vizsgálatokat a FORM+TEST gyártmányú ALPHA-3-3000 S, 3000 kN maximális erejű, erővezérelt terhelő-berendezéssel, az MSZ 4798-1:2004 előírásainak megfelelő 11,20 kN/s erőléptékkel végeztem el.



45. kép: Próbatestek pontos méretfelvétele



46. kép: Terhelő berendezés használat közben



47. kép: FORM+TEST terhelő berendezés

3.5.2. Vízjáróság

Az öntömörödő beton vízjárósági vizsgálatát WE 6 MM készülékkel vizsgáltam: 5 bar nyomással 3 napig, ahogy azt a 2.1.7.3. fejezetben lévő képeken is látható. Utána széthasítottam őket és leolvastam a vízbehatolás mélységét. A megfelelően pontos eredmények érdekében, ehhez a vizsgálathoz is 3 darab próbatestet használtam fel minden betonösszetételből. (MSZ EN 12390-8:2009)



48. kép: Próbatest hasítása



49. kép: Vizsgált felületrész



50. kép: Vízbehatolás értékének leolvasása digitális tolómérő segítségével

3.5.3. Fagyállóság

A fagyállósági vizsgálat előtt megmértem a próbatestek tömegét szárazon, illetve pontos geometriai méretüket digitális tolómérő segítségével. A fagyállósági vizsgálat (f50) 50 fagyasztás-olvasadási ciklussal ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ légtérben fagyasztással és $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ olvasztással vízben) történt, ahogy az a 2.1.7.4. fejezetben található képeken is látszik. A fagyasztó berendezésbe minden alkalmazott betonösszetételből 2 darab próbatest került, míg etalonként vízbe – a fagyasztás időtartamára – 3 darab. A fagyasztó gépből való kivételt követően megmértem a próbatestek ($150 \times 150 \times 150\text{ mm}$ -es kocka) tömegét nedvesen, majd szárítás után a FORM+TEST gyártmányú terhelő berendezéssel eltörtem őket. Kiszámoltam a tömegvesztésüket és a szilárdságcsökkenést is (MSZ 4715/3, MSZ 4719).



51. kép: Fagyállósági vizsgálat

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS AZOK KIÉRTÉKELÉSE, FELDOLGOZÁSA

4.1 Kísérleti eredmények, értékelés

4.1.1. Frissbeton tulajdonságai

A különböző receptúrák megvalósítása során az alábbi konzisztencia vizsgálatokat végeztem: Blokkoló-gyűrű (J-Ring), V-tölcsér (V-Funnel), melyeknek módját már a 2.1.7.1. ill. a 2.1.7.2. fejezetekben bemutattam. Az egyes konzisztencia vizsgálatok során szétosztályozódást, blokkolódást nem tapasztaltam.

A különböző receptúrák megvalósításakor a Blokkoló-gyűrűvel végzett konzisztencia vizsgálatok esetében minden mérést két irányban végeztem el, így a 4.1. táblázatban közölt értékek már ezek átlagát képezik. A részeredményeket a *függelékben*, minden receptúrára részletesen mellékeltem. A terület értékek az előzetes **1. hipotézisnek** megfelelően alakultak, hiszen mindegyik 650 mm-nél nagyobb volt. Az értékek az alábbi intervallumban helyezkednek el: 685-802,5 mm, melyek teljes mértékben megfelelnek a 2.1.7.1. fejezetben leírtaknak is.

4.1. táblázat: Frissbeton tulajdonságai, J-Ring terület és V-tölcsér kifolyási idő

Receptúra	CEM II A-S 42,5 N		mészköliszt		metakaolin		víz		levegő		adalékanyag			adalékszer		J-ring terülés [mm]	V- funnel kif. idő [sec]
	adagolás								45%	25%	30%	adagolás					
	[kg/m ³]	[l/m ³]	[kg/m ³]	[l/m ³]	[kg/m ³]	[l/m ³]	[kg/m ³], [l/m ³]	[l/m ³]	[kg/m ³]			%	[kg/m ³]				
1	360	116,13	220	95,65	-	-	180	17	698,09	387,83	465,39	1,0%	3,60	740	7,4		
2	400	129,03	180	78,26	-	-	180	17	703,42	390,79	468,95	0,9%	3,60	730	8,4		
3	320	103,23	260	113,04	-	-	180	17	694,18	385,66	462,79	0,9%	2,88	745	6,7		
4	400	129,03	220	95,65	-	-	180	17	682,29	379,05	454,86	1,0%	4,00	802,5	5,3		
5	360	116,13	260	113,04	-	-	180	17	677,86	376,59	451,91	0,9%	3,24	780	5,5		
6	320	103,23	300	130,43	-	-	180	17	672,38	373,55	448,26	1,2%	3,84	735	5,6		
7	400	129,03	140	60,87	-	-	180	17	724,56	402,53	483,04	0,8%	3,20	710	7,2		
8	360	116,13	180	78,26	-	-	180	17	719,18	399,54	479,45	0,9%	3,24	710	6,3		
9	320	103,23	220	95,65	-	-	180	17	714,85	397,14	476,56	0,9%	2,88	750	5,3		
10	400	129,03	180	78,26	40	17,02	180	17	682,25	379,03	454,83	1,1%	4,40	770	7,2		
11	400	129,03	140	60,87	40	17,02	180	17	703,86	391,03	469,24	0,9%	3,60	750	5,2		
12	400	129,03	100	43,48	40	17,02	180	17	724,52	402,51	483,02	0,9%	3,60	685	7,2		

A 4.1. táblázatban az adalékanyag címszó alatt feltüntetett százalékok értelemszerűen az egyes adalékanyag frakciókra vonatkoznak, miszerint:

- 0/4 mm frakció 45%
- 4/8 mm frakció 25%
- 8/16 mm frakció 30%

Konzisztencia vizsgálatokat végeztem V-tölcsérrel, a kifolyási idő meghatározásának érdekében, a különböző receptúrák betonkeverése során, amint azt az 54. kép is mutatja. Mérési eredményeim a 4.1. táblázat utolsó oszlopában találhatóak. A kifolyási idő értékek - az előzetes 1. *hipotézisnek* megfelelően - az előírt tartományba estek, mely intervallum az alábbi: 5 – 15 sec; ahogy az a 2.1.7.2. fejezetben is látható.

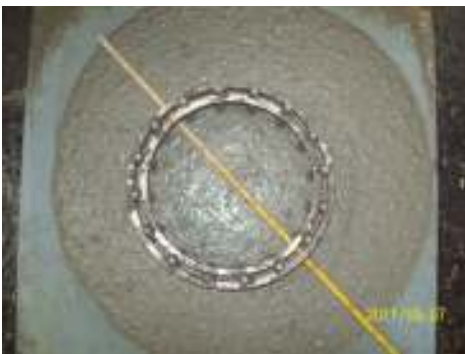
Az egyszerű összehasonlíthatóság érdekében a 4.2. táblázatban foglaltam össze a frissbeton illetve a 28 napos korban mért (geometria és tömeg) majd számolt értékekből származó testsűrűséget. A csökkenő tendencia mindenhol jól megmutatkozik, ami az előzetesen elvártaknak megfelel. Ez a csökkenő jelleg annak a következménye, hogy a betonban lévő felesleges víz eltávozott.

4.2. táblázat: Testsűrűségek

Receptúra	Frissbeton testsűrűség	28 napos testsűrűség
	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	2,375	2,361
2	2,374	2,365
3	2,380	2,355
4	2,367	2,359
5	2,376	2,367
6	2,375	2,348
7	2,376	2,336
8	2,371	2,356
9	2,378	2,360
10	2,374	2,341
11	2,332	2,312
12	2,370	2,345



52. kép: J-Ring vizsgálat



53. kép: J-Ring – terület mérés



54. kép: V-tölcsér – kif. idő

4.1.2. Megszilárdult beton tulajdonságai

A megszilárdult beton tulajdonságait az 4.3. táblázatban foglaltam össze. A táblázat tartalmazza, az egyes receptúrák sorszámát, kiegészítő anyag (mészkeőliszt, metakaolin) összetételét, a testsűrűség értékét, és a nyomószilárdság nagyságát 2, 7, és 28 napos korban.

A kapott eredményeket a 4.1.4. fejezetben részletesen is bemutatom.

4.3. táblázat: Megszilárdult beton tulajdonságai

Receptúra	Cement	Kieg. anyag	Kieg. anyag	Finomrész tartalom	Bíz	28 napos testsűrűség	$f_{c,m,cube,150}$	$f_{c,m,cube,150}$	$f_{c,m,cube,150}$
	CEM II A-S 42,5 N	Mészkeőliszt	Metakaolin				2 nap	7 nap	28 nap
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]				[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1	360	220	-	580	180	2,361	30,80	44,50	59,17
2	400	180	-	580	180	2,365	33,66	45,63	66,13
3	320	260	-	580	180	2,355	28,53	43,79	57,63
4	400	220	-	620	180	2,359	37,97	50,81	64,04
5	360	260	-	620	180	2,367	33,36	46,59	58,12
6	320	300	-	620	180	2,348	30,46	43,91	57,97
7	400	140	-	540	180	2,336	31,81	50,41	67,58
8	360	180	-	540	180	2,356	30,27	46,23	62,07
9	320	220	-	540	180	2,360	27,97	43,76	57,57
10	400	180	40	620	180	2,341	34,37	56,80	84,65
11	400	140	40	580	180	2,312	33,95	57,43	82,32
12	400	100	40	540	180	2,345	35,46	58,77	79,59

Az alábbi képeken tipikus törésképek láthatóak, az öntömörödő betonból készült próbatestek esetén, a saját kísérletsorozatomban.



55. – 56. kép: Jellemző törésképek

4.1.3. Nyomószilárdság

Az alábbiakban azonos cement fajtájú, azonos cement- és víztartalmú, tehát állandó víz-cement tényezőjű, de különböző finomrész anyag (mészkőliszt és metakaolin) tartalmú betonkeverék nyomószilárdsági eredményeit hasonlítom össze.

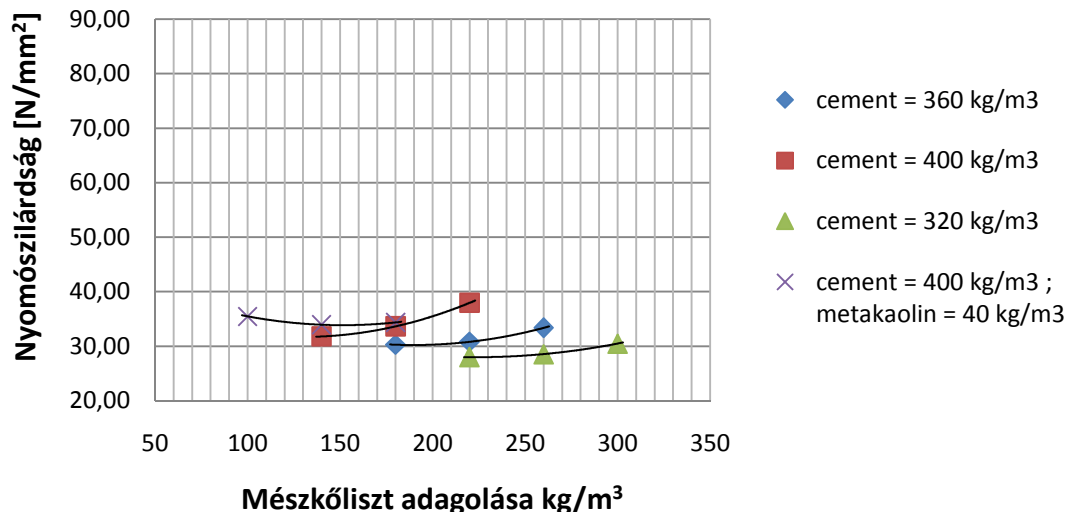
4.1.3.1. Mészkőliszt adagolás hatása

A *4.1. ábrán* (következő oldal) látható a mészkőliszt adagolás hatása a 2 napos nyomószilárdságra, azonos cementminőség és azonos v/c tényező esetén.

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a nyomószilárdság értékének növekedése és a mészkőliszt adagolás között jól leírható összefüggés van, ahogy azt a **2. hipotézisben** megjegyeztem. Ez megfigyelhető minden betonösszetételnél. Ezek alapján kijelenthető, hogy 40 kg/m^3 lépcsőzetes mészkőliszt adagolása esetén $\sim 2\text{-}10\%$ szilárdságnövekedés várható, míg 80 kg/m^3 többlet adagolás esetén akár $\sim 20\%$ is. Ez a tendencia igaz 320 kg/m^3 , 360 kg/m^3 és 400 kg/m^3 cement adagolásakor is. A 10., 11., 12. receptúra esetén 400 kg/m^3 cement mellett 40 kg/m^3 metakaolint is tartalmazott a finomrész, ami egyértelmű szilárdságnövekedést okozott, azokhoz az összetételekhez képest ahol, csak mészkőlisztet használtam. Azonban a mészkőliszt adagolás lépcsőkben történő növelése ellentétes tendenciát mutat, mivel enyhe szilárdságcsökkenés figyelhető meg az adagolás függvényében. Az *4.1. ábra* legfelső (cement = 400 kg/m^3 ; metakaolin = 40 kg/m^3) görbéje ezt jól szemlélteti. További kutatások szükségesek annak megállapítása érdekében, hogy ez a csökkenő tendencia 320 kg/m^3 ; és 360 kg/m^3 cement adagolás esetén is fenn áll-e.

Összességében levonható a következtetés, hogy a mészkőliszt növelésével nagymértékben nő a korai nyomószilárdság értéke is. A finomrész kiegészítése metakaolinnal is a nyomószilárdság értékének pozitív eltolódását eredményezi. Ezáltal csökkenthető a kizsaluzási idő, ami kiemelkedően fontos a mai építőiparban, hiszen segítségével óriási költségek takaríthatók meg.

Mész-kőliszt és metakaolin adagolás hatása a 2 napos nyomószilárdságra

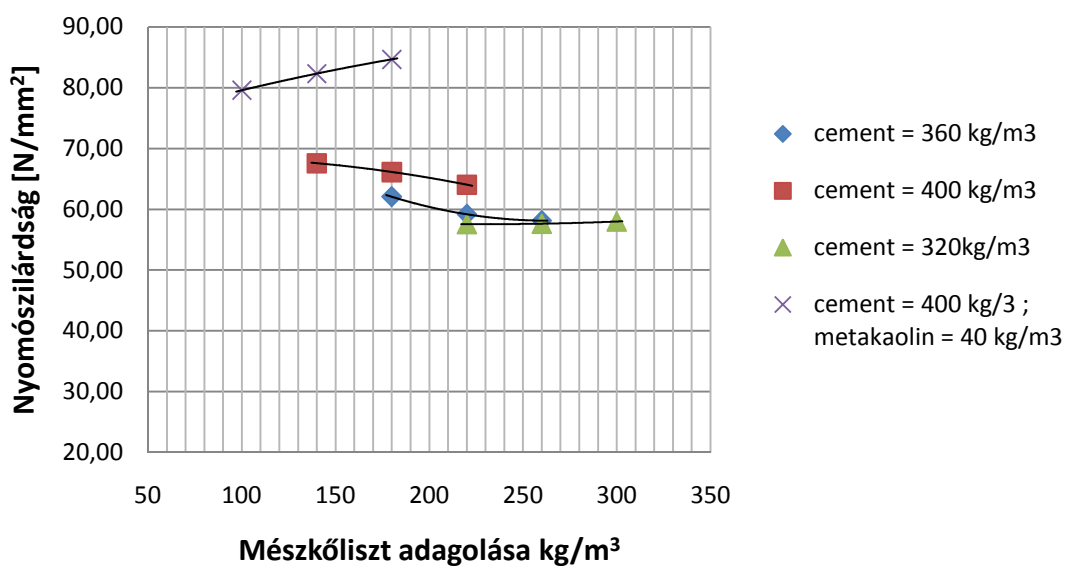


4.1. ábra: 2 napos nyomószilárdság alakulása a finomrész mennyiségének függvényében

A részletes eredményeket a **függelék** tartalmazza.

A mész-kőliszt adagolásának mennyisége egy bizonyos érték elérése után szilárdságcsökkenést okoz [18], [19]. A kísérletsorozat vizsgálati tartománya kiterjed ilyen mennyiségű mész-kőliszt adagolásra, mely a 28 napos nyomószilárdságban mutatkozik meg.

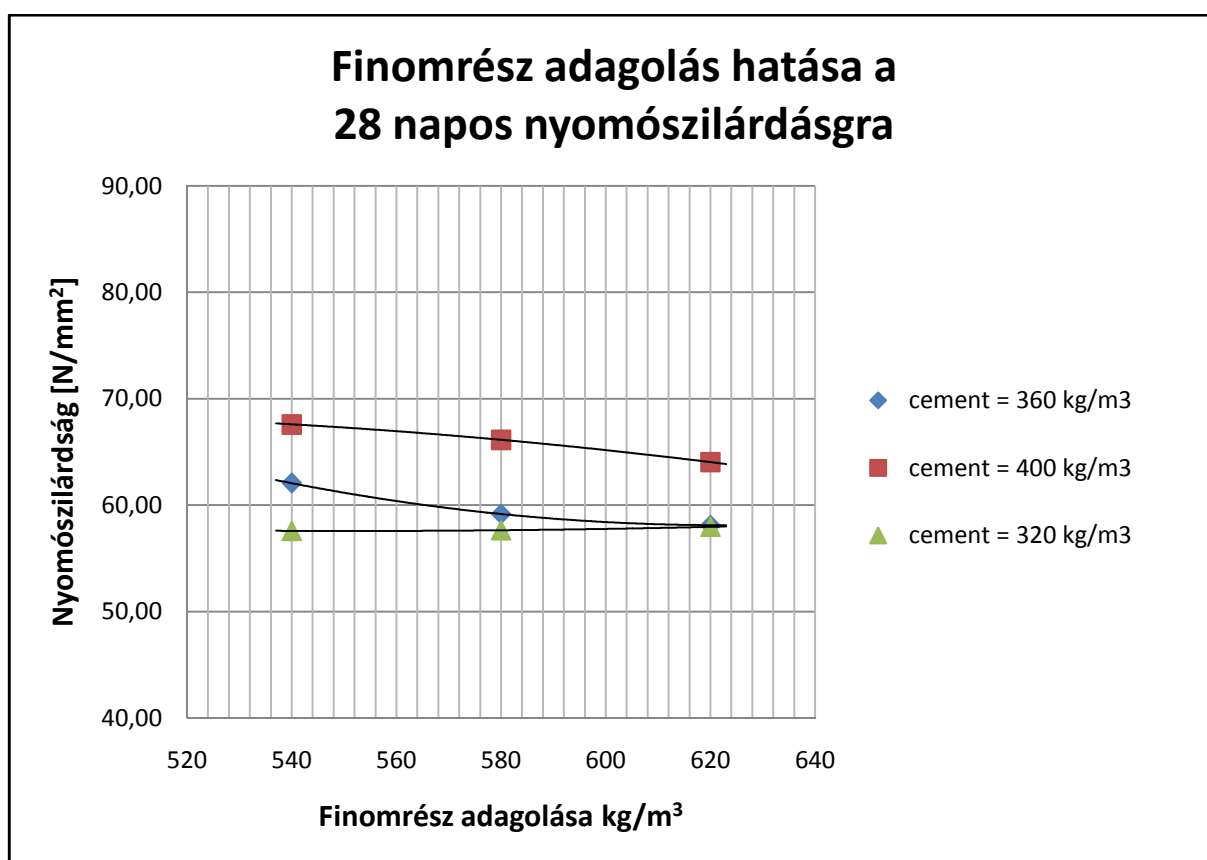
Mész-kőliszt és metakaolin adagolás hatása a 28 napos nyomószilárdságra



4.2. ábra: 28 napos nyomószilárdság alakulása a finomrész mennyiségének függvényében

A 4.2. ábrán látható, hogy a mészkőliszt túlzott mértékű adagolása szilárdságcsökkenést okoz. A jelleggörbéknek megfelelően 40 kg/m^3 mészkőliszt adagolása esetén $\sim 3\text{-}5\%$ szilárdságcsökkenés következik be. Ez alól kivételt képeznek azok a betonösszetételek, ahol a mészkőliszt mellett metakaolint is használtam: a 10., 11., 12., receptúránál 400 kg/m^3 cement mellett, $100\text{-}180 \text{ kg/m}^3$ mészkőliszt és 40 kg/m^3 metakaolin alkották a finomrészt. Ezeknél a metakaolin hatásának köszönhetően lettek ilyen magas értékűek az eredmények.

A részletes eredményeket a *függelék* tartalmazza.



4.3. ábra: 28 napos nyomószilárdság alakulása a finomrész adagolás függvényében

A 4.3. ábrán látható a finomrész (mészkőliszt) adagolás hatása a 28 napos nyomószilárdságra vonatkozóan. A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy a finomrész mennyiségének növelése 400 kg/m^3 és 360 kg/m^3 cement adagolása mellett egyértelmű szilárdságcsökkenést okoz. Itt a c/f (cement-finomrész tényező) értéke $0,33$ -ról $0,29$ -re csökkent, tehát a finomrész mennyiségének növelése azonos cementtartalom mellett a 28 napos szilárdságra csökkentő hatással van. Azonban ez a tendencia, növekvő jelleget mutat

320 kg/m³ cement adagolása esetén, ahol enyhe nyomószilárdság növekedés figyelhető meg a finomrész mennyiség növelésének függvényében.

Összehasonlítva:

- az azonos finomrész, víz tartalommal és változó cement tartalommal rendelkező, olyan betonösszetételeket, ahol csak mészköliszt került kiegészítő adalékanyagként felhasználásra, jól leírható tendencia mutatkozik meg a v/c tényező és a nyomószilárdság értéke között. A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy állandó finomrész tartalom és állandó vízmennyiség, azonban változó v/c tényező esetén a legnagyobb nyomószilárdság ott figyelhető meg, ahol a v/c tényező értéke a legalacsonyabb. Ez igaz minden olyan betonösszetételnél, - ahol csak mészköliszt alkotta a kiegészítő anyagot - melyekben a finomrész tartalom 540 kg/m³; 580 kg/m³ és 620 kg/m³ volt. A vizsgálat - egymással összefüggő - számszerű értékeit a 4.4 táblázat foglalja össze.
- Állandó víz, cement tartalom és v/c tényező illetve állandó mennyiségű metakolin mellett, továbbá változó mészköliszt tartalom esetén a legnagyobb nyomószilárdság ott figyelhető meg, ahol a legnagyobb a finomrész tartalom a betonösszetételben: a 10.-12. receptúra esetén, ahol a finomrészt állandó jelleggel 40 kg/m³ metakaolin és változó mennyiségű mészköliszt alkotta megfigyelhető, hogy magasabb finomrész tartalom esetén nagyobb nyomószilárdság érhető el.
- Állandó cement tartalom (400 kg/m³) és állandó vízmennyiség (180 l/m³) ebből adódóan állandó v/c tényező esetén többlet kiegészítő anyag, esetemben mészköliszt adagolása egyértelmű szilárdság csökkenést okoz, ahogy az 4.2. ábra és a 4.4. táblázat értékei is szemléltetik.

Ez a tendencia hasonlóképpen alakul, ha a cement tartalom értéke 360 kg/m³ és a vízmennyiség és v/c tényező továbbra is állandóak.

Abban az esetben, ha az állandó cement tartalom értéke 320 kg/m³ és a vízmennyiség és a v/c tényező továbbra is állandó nem figyelhető meg ez a csökkenés, közel azonos nyomószilárdsági értékek adódnak, tehát van egy adott finomrész mennyiség mely növelésével már nem érhető el szilárdság növekedés. A kapott eredményeket a 4.2 ábrán szemléltettem, illetve 4.4 táblázatban közöltem.

4.4. táblázat: Megszilárdult beton tulajdonságai

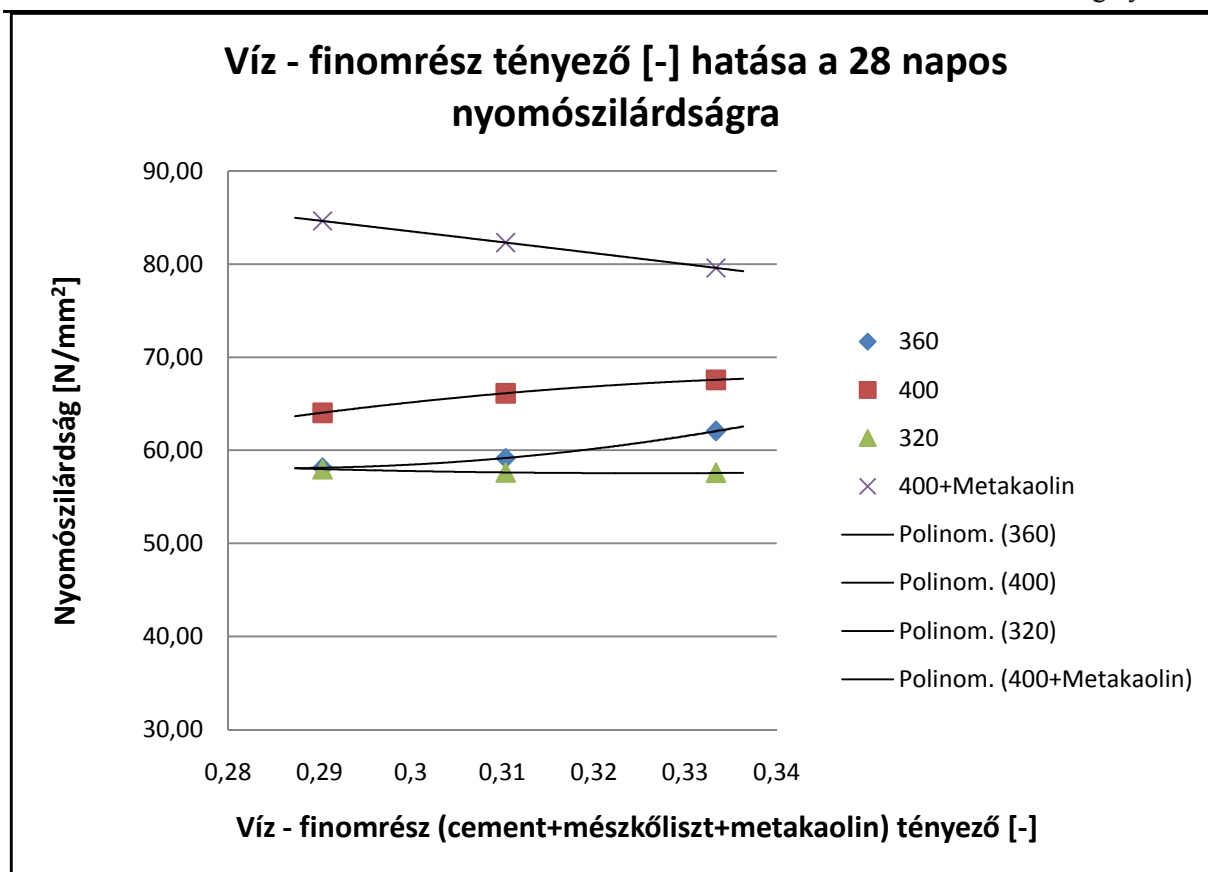
Receptúra	Cement	Kieg. anyag	Kieg. anyag	Finomrész tartalom	Víz	28 napos testsűrűség	$f_{c,m,cube,150}$	$f_{c,m,cube,150}$	$f_{c,m,cube,150}$
	CEM II A-S 42,5 N	Mészke- liszt	Metakaolin				2 nap	7 nap	28 nap
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]				[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1	360	220	-	580	180	2,361	30,80	44,50	59,17
2	400	180	-	580	180	2,365	33,66	45,63	66,13
3	320	260	-	580	180	2,355	28,53	43,79	57,63
4	400	220	-	620	180	2,359	37,97	50,81	64,04
5	360	260	-	620	180	2,367	33,36	46,59	58,12
6	320	300	-	620	180	2,348	30,46	43,91	57,97
7	400	140	-	540	180	2,336	31,81	50,41	67,58
8	360	180	-	540	180	2,356	30,27	46,23	62,07
9	320	220	-	540	180	2,360	27,97	43,76	57,57
10	400	180	40	620	180	2,341	34,37	56,80	84,65
11	400	140	40	580	180	2,312	33,95	57,43	82,32
12	400	100	40	540	180	2,345	35,46	58,77	79,59

4.1.3.2. Víz-finomrész (cement, mészkőliszt, metakaolin) tényező és a 28 napos nyomószilárdság összefüggése

Érdekes kiterjeszteni az előző bekezdések megállapításait a víz-finomrész tényező összefüggéseire is, mely a 4.4. ábrán látható.

Azoknál a betonösszetételeknél, ahol a finomrész csak mészkőlisztből és cementből áll össze megfigyelhető, hogy a víz-finomrész tényező növelésével együtt növekszik a 28 napos nyomószilárdság értéke is. E szerint ~1%-os víz finomrész tényező növelés hatására (azonos víz-cement tényező esetén; 0,28 - 0,34 tartományon vizsgálva) ~1-2 % - os szilárdságnövekedés tapasztalható. Ez a tendencia ellentétes azoknál a betonösszetételeknél, ahol 40 kg/m³ metakaolint is tartalmaz a finomrész.

A részletes eredményeket a **függelék** tartalmazza.

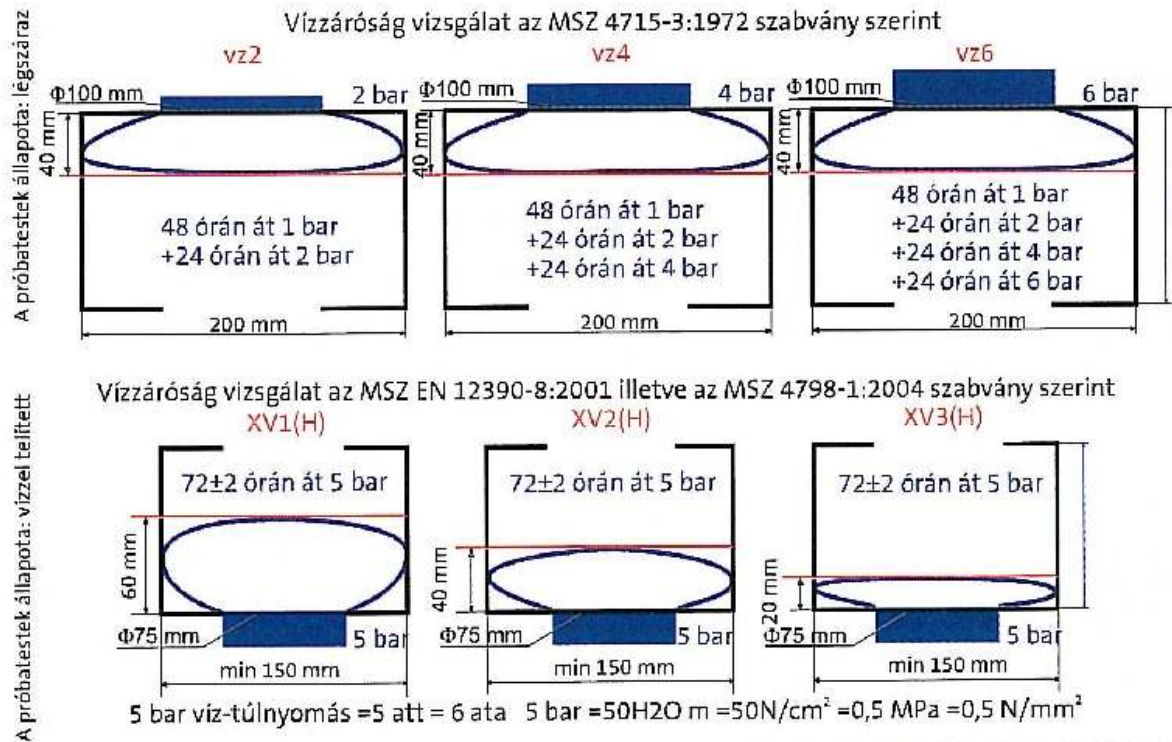


4.4. ábra: Víz - finomrész tényező [-] hatása a 28 napos nyomószilárdságra

4.1.4. Vízjáróság

A beton vízjáróságát az MSZ EN 12390-8:2001 szabvány szerint, legalább 28 napos korú próbatesten, 75 mm átmérőjű körfelületen 72 ± 2 órán át ható 5 bar ($0,5 \pm 0,05$ MPa) állandó víznyomáson kell vizsgálni. Ennek megfelelően az öntömörödő beton vízjárósági vizsgálatát WE 6 MM készülékkel vizsgáltam: 5 bar nyomással 3 (3x24 óra) napig, ahogy azt a 2.1.7.3. fejezetben található képeken is látható.

Utána széthasítottam őket és leolvastam a vízbehatolás mélységét. A megfelelően pontos eredmények érdekében, ehhez a vizsgálatához is 3 darab próbatestet használtam fel minden betonösszetételből. A kapott eredményeket a szabványnak megfelelően – ami az 57. képen látható – osztályba soroltam. A kapott eredmények átlagát a 4.5. táblázatban foglaltam össze.



57. kép: MSZ EN 12390-8:2001, vízzárósági vizsgálat

4. 5. táblázat: Vízbehatolás mélysége, környezeti osztályok

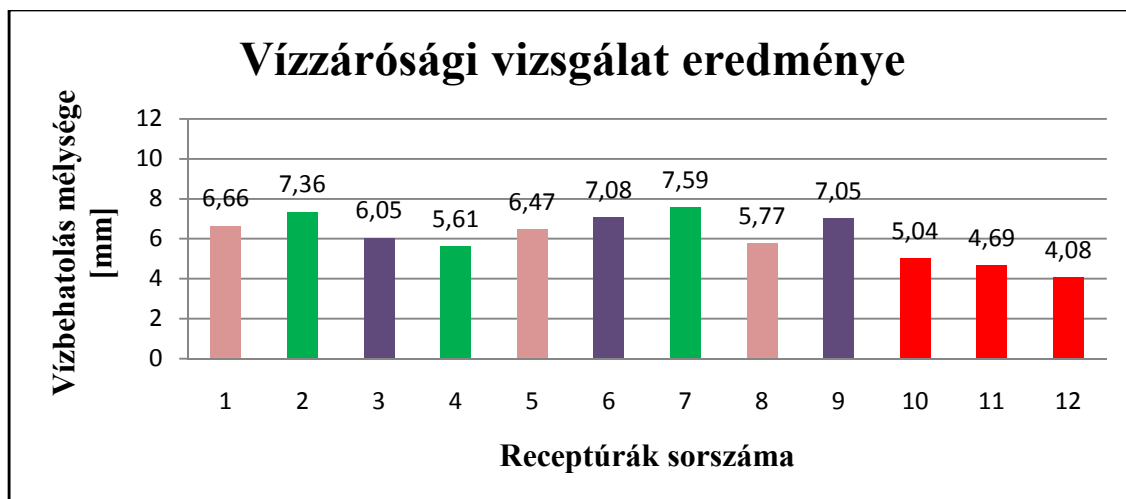
Receptúra	Vízbehatolás mélysége	Környezeti osztály
	[mm]	
1	6,66	XV3(H)
2	7,36	
3	6,05	
4	5,61	
5	6,47	
6	7,08	
7	7,59	
8	5,77	
9	7,05	
10	5,04	
11	4,69	
12	4,08	

Az összes érték kisebb volt, mint 20 mm, ebből következően minden betonösszetétel XV3(H) környezeti osztályú.

Az eredmények 4,08–7,59 mm között helyezkednek el, amik az előzetesen felvetett **3. hipotézisnek** megfelelően alakultak. Az összes érték nagyon jól kielégíti a szabványban előírt követelményeket. Az eredmények alapján megállapítható, hogy azoknál a betonösszetételeknél, ahol 40 kg/m^3 metakaolin is felhasználásra került, ott a vízbehatolás mélysége jelentősen csökkent. A betonösszetételeknél, ahol csak mészköliszt került felhasználásra, ott azonos cementmennyiség esetén a finomrész tartalom növelésével a vízbehatolás mélysége csökkenő jelleget mutat, amit a 4.6 táblázatban foglaltam össze. A 4.5 ábra szemlélteti a vízbehatolási mélységeket.

A 4.5 ábrán lila színnel töltöttem ki azokat a vízbehatolási mélységeket, ahol 320 kg/m^3 , rózsaszínnel, ahol 360 kg/m^3 , míg zölddel ahol 400 kg/m^3 volt a cement tartalom. Ezekben az esetekben csak mészköliszt alkotta a finomrészt.

Piros színnel tüntettem fel azokat a betonösszetételeket, ahol 400 kg/m^3 volt cement mennyisége és mészköliszt mellett metakaolin is felhasználásra került kiegészítő adalékanyagként.



4.5. ábra: Vízzárósági vizsgálat eredménye, vízbehatolás mélysége

4.6. táblázat: Betonösszetételek és vízbehatolás mélysége

Receptúra	Cement	Kieg. anyag	Kieg. anyag	Finomrész tartalom	Víz	Vízbehatolás mélysége
	CEM II A-S 42,5 N	Mészkeőliszt	Metakaolin			
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]			
1	360	220	-	580	180	6,66
2	400	180	-	580	180	7,36
3	320	260	-	580	180	6,05
4	400	220	-	620	180	5,61
5	360	260	-	620	180	6,47
6	320	300	-	620	180	7,08
7	400	140	-	540	180	7,59
8	360	180	-	540	180	5,77
9	320	220	-	540	180	7,05
10	400	180	40	620	180	5,04
11	400	140	40	580	180	4,69
12	400	100	40	540	180	4,08

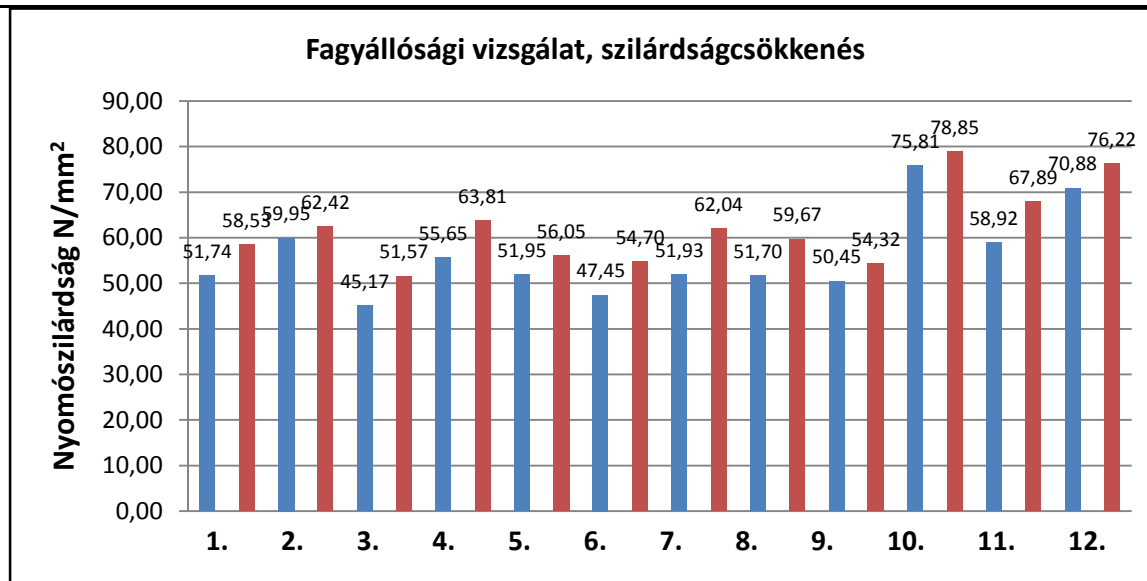
4.1.5. Fagyállóság

A fagyállósági vizsgálat előtt megmértem a próbatestek tömegét szárazon, illetve pontos geometriai méretüket digitális tolómérő segítségével. A fagyállósági vizsgálat (f50) 50 fagyasztás-olvadási ciklussal (-20 °C légtérben fagyasztással és + 20 °C olvasztással vízben) történt, ahogy az a 2.1.7.4. fejezetben található képeken is látszik. A fagyasztó berendezésbe minden alkalmazott betonösszetételből 2 darab próbatest került, míg etalonként vízbe – a fagyasztás időtartamára – 3 darab. A fagyasztó gépből való kivételt követően megmértem a próbatestek (150 x 150 x 150 mm-es kocka) tömegét nedvesen és kiszámoltam a tömegveszteséget. A 4. *hipotézisnek* megfelelően alakultak az eredmények, hiszen tömegveszteség nem következett be. Ez abból kifolyólag történt így, hogy a vizsgálat előtt vízben tárolt próbatestek pórusaiban a víz megfagyott a vizsgálat során minden fagyasztási ciklus alkalmával, ezért az tágította a pórusokat, ezáltal nagyobb térfogatúvá váltak. Így nagyobb mennyiségű vizet tudtak a próbatestek felvenni.

4.7. táblázat: Betonösszetételek és fagyállóság

Receptúra	Cement	Kieg. anyag	Kieg. anyag	Finomrész tartalom	Víz	Szilárdság csökkenés
	CEM II A-S 42,5 N	Mészkeőliszt	Metakaolin			
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]			
1	360	220	-	580	180	11,6
2	400	180	-	580	180	3,9
3	320	260	-	580	180	12,4
4	400	220	-	620	180	12,8
5	360	260	-	620	180	7,3
6	320	300	-	620	180	13,3
7	400	140	-	540	180	16,3
8	360	180	-	540	180	13,3
9	320	220	-	540	180	7,1
10	400	180	40	620	180	3,9
11	400	140	40	580	180	13,2
12	400	100	40	540	180	7,0

A próbatesteket szárítás után a FORM+TEST gyártmányú, ALPHA-3-3000 S terhelő berendezéssel eltörtem. Kiszámoltam a szilárdságcsökkenést is (MSZ 4715/3, MSZ 4719). Az idő szűke miatt hámlási vizsgálatot nem végeztem el. A mérési eredmények kimutatták, hogy egyértelmű szilárdságcsökkenés következik be a fagyasztás hatására, amely ~3-16 % nagyságú szilárdságvesztést jelent, ahogy azt a **4. hipotézisben** feltételeztem. A kapott eredményeket a **4.7 táblázatban** foglaltam össze. A legkisebb veszteség a 2. és a 10. betonösszetételnél figyelhető meg, amely ~3 % volt. A 2. receptúra esetén 180 kg/m³ mészkőliszt, míg a 10. receptúra esetén 180 kg/m³ mészkőliszt és 40 kg/m³ metakaolin kerültek felhasználásra. A legmagasabb szilárdságcsökkenés a 7. receptúra (cement: 400 kg/m³; mészkőliszt: 140 kg/m³ víz: 180 l/m³; v/c=0,45) esetén állt elő, ahol ennek értéke ~ 16 %-ra adódott.



4.6. ábra: Fagyállósági vizsgálat eredménye: szilárdságcsökkenés

A 4.6 ábrán kékkel szerepelnek a fagyállósági vizsgálatnak kitett próbatestek 28 napos nyomószilárdság értékei, míg pirossal az etalonként vízben tárolt próbatestek 28 napos nyomószilárdság értékei.

5. MEGÁLLAPÍTÁSOK, KONKLÚZIÓ

Tudományos Diákköri munkám keretében arra a kérdésre kerestem a választ, hogy a ma már egyre közkedveltebbé váló öntömörödő betonok mechanikai és egyéb tulajdonságait milyen módon, illetve milyen mértékben befolyásolja a finomrész-tartalom változtatása. Ennek érdekében a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék Laboratóriumában vizsgálatokat végeztem. Vizsgálataim közvetlen célja a cement, a mészköliszt és a metakaolin adagolási mennyiségének hatását kimutatni megszilárdult beton nyomószilárdságára, vízzáróságára és fagyállóságára.

Kísérleti állandók voltak:

- a cementminőség: CEM II A-S 42,5 N
- a víztartalom: $v = 180 \text{ l/m}^3$
- szemmegoszlási görbe azonos

Kísérleti paraméterek voltak:

- cement mennyisége: 320 kg/m^3 ; 360 kg/m^3 ; 400 kg/m^3
- a kiegészítő anyag: mészköliszt: 100 kg/m^3 – 300 kg/m^3 (40 kg/m^3 -es lépcsőben)
metakaolin: 0 kg/m^3 , 40 kg/m^3

Kísérleteim során az alábbi vizsgálatokat végeztem el:

- konzisztencia: Blokkoló-gyűrű (J-Ring); V-tölcsér (V-Funnel)
- nyomószilárdság próbatesten ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$) mérve 2, 7, 28 napos korban
- vízzárósági vizsgálat
- fagyállósági vizsgálat

Kísérleti eredmények alapján megállapítható:

1. Nyomószilárdság:

A vizsgált tartományon (100 kg/m^3 – 300 kg/m^3) 40 kg/m^3 mészköliszt adagolás hatására ~2-10% szilárdságnövekedés várható, ez a 2 napos nyomószilárdságban mutatkozik meg. Ez a tendencia igaz 320 kg/m^3 , 360 kg/m^3 és 400 kg/m^3 cement adagolásakor is. Ahol 400 kg/m^3 cement mellett 40 kg/m^3 metakaolint is tartalmazott a finomrész, egyértelmű szilárdságnövekedés jelentkezik a metakaolin hatásának köszönhetően.

A mészköliszt túlzott mértékű adagolása szilárdságcsökkenést okoz. Ez a 28 napos szilárdságban értékelhető, 40 kg/m³ mészköliszt adagolása esetén ~3-5 % szilárdságcsökkenés következik be. Ez alól kivételt képeznek azok a betonösszetételek, ahol a mészköliszt mellett metakaolint is használtam.

Összehasonlítva az azonos finomrész, víz tartalommal és változó cement tartalommal rendelkező, olyan betonösszetételeket, ahol csak mészköliszt került kiegészítő adalékanyagként felhasználásra, jól leírható tendencia mutatkozik meg a v/c tényező és a nyomószilárdság értéke között. A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy állandó finomrész tartalom és állandó vízmennyiség, azonban változó v/c tényező esetén a legnagyobb nyomószilárdság ott figyelhető meg, ahol a v/c tényező értéke a legalacsonyabb. Ez igaz minden olyan betonösszetételnél, - ahol csak mészköliszt alkotta a kiegészítő anyagot - melyekben a finomrész tartalom 540 kg/m³; 580 kg/m³ és 620 kg/m³ volt.

Állandó víz, cement mennyiség és v/c tényező illetve állandó mennyiségű metakolin mellett, továbbá változó mészköliszt tartalom esetén a legnagyobb nyomószilárdság ott figyelhető meg, ahol a legnagyobb a finomrész tartalom a betonösszetételben.

2. Víz-finomrész tényező

A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a cementtartalom növelése nélkül növelhető a megszilárdult beton nyomószilárdsága. Tehát ~1%-os víz finomrész tényező növelés hatására (azonos víz-cement tényező esetén; 0,28 - 0,34 tartományon vizsgálva) ~1-2 % szilárdságnövekedés tapasztalható. Ez a tendencia ellentétes azoknál a betonösszetételeknél, ahol 40 kg/m³ metakaolint is tartalmazott a finomrész.

3. Vízjáróság

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a vízjárósági vizsgálatok során a vízbehatolás mélysége minden alkalommal kisebb volt, mint 20 mm, ami az XV3(H) környezeti osztálynak felel meg. Tehát vízjáróság szempontjából kiválóak a kutatás keretében vizsgált betonösszetételek.

4. Fagyállóság

A fagyállósági vizsgálat következtében egyértelmű szilárdságcsökkenés figyelhető meg, azonban tömegveszteség nem következett be, hiszen a megfagyott víz feszítette a kapillárisok falát, így azok átmérője megnőtt és több vizet tudtak felvenni.

6. JÖVŐBENI KUTATÁSOK

A Tudományos Diákköri munkám keretében megállapítottam az öntömörödő betonok mechanikai és egyéb tulajdonságait milyen módon, illetve milyen mértékben befolyásolja a finomrész-tartalom változtatása. Vizsgálataim közvetlen célja volt a cement, a mészkőliszt és a metakaolin adagolási mennyiségének hatását kimutatni megszilárdult beton nyomószilárdságára, vízzáróságára és fagyállóságára.

Továbbra is ezzel a témával szeretnék aktívan foglalkozni! A jövőben szeretném kutatásomat kiterjeszteni, más kiegészítő anyagokra is, illetve szeretném a vizsgálataimat a nagyszilárdságú öntömörödő beton irányába folytatni, hogy egy teljesen átfogó képet alakíthassak ki az öntömörödő betonról.

7. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Salem Georges Nehme PhD egyetemi docensnek a kiváló témavezetésért, a szakmai tanácsokért és a rendületlen biztatásért. A Vele végzett közös kutató munka során rendkívül sok új ismeretre tehettem szert, amiért nagyon hálás vagyok!

Külön köszönetemet szeretném kifejezni Eipl Andrásnak, a fáradtságot és időt nem kímélő támogatásáért a laborban töltött órák alatt, és a vizsgálatok során nyújtott segítségével.

Köszönettel tartozom továbbá Csányi Erika tudományos munkatársnak a mészkőlisztre és metakaolinra vonatkozó anyagjellemzők megállapítása során nyújtott segítségével.

Köszönettel tartozom a BME Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszéken dolgozó laboránsoknak: Diriczi Dávidnak és Kovács Gábornak a gépek használata során nyújtott segítségükért!

Ezúton szeretnék köszönetet mondani a Duna Dráva Cement Kft.-nek a mészkőliszt és a cement, illetve a BASF Építőkémia Hungária Kft.-nek a Glenium 51 folyósító biztosításában nyújtott támogatásukért.

8.HIVATKOZÁSOK

- [1] **Balázs Gy.** (1994): „Építőanyagok és kémia” *Műegyetem Kiadó*, pp. 80, 237-282
- [2] **Sidney Mindess, J. Francis Young** (1981): „Concrete” *Prentice Hall International, INC London*, pp. 544-548
- [3] **Nehme S. G.** (2004): „A beton porozítása” – *PhD értekezés*, BME Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék, Budapest, pp. 31-32, 92-94.
- [4] **Degussa** (2004): „Tervezési segédlet öntömörödő beton készítéséhez Glenium adalékszerrel” pp 1-23
- [5] **Palotás L. – Balázs Gy.** (1980): „Beton-habarc-skerámia-műanyag” *VIII. Beton Akadémia Kiadó*, pp. 19-27, 131-134
- [6] **Ujhelyi J.** (1973): „Beton és habarcstechnológia” - *Műszaki Könyvkiadó*, pp. 580-593
- [7] **Kausay T.** (2003): „Adalékanyag” – *A „Beton” című szakmai havilap 2003. októberi száma*, pp. 10-11.
- [8] **Carmeus Hungária Kft.**: *Mészkeőliszt alkalmazása a betonban*, pp. 1-3
- [9] **Kausay T.** (2009): „Nagyszilárdságú beton” – *A „Beton” című szakmai havilap 2009. szeptemberi száma*, pp. 3-4.
- [10] **Kausay T.** (2009): „Ultra nagy szilárdságú beton” – *A „Beton” című szakmai havilap 2009. októberi és november-decemberi száma*, pp. 4-7.
- [11] **Lagier, F. - Kurtis, K.E.** (2007): „Influence of Portland cement composition on early age reactions with metakaolin.” *CCR 37 Issue 10* pp. 1411-1417
- [12] **Okamura, H. and Ouchi, M.** (2003): „Self-compacting Concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 1, No. 1, pp. 5-15.
- [13] **Okamura, H. and Ouchi, M.** (1995): „Mix-design for self-compacting concrete”, *Concrete Library of JSCE*, pp. 107-120
- [14] <http://www.viztorony.hu/>
- [15] <http://www.beton.org/>
- [16] **Nehme S. G.** (2007): „A paksi KKÁT II. ütem vasbeton szerkezetének építése” – *A „Beton” című szakmai havilap 2007. májusi XV. évf. 5. szám*, pp. 10-11.
- [17] **Kausay T.** (2001): „Fajlagos felület” – *A „Beton” című szakmai havilap 2001. szeptemberi száma*, pp. 14.
- [18] **Zsigovics I.** (2007): „Mix desing of self compacting concrete” *3rd Central European Congress on Concrete Engineering 2007 Visegrád*, pp 161.164
- [19] **Zsigovics I.** (2003): „Öntömörödő beton” – *PhD értekezés*, BME Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék, Budapest, pp. 67-69.

9.JELÖLÉSEK

JEL	MEGNEVEZÉS	MÉRTÉKEGYSÉG
ρ_s	anyagsűrűség	kg/m ³
$f_{c,cube,2}$	átlagos nyomószilárdság 2 napos korban 150x150x150mm próbakockán	N/mm ²
$f_{c,cube,28}$	átlagos nyomószilárdság 28 napos korban 150x150x150mm próbakockán	N/mm ²
$f_{c,cube,7}$	átlagos nyomószilárdság 7 napos korban 150x150x150mm próbakockán	N/mm ²
β	fajlagos felület	m ² /kg
ρ_{friss}	frissbeton testsűrűsége	kg/m ³
d	szemcseátmérő	mm
d_{max}	terülés értéke	mm
ρ_{28}	testsűrűsége (28 napos beton)	kg/m ³
v/f	víz-finomrész tényező (térfogatarány)	-
v	víz mennyisége 1m ³ betonban	ℓ/m ³
v/c	víz-cement tényező (térfogatarány)	-

10. SUMMARY IN ENGLISH

Nowadays the demand for concrete with high quality is permanent. The claim to build aesthetics reinforced concrete structures is increasing. In the last decade the development of the new concreting procedures became faster, therefore the concrete was further developed to be economical and multi-faceted. The self-compacting concrete is used in the preconstruction works of the building industry, because only in these factories is possible to measure the aggregate enough precisely. Primary prestressed concrete specimens are finished in the factories, where the high early strength is the most important requirement. The production became profitable and quicker with this new technology.

These days the using of self-compacting concrete is popular. Therefore my goal was with this research to answer the following question: How the mechanical and other properties of the self-compacting concrete is affected by the fine aggregate? The aim of this paper was to study the effect of fine aggregate, and to evaluate and compare the results, especially the compressive strength, the frost-resistance and the water tightness. Therefore, 12 different and etalon concrete recipes were studied. In the special recipes the amount of fine aggregate was different with increasing fine aggregate content. The fine aggregates were: limestone and metakaolin. It was important to change the water-cement ratio during the designing of the recipes as well.

The specimens were stored in water for 7 days after the concrete mixing. The strength tests were carried out on 2, 7 and 28 days old specimens. 3-3 pieces of specimens were used for every strength test. It is easy to show the effect of the variable (additional additive, cement content, water-cement ratio, fine aggregate content) for the strength with the laboratory experimental results.

The specimens were 28 days old, when the frost-resistance and water tightness tests were carried out. Therefore, the results can be compared with reasonable accuracy.

This paper is focused on the laboratory experimental results and on the evaluating and comparing of the results.

1. RECEPTÚRA

1. F 1. táblázat: Betonösszetétel (1)

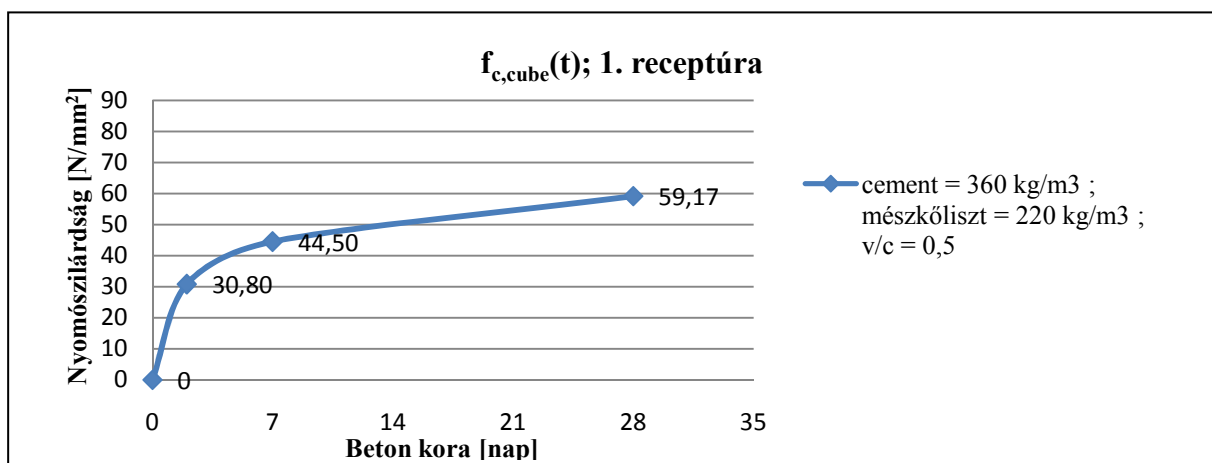
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	698,09	264,52
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	387,83	146,90
	8/16 mm frakció	30%	465,39	176,29
	Mészkelet		220,00	95,65
	Összesen	100%	1551,31	587,62
Cement			360,00	116,13
Víz	m _w /m _c =	50,0%	180,00	180,00
	C+ M		580,00	
Adalékszer cem. m%		1,00%	3,60	3,60
Levegő			--	17,00
Összesen			2315	1000

1. F 2. táblázat: Konzisztencia

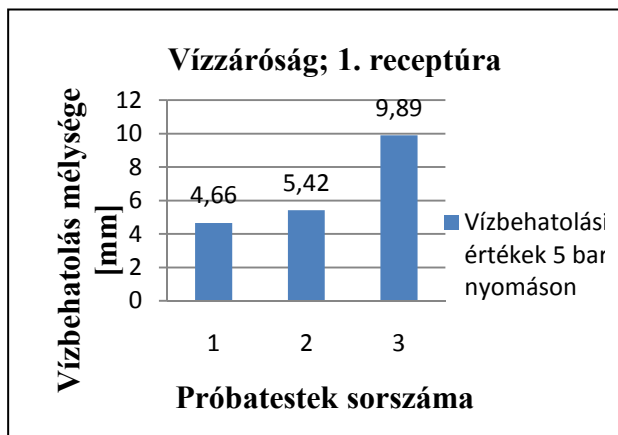
Terület (cm)	73	74
	75	
Kifolyási idő (sec)	7,4	

1. F 3. táblázat: Vízjárás

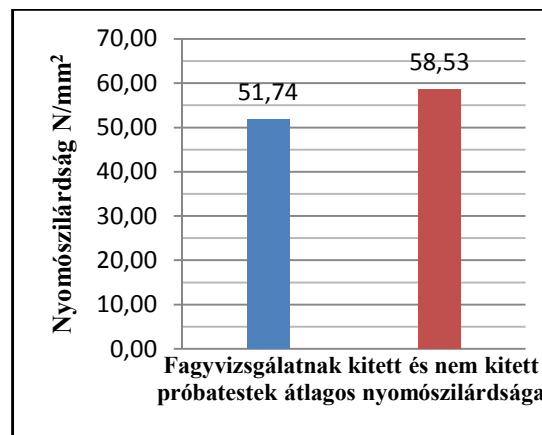
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
1-1	4,66
1-2	5,42
1-3	9,89
átlag	6,66
Környezeti osztály	XV3(H)



1. F 1. ábra: Nyomószilárdság



1. F 2. ábra: Vízjárás



1. F 3. ábra: Fagyállóság

2.RECEPTÚRA

2. F 1. táblázat: Betonösszetétel (2)

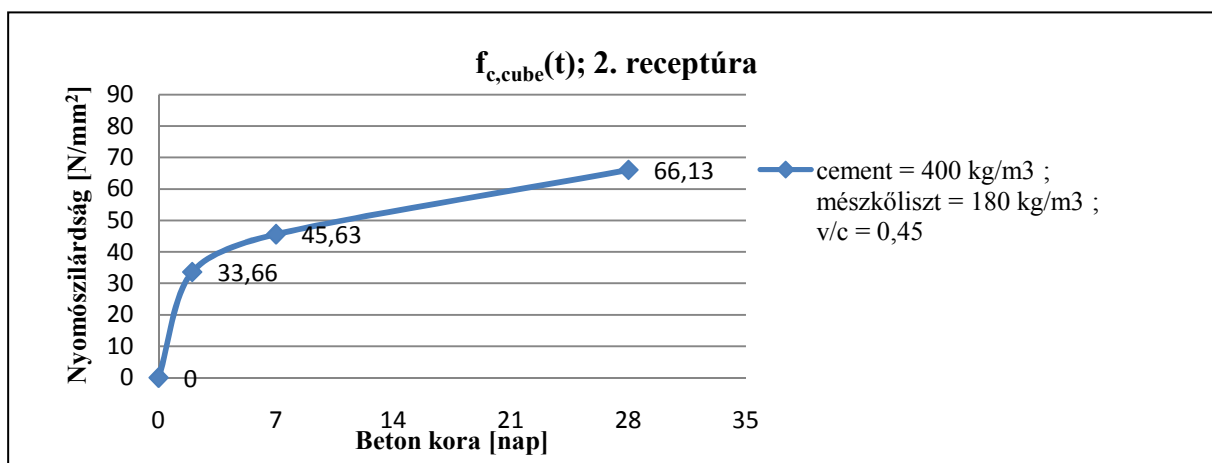
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	703,42	266,45
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	390,79	148,03
	8/16 mm frakció	30%	468,95	177,63
	Mészkelet		180,00	78,26
	Összesen	100%	1563,16	592,11
Cement			400,00	129,03
Víz	m _w /m _c =	45,0%	180,00	180,00
	C+ M		580,00	
Adalékszer cem. m%		0,90%	3,60	3,60
Levegő			--	17,00
Összesen			2327	1000

2. F 2. táblázat: Konzisztencia

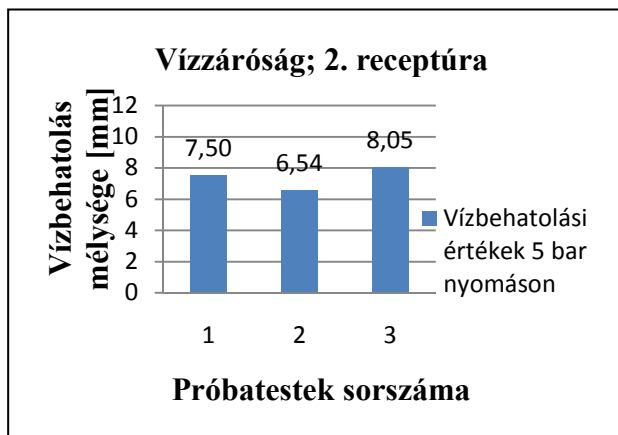
Terülés (cm)	72	73
	74	
Kifolyási idő (sec)	8,41	

2. F 3. táblázat: Vízjárás

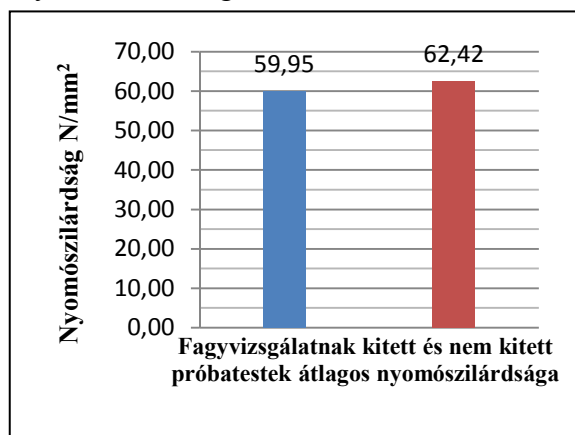
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
2-1	7,50
2-2	6,54
2-3	8,05
átlag	7,36
Környezeti osztály	XV3(H)



2. F 1. ábra: Nyomószilárdság



2. F 2. ábra: Vízjárás



2. F 3. ábra: Fagyállóság

3.RECEPTÚRA

3. F 1. táblázat: Betonösszetétel (3)

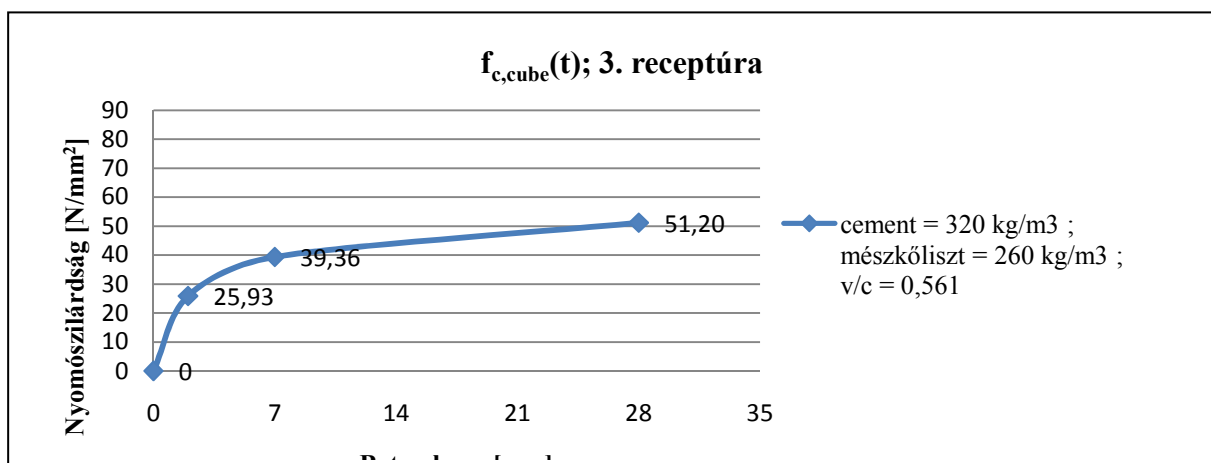
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	694,18	262,95
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	385,66	146,08
	8/16 mm frakció	30%	462,79	175,30
	Mészkelet		260,00	113,04
	Összesen	100%	1542,63	584,33
Cement			320,00	103,23
Víz	m _w /m _c =	56,1%	180,00	180,00
	C+ M		580,00	
Adalékszer cem. m%			0,90%	2,88
Levegő			--	17,00
Összesen			2305	1000

3. F 2. táblázat: Konzisztencia

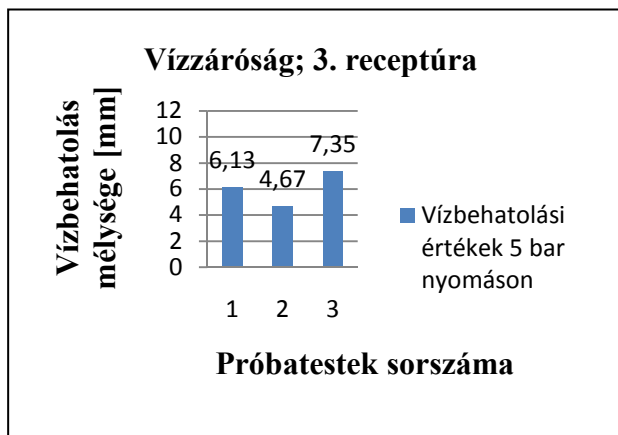
Terület (cm)	74	74,50
	75	
Kifolyási idő (sec)	6,7	

3. F 3. táblázat: Vízjárás

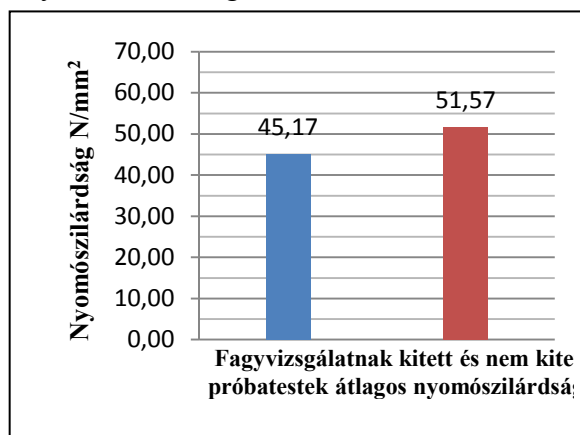
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
3-1	6,13
3-2	4,67
3-3	7,35
átlag	6,05
Környezeti osztály	XV3(H)



3. F 1. ábra: Nyomószilárdság



3. F 2. ábra: Vízjárás



3. F 3. ábra: Fagyállóság

4.RECEPTÚRA

4. F 1. táblázat: Betonösszetétel (4)

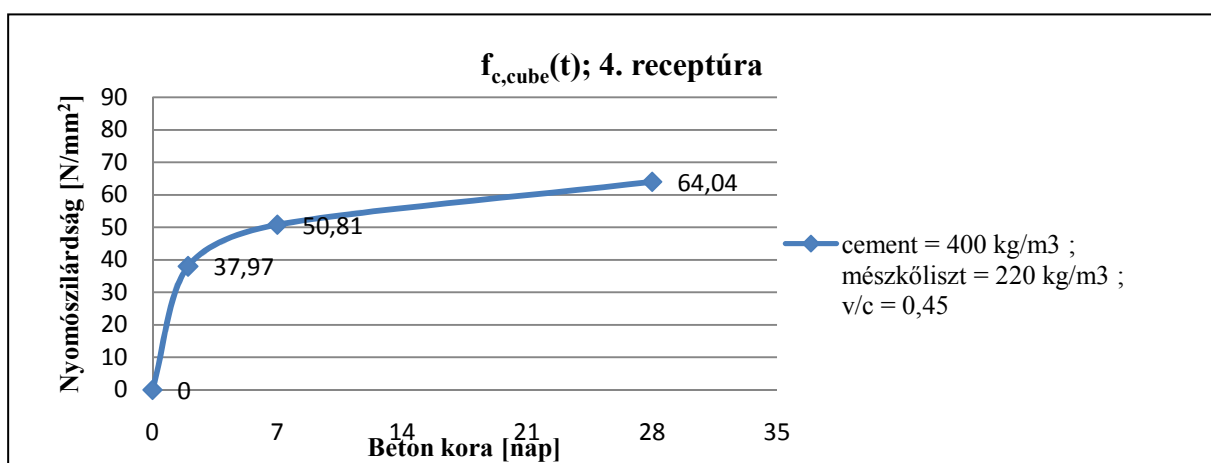
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	682,29	258,44
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	379,05	143,58
	8/16 mm frakció	30%	454,86	172,29
	Mészkőliszt		220,00	95,65
	Összesen	100%	1516,19	574,32
Cement			400,00	129,03
Víz	m _w /m _c =	45,0%	180,00	180,00
	C+ M		620,00	
Adalékszer cem. m%			1,00%	4,00
Levegő			--	17,00
Összesen			2320	1000

4. F 2. táblázat: Konzisztencia

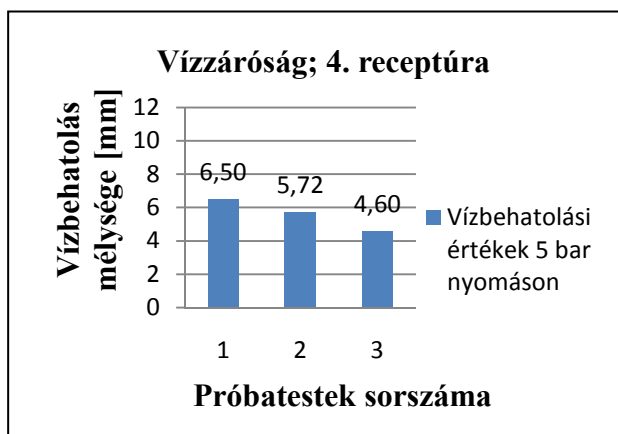
Terület (cm)	80	80,25
	80,5	
Kifolyási idő (sec)	5,3	

4. F 3. táblázat: Vízjáróság

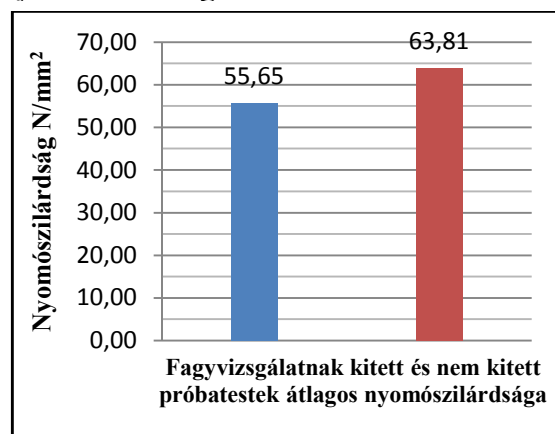
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
1-1	6,50
1-2	5,72
1-3	4,60
átlag	5,61
Környezeti osztály	XV3(H)



4. F 1. ábra: Nyomószilárdság



4. F 2. ábra: Vízjáróság



4. F 3. ábra: Fagyállóság

5.RECEPTÚRA

5. F 1. táblázat: Betonösszetétel (5)

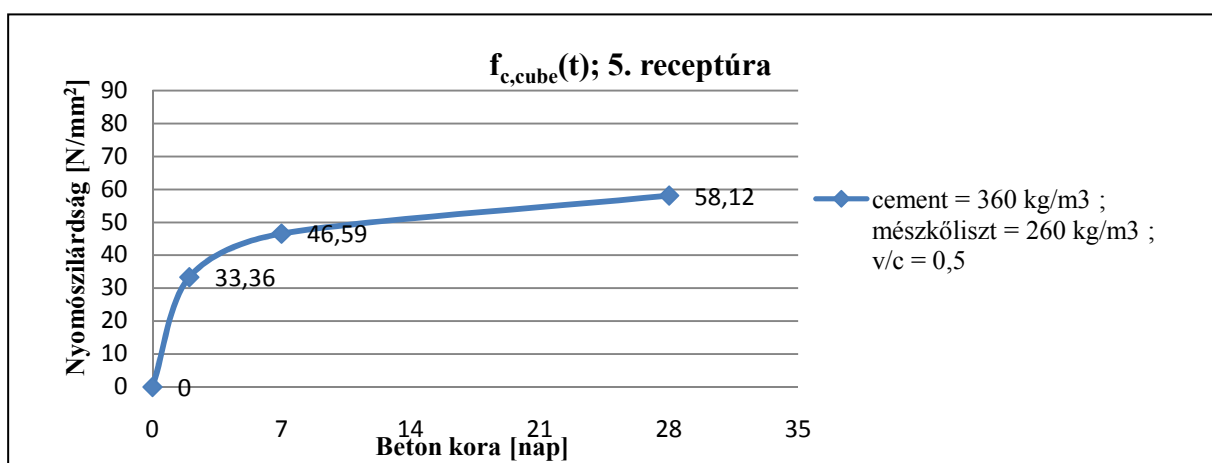
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	677,86	256,76
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	376,59	142,65
	8/16 mm frakció	30%	451,91	171,18
	Mészkelet		260,00	113,04
	Összesen	100%	1506,35	570,59
Cement			360,00	116,13
Víz	m _w /m _c =	50,0%	180,00	180,00
	C+ M		620,00	
Adalékszer cem. m%		0,90%	3,24	3,24
Levegő			--	17,00
Összesen			2310	1000

5. F 2. táblázat: Konzisztencia

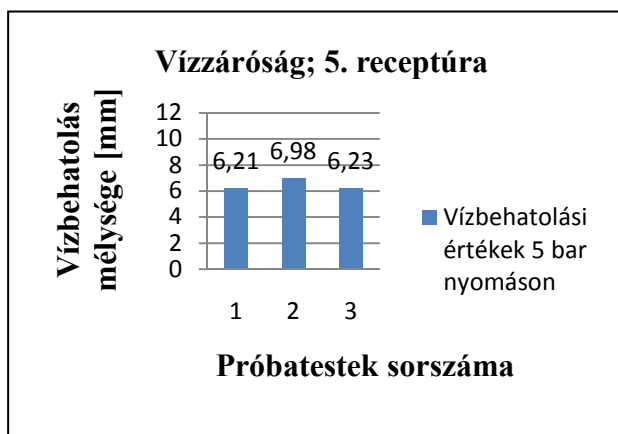
Terület (cm)	78	78
	78	
Kifolyási idő (sec)	5,5	

5. F 3. táblázat: Vízáróság

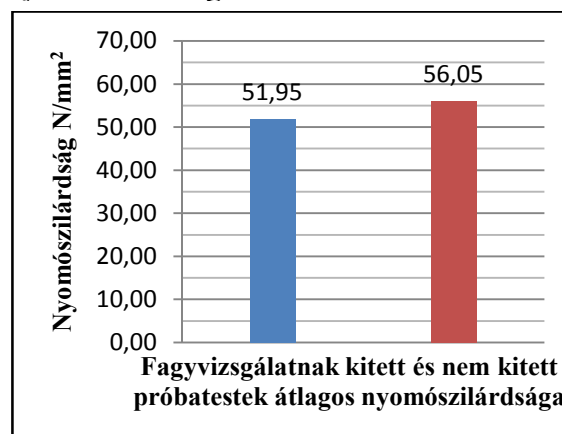
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
5-1	6,21
5-2	6,98
5-3	6,23
átlag	6,47
Környezeti osztály	XV3(H)



5. F 1. ábra: Nyomószilárdság



5. F 2. ábra: Vízáróság



5. F 3. ábra: Fagyállóság

6.RECEPTÚRA

6. F 1. táblázat: Betonösszetétel (6)

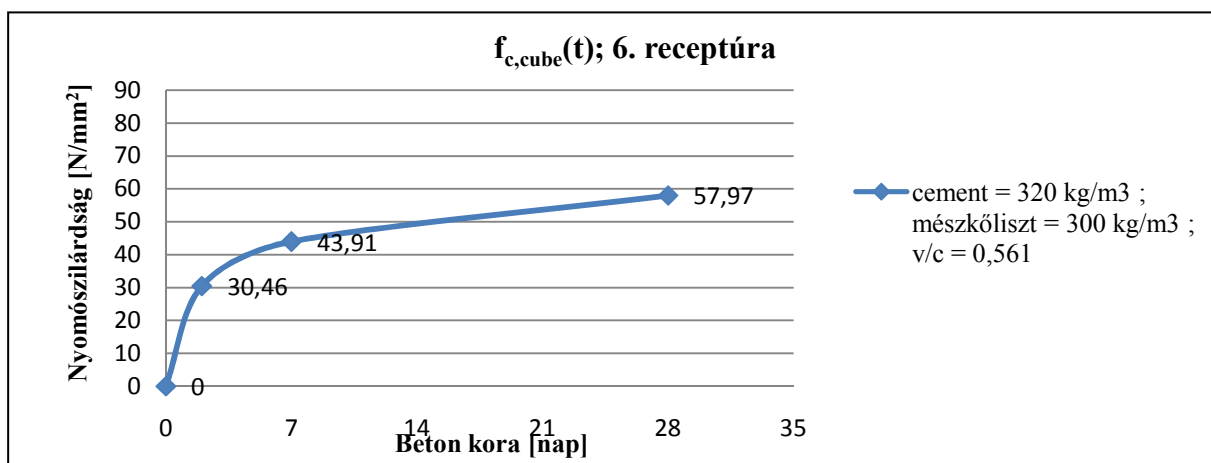
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	672,38	254,69
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	373,55	141,49
	8/16 mm frakció	30%	448,26	169,79
	Mészkelet		300,00	130,43
	Összesen	100%	1494,19	565,98
Cement			320,00	103,23
Víz	m _w /m _c =	56,1%	180,00	180,00
	C+ M		620,00	
Adalékszer cem. m%		1,20%	3,84	3,84
Levegő			--	17,00
Összesen			2298	1000

6. F 2. táblázat: Konzisztencia

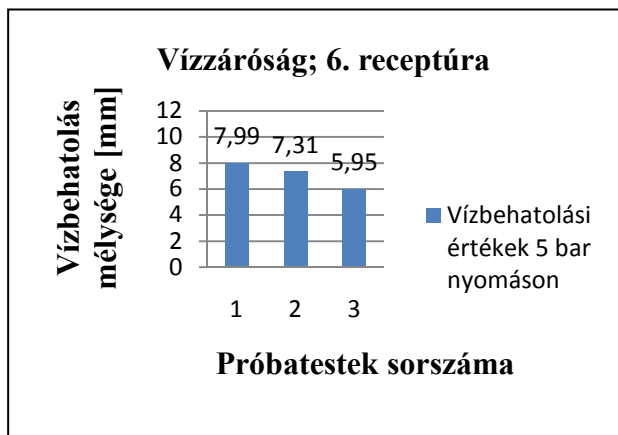
Terület (cm)	73	73,50
	74	
Kifolyási idő (sec)	5,6	

6. F 3. táblázat: Vízjárás

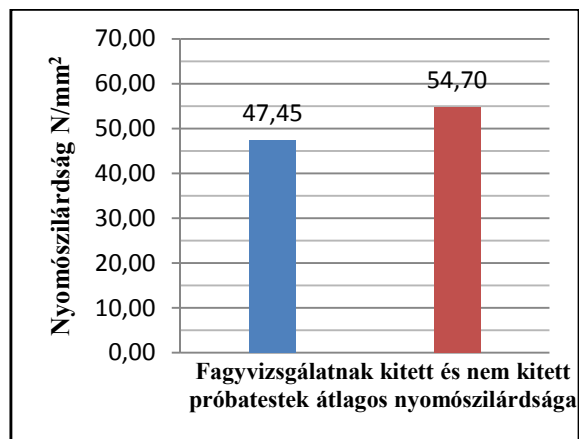
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
6-1	7,99
6-2	7,31
6-3	5,95
átlag	7,08
Környezeti osztály	XV3(H)



6. F 1. ábra: Nyomószilárdság



6. F 2. ábra: Vízjárás



6. F 3. ábra: Fagyállóság

7.RECEPTÚRA

7. F 1. táblázat: Betonösszetétel (6)

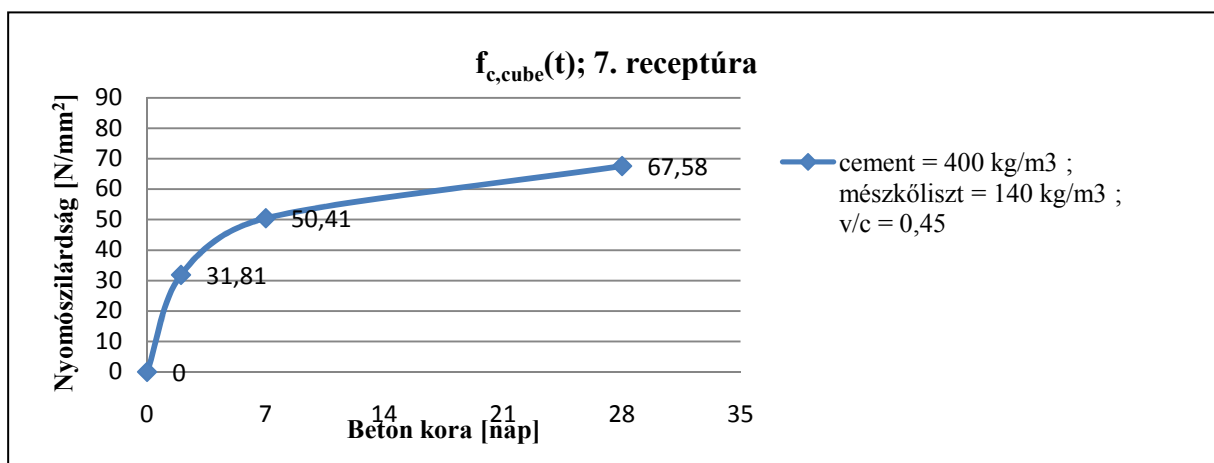
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	724,56	274,45
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	402,53	152,47
	8/16 mm frakció	30%	483,04	182,97
	Mészkőliszt		140,00	60,87
	Összesen	100%	1610,13	609,90
Cement			400,00	129,03
Víz	m _w /m _c =	45,0%	180,00	180,00
	C+ M		540,00	
Adalékszer cem. m%		0,80%	3,20	3,20
Levegő			--	17,00
Összesen			2333	1000

7. F 2. táblázat: Konzisztencia

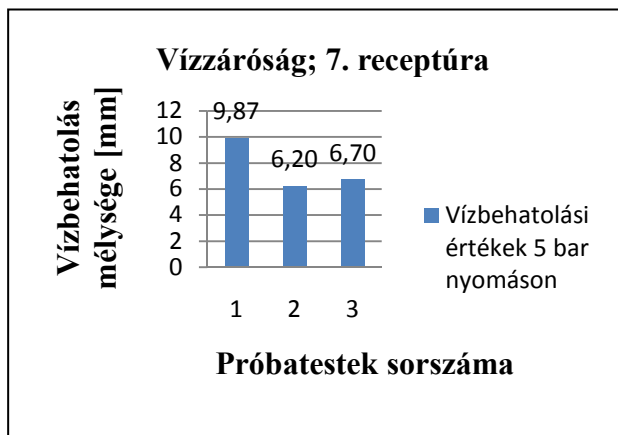
Terület (cm)	70	71,00
	72	
Kifolyási idő (sec)	7,2	

7. F 3. táblázat: Vízjáróság

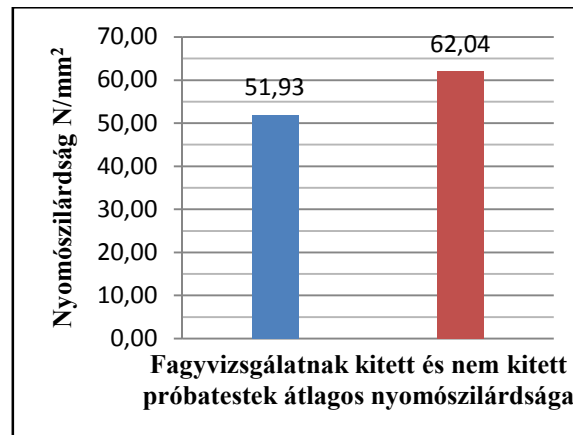
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
7-1	9,87
7-2	6,20
7-3	6,70
átlag	7,59
Környezeti osztály	XV3(H)



7. F 1. ábra: Nyomószilárdság



7. F 2. ábra: Vízjáróság



7. F 3. ábra: Fagyállóság

8.RECEPTÚRA

8. F 1. táblázat: Betonösszetétel (8)

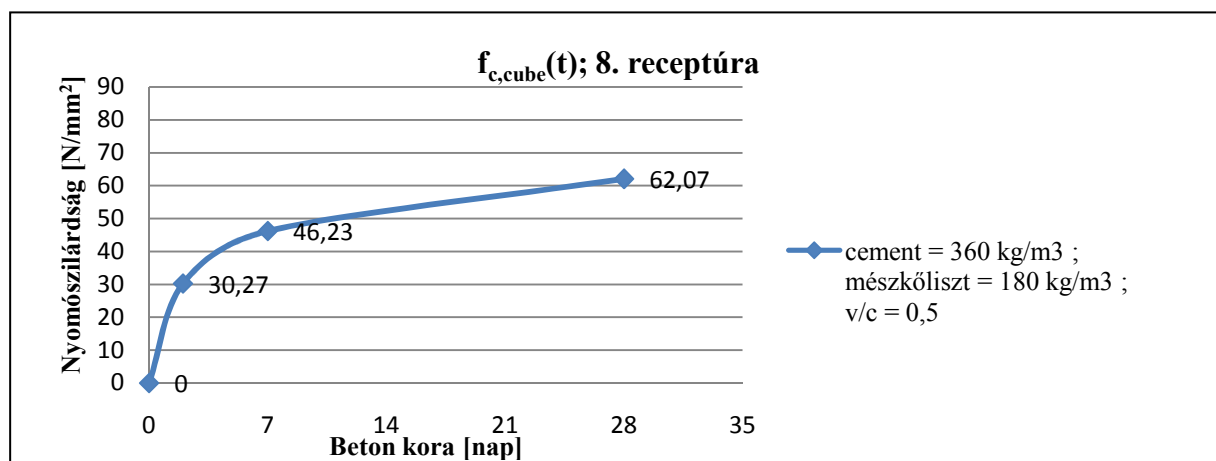
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	719,18	272,42
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	399,54	151,34
	8/16 mm frakció	30%	479,45	181,61
	Mészkelet		180,00	78,26
	Összesen	100%	1598,18	605,37
Cement			360,00	116,13
Víz	m _w /m _c =	50,0%	180,00	180,00
	C+ M		540,00	
Adalékszer cem. m%		0,90%	3,24	3,24
Levegő			--	17,00
Összesen			2321	1000

8. F 2. táblázat: Konzisztencia

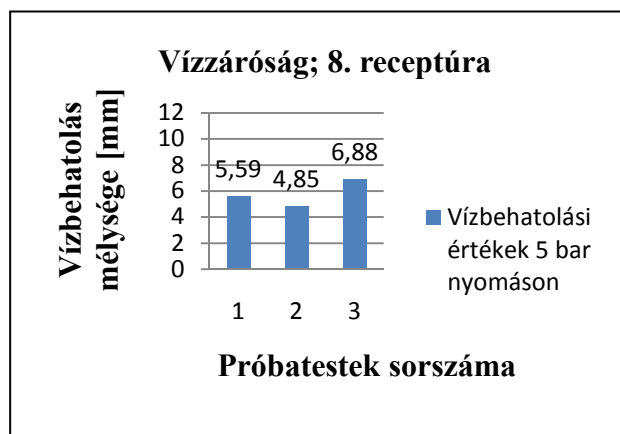
Terület (cm)	70	71,00
	72	
Kifolyási idő (sec)	6,3	

8. F 3. táblázat: Vízhatóság

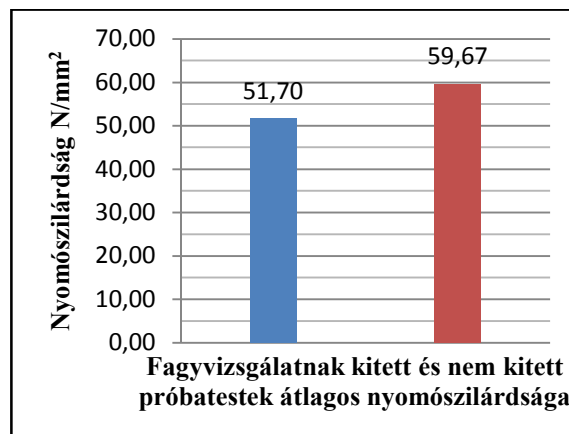
Próbatest jele	Vízhatóság mélysége
	[mm]
8-1	5,59
8-2	4,85
8-3	6,88
átlag	5,77
Környezeti osztály	XV3(H)



8. F 1. ábra: Nyomószilárdság



8. F 2. ábra: Vízhatóság



8. F 3. ábra: Fagyállóság

9. RECEPTÚRA

9. F 1. táblázat: Betonösszetétel (9)

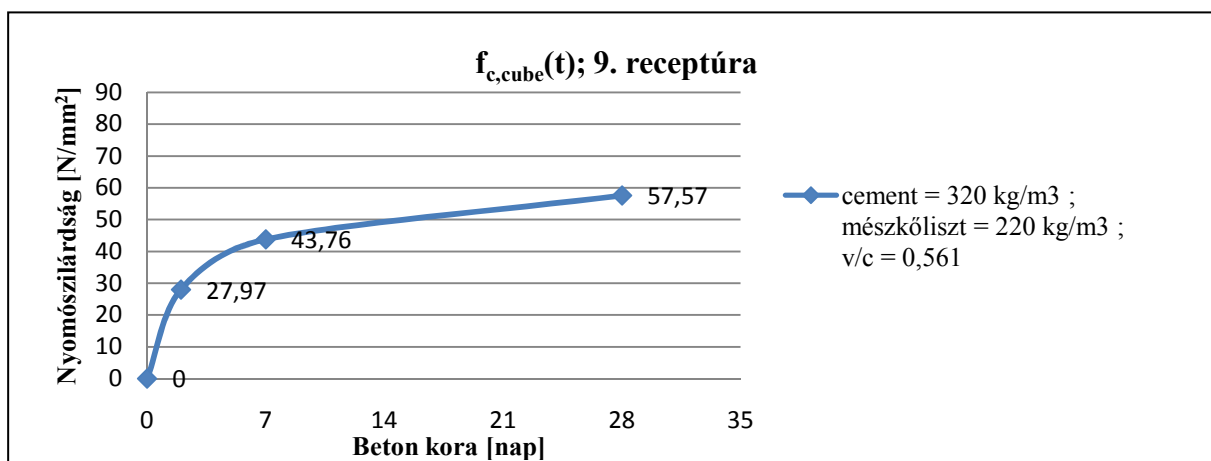
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	714,85	270,77
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	397,14	150,43
	8/16 mm frakció	30%	476,56	180,52
	Mészkelet		220,00	95,65
	Összesen	100%	1588,55	601,72
Cement			320,00	103,23
Víz	m _w /m _c =	56,1%	180,00	180,00
	C + M		540,00	
Adalékszer cem. m%		0,90%	2,88	2,88
Levegő			--	17,00
Összesen			2311	1000

9. F 2. táblázat: Konzisztencia

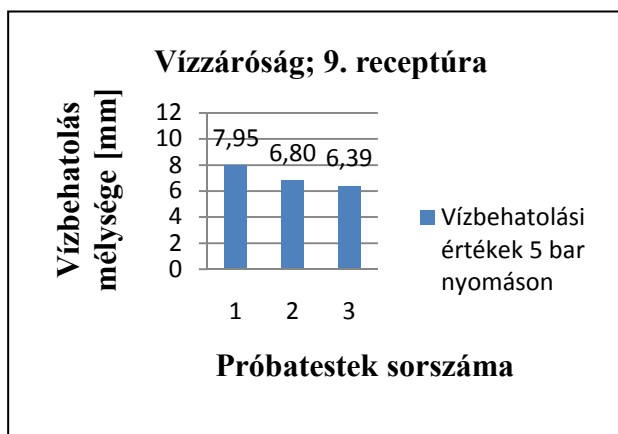
Terület (cm)	74	75,00
	76	
Kifolyási idő (sec)	4,3	

9. F 3. táblázat: Vízáróság

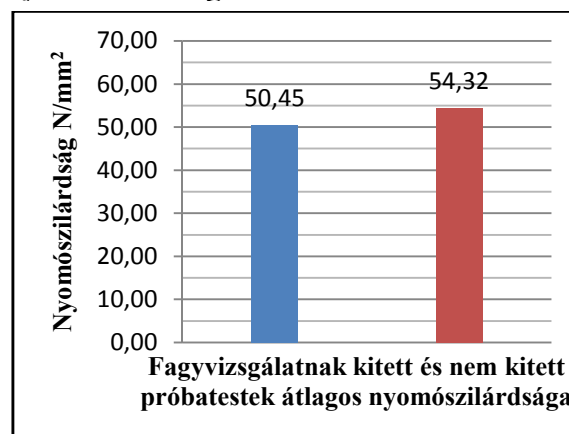
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
9-1	7,95
9-2	6,80
9-3	6,39
átlag	7,05
Környezeti osztály	XV3(H)



9. F 1. ábra: Nyomószilárdság



9. F 2. ábra: Vízáróság



9. F 3. ábra: Fagyállóság

10. RECEPTÚRA

10. F 1. táblázat: Betonösszetétel (10)

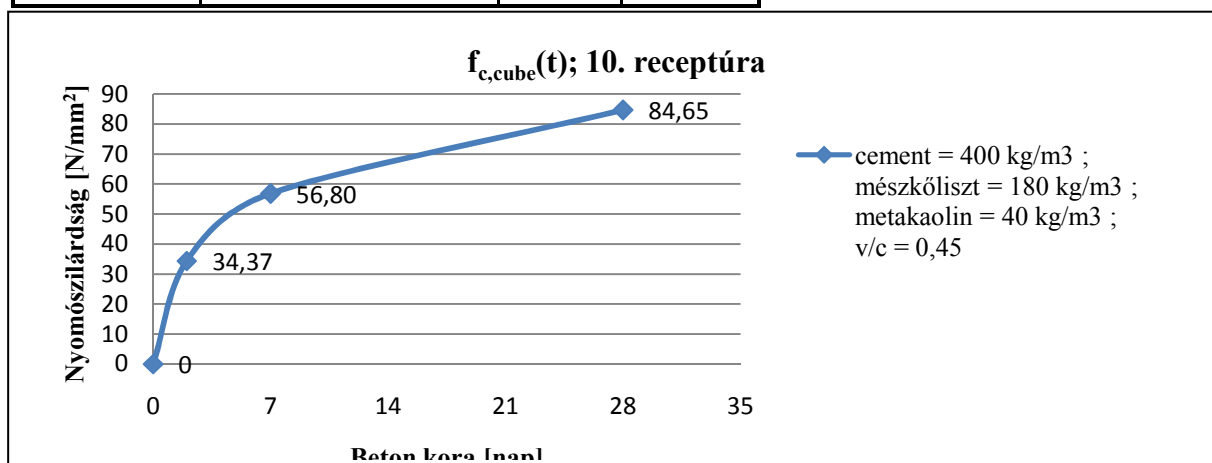
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	682,25	258,43
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	379,03	143,57
	8/16 mm frakció	30%	454,55	172,29
	Mészkőliszt		180,00	78,26
	Metakaolin		40,00	17,02
	Összesen	100%	1516,11	574,29
Cement			400,00	129,03
Víz	m _w /m _c =	45,0%	180,00	180,00
	C+ M		620,00	
Adalékszer cem. m%		1,10%	4,40	4,40
Levegő			--	17,00
Összesen			2321	1000

10. F 2. táblázat: Konzisztencia

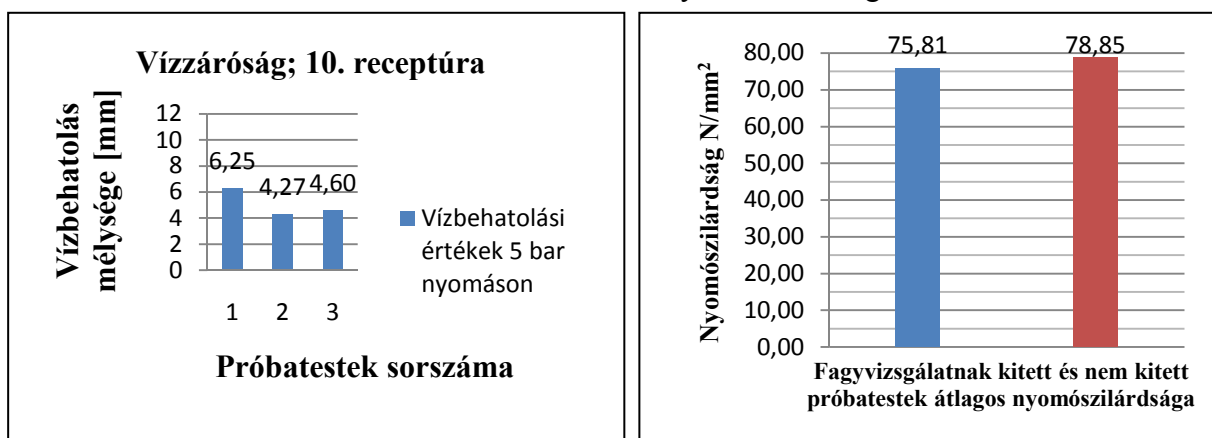
Terület (cm)	76	75,00
	78	
Kifolyási idő (sec)	7,2	

10. F 3. táblázat: Vízáróság

Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
10-1	6,25
10-2	4,27
10-3	4,60
átlag	5,04
Környezeti osztály	XV3(H)



10. F 1. ábra: Nyomószilárdság



10. F 2. ábra: Vízáróság

10. F 3. ábra: Fagyállóság

11. RECEPTÚRA

11. F 1. táblázat: Betonösszetétel (11)

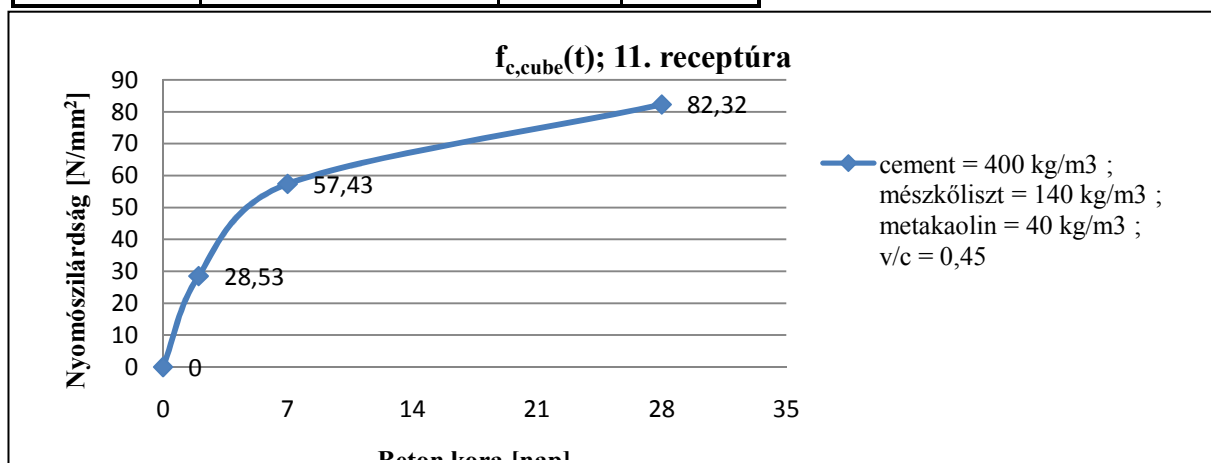
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	703,86	266,61
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	391,03	148,12
	8/16 mm frakció	30%	469,24	177,74
	Mészkőliszt		140,00	60,87
	Metakolin		40,00	17,02
	Összesen	100%	1564,14	592,48
Cement			400,00	129,03
Víz	m _w /m _c =	45,0%	180,00	180,00
	C+ M		580,00	
Adalékszer cem. m%		0,90%	3,60	3,60
Levegő			--	17,00
Összesen			2328	1000

11. F 2. táblázat: Konzisztencia

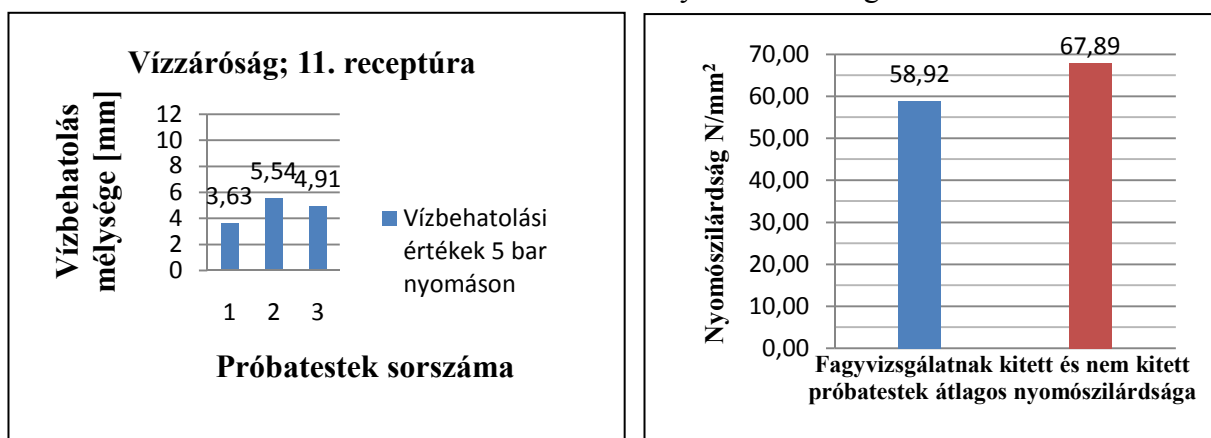
Terület (cm)	74	75,00
	76	
Kifolyási idő (sec)	5,2	

11. F 3. táblázat: Vízáróság

Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
11-1	3,63
11-2	5,54
11-3	4,91
átlag	4,69
Környezeti osztály	XV3(H)



11. F 1. ábra: Nyomószilárdság



11. F 2. ábra: Vízáróság

11. F 3. ábra: Fagyállóság

12. RECEPTÚRA

12. F 1. táblázat: Betonösszetétel (12)

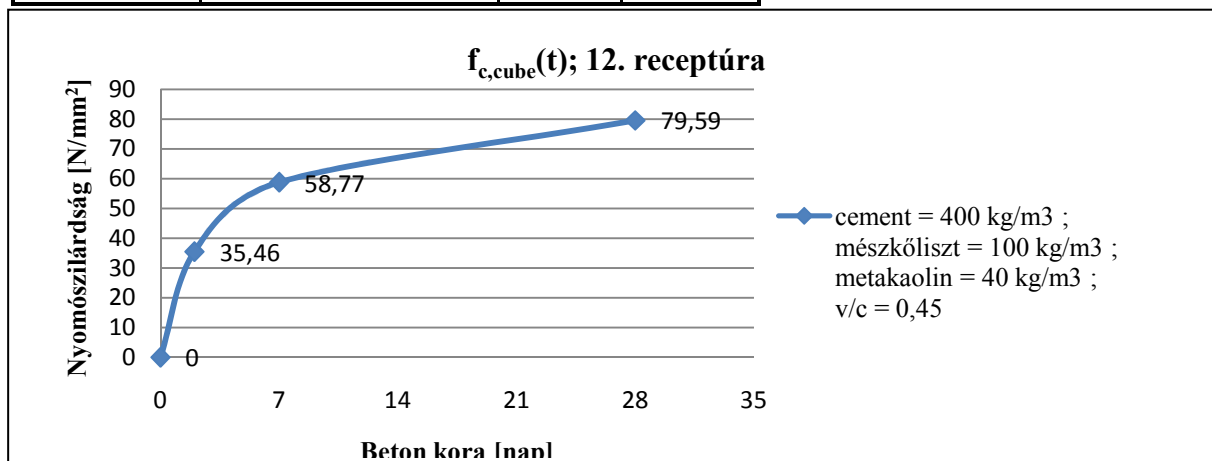
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat l/m ³
	0/4 mm frakció	45%	724,52	274,44
Adalékanyag	4/8 mm frakció	25%	402,51	152,47
	8/16 mm frakció	30%	483,02	182,96
	Mészkőliszt		100,00	43,48
	Metakolin		40,00	17,02
	Összesen	100%	1610,05	609,87
Cement			400,00	129,03
Víz	m _w /m _c =	45,0%	180,00	180,00
	C+ M		540,00	
Adalékszer cem. m%		0,90%	3,60	3,60
Levegő			--	17,00
Összesen			2334	1000

12. F 2. táblázat: Konzisztencia

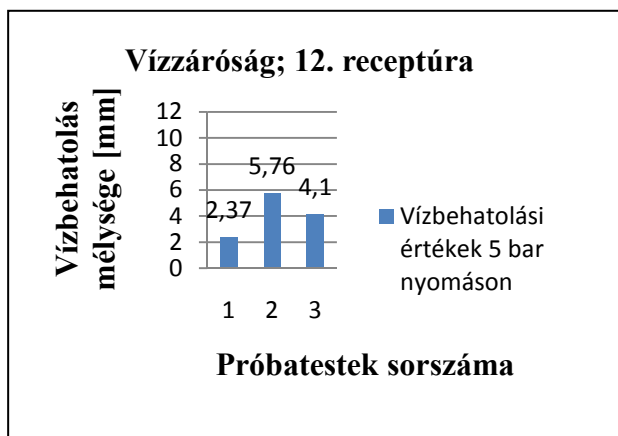
Terület (cm)	67	68,50
	70	
Kifolyási idő (sec)	5,2	

12. F 3. táblázat: Vízjáróság

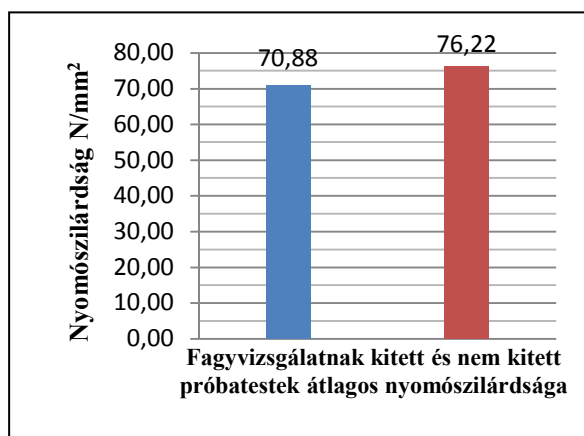
Próbatest jele	Vízbehatolás mélysége
	[mm]
12-1	2,37
12-2	5,76
12-3	4,10
átlag	4,08
Környezeti osztály	XV3(H)



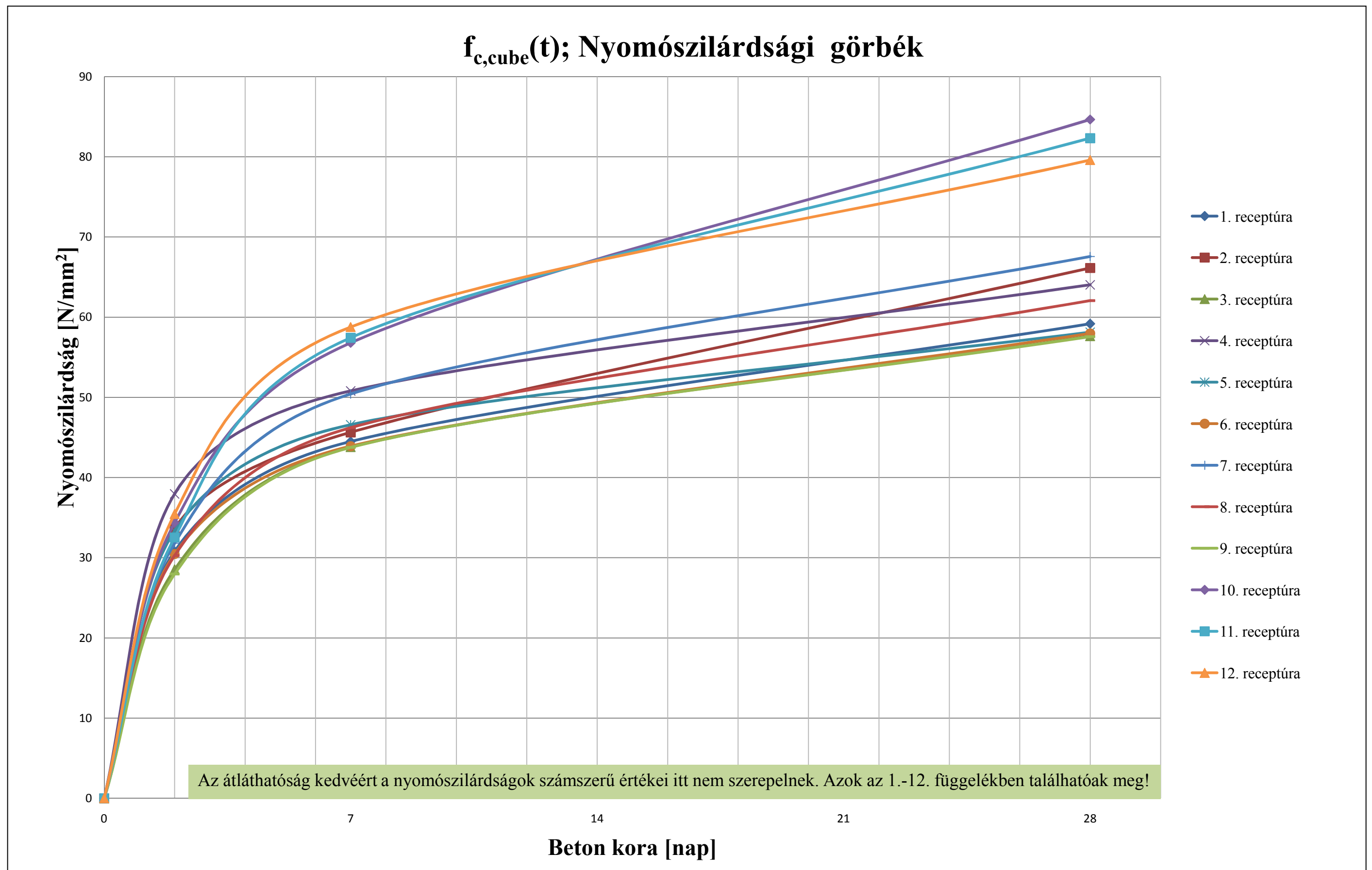
12. F 1. ábra: Nyomószilárdság



12. F 2. ábra: Vízjáróság



12. F 3. ábra: Fagyállóság



Összefoglaló táblázat

Receptúra	Cement	Mészkeőliszt	Metakaolin	Σ finomrész	Σ fajlagos felület	Víz	v/c	v/f	Testsűrűség frissbeton	Testsűrűség 28 napos	σ 7 napos	Terjedelem	σ 28 napos	Terjedelem
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	m ² /m ³	kg/m ³	-	-	kg/m ³	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
9.	320	220	-	540	612960	180	0,56	0,33	2378	2360	43,76	2,67	57,57	1,72
3.	320	260		580	704160	180	0,56	0,31	2380	2355	43,79	1,56	57,63	1,84
6.	320	300		620	795360	180	0,56	0,29	2375	2348	43,91	0,26	57,97	1,22
8.	360	180	-	540	535680	180	0,5	0,33	2371	2356	46,23	0,36	62,07	3,03
1.	360	220		580	626880	180	0,5	0,31	2375	2361	44,50	0,94	59,17	1,32
5.	360	260		620	718080	180	0,5	0,29	2376	2367	46,59	0,85	58,12	0,95
7.	400	140	-	540	458400	180	0,45	0,33	2376	2336	50,41	1,49	67,58	3,71
2.	400	180		580	549600	180	0,45	0,31	2374	2365	45,63	1,42	66,13	1,91
4.	400	220		620	640800	180	0,45	0,29	2367	2359	50,81	1,74	64,04	4,48
12.	400	100	40	540	393520	180	0,45	0,33	2370	2345	58,77	2,79	84,65	2,41
11.	400	140	40	580	484720	180	0,45	0,31	2332	2312	57,43	1,37	82,32	2,35
10.	400	180	40	620	575920	180	0,45	0,29	2374	2341	56,80	5,12	84,65	2,29