

Ajtayné Károlyfi Kitti

**Látszóbeton felületek tervezési és értékelési
módszerének új aspektusai**

doktori értekezés

Témavezető:

Papp Ferenc

egy. tanár, az MTA doktora

Széchenyi István Egyetem

Építés-, Építő- és Közlekedésmérnöki Kar

Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése

Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

TARTALOMJEGYZÉK

ÖSSZEFOGLALÁS	5
SUMMARY	6
FOGALMAK	7
1. BEVEZETÉS	9
1.1. A TÉMA AKTUALITÁSA	9
1.2. A DISSZERTÁCIÓ FELÉPÍTÉSE ÉS AZ ALKALMAZOTT MÓDSZEREK	10
1.3. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI	11
2. A ZSALUZATI MÉRET HATÁSA AZ ADALÉKANYAG HALMAZTÖMÖRSÉGÉRE	12
2.1 IRODALMI ÁTTEKINTÉS	12
2.1.1 A szemcsés halmazok tömörségét befolyásoló tényezők	13
2.1.2 A maximális tömörségű keverék létrehozását célzó modellek	18
2.1.3 Irodalmi adatok a zsaluzati méret és a halmaztömörség összefüggéséről	28
2.2 KÍSÉRLETEK FELÉPÍTÉSE	31
2.2.1 Alkalmazott adalékanyag	31
2.2.2 Alkalmazott zsaluzatok	32
2.2.3 Kísérletek végrehajtásának menete	33
2.3 KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	37
2.3.1 OH 0/4 frakció vizsgálata	37
2.3.2 OK 4/8 frakció vizsgálata	38
2.3.3 OK 8/16 frakció vizsgálata	39
2.3.4 OK 16/32 frakció vizsgálata	40
2.3.5 Komponensek vizsgálata	42
2.3.6 Határgörbék vizsgálata.....	43
2.3.7 Összefoglalás	47
3. A ZSALUZATI MÉRET ÉS A PÉPTELÍTETTSÉG HATÁSA A LÁTSZÓBETON SZERKEZETEK MINŐSÉGÉRE	54
3.1 IRODALMI ÁTTEKINTÉS	54
3.1.1 A látszóbeton fogalma	54
3.1.2 A zsaluhéjjal és formaleválasztóval szemben támasztott követelmények	54
3.1.3 A beton alapanyagaival és összetételével szemben támasztott követelmények	58
3.1.4 A péptelítettség hatása a beton mechanikai tulajdonságaira	61
3.1.5 A péptelítettség hatása a látszóbeton felületi minőségére.....	62
3.2 KÍSÉRLETEK FELÉPÍTÉSE	64
3.2.1 Alkalmazott anyagok	64
3.2.2 Betonösszetételek meghatározása	65
3.2.3 Kísérletek végrehajtásának a menete	67
3.3 KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	70
3.3.1 A péptelítettség és a zsaluzati méret hatása a felületi minőségre	70

3.3.2	A péptelítettség hatása a beton mechanikai tulajdonságaira.....	82
3.3.3	Összefoglalás	84
4	LÁTSZÓBETON FELÜLETEK POROZITÁSÁNAK VIZSGÁLATA DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁSSAL.....	87
4.1	IRODALMI ÁTTEKINTÉS	87
4.1.1	Hazai szabályozás	87
4.1.2	Nemzetközi szabványok és irányelvek	89
4.1.3	Értékelési módszerek	91
4.1.4	Digitális képfeldolgozás alkalmazása a felületek értékelésében	95
4.2	ÚJ VIZSGÁLATI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA	98
4.2.1	Alkalmazott eszközök és szoftverek	98
4.2.2	Az eljárás bemutatása	98
4.2.3	A kidolgozott eljárás alkalmazhatósága.....	106
4.2.4	A kidolgozott eljárás további felhasználási lehetőségei	111
4.2.5	Összefoglalás	113
5	AZ ÉRTEKEZÉS TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA	115
6.	ÖSSZEGZÉS	118
7.	TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK.....	120
	IRODALOMJEGYZÉK.....	122

ÖSSZEFOGLALÁS

Doktori kutatásom során a látszóbeton felületek tervezési és értékelési kérdéseivel foglalkoztam. A kutatás három részre tagolódik. Az első részben az adalékanyag halmaztömörtségét vizsgáltam a szemeloszlás és a zsaluzati vastagság függvényében, melynek segítségével az adalékanyag pépigénye meghatározható. A második részben a látszóbeton felületek minőségét vizsgáltam a betonösszetétel péptelítettségének, valamint a zsaluzat méretének függvényében, felhasználva az első rész kísérleti eredményeit. A harmadik részben a látszóbeton felületi pórustartalmának értékeléséhez dolgoztam ki digitális képfeldolgozáson alapuló eljárást.

Az adalékanyag halmaztömörtségét 0-32 mm szemnagyságú, négy frakcióból álló mintán, valamint a frakciókból előállított MSZ EN 12620:2013 szerinti „A” és „C” határgörbén vizsgáltam laza és tömörített állapotban. Vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy 30 cm magasságú és szélességű zsaluzat és rázóasztalos tömörítés alkalmazása mellett a halmaztömörség a zsaluzati vastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével nem változik jelentősen, 20 cm-ről 30 cm-re való növelésével nő. Megállapítottam továbbá, hogy 60 cm magasságú és szélességű zsaluzat és tűvibrátoros tömörítés alkalmazása mellett a vizsgált frakciók halmaztömörsege a zsaluzat vastagságának 10 cm-ről 20 cm-re való növelésével csökken, 20 cm-ről 50 cm-re való növelésével kismértékben nő.

A látszóbeton felületi minőségének a péptelítettség mértékétől és a zsaluzati vastagságtól függő vizsgálatához próbatesteket készítettem. A felületi minőséget a pórustartalom, a színeltérés, a fészkesség és a kivérzés szempontjából elemeztem. Vizsgálataim során elemeztem a péptelítettségnek a megszilárdult beton mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását. A kísérleti eredmények alapján megállapítottam, hogy a péptelítettség növelése jelentős javulást eredményez a felületi minőségben, míg a zsaluzati vastagság növelése kismértékű minőségbeli változást okoz. Vizsgálataim alapján a különleges követelményszintű, 20 cm-nél kisebb szerkezeti vastagságú, beltéri látszóbeton felületek készítésénél 126-150 l/m³ túltelítettséget javasolok alkalmazni, figyelembe véve az ezzel járó 4-13%-os nyomószilárdság-csökkenést.

A felületi pórustartalom értékeléséhez digitális képfeldolgozáson alapuló módszert dolgoztam ki a Python programnyelv alkalmazásával. A vizsgálatához egy jelölőkörrel ellátott fénykép készítése szükséges. A módszer alapja a képből manuálisan kiválasztott hibamentes felületrészekre, mint háttérre egy kétváltozós harmadfokú polinom illesztése és az így kapott hibamentes kép eredeti képtől való eltéréseinek hibaként való megfeleltetése. Az eljárást mintafelületeken tesztelve megállapítottam, hogy az átlagosan 5%-kal magasabb pórustartalmat eredményez a kézi módszerrel kapott értékekhez képest, a vizsgálatához szükséges időtartam azonban 85%-kal csökkenthető.

SUMMARY

The subject of my PhD research were the designing and evaluation aspects of fair-faced concrete surfaces. My investigations consist of three parts. In the first part the packing density of aggregates was examined depending on the width of the formwork and the particle size distribution of the aggregate, which can be used for determining the amount of cement paste needed for the saturated concrete mixture. In the second part the surface quality of fair-faced concrete elements was examined depending on the saturation degree of the cement paste and the width of the formwork based on the experimental results of the first part. In the third part a method was recommended for evaluation of the surface void ratio of fair-faced concrete elements using digital image processing methods.

The packing density of aggregates was examined on four aggregate fractions (0-32 mm) and on the „A” and „C” limit curves of the MSZ EN 12620:2013 standard in loose and dense condition. Based on my laboratory investigations I have concluded that the packing density of the aggregate is constant between the width of 5 and 20 cm, and it is increasing with increasing formwork width from 20 to 30 cm by using a formwork with 30 cm depth and height and vibrating table for compaction. Furthermore, the packing density is decreasing with increasing the width from 10 to 20 cm and has a slight increase with increasing the formwork width from 20 to 50 cm by using a formwork with 60 cm depth and height and internal vibrator for compaction.

Specimens were made for the evaluation of the surface quality of fair-faced concrete elements depending on the saturation degree of the cement paste and the width of the formwork. The surface quality was assessed based on the surface void ratio, the discoloration, the honeycomb and bleeding. I have studied the effect of saturation degree of the cement paste on the mechanical properties of concrete. Based on my observations I have concluded that the increase in saturation degree of cement paste improves significantly the surface quality, while the increase in width of the formwork has only a reduced impact. Based on the results I have proposed the application of oversaturated concrete mixtures with 126-150 l/m³ saturation degree in the case of the special requirements of indoor fair-faced concrete elements of a width smaller than 20 cm, taking into account the decrease of 4-13% in compressive strength of the concrete.

For the evaluation of the surface void ratio a new method was proposed using digital image processing techniques, which requires one image from the surface. The basis of the method is fitting a third order polynomial to the image containing the selected regions which are free from surface defects. The detection of surface irregularities is made based on the difference between the original and the fitted image. The method was tested on reference surfaces and it was concluded that it results in 5% higher surface void ratio, than the results of the manual method, however the time needed for the process can be reduced by 85%.

FOGALMAK

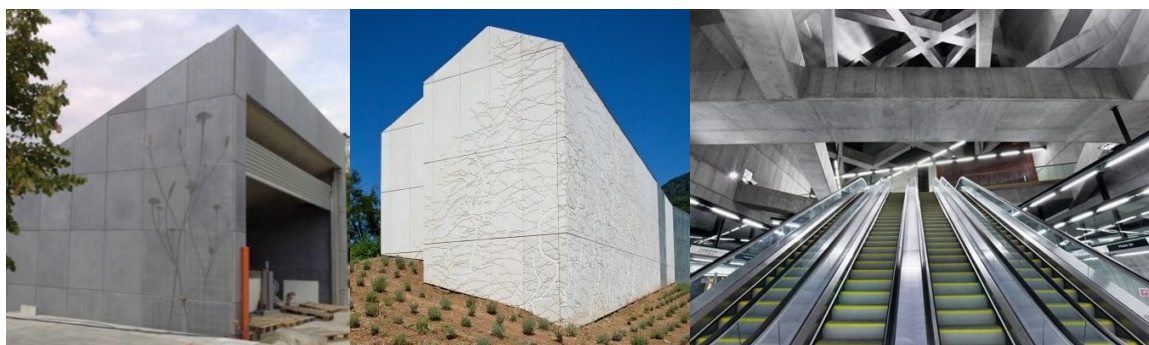
Látszóbeton:	Olyan el nem takart betonfelület, amely előre meghatározott, esztétikus és tartós megjelenéssel bír.
Testsűrűség:	A pórusokat is tartalmazó minta tömegének és térfogatának hányadosa [kg/m^3].
Halmazsűrűség:	A pórusokat és a szemek közötti hézagokat is tartalmazó minta tömegének és térfogatának hányadosa [kg/m^3].
Halmaztömörtség:	A minta hézagmentes térfogatának és a zsaluzat térfogatának hányadosa, vagy másképpen a minta adott térfogatú zsaluzatban mért halmazsűrűségének és testsűrűségének hányadosa [-].
Hézagtérfogat:	A testsűrűség és halmazsűrűség különbségének és a testsűrűségnek a hányadosa, vagy másképpen az egy egészéből kivont halmaztömörtség [-].
Komponens:	Az adott lyukbőségű szitán fennmaradt adalékanyag szemcse. Jelölése a továbbiakban: 4/8, 2/4, 1/2, stb.
Frakció:	Osztályozott kavics és homok halmaz, melynek szemnagysága az MSZ EN 933-1:2012 szabványnak megfelelő D lyukbőségű szitán áthullott legkisebb mennyisége 80 tömeg% és a d lyukbőségű szitán áthullott legnagyobb mennyisége 15 tömeg%. Jelölése a továbbiakban: OH 0/4, OK 4/8, OK 8/16 és OK 16/32.
Ideális szemeloszlási görbe:	A maximális halmaztömörtség elérése érdekében javasolt szemeloszlási görbe.
Folytonos szemeloszlás:	A folytonos szemeloszlású halmaz esetében azt feltételezzük, hogy az adalékanyag szemcseméret tartományában minden frakció megtalálható.
Diszkrét számítási eljárás:	A halmaztömörtség számítására kidolgozott matematikai modell, amely az adalékanyag halmazt azonos átmérővel rendelkező, merev gömbökből képzett komponensek halmazaként kezeli. A keverék halmaztömörősége a komponensek saját halmaztömörőségéből, a keverékben elfoglalt arányából, valamint az alkalmazott tömörítési módszer függvényében számítható.
Diszkrét elemes modell:	A szemcsés halmazok modellezésére használt szoftveres eljárás. A modell egymástól egyértelműen elkülönülő

	elemekből épül fel, melyek önálló elmozdulási szabadságfokokkal rendelkeznek, közöttük kapcsolatok jöhetnek létre és szűnhetnek meg. A modell képes lekövetni az elemek véges nagyságú elmozdulásait és elfordulásait.
Péptelítettség:	Az adalékanyag váz pépigényének és a cementpép mennyiségének a különbsége [l/m^3]. Negatív érték esetén a keverék telítetlen, pozitív érték esetében a keverék túltelített.
Látszóbeton felületi minőség:	A hazai és nemzetközi szabványok, illetve irányelvek által meghatározott szempontok szerinti értékeléssel kapott eredmények és az ezek alapján meghatározott látszóbeton osztály a vizsgált felület esetében.
Felületi pórustartalom:	Az 50x50 cm-es referenciafelületen, a vizsgált átmérő-intervallumba tartozó pórusok összterületének a referenciafelület területéhez viszonyított aránya [%].
Kivérzés:	A frissbeton keverővíz-vesztesége (vízkiválás), amely a felületen sötét elszíneződésként jelenik meg.
Fészkeség:	Üregerős felületi hiány, melynek mérete meghaladja a pórusok átmérőjét (>15 mm).

1. BEVEZETÉS

1.1. A téma aktualitása

Az 1960-as évek nyers építészeti brutalizmusa után a 21. század építészete kezdi újra felfedezni a betonfelületben rejlő esztétikai értéket (1. ábra). Nemzetközi és hazai szinten egyre gyakrabban alkalmaznak nyersen maradó, magas felületi minőséggel rendelkező, gondosan megtervezett és kivitelezett látszóbeton felületeket mind a magasépítésben, mind pedig a hídépítésben.



1. ábra: Látszóbeton felületek: a) Tétényi úti metróállomás, Budapest [1]; b) Laposa Borászat, Badacsonytomaj [2]; c) Fővám téri metróállomás, Budapest [3]

A látszóbeton, mint tartószerkezet és egyben felületképző elem tervezése és kivitelezése nagy szaktudást és technológiai felkészültséget igényel. Alkalmazását nehezíti továbbá az a körülmény, hogy jelenleg nincs érvényes szabvány a látszóbeton felületek tervezésére és kivitelezésére, ezért az építész csak néhány, a kivitelezők által készített irányelvekre támaszkodhat. A felületi minőség értékeléséhez rendelkezésünkre állnak hazai és nemzetközi szabványok, illetve irányelvek. Az értékelési módszerek azonban kivétel nélkül kézi megoldáson alapuló eljárások, amelyek amellet, hogy időigényesek, több szempont esetében csak szubjektív értékelést tesznek lehetővé. Ebből adódóan az értékelési módszer objektívabbá tétele és automatizálása aktuális feladat.

A látszóbeton felületi minőségét számos tényező befolyásolja: az alkalmazott betonösszetétel, a zsaluhéj, a zsaluleválasztó szer, az időjárási körülmények és a kivitelezés minősége. Jelen kutatás a látszóbeton felületek minőségének egyik fő befolyásoló tényezőjére, a betonösszetételre irányul. A betonösszetételt tekintve a látszóbeton felület minőségét a felhasznált cement, adalékanyag és adalékszer típusa, minősége és mennyisége egyaránt befolyásolja. A betonösszetétel szempontjából további fontos, a kutatás során vizsgált befolyásoló tényező a beton péptelítettsége, azaz hogy a cementpép milyen mértékben tölti ki

az adalékanyag szemcsék közötti hézagokat. Gyakorlati tapasztalatok alapján elmondható, hogy látszóbeton esetében a túltelített keverékek magasabb felületi minőséget eredményeznek, azonban arra vonatkozóan nincs részletesebb adatunk, hogy milyen mértékű túltelítettséget javasolt alkalmazni különböző szerkezeti elemek és minőségi követelményszintek esetén. Feltételezhető azonban, hogy az optimális telítettség jelentős mértékben függ a szerkezeti elem geometriai méreteitől, arányaitól. Ahhoz, hogy a péptelítettség és a felületi minőség összefüggését vizsgálni tudjuk, ismernünk kell az adalékanyag halmaztömörtségét is, amely jellemző azt fejezi ki, hogy mennyire hatékonyan tudják kitölteni az adalékanyag szemcsék a rendelkezésre álló teret. Erre vonatkozóan a szakirodalmi adatok alapján közelítő értékek és modellek állnak rendelkezésünkre, ezért az eredeti problémát visszavezettem egy még elemibb kérdésre, amely kutatásom első részét képezi.

1.2. A disszertáció felépítése és az alkalmazott módszerek

A téma aktualitásának, a kutatás célkitűzésének és módszertanának bemutatása után a **2. fejezetben** összefoglalom az irodalomkutatás eredményét. Ezt követően laboratóriumi vizsgálatok alkalmazásával meghatározom a zsaluzati vastagság és a tömörítési módszer az adalékanyag halmaztömörségére gyakorolt hatását. A laboratóriumi vizsgálatok során kapott adatokat összehasonlítom a szakirodalmi adatokkal.

A **3. fejezetben** a szakirodalmi adatokra, valamint a 2. fejezetben bemutatott vizsgálatok eredményeire alapozva adott halmaztömörségű adalékanyaggal és különböző péptelítettségű betonösszetételekkel készített látszóbeton felületek minőségét vizsgálom a zsaluzat méreteinek függvényében. A vizsgálatok során készített látszóbeton próbatestek felületi minőségének értékelését a hazai és nemzetközi szabványok és irányelvek által meghatározott manuális eljárások segítségével, valamint a 4. fejezetben bemutatott digitális képfeldolgozás módszerével végzem el.

A **4. fejezetben** a látszóbeton felületek pórustartalmával foglalkozom, amely az egyik leggyakoribb felületi hiba, s melynek elemzése fontos összefüggésekre világíthat rá a betontechnológia, a kivitelezési mód és a felület minősége között. A jelenlegi manuális értékelési eljárás hatékonyságának és pontosságának növelése érdekében digitális képfeldolgozáson alapuló automatizált eljárást dolgozok ki a porozitás vizsgálatára a Python 3.6 szoftver alkalmazásával. A módszert esettanulmányok segítségével értékelem, valamint felhasználok azt a 3. fejezetben bemutatott látszóbeton próbatestek értékelésekor.

Az **5. fejezetben** a kutatás főbb tudományos eredményeit 3 tézisben fogalmazom meg.

A **6. fejezetben** összefoglalom a kutatás eredményeit és tapasztalatait.

A **7. fejezetben** javaslatot teszek a kutatás további lehetséges irányaira.

Az Irodalomjegyzékben feltüntetem az értekezésemben hivatkozott szakirodalom listáját, valamint a saját, illetve társszerzőkkel készített publikációk listáját.

1.3. A kutatás célkitűzései

A doktori kutatásom során az általam végzett laboratóriumi kísérletek valamint a szakirodalomból gyűjtött információk kiértékelésének célkitűzései a következők:

- a zsaluzati vastagság az adalékanyag halmaztömörségére gyakorolt hatásának meghatározása a tömörítési mód figyelembevételével
- a zsaluzati vastagság és a péptelítettség hatásának tisztázása a látszóbeton felületi minőségére
- digitális képfeldolgozáson alapuló eljárás kidolgozása a látszóbeton felületek pórustartalmának értékelésére.

2. A ZSALUZATI MÉRET HATÁSA AZ ADALÉKANYAG HALMAZTÖMÖRSÉGÉRE

2.1 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A betontechnológiában jól ismert tény, hogy az adalékanyag halmaztömörsege jelentősen befolyásolja a beton szilárdsági tulajdonságait [4]. Az adalékanyag halmaztömörsege a szemcsék hézagmentes térfogatának és a zsaluzat térfogatának hányadosaként (vagy: az egységnyi térfogatba tömöríthető adalékanyag térfogatarányaként) definiálható, s értékét az adalékanyag jellemzői, az alkalmazott tömörítési módszer, valamint a sablon geometriai méretei befolyásolják.

Az adalékanyag halmaztömörsege ez alapján a következőképpen számítható:

$$\phi = \frac{m_a}{\rho_t \cdot V_T} = \frac{\rho_h}{\rho_t} \quad (1)$$

ahol,

ϕ : a keverék halmaztömörsege [-]

m_a : az adalékanyag tömege [kg]

ρ_t : az adalékanyag testsűrűsége [kg/m³]

ρ_h : az adalékanyag halmazsűrűsége [kg/m³]

V_T : a zsaluzat (betonszerkezet) térfogata [m³]

Vagy másképpen kifejezve

$$\phi = 1 - e \quad (2)$$

ahol e az adalékanyag váz hézagtartalma.

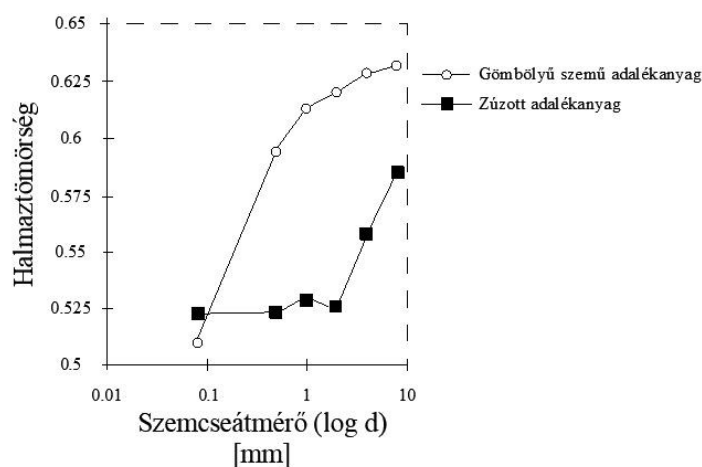
A betonösszetétel tervezésekor fontos tényező a telített állapothoz szükséges cementpép mennyisége, melynek számításához elengedhetetlen az adalékanyag halmaztömörségének ismerete. Feret [5] és Abrams [6] kutatásai óta ismert, hogy a beton készítéséhez a maximális tömörségű adalékanyag a legjobb. Az adalékanyag halmaztömörségének növelésével kevesebb cementpép szükséges a szemcsék közötti hézagok kitöltéséhez, azaz a telített állapot eléréséhez, amelynek eredményeképpen gazdaságosabb és tartósabb szerkezeteket tudunk kialakítani. A kisebb cementtartalmú betonszerkezetek kevésbé hajlamosak a repedezésre és a zsugorodásra [7]. A halmaztömörség növelése csökkenti a beton porozitását, így az áteresztő képességét is, valamint kedvező hatást gyakorol a frissbeton

bedolgozhatóságára [8, 9]. Amennyiben a cementpép térfogata állandó, a halmaztömörtség növelésével állandó víz-cement tényező mellett nő a beton bedolgozhatósága; ugyanígy azonos bedolgozhatóságot tudunk biztosítani a víz-cement tényező csökkentése, azaz nagyobb szilárdság elérése mellett.

A szemcsés halmazok tömörsége, tömöríthetősége számos iparágban fontos kutatási terület (például csomagolóstechnika, gyógyszeripar), valamint matematikusok, fizikusok és mérnökök is régóta foglalkoznak vele [8, 10]. Bár számos modell és számítási eljárás létezik, a probléma összetettségéből fakadóan egyelőre nem rendelkezünk olyan modellel, amely egy adott halmaz szemeloszlásának, a szemcsék alakjának, a tömörítési eljárásnak, valamint a sablon méreteinek figyelembevételével meg tudná becsülni a keverék halmaztömörségét.

2.1.1 A szemcsés halmazok tömörségét befolyásoló tényezők

Az adalékanyag halmaztömörségét elsősorban a testsűrűség, a szemcseméret, a szemeloszlás, a szemalak és a vízfelvétel (illetve víztartalom) mértéke határozza meg. A testsűrűség önmagában nem befolyásolja jelentős mértékben a halmaz tömörségét, ugyanakkor különböző testsűrűségű anyagokból alkotott keverékek esetén jelentősen változhat a halmaztömörtség, illetve esetenként szétosztályozódás alakulhat ki. A szemcseméret nagyobb átmérők esetén szintén elhanyagolható hatást gyakorol a halmaztömörségre, ami azt jelenti, hogy azonos átmérőjű szemcsék halmaztömörősége közel állandó [11]. Ugyanakkor az 1 mm-nél kisebb szemcsék esetén a kisebb tömeg, a nagyobb felület és az emiatt kialakuló nagyobb felületi súrlódás következtében csökken a halmaztömörőség (2. ábra).

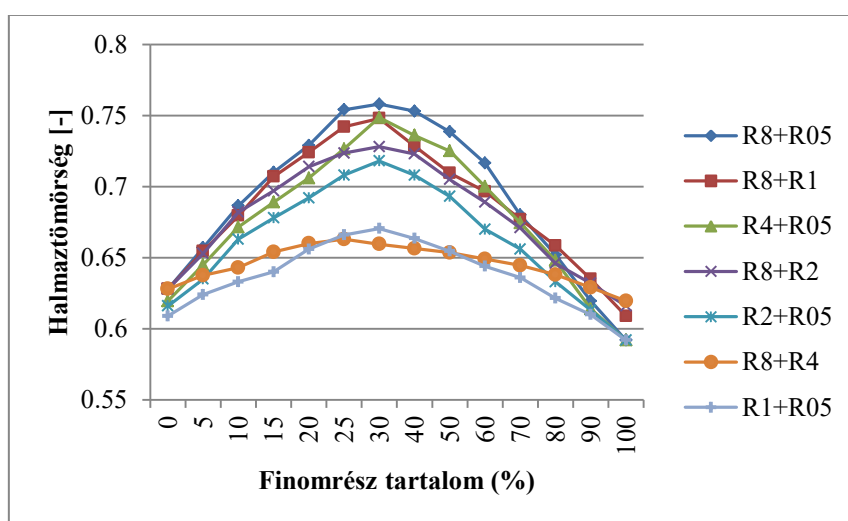


2. ábra: A szemcseméret és a halmaztömörőség összefüggése [12] (saját szerkesztés)

Általánosságban elmondható, hogy a nagyobb szemcsék közötti hézagok kisebb szemcsékkel való kitöltése növeli a keverék halmaztömörségét, így a tágabb szemeloszlás kedvezőbb. Fontos tényező azonban a különböző méretű szemcsék keverékben elfoglalt aránya: durva ($d \geq 4.75 \text{ mm}$) és finom frakcióból álló keverék esetén a finomrész optimális aránya 30-50% között alakul, a keverék halmaztömörége és a finomrész aránya közötti kapcsolat pedig nemlineáris, amelyet többek között igazolnak De Larrard kétalkotós keverékekkel, 10 kPa nyomás alatti rázóasztalos tömörítés mellett végzett vizsgálatai is (1. táblázat, 3. ábra) [8, 12].

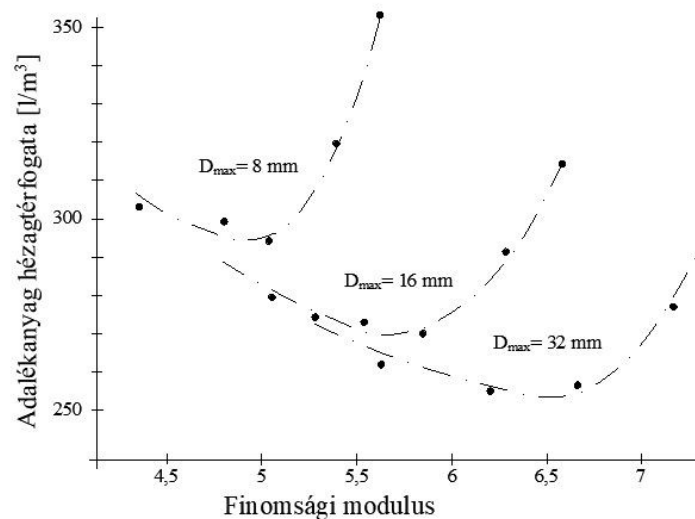
1. táblázat: De Larrard vizsgálataiban alkalmazott frakciók [12]

Jelölés	d_{\min} [mm]	d_{\max} [mm]	Halmaztömörség
R05	0.5	0.63	0.592
R1	1	1.25	0.609
R2	2	2.5	0.616
R4	4	5	0.620
R8	8	10	0.628



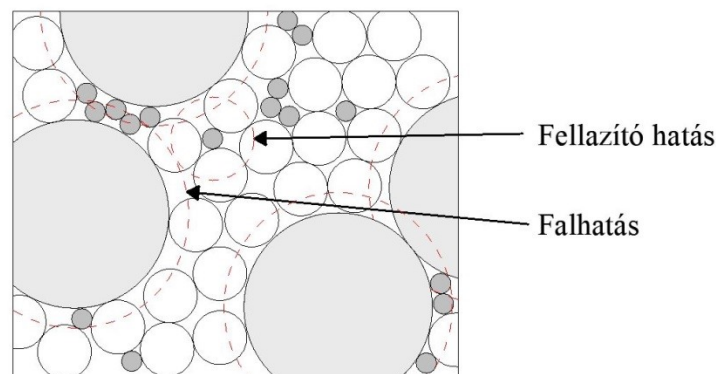
3. ábra: A finomrész arányának hatása a halmaztömörésre kétalkotós, gömbölyű szemű adalékanyagokból álló keverékek esetén [12] (saját szerkesztés)

Ujhelyi [13] az adalékanyag finomsági modulusának függvényében vizsgálta annak hézagterfogatát (4. ábra), mely eredmények alapján jól látszik, hogy mind a szemcseméret, mind a szemeloszlás jelentős hatást gyakorol a halmaztömörésre.



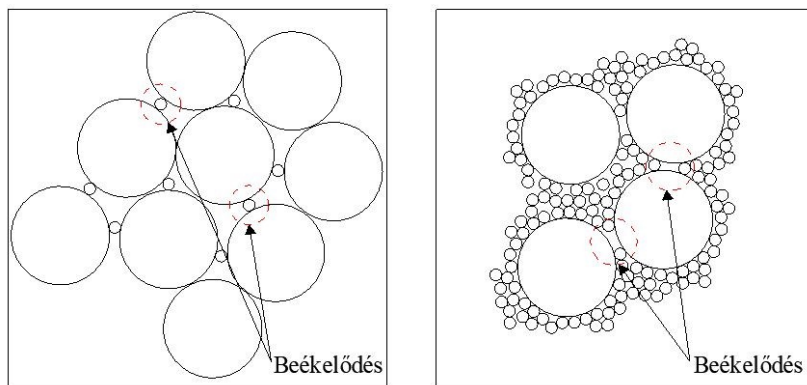
4. ábra: A finomsági modulus és az adalékanyag váz hézagterfogata közötti összefüggések [13] (saját szerkesztés)

A halmaztömörség szempontjából a folytonos szemeloszlás általában kedvezőbb, mint a lépcsős. Ugyanakkor a nagyobb szemcsék hézagai közé be nem illeszkedő túl nagy, vagy túl sok kicsi szemcse eltávolítja egymástól az adalékanyag szemeket, amely hatással van a teljes keverék tömörségére. Ezt a jelenséget fellazító hatásnak (*loosening effect*) nevezzük. Hasonlóképpen, a nagyobb szemcsék vagy a zsaluzat határfelülete közelében a kisebb szemcsék nem tudják hatékonyan kitölteni a teret, emiatt nagyobb hézagok alakulnak ki, amely jelenséget falhatásnak (*wall effect*) nevezünk (5. ábra).



5. ábra: Falhatás és fellazító hatás [12] (saját szerkesztés)

A fellazító hatáshoz hasonló a beékelődés (*wedging effect*), amely azt jelenti, hogy a nagyobb szemcsék közé ékelődött kisebb, izolált szemcsék tovább növelik a hézagterfogatot (6. ábra). A beékelődés minden esetben, a durva és finom frakció arányától függetlenül létrejöhethet, halmaztömörség-csökkentő hatása akkor a legjelentősebb, mikor a kisebb szemcsék átmérője megközelíti a nagyobb szemcsék közötti hézagok méreteit [14, 15].



6. ábra: Beékelődés [15] (saját szerkesztés)

A szemalak tekintetében a két fő jellemző a forma és a felületi textúra. A forma alatt a szemcse háromirányú kiterjedését értjük, így az lehet például hosszúkas, lemezes vagy zömök. A formát kvantitatív módon a szemcse három tengely szerinti kiterjedésének arányaival lehet jellemezni. A szemalak jelentős hatást gyakorol a halmaztömörségre. Azonos átmérőjű gömbökből álló halmaz maximális tömörsége megközelítőleg 0.64, míg szabályos, szögletes formákkal ennél nagyobb értékeket érhetünk el. Néhány jellemző szemalak és a hozzájuk tartozó megközelítő halmaztömörség értéke látható a 2. táblázatban [8].

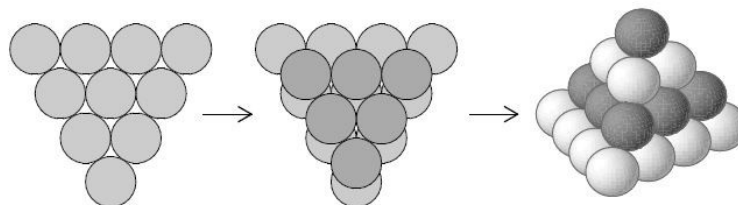
2. táblázat: Különböző alakú szemcsés halmazokkal elérhető tömörség [8]

Szemalak	Halmaztömörség [-]
Gömb	0.60-0.64
Kocka	0.76
Paralelepipedon	0.51-0.67
Korong	0.63
Forgási ellipszoid	0.58-0.61
Gömbölyű szemű adalékanyag	0.59-0.63
Zúzott adalékanyag	0.50-0.57
Szál (L/D=10)	0.48
Szál (L/D=167)	0.03

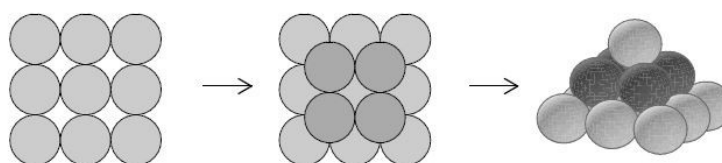
Ezen a ponton fontos megjegyezni, hogy ebben az esetben véletlenszerű elrendezést feltételezünk. A szabályos elrendezésű mértani alakzatok tömöríthetősége régóta kutatott matematikai probléma 2 és 3 dimenzióban egyaránt. 1900-ban David Hilbert a II. Nemzetközi Matematikai Kongresszuson tartott előadásában felsorolta a matematika szerinte legfontosabb problémáit, melyek közül a 18. kérdés a Kepler-sejtés volt [16]. Eszerint azonos átmérőjű gömbökkel a legjobb térkitöltés hexagonális és lapközepes kockaráccsal érhető el (7. ábra), és maximális értéke $\phi=0.7404$. 1998-ban Thomas Hales [17] bizonyítást talált a sejtésre, amely azonban jelenleg is verifikáció alatt áll. A tény, hogy különböző elrendezésű,

azonos átmérőjű gömbökből álló halmazok tömörsége eltérő, igazolja, hogy a halmaztömörtség jelentősen függ a szemcsék térbeli eloszlásától [10, 18].

Lapközepes kockarács elrendezés



Hexagonális elrendezés



7. ábra: Azonos átmérőjű gömbök maximális tömörségű elrendezései [18] (saját szerkesztés)

Az adalékanyag halmaz azonban több, különböző méretű és alakú szemcsékből áll, az elrendezése pedig véletlenszerű, így a probléma összetettsége miatt egyelőre nem ismerünk egyértelmű kapcsolatot a szemalak és a halmaztömörtség között. Amit tudhatunk: általában igaz, hogy gömbölyű szemű adalékanyaggal nagyobb tömörség érhető el, mint a zúzott anyag alkalmazásával [8].

A szemcsék felületi textúrája alapján megkülönböztetünk durva, egyenletes és sima felületet. A sima felületű szemcsék a kisebb súrlódásnak köszönhetően gyorsabban és könnyebben elmozdulnak egymáson: az átrendeződés következménye egy stabilabb állapot és nagyobb tömörség létrejötte. A durva felületű szemcsék (például zúzottkő) nehezebben mozognak, így több energia szükséges az átrendeződéshez, ezért az ilyen keverékekkel elérhető halmaztömörtség általában alacsonyabb. Mindez arra enged következtetni, hogy a szemcsék alakja mellett a felületi textúra is hatással van a keverék tömörségére.

A víztartalom ugyancsak befolyásolja az adalékanyag halmaztömörségét, valamint vízigényét [11]. A finom szemcsék esetében a nagy fajlagos felület következtében a nedves és száraz állapotban mért halmaztömörtség között számottevő különbség is lehet, így ezek a tömörítési eljárások nem alkalmasak cementet is tartalmazó keverékek vizsgálatára [19]. Wong és Kwan [20] kutatásai igazolták, hogy a nedves vizsgálati eljárások jobban megközelítik a szemcsék betonkeverékben lejárolt valós viselkedését és kevésbé érzékenyek a tömörítésre. Nedves állapotban a szemcsék nem érintkeznek egymással közvetlenül, hanem a felületi erővel

kötött, a szemek felületén lévő vízfilmen keresztül, amely a szemcséket kissé eltávolítja egymástól [21].

A tömörítés módja szintén hatással van a keverék halmaztömörtségére. Általánosságban elmondható, hogy a tömörítési energia (vibrátoros vagy rázóasztalos tömörítés esetén az alkalmazott frekvencia) növelésével a halmaztömörség elér egy maximumot, majd csökkenni kezd. A maximális tömörség eléréséhez szükséges idő függ a komponensek arányától is: kétalkotós keverékek esetén 70%-os durva adalékanyag tartalmú keverékek tömörítési ideje a legkisebb [15].

2.1.2 A maximális tömörségű keverék létrehozását célzó modellek

Az adalékanyagok tömörségének kutatása 1892-ben kezdődött Féret [5] vizsgálataival, s mind a mai napig releváns kutatási terület. A betontechnológia fejlődésével az elmúlt évtizedekben az adalékanyag összetétel optimalizálása egyre fontosabbá vált, a kidolgozott módszerek az alábbi két kategóriába sorolhatók:

- ideális szemeloszlási görbék
- diszkrét számítási eljárások.

2.1.2.1 Ideális szemeloszlási görbék

Az adalékanyagok jellemzéséhez használatos szemeloszlási görbe egy adott d szemcseméretnél kisebb szemcsék tömegét ábrázolja diagramon a teljes minta száraz tömegének százalékában kifejezve. A kezdetekben a legtöbb kutató a maximális halmaztömörséghez tartozó ideális szemeloszlási görbék kidolgozását célozta meg. 1892-ben Féret [5] elsőként bizonyította, hogy a beton nyomószilárdsága összefügg az adalékanyag halmaztömörségével. Fuller és Thompson [22] 10% finomrész tartalmú (cementet is tartalmazó) tömörített halmazokat vizsgált, a maximális tömörséghez tartozó szemeloszlási görbére a következő javaslatot tette:

$$a = \left[\frac{d}{D_{max}} \right]^q \quad (3)$$

ahol,

a : a d [mm] lyukbőségű szitán áthulló szemcsék tömegaránya [-]

D_{max} : a maximális szemnagyság [mm]

q : a Fuller görbék esetén $q=0.5$ [-]

A parabola alakú Fuller görbékét mindmáig alkalmazzák a betontervezésben. Ugyanakkor a maximális tömörségű adalékanyag előállítását célzó ideális szemeloszlási görbe alkalmazása nem feltétlenül eredményezi a maximális tömörségű betonkeveréket, mivel nem veszi figyelembe a cementszemcsék hézagokban való elhelyezkedését. Számos kutató javasolt további módosítást a (3) egyenletben szereplő q értéken, többek között Talbot és Richart [23], illetve Andreasen és Andersen [24], akik 1930-ban továbbfejlesztették a modellt és megállapították, hogy q értékének 0.33 és 0.50 közé kell esnie, meghatározása pedig kísérleti úton történik az adalékanyag típusának függvényében. Ez a modell azonban továbbra is azzal a feltételezéssel él, hogy a minimális szemmagyság végtelenül kicsi. Ezért 1980-ban Funk és Dinger [25] meghatározott egy d_{min} minimális szemmagyságot, tovább pontosítva a módszert:

$$a = \frac{d^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q} \quad (4)$$

ahol d_{min} : a minimális szemmagyság [mm]-ben, továbbá $q = 0.37$.

A későbbiek során különböző q értékeket határoztak meg a szemalak, a frakció arányok, illetve az előírt konzisztencia függvényében [26,27].

Caquot volt az első, aki kísérleti úton megállapította a falhatást (*A szemcsés halmazok tömörségét befolyásoló tényezők fejezet, 15. old.*), az általa meghatározott módszer szerint a legtömörebb szemeloszlást az alábbi kifejezés adja: [28]

$$a = \frac{K}{\sqrt[5]{\frac{D_{max}}{d}}} \quad (5)$$

ahol K: az adalékanyag fajtájától függő állandó.

Faury kísérletei szerint a maximális tömörségű adalékanyagot $d_0 - \frac{D}{2}$ finom és $\frac{D}{2} - D$ durva adalékanyag frakcióból kell összeállítani, ahol $d_0 = 0.0065 \text{ mm}$ a cement minimális szemmagysága. A $d_0 - \frac{D}{2}$ frakció mennyisége [28]:

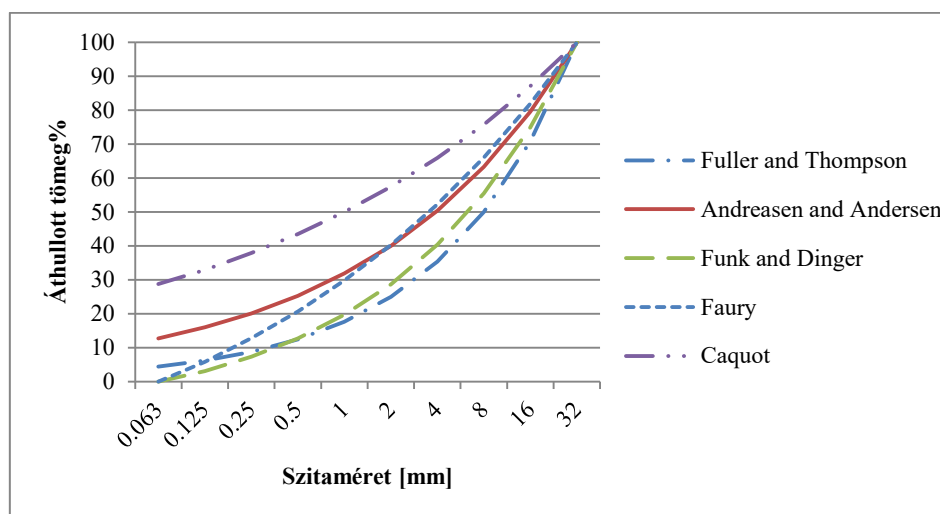
$$a = \frac{1}{\sqrt[5]{D_{max}} - \sqrt[5]{d_0}} \cdot (\sqrt[5]{D_{max}} - \sqrt[5]{d_0}) \quad (6)$$

A $\frac{D}{2} - D$ frakció mennyisége:

$$a = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D_{max}} \quad (7)$$

ahol A az adalékanyag fajtájától és a bedolgozás módjától függő állandó, értéke egy egész körüli [28].

A 8. ábra Fuller és Thompson, Andreasen és Andersen ($q=0.33$ értékkel), Funk és Dinger, Caquot, valamint Faury által meghatározott ideális szemeloszlási görbéket mutatja $d_{min}=0.063\text{ mm}$ minimális és $D_{max}=32\text{ mm}$ maximális szemcsemérettel.



8. ábra: Ideális szemeloszlási görbék [28] (saját szerkesztés)

Több számítógépes programot fejlesztettek betonkeverékek optimalizálására a Fuller és Thompson modell alapján, illetve módosított változataira alapozva. Ilyen program például az EMMA [29], amely állandó q kitevő mellett optimalizált adalékanyag összetételt állapít meg.

Bár az ideális szemeloszlási görbék, illetve az ezeken alapuló szoftverek praktikus alkalmazhatóak a gyakorlatban, számos kutató többféle módszerrel különböző eredményre jutott. Ezen túlmenően az ideális szemeloszlási görbék főként geometriai megfontolásokon alapuló folytonos modellek, amelyek feltételezik, hogy a tömörségi, tömöríthetőségi tulajdonságok a lépték változtatásával – tehát a szemcse- és zsaluzati méretek növelésével vagy csökkentésével – nem változnak [30]. Mindemellett a legtöbb ilyen módszer nem veszi figyelembe a szemalak, a falhatás vagy a fellazító hatás tényezőit. Továbbá egyes kutatások szerint [31,32] meghatározott lépcsős szemeloszlású keverékekkel nagyobb tömörséget érhetünk el, mint a folytonos szemeloszlású adalékanyagokkal, az ilyen esetek vizsgálata azonban nem lehetséges a fentiekben bemutatott megközelítéssel.

2.1.2.2 Diszkrét számítási eljárások

A diszkrét számítási eljárások célja a szemeloszlás, valamint az egyes komponensek (azaz az egyes szitákon fennmaradt, a szita lyukbőségének megfelelő átmérővel jellemzett szemcsék) saját halmaztömörségének ismeretében a keverék halmaztömörségének számítása. A koncepciója az, hogy a nagyobb szemcsék hézagait kitöltik az eggyel kisebb szemcsék, azok

hézagait a következő komponens tölti ki és így tovább [33]. Három típusát különböztethetjük meg ezeknek a modelleknek:

- kétalkotós
- háromalkotós
- többalkotós modellek.

Közös jellemzőjük, hogy a keverékeket felépítő egyes komponenseket merev, azonos átmérőjű gömbökként kezelik.

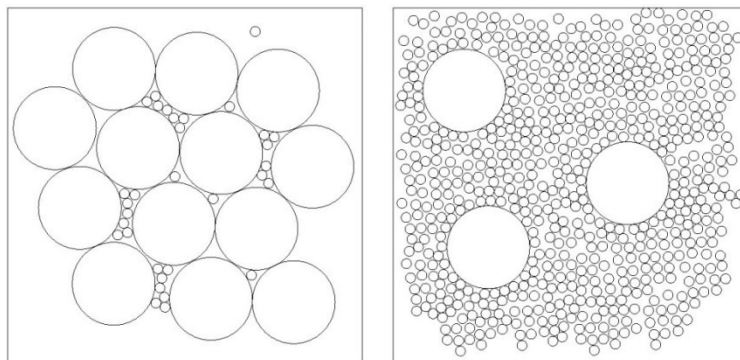
Kétalkotós modellek

Kétalkotós keverékek esetén két alapesetet írhatunk fel, amely szinte mindegyik diszkrét számítási eljárás alapját képezi. Vegyünk egy d_1 átmérővel jellemezhető és β_1 saját halmaztömörséggel rendelkező komponens, amelynek keverékben elfoglalt aránya y_1 ; illetve egy d_2 átmérővel jellemezhető és β_2 saját halmaztömörséggel rendelkező komponens, amelynek keverékben elfoglalt aránya y_2 . Ha $d_2 \ll d_1$, a keverék halmaztömörsege (ϕ) a következőképpen alakulhat:

$$\phi = \frac{\beta_1}{y_1} \text{ ha a nagyobb átmérőjű komponens } (d_1) \text{ domináns} \quad (8)$$

$$\phi = \frac{1}{y_1 + \left(\frac{y_2}{\beta_2}\right)} \text{ ha a kisebb átmérőjű komponens } (d_2) \text{ domináns} \quad (9)$$

A dominancia elsősorban az egyes komponensek térfogatarányától függ: amennyiben a nagyobb szemcsék vannak nagyobb arányban jelen ($y_1 \gg y_2$), a kisebb szemcsék kitöltik a hézagokat, míg ellenkező esetben ($y_2 \gg y_1$) a nagyobb szemcsék beágyazódnak a kisebb szemcsékből álló mátrixba (9. ábra). A (8) és (9) egyenlet azonban két, egyenként azonos átmérőjű szemcséből álló, egymással interakcióba nem lépő komponensre vonatkozik, ahol $d_2/d_1 \approx 0$. Amennyiben ez a feltétel nem teljesül, a halmaztömörség meghatározásakor figyelembe kell venni a két komponens átmérőinek arányát. Abban az esetben, ha a két komponens átmérője közel azonos ($d_1 \approx d_2$), a 2.1.1 *A szemcsés halmazok tömörségét befolyásoló tényezők* (15. old.) fejezetben leírt két járulékos hatás (fellazító hatás és falhatás) is figyelembe veendő.



9. ábra: a) d_1 domináns keverék, b) d_2 domináns keverék (saját szerkesztés)

Az első matematikai modellt Furnas [34] dolgozta ki 1928-ban, amely kétalkotós keverékek hézagterfogatát határozta meg, egymással interakcióba nem lépő komponensek esetére, azaz a járulékos hatások elhanyagolása mellett. 1931-ben továbbfejlesztette a modellt többalkotós keverékek esetére is, immár figyelembe véve a szemcsék közötti lehetséges interakciókat. Powers [35] a fellazító- és falhatást is figyelembe véve dolgozta ki modelljét kétalkotós keverékek halmaztömörségének becslésére. Ben Äim és Le Goff [36], valamint Schwanda [37] implementálta a falhatás és fellazító hatást Furnas modelljébe 1966 és 1968 között. Powers munkásságát továbbfejlesztve Dewar [38] 1999-ben publikálta a Szemcsés Halmazok Elméletét (*Theory of Particle Mixtures = TPM*). Könyvében a kétalkotós keverékekből kiindulva általánosítja a modellt három- és többalkotós halmazokra is.

Háromalkotós modellek

Toufar et al. [39] 1976-ban a háromalkotós keverékekre kidolgozott számítási eljárását a kétalkotós keverékekre vezette vissza. A modell alapján amennyiben a két komponens átmérőinek aránya kisebb 0.22-nél, a kisebb szemcsék (d_1) nem töltik ki megfelelően a nagyobb szemcsék (d_2) közötti hézagokat, így Toufar et. al. empirikus úton az alábbi feltételt írta elő a komponensek átmérőire:

$$0.22 < \frac{d_1}{d_2} < 1.0 \quad (10)$$

A háromalkotós keverékek esetében két komponenst kombinálva megállapítható azok együttes halmaztömörége és átlagos átmérője, majd ezt kombinálva a harmadik komponenssel a probléma visszavezethető a kétalkotós keverékek esetére. Ilyen módon az eljárás többalkotós halmazok tömörségének becslésére is alkalmas. A modell a halmaztömörség értékét a következő összefüggéssel határozza meg:

$$\phi = \frac{1}{\left(\frac{y_1}{\phi_1} + \frac{y_2}{\phi_2} - y_2 \left(\frac{1}{\phi_2} - 1\right) k_a k_s\right)} \quad (11)$$

ahol,

ϕ : a keverék halmaztömörsege

y_1 és y_2 : a két komponens térfogataránya a keverékben

ϕ_1 és ϕ_2 : a két komponens saját halmaztömörsege

k_d : a szemcseátmérők arányát figyelembe vevő tényező:

$$k_d = \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} \quad (12)$$

k_s : statisztikai tényező, a szemcsék közötti interakciók valószínűségét figyelembe vevő paraméter:

$$k_s = 1 - \frac{1+4x}{(1+x)^4} \quad (13)$$

ahol

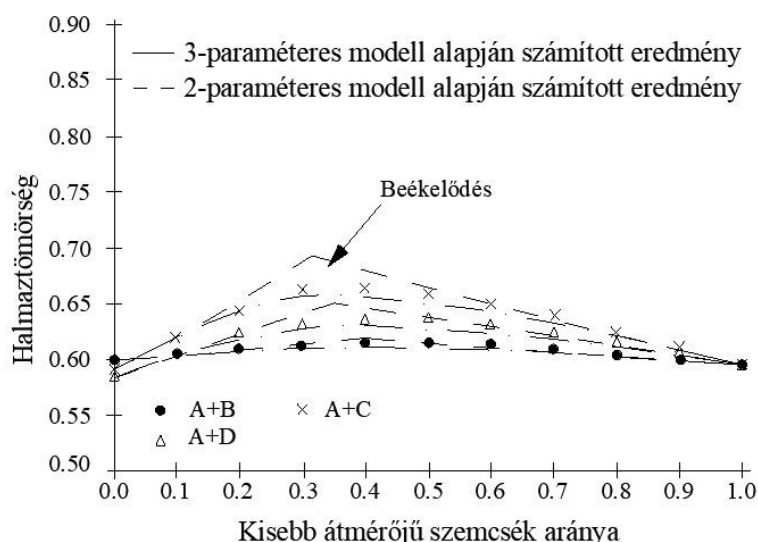
$$x = \frac{y_1 \phi_2}{y_2 \phi_1 (1 - \phi_2)} \quad (14)$$

Amennyiben a szemcsék közötti interakciókat figyelmen kívül hagyjuk, $k_d = 1.0$. Későbbi vizsgálatok kimutatták, hogy többalkotós keverékek esetében a modell alábecsüli a halmaztömörség értékét, mely kiküszöbölhető, amennyiben elsőként a két legnagyobb átmérő aránnyal rendelkező komponenseket kombináljuk. Golterman et al. [40] 1997-ben kísérleti eredményei alapján módosítást javasolt a modellen a k_s tényező alábbi pontosításával:

$$k_s = 1 - \frac{1+4x}{(1+x)^4} \quad \text{ha} \quad x \geq 0.4753 \quad (15)$$

$$k_s = \frac{0.3881x}{0.4753} \quad \text{ha} \quad x < 0.4753 \quad (16)$$

Kwan et al. [41] kétalkotós keverékeket vizsgálva, a falhatást és a fellazító hatást egyaránt figyelembe véve eltérést tapasztalt az elméleti és a gyakorlati eredmények között az optimális finomrész-arány környékén. Az általa kidolgozott 2-paraméteres modell túlbecsülte a gyakorlati értékeket, amelyet a beékelődés (2.1.1 *A szemcsés halmazok tömörségét befolyásoló tényezők fejezet, 16. old.*) hatásával magyarázott (10. ábra). A kísérleti adatok alapján kidolgozta a háromalkotós keverékekre alkalmazható 3-paraméteres modellt, amelyben a fellazító hatás, a falhatás és a beékelődés tényezőit a kísérleti adatok alapján kalibrálta.



10. ábra: A beékelődés hatása, a kétalkotós keverékekben az egyes halmazok átlagos átmérője: A: 5.26 mm, B: 8.03 mm, C: 15.73 mm, D: 11.71 mm [41] (saját szerkesztés)

Többallkotos modellek

Furnas modelljét továbbfejlesztve elsőként Stovall, De Larrard és Buil [42] általánosította a módszert többallkotos keverékekre, amely a Lineáris Halmaztömörégi Modell (*Linear Packing Density Model = LPDM*) nevet kapta. Az LPDM a keverék halmaztömörségét az egyes komponensek saját halmaztömörségéből, valamint a keverékben elfoglalt arányából (szemeloszlás) állapítja meg. Ebben az esetben egy úgynevezett virtuális halmaztömörséget számítunk ki, amely a keverékkel elérhető maximális tömörség, feltételezve, hogy a szemcsék megtartják eredeti alakjukat [12]. A modell figyelembe veszi a járulékos hatásokat két interakciós tényező bevezetésével. Ebből a modellből került kidolgozásra egy, a cementes szuszpenziókra alkalmazható módszer is (*Solid Suspension Model = SSM*), amely képes megbecsülni egy adott szuszpenzió várható viszkozitását [43,44]. Utóbbi modell fontos újítása volt a virtuális és valós halmaztömörség megkülönböztetése, amely aztán elvezetett az adalékanyagokra általánosan alkalmazható módszerig (*Compressible Packing Model = CPM*) [12]. A CPM a valós halmaztömörség számításánál már figyelembe veszi a tömörítési módszer halmaztömörségre gyakorolt hatását a K tényező bevezetésével. Ebből adódóan az LPDM a CPM egy speciális esetének tekinthető, ahol a tömörítési tényező $K = \infty$. A CPM számítás lépései a következők: Adott n számú d_i átmérővel jellemezhető komponens ($i=1\dots n$), ahol az átmérők az egyes (alsó) szitaméreteknél felelnek meg és igaz, hogy $d_i \geq d_{i+1}$. Kísérleti úton meghatározandók az egyes komponensek saját halmaztömörség értékei, melyekből számíthatók a virtuális halmaztömörségek értékei:

$$\bar{\beta}_i = \left(1 + \frac{1}{K}\right) \phi_i \quad (17)$$

ahol,

$\bar{\beta}_i$: az i -edik komponens virtuális halmaztömörősége

K : tömörítési tényező (kísérletek segítségével meghatározott értékek de Larrard [12] szerint: rázóasztalon történő tömörítés esetén $K = 4.75$; 10 kPa nyomás alatti rázóasztalos tömörítés esetén $K = 9$; laza állapotban $K = 4.10$, döngölés esetén $K = 4.50$)

ϕ_i : az i -edik komponens saját halmaztömörősége.

Ezután minden komponens esetén meghatározandó a fellazító- (a_{ij}) és a falhatás (b_{ij}) tényezője, amely az egymás után következő komponensek átmérőinek arányától függ.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_{i+1}}{d_i}\right)^{1.02}} \quad \text{ha } d_{i+1} \leq d_i \quad (18)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_{i+1}}\right)^{1.52} \quad \text{ha } d_i \leq d_{i+1} \quad (19)$$

A fenti adatokból meghatározható a keverék virtuális halmaztömörősége (γ_i):

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j}\right] y_j} \quad (20)$$

ahol y_i az i -edik komponens térfogataránya a keverékben.

A valós halmaztömörőség (ϕ) ezután a virtuális érték felhasználásával egy implicit képlet segítségével határozható meg:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\phi} - 1} \frac{1}{\gamma_i} \quad (21)$$

Többszörös keverékek esetén a domináns komponens meghatározása nehézkessé válik, a CPM modell két interakciós tényezőjével azonban figyelembe vehető minden komponens-pár egymásra gyakorolt halmaztömörőség-csökkentő hatása. De Larrard és Sedran [45] az elméleti modellek felhasználásával új betontervezési eljárást és szoftvert (Bétonlab) publikált 2002-ben.

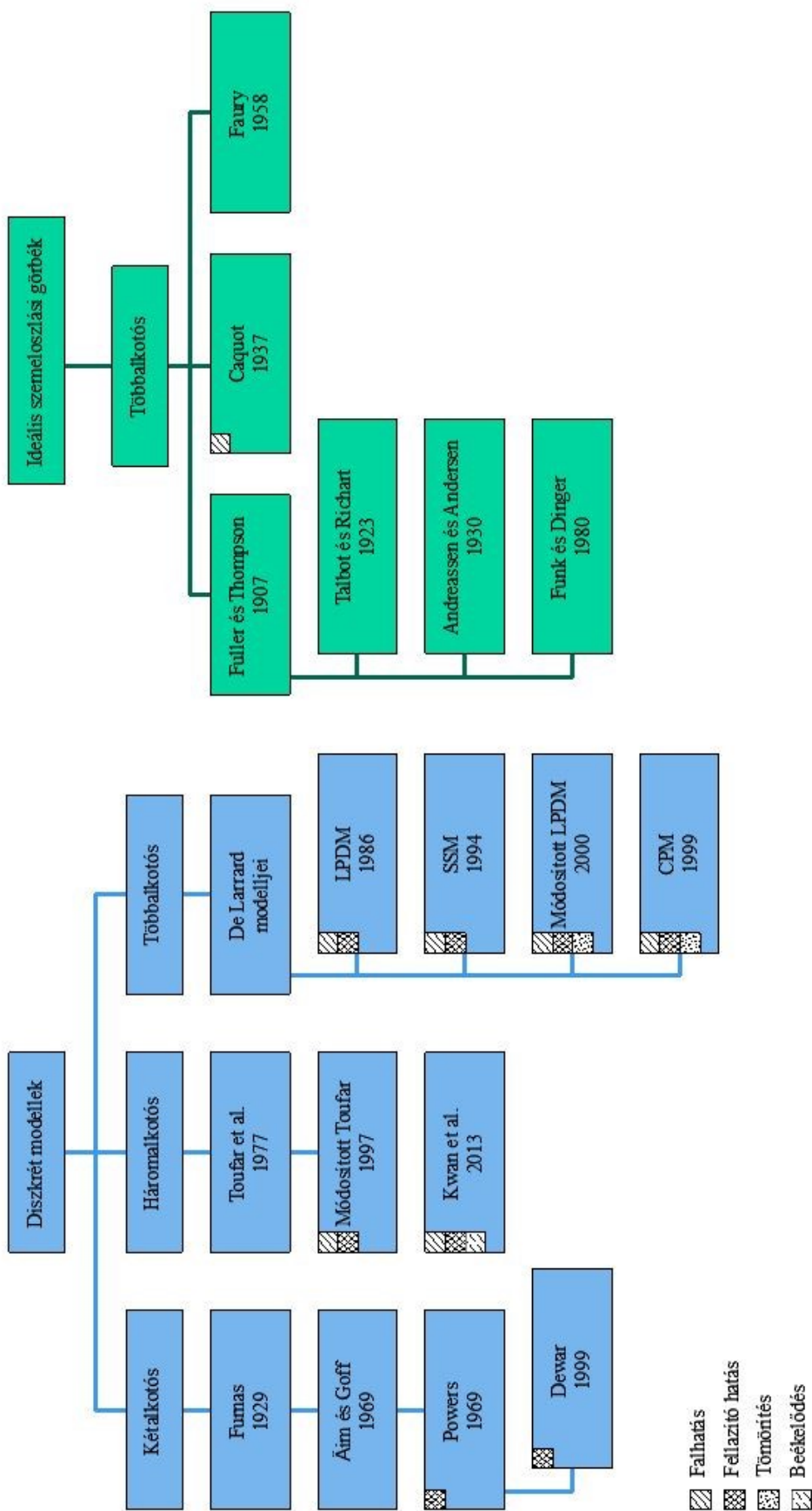
A modellek gyakorlati alkalmazhatósága

Petersen [46] 1981-es vizsgálataiban azt találta, hogy kis átmérő arányok esetén Äim és Goff modellje (2.1.2.2 fejezet/Kétalkotós modellek, 21. old.) közelíti meg legjobban a kísérleti eredményeket, míg nagyobb átmérő arányok esetében a Toufar modell (2.1.2.2 fejezet/Háromalkotós modellek, 22. old.). Goltermann et al. [40] három modell pontosságát vizsgálta nagyszámú mintán: az Äim és Goff, a Toufar és a módosított Toufar modellt, melyek közül utóbbi kettő bizonyult megfelelően pontosnak [26].

Jones et al. [47] laboratóriumi kísérletek során vizsgálta Dewar (2.1.2.2 fejezet/Kétalkotós modellek, 21. old.), Toufar, De Larrard LPDM és CPM modelljének (2.1.2.2 fejezet/Többalkotós modellek, 24. old.) pontosságát két durva adalékanyag frakción 10, illetve 20 mm-es maximális szemnagysággal, valamint két homok frakción, továbbá az ezekből alkotott keverékeken. Kétalkotós, durva adalékanyagból álló keverékek esetén a Dewar, Toufar, valamint az LPDM modell jó egyezést mutatott a kísérleti adatokkal. A CPM esetében a tömörítési tényező $K = 12.5$ -ös értékre való módosításával érték el megfelelő pontosságot. Cementet és kiegészítő anyagot tartalmazó keverékek esetén a Toufar, Dewar és LPDM modell felülbecsülte az eredményeket, míg a CPM megfelelő egyezést mutatott. Az átlagos eltérés a mért és számított értékek között 2.4 – 5.5% volt. Háromalkotós keverékek esetén szinte mindegyik modell jól közelíti a kísérleti eredményeket, pontosságuk az egyes komponensek átmérőinek arányától függ, a legpontosabbnak azonban a Dewar-féle modell bizonyult. Összességében a vizsgált modellek jó egyezést mutatnak a kísérleti eredményekkel, mindaddig, amíg a komponensek átmérője nem különbözik túlságosan. Amennyiben az átmérők aránya 0.40-nél kisebb, az LPDM, CPM és a Toufar-féle modell kevésbé pontos eredményeket ad [47]. A tömörítési modellek áttekintését a 11. ábra tartalmazza. Az elméleti modellek megjelenését követően, azok gyakorlati alkalmazását elősegítendő több számítógépes program került kidolgozásra. Ezek összefoglalóját a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Keverék optimalizáláshoz kifejlesztett programok [11]

Program	Alkalmazott modell	Forrás
Europack	Módosított Toufar	www.gmic.dk
MixSim	Dewar/Powers	www.mixsim.net
4C Packing	Módosított LPDM	www.danishtechology.dk
LISA	Andreassen	www.silicafume.net
RENE LCPC, BETONLABPRO	CPM	www.clks.cbt.nist.gov



11. ábra: Tömörítési modellek áttekintése [11, 15] (saját szerkesztés)

2.1.3 Irodalmi adatok a zsaluzati méret és a halmaztömörség összefüggéséről

A halmaztömörség számítására vonatkozó (1) és (2) összefüggés csak – a szemcseméretre képest – végtelen térfogatú zsaluzat feltételezésével igaz, tehát nem veszi figyelembe az alkalmazott zsaluzat geometriai méreteit [7, 12]. Ezért Äim [12] 1970-ben kidolgozott egy hengeres sablonokra alkalmazható eljárást, amely figyelembe veszi a sablon méretei miatt fellépő falhatást. Azt feltételezte, hogy a sablon fala mentén maximum $d/2$ távolságban vizsgált térfogatrészen lokálisan kisebb a halmaztömörség, mint a sablon belső részein. Ebben a térfogatrészben a halmaztömörség $k_w \cdot \phi$, ahol $k_w < 1$, a sablon többi részében pedig ϕ . A keverék átlagos halmaztömörége így a következő képlettel számítható:

$$\phi' = ((1 - (1 - k_w)V_p)\phi \quad (22)$$

ahol,

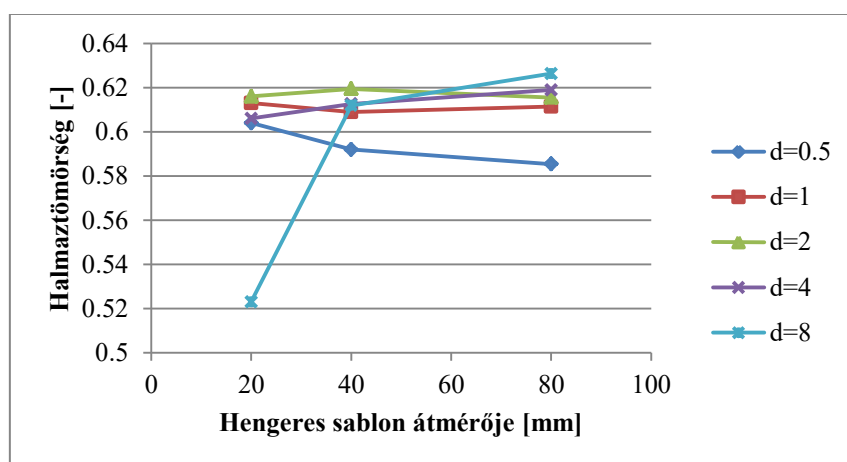
ϕ' : a halmaztömörség értéke a falhatást figyelembe véve [-]

ϕ : a mért halmaztömörség értéke [-]

V_p : a falhatás miatt kialakuló „zavart” rész egységnyi térfogatban elfoglalt aránya [-]

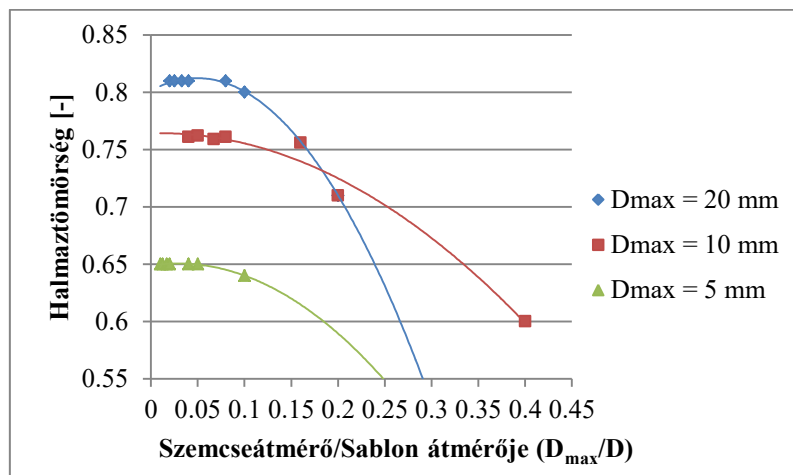
k_w : empirikus úton meghatározott konstans, gömbölyű szemű adalékanyag esetén $k_w = 0.88$; zúzott adalékanyag esetén $k_w = 0.73$.

De Larrard [12] Äim kutatásaira alapozva vizsgálta a hengeres zsaluzatok átmérőjének halmaztömörségre gyakorolt hatását különböző méretű komponensek esetén. A 12. ábrán látható kísérleti adatok szerint a kisebb szemcseméretű ($d \leq 2 \text{ mm}$) esetén a hengeres sablon átmérőjének növelésével a halmaztömörség némiképp csökken vagy stagnál, míg a nagyobb szemcseátmérők esetén nő.



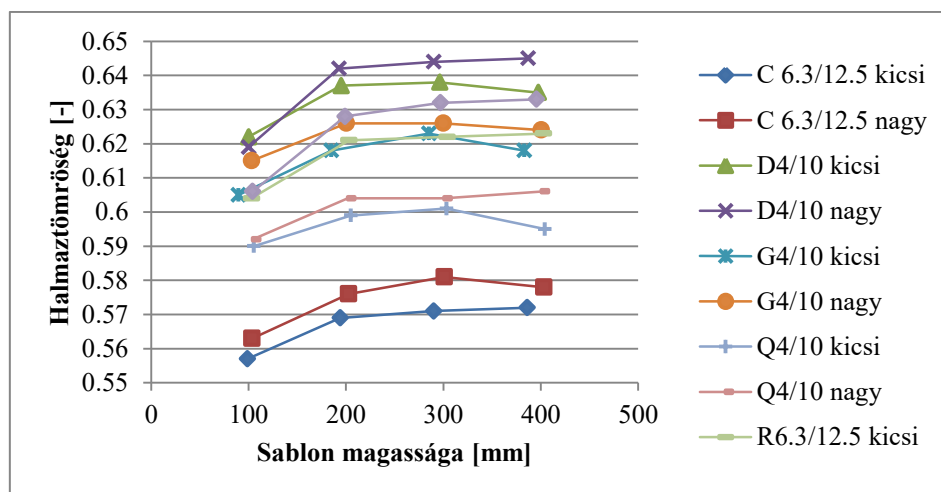
12. ábra: Zsaluzati méret hatása a halmaztömörségre hengeres sablonok esetén [12] (saját szerkesztés)

McGeary [48] és Ayer és Soppet [49] 200 mm átmérőjű hengeres sablon vizsgálata során arra a következtetésre jutott, hogy amennyiben a durva adalékanyag maximális átmérőjének (D_{max}) és a sablon átmérőjének (D) az aránya (D_{max}/D) kisebb 0.1-nél, a sablon miatt fellépő falhatás elhanyagolható mértékű. Hettiarachchi [15] változó átmérőjű hengeres sablonokat és ezáltal eltérő D_{max}/D arányokat vizsgált. A keverékekben a maximális átmérőjű szemcsék aránya 70% volt, a mintát rázóasztalon tömörítették 110 rad/s frekvenciával. Eredményei alátámasztják a McGeary, Ayer és Soppet következtetéseit (13. ábra).



13. ábra: A szemnagyság és a sablon átmérőjének arányának hatása a halmaztömörőségre [15] (saját szerkesztés)

Lecomte [50] két különböző átmérőjű (kicsi: 82.8 és nagy: 149 mm) hengeres sablont vizsgált, amelyeket 4-4 különböző magasságig (h) töltött meg. 6 különböző adalékanyagot vizsgált, 1 gömbölyűszemű (R), 4 zúzott adalékanyagot (C,D,G,Q) és ásványolajkoksztot (P). A hengeres sablon magasságának növelésével a halmaztömörőség minden minta esetén kismértékben nőtt, átlagosan 1-4 % közötti értékkel (14. ábra).



14. ábra: Hengeres sablon méretének hatása a halmaztömörőségre [50] (saját szerkesztés)

A bemutatott szakirodalmi adatok alapján megállapítható, hogy a hengeres zsaluzat mérete hatással van az adalékanyag halmaztömörségére. A maximális szemnagyság és a sablon magasságának hányadosát (D_{max}/h) vizsgálva a halmaztömörség a 0.32-0.62 közötti tartományban éri el maximumpontját, 0.32 alatti arányok (azaz jelen esetben a 200 mm-nél kisebb hengermagasság) esetében a halmaztömörség csökken, 0.62 felett közel konstans. Egyéb zsaluzati formák és méretek kapcsán jelenlegi ismereteim alapján nincs hasonló jellegű kutatási eredmény.

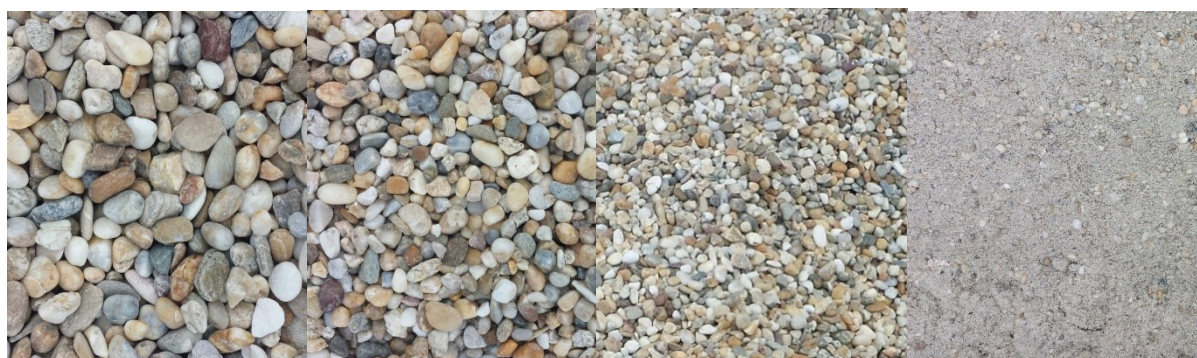
2.2 KÍSÉRLETEK FELÉPÍTÉSE

A doktori kutatás első részéhez kapcsolódó kísérleteimet két ütemben végeztem el. Az első ütemben a gyakorlatban általánosan használt adalékanyag frakciók halmaztömörségét vizsgáltam a zsaluzati méret függvényében. A második ütemben az egyes komponensek, valamint az MSZ EN 12620:2013 [51] szabvány szerinti „A” és „C” jelű határgörbék halmaztömörségét vizsgáltam a zsaluzati mérettől függően.

2.2.1 Alkalmazott adalékanyag

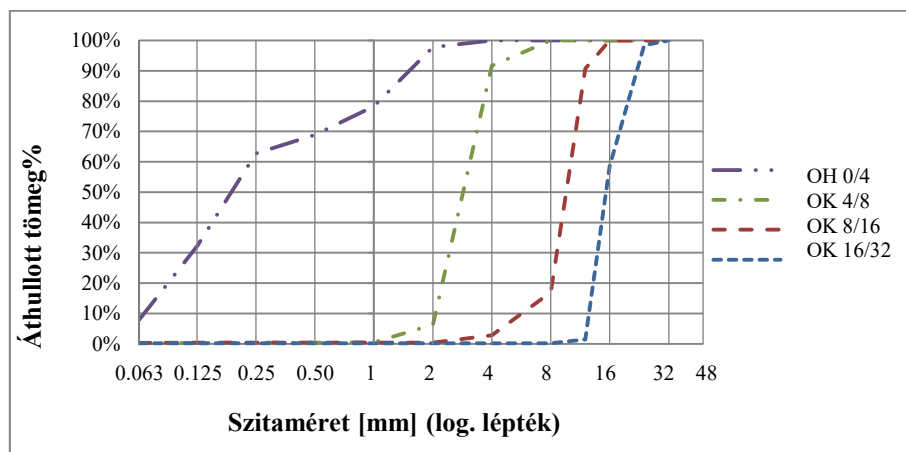
A vizsgálatok során az Ing. Kotzian Kft. levéli bányájából származó osztályozott kvarchomok és kvarckavics frakciókat használtam az alábbi szemnagyságokkal (15. ábra):

- osztályozott homok 0-4 mm (továbbiakban OH 0/4)
- osztályozott kavics 4-8 mm (továbbiakban OK 4/8)
- osztályozott kavics 8-16 mm (továbbiakban OK 8/16)
- osztályozott kavics 16-32 mm (továbbiakban OK 16/32)



15. ábra: Alkalmazott adalékanyag frakciók

A négy adalékanyag frakció szemmegoszlási diagramját a 16. ábra mutatja, a mérési adatokat a Melléklet 1.1 fejezete tartalmazza.



16. ábra: Az alkalmazott adalékanyag frakciók szemmegoszlása (saját szerkesztés)

A frakciónkénti vizsgálatokat követően szitálással felbontottam a frakciókat, majd a szabvány szerinti „A” és „C” jelű határgörbét pontosan kikevertem.

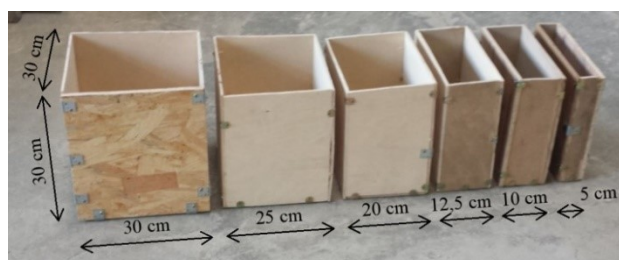
2.2.2 Alkalmazott zsaluzatok

A zsaluzati méretek az adalékanyag halmaztömörségére gyakorolt hatását egyedi zsaluzatokon vizsgáltam. A frakciók vizsgálatához az első ütemben 50x60x60 cm befoglaló méretű, nyír rétegelt lemezből készített, fenolfilm bevonatú zsaluzatot alkalmaztam (Zs-1), amelynek az egyik oldalfala 5 cm-es lépcsőkben csavarok segítségével állítható 5 és 50 cm között, így összesen 10 különböző falvastagságot vizsgáltam (17. ábra).



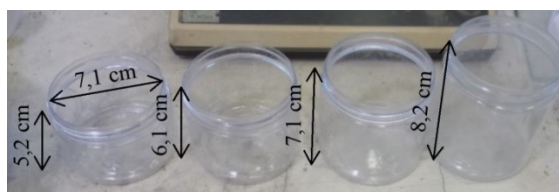
17. ábra: Alkalmazott zsaluzat az első vizsgálati szakaszban (Zs-1): a) 5 cm-es falvastagság, b) 50 cm-es falvastagság

A második ütemben 6 különböző, furnérből készített zsaluzatot alkalmaztam (Zs-2), állandó 30 cm-es szélességgel és magassággal, 5; 10; 12.5; 20; 25 és 30 cm-es vastagsággal (18. ábra) a frakciók és a határgörbék vizsgálatához.



18. ábra: Alkalmazott zsaluzatok a második vizsgálati szakaszban (Zs-2)

A szitaméretek szerint szétbontott komponensek vizsgálatához állandó, 7.1 cm átmérőjű, 5.2; 6.1; 7.1 és 8.2 cm magasságú műanyag hengeres formákat (Zs-3) alkalmaztam (19. ábra).



19. ábra: Alkalmazott hengeres formák a második vizsgálati szakaszban (Zs-3)

2.2.3 Kísérletek végrehajtásának menete

A halmaztömörség vizsgálatához először az egyes frakciók, valamint az egyes komponensek testsűrűségét határoztam meg. Ezt követően a zsaluzatokban történő vizsgálat során már elegendő volt az adott minta tömegét lemérve az adalékanyag halmazűrűségét meghatározni. A halmazsűrűség és testsűrűség hányadosából a halmaztömörség meghatározható.

2.2.3.1 Testsűrűség meghatározása

A vizsgálat menete eltérő durva ($d_{max} > 4 \text{ mm}$) és finom ($d_{max} \leq 4 \text{ mm}$) adalékanyagok esetén. A mintavételezés a halmaz közepéből, előzetesen laborlevegőn kiszárított adalékanyagból történt. A finom adalékanyag frakcióból (OH 0/4), valamint a szitaméreteknek megfelelő szemnagyságú komponensekből mintákat vettem, melyek testsűrűségét piknométeres módszer segítségével vizsgáltam (20. ábra). A homok frakció és a frakció komponenseinek átlagos testsűrűségét a 4-5. táblázat tartalmazza. A részletes mérési adatokat a Melléklet 1.2 és 1.3 fejezete tartalmazza.



20. ábra: Finom adalékanyag testsűrűségének meghatározásához használt eszközök

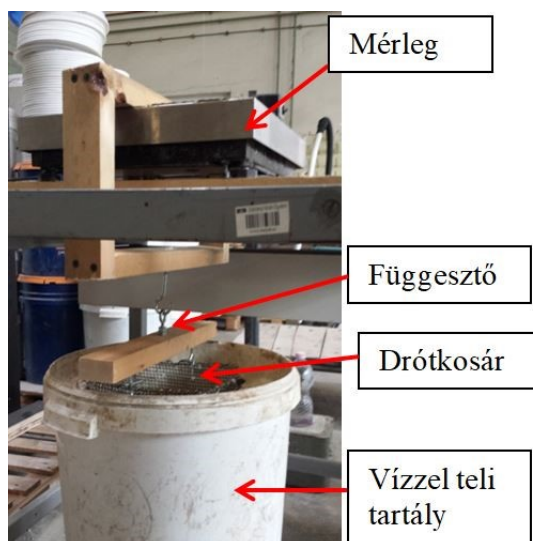
4. táblázat: Az OH 0/4 átlagos testsűrűsége 4 mérési adat alapján

Vizsgált frakció	Testsűrűség [kg/m ³]
OH 0/4	2642

5. táblázat: Komponensek átlagos testűrűsége 3 mérési adat alapján

Vizsgált komponens [mm]	Testsűrűség [kg/m ³]
0.063/0.125	2696
0.125/0.25	2673
0.25/0.5	2628
0.5/1	2633
1/2	2636
2/4	2629
4/8	2649

A durva adalékanyag frakciókból (OK 4/8, OK 8/16, OK 16/32) 3000 g-os mintákat vettem, melyeket 4 mm lyukbőségű drótkosár segítségével vizsgáltam a szabvány [52] szerinti módszernek megfelelően (21. ábra).



21. ábra: Durva adalékanyag frakciók testsűrűségének meghatározásához használt kísérleti összeállítás

A mért adatokból meghatároztam az osztályozott kavics frakciók testsűrűségét (6. táblázat). A részletes mérési adatokat a Melléklet 1.2 fejezete tartalmazza.

6. táblázat: Kavics frakciók átlagos testsűrűsége 3 mérési adat alapján

Vizsgált frakció	Látszólagos testsűrűség [kg/m ³]
OK 4/8	2628
OK 8/16	2626
OK 16/32	2617

2.2.3.2 Halmaztömörtség meghatározása

Az adalékanyag halmaztömörtsége az alábbi összefüggésekkel számítható:

$$\phi = \frac{V_S}{V_T} \quad (23)$$

$$\phi = \frac{\rho_h}{\rho_t} = 1 - e \quad (24)$$

ahol,

ϕ : az adalékanyag halmaztömörtsége [-]

V_S : az adalékanyag térfogata [m³]

V_T : a zsaluzat térfogata [m³]

ρ_h : halmazsűrűség [kg/m³]

ρ_t : testsűrűség [kg/m³]

e : hézagtartalom [-]

Az adalékanyag halmazsűrűsége és testsűrűsége az alábbi képletekkel számítható:

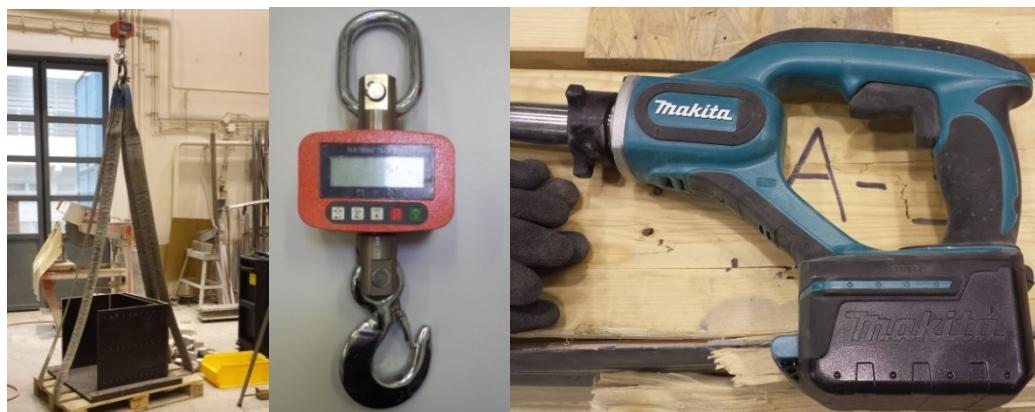
$$\rho_h = \frac{m}{V_T} \quad (25)$$

$$\rho_t = \frac{m}{V_S} \quad (26)$$

ahol m az adalékanyag tömege [kg]-ban.

A fentiek alapján a további vizsgálatok során elegendő volt az adott minta és a zsaluzat tömegét megmérni, ebből a halmazsűrűséget kiszámítani, majd az előbbieken meghatározott testsűrűség adatokat felhasználva a halmaztömörtség már számítható a (24) képlet segítségével.

Az adalékanyag mintákat vizsgálat előtt laborlevegőn kiszárítottam. A Zs-1 zsaluzat esetében a nagy súlyok miatt 0.5 kg pontosságú darumérleget használtam (22. ábra), valamint tűvibrátoros tömörítést. A mintát három rétegben dolgoztam be a zsaluzatba, mindhárom rétegen 5x5 cm-es hálóban, pontonként 5 másodpercig alkalmaztam a tűvibrátort. Az utolsó réteg esetében a zsaluzatot tömörítés közben töltöttem teljesen tele. A Zs-2 zsaluzathoz 1 g pontosságú mérleget és rázóasztalos tömörítést alkalmaztam. A mintát három rétegben tömörítettem be a zsaluzatba, rétegenként 30 másodperc tömörítést alkalmazva, a zsaluzatokat az asztalhoz leszorítva. Az utolsó réteg esetében a zsaluzatot tömörítés közben töltöttem teljesen tele. A Zs-3 (hengeres) zsaluzathoz 0.001 g pontosságú mérleget és a kis méretek miatt ejtési kézi tömörítési módszert alkalmaztam (23. ábra). A mintát három rétegben töltöttem be a zsaluzatba, minden réteg esetében 15 ejtést alkalmaztam 15 cm magasságból. Az utolsó réteg esetében a zsaluzatot tömörítés közben töltöttem teljesen tele. Minden mintát megvizsgáltam a felsorolt zsaluzati méretekben laza és tömörített állapotban is. Az elvégzett vizsgálatokat a 7. táblázat foglalja össze.



22. ábra: A Zs-1 zsaluzathoz használt vizsgálati berendezések



23. ábra: A Zs-2 és Zs-3 zsaluzathoz használt vizsgálati berendezések

7. táblázat: Vizsgált adalékanyagok és zsaluzati méretek

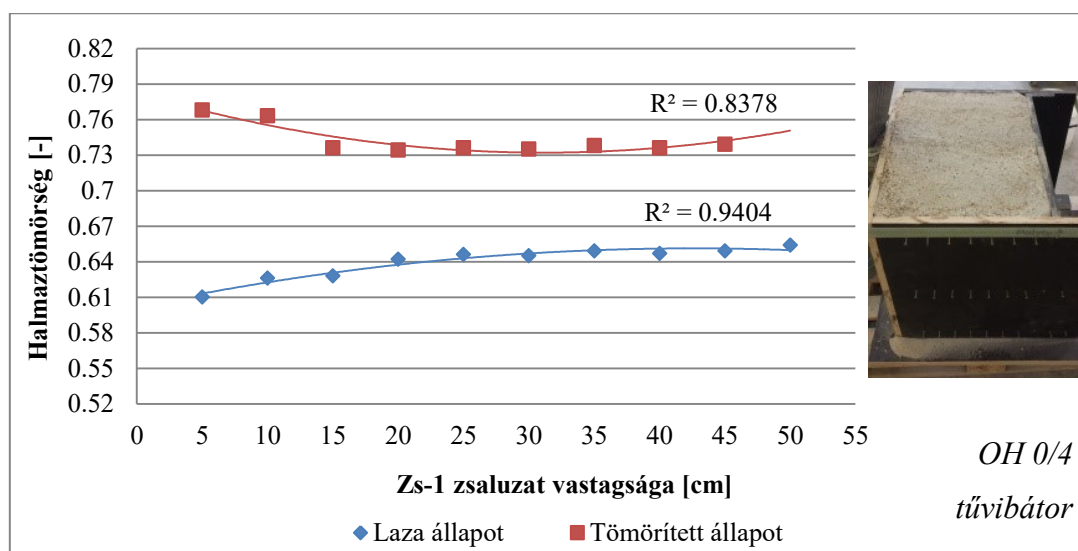
Vizsgált minta	Alkalmazott zsaluzat	Vizsgált zsaluzati mérettartomány [cm]	Alkalmazott tömörítési mód	Vizsgálati darabszám [db]
OH 0/4	Zs-1	5x60x60 – 50x60x60	Tűvibrátor	10
	Zs-2	5x30x30 – 30x30x30	Rázóasztal	6
OK 4/8	Zs-1	5x60x60 – 50x60x60	Tűvibrátor	10
	Zs-2	5x30x30 – 30x30x30	Rázóasztal	6
OK 8/16	Zs-1	5x60x60 – 50x60x60	Tűvibrátor	10
	Zs-2	5x30x30 – 30x30x30	Rázóasztal	6
OK 16/32	Zs-1	5x60x60 – 50x60x60	Tűvibrátor	10
	Zs-2	5x30x30 – 30x30x30	Rázóasztal	6
„A” határgörbe	Zs-2	5x30x30 – 30x30x30	Rázóasztal	6
„C” határgörbe	Zs-2	5x30x30 – 30x30x30	Rázóasztal	6
0.063/0.125	Zs-3	d=7.1 h=5.2-8.2	Ejtés	4
0.125/0.25	Zs-3	d=7.1 h=5.2-8.2	Ejtés	4
0.25/0.5	Zs-3	d=7.1 h=5.2-8.2	Ejtés	4
0.5/1	Zs-3	d=7.1 h=5.2-8.2	Ejtés	4
1/2	Zs-3	d=7.1 h=5.2-8.2	Ejtés	4
2/4	Zs-3	d=7.1 h=5.2-8.2	Ejtés	4
4/8	Zs-3	d=7.1 h=5.2-8.2	Ejtés	4
Összesen (laza és tömörített állapotban):				206

2.3 KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

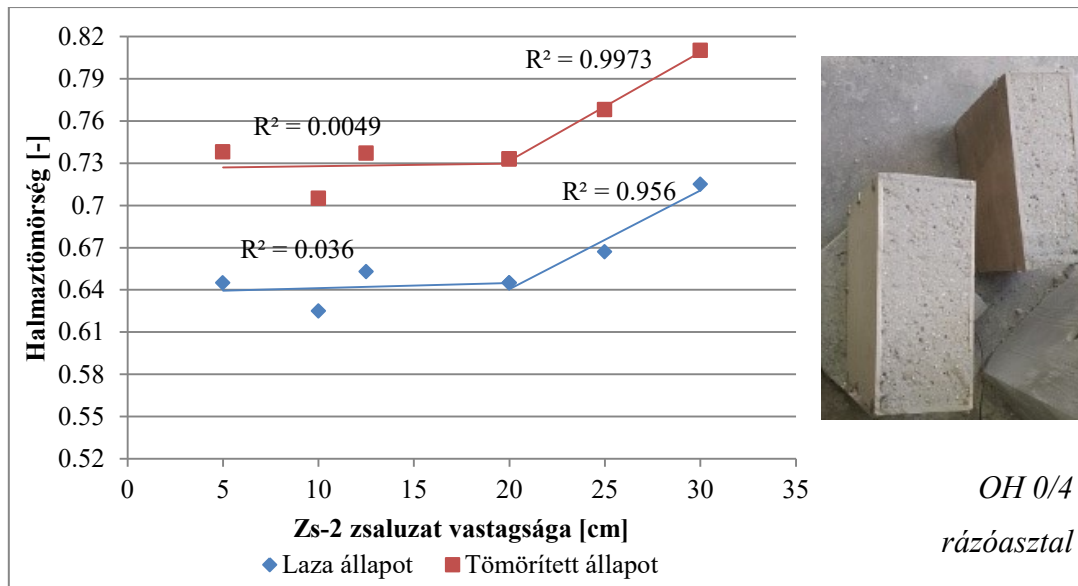
A kísérletek célja a zsaluzati vastagság halmaztömörségre gyakorolt hatásának meghatározása volt. A mérési adatokat a Melléklet 1.4, 1.5, 1.6 és 1.8 fejezetei tartalmazzák.

2.3.1 OH 0/4 frakció vizsgálata

Az OH 0/4 finom adalékanyag frakció halmaztömörségét a Zs-1 és Zs-2 zsaluzatban vizsgáltam (24-25. ábra). Az OH 0/4 frakció laza halmaztömörsége a 60 cm-es szélességgel és magassággal rendelkező (Zs-1) zsaluzatban túvibrátoros tömörítés mellett a falvastagság 5-ről 50 cm-re való növelésével 7%-kal nőtt. A növekedés a zsaluzat falvastagságának 5-25 cm-es tartományában jelentős (6%), ezt követően a halmaztömörség közel konstans. Tömörített állapotban az 5 és 10 cm-es falvastagság esetében a halmaztömörség kiugróan magas, majd a 15 cm-es falvastagságnál lecsökken, ezt követően pedig közel konstans. A 30 cm-es szélességgel és magassággal rendelkező (Zs-2) zsaluzatban rázóasztalos tömörítés mellett a laza halmaztömörség 11%-kal nőtt a falvastagság 5-ről 30 cm-re való növelésével. Tömörített állapotban a halmaztömörség 10%-os növekedést mutat ugyanebben a tartományban. Mindkét állapotban a halmaztömörség változásának trendje hasonló, a falvastagság 5-ről 20 cm-re való növelésével nem változik jelentősen, ezt követően jelentősen megnő. Összevetve a két zsaluzattal kapott halmaztömörségi adatokat, a Zs-2 zsaluzatnál mind a kezdeti, mind a végértékek magasabbak laza és tömörített állapotban egyaránt, mely a hatékonyabb tömörítési módszer és a kisebb méretű minta eredménye. A 15-20 cm-es falvastagságok esetében az eredmények hasonlóak, a Zs-1 zsaluzatban ezt követően nincs jelentős változás, míg a Zs-2 zsaluzatban ezt követően válik számottevővé a növekedés.



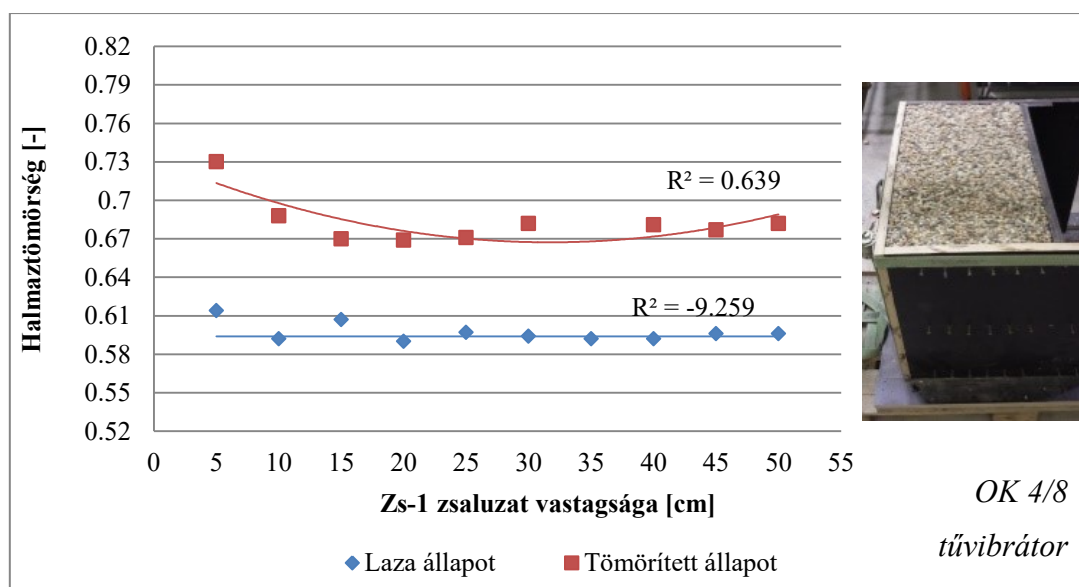
24. ábra: Halmaztömörség értékei az Zs-1 zsaluzat alkalmazásával, egy mérési sorozat alapján



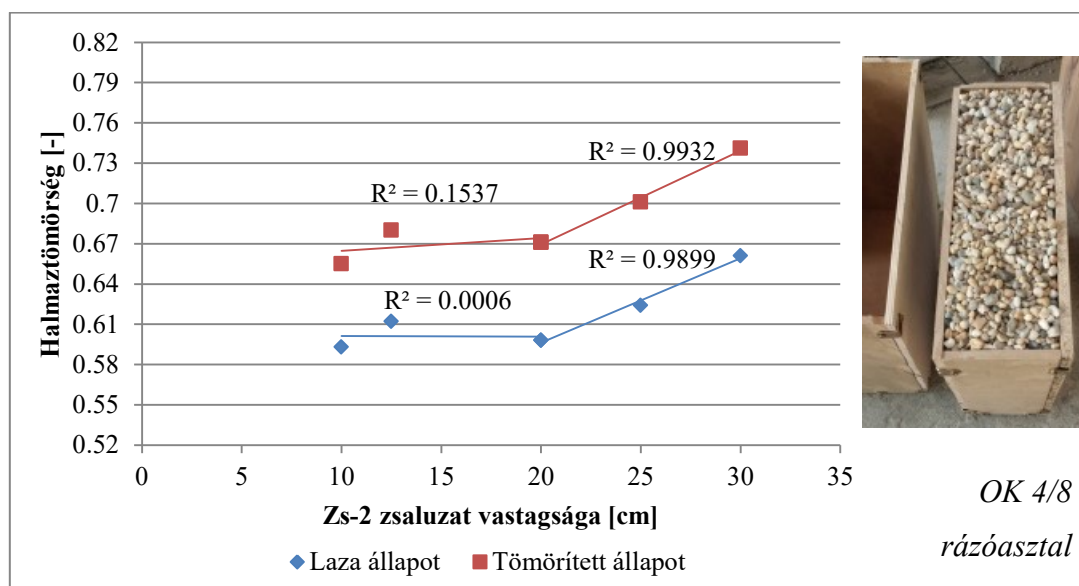
25. ábra: Halmaztömörtség értékei a Zs-2 zsaluzat alkalmazásával, 3 mérési sorozat átlagát véve

2.3.2 OK 4/8 frakció vizsgálata

Az OK 4/8 adalékanyag frakció halmaztömörtségét a Zs-1 és Zs-2 zsaluzatban vizsgáltam (26-27. ábra). A 60 cm-es szélességgel és magassággal rendelkező (Zs-1) zsaluzatban túvíbrátoros tömörítés mellett a laza halmaztömörtség a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével kismértékű, lineáris csökkenést mutat, ezt követően közel konstans. Tömörített állapotban a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével közel lineárisan, számottevő mértékben (9%-kal) csökken a halmaztömörtség, majd a falvastagság növelésével a továbbiakban közel állandó marad. A halmaztömörtség változása tömörített állapotban hasonló trendet mutat az OH 0/4 homok frakcióéhoz, míg a laza halmaztömörtség esetében a 20 és 50 cm közötti falvastagság tartományban látható hasonló, közel konstans tendencia, az értékek azonban mindkét állapotban alacsonyabbak, mint a homok frakció esetében; a falvastagságonként mért értékek eltéréseinek átlaga laza állapotban 7%, tömörített állapotban 9%. A 30 cm szélességű és magasságú Zs-2 zsaluzat esetében rázóasztalos tömörítés mellett a falvastagság 5 cm-ről 30 cm-re való növelésével a halmaztömörtség laza állapotban közel 8%-kal, tömörített állapotban 7%-kal nőtt. Mindkét állapotban a 20 cm-es falvastagságig nem tapasztaltam jelentős változást, a halmaztömörtség a falvastagság további növelésével azonban számottevően (10%-kal) megnövekszik. Az OK 4/8 kavics frakció a Zs-2 zsaluzat esetében az OH 0/4 frakcióhoz hasonló tendenciát mutat mind laza, mind tömörített állapotban, az értékek azonban alacsonyabbak mindkét esetben, laza állapotban átlagosan 7%-kal, tömörített állapotban 9%-kal.



26. ábra: Halmaztömörtség értékei a Zs-1 zsaluzat alkalmazásával, egy mérési sorozat alapján

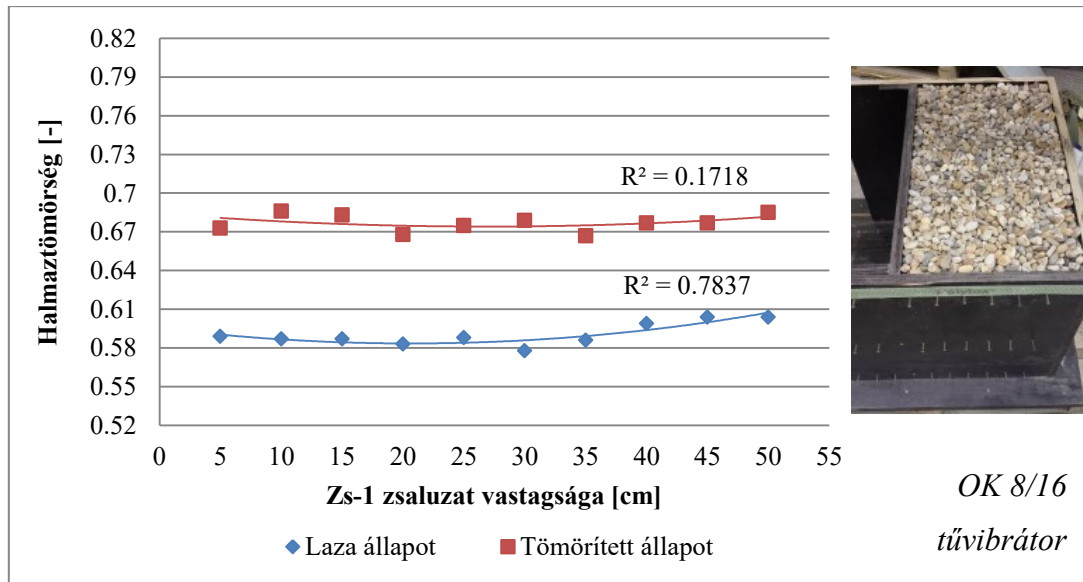


27. ábra: Halmaztömörtség értékei a Zs-2 zsaluzat alkalmazásával, 3 mérési sorozat átlagát véve

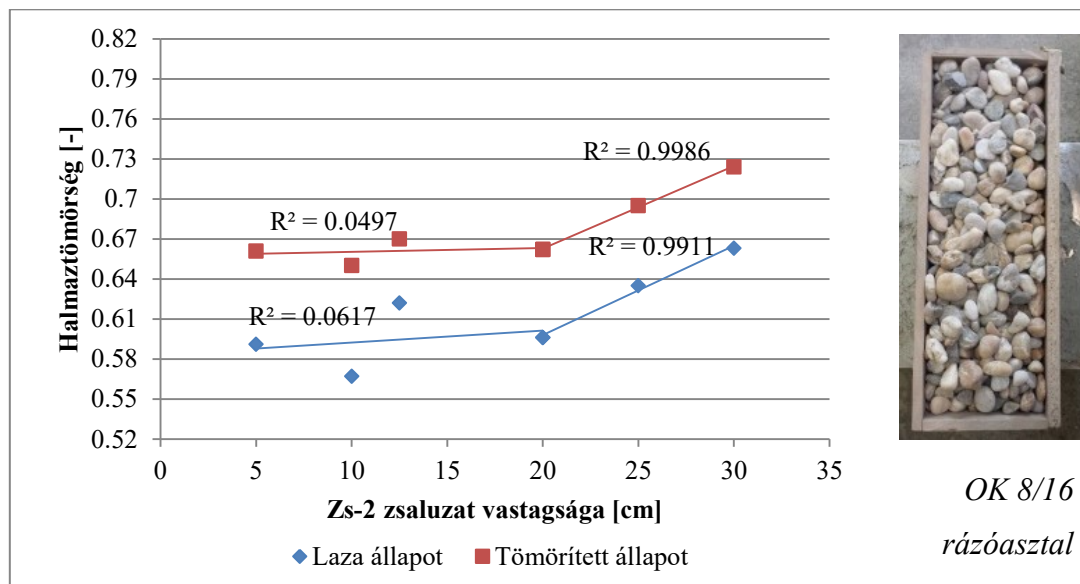
2.3.3 OK 8/16 frakció vizsgálata

Az OK 8/16 adalékanyag frakció halmaztömörségét a Zs-1 és Zs-2 zsaluzatban vizsgáltam (28-29. ábra). Laza állapotban a 60 cm-es szélességgel és magassággal rendelkező Zs-1 zsaluzat esetében laza állapotban a halmaztömörség a falvastagság 5-ről 30 cm-re való növelésével nem változik jelentősen, 30-ról 50 cm-re való növelésével kismértékű, közel lineáris növekedést mutat. A tendencia és a hozzá tartozó értékek hasonlóak az OK 4/8 kavics frakció eredményeihez. Tömörített állapotban a halmaztömörség a falvastagság növelésével nem változik jelentősen, közel konstans. A 30 cm-es szélességű és magasságú (Zs-2) zsaluzat esetében, rázóasztalos tömörítés mellett a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével a

halmaztömörtség sem laza, sem tömörített állapotban nem változik jelentősen. 20 és 30 cm között a halmaztömörtség laza állapotban több mint 12%-kal, tömörített állapotban közel 10%-kal nő. A halmaztömörtség változásának trendje hasonló az OK 4/8 kavics frakció eredményeihez, az értékek kissé alacsonyabbak, laza és tömörített állapotban átlagosan 2%-kal.



28. ábra: Halmaztömörtség értékei a Zs-1 zsaluzat alkalmazásával, egy mérési sorozat alapján

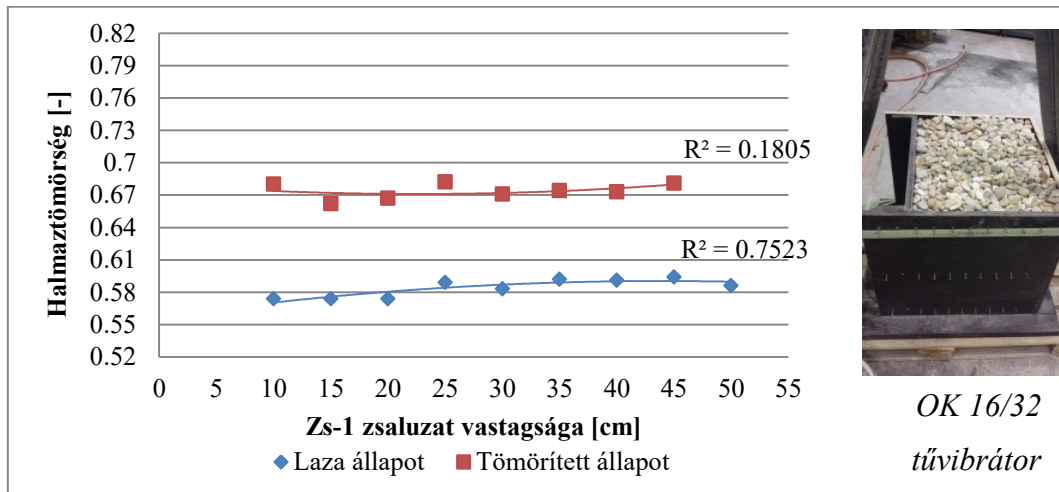


29. ábra: Halmaztömörtség értékei a Zs-2 zsaluzat alkalmazásával, 3 mérési sorozat átlagát véve

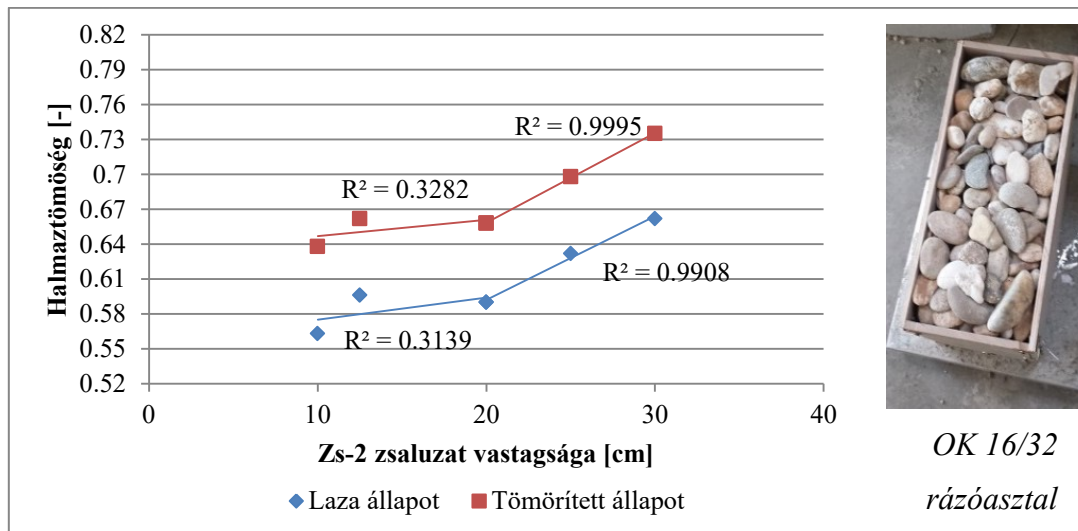
2.3.4 OK 16/32 frakció vizsgálata

Az OK 16/32 adalékanyag frakció halmaztömörségét a Zs-1 és Zs-2 zsaluzatban vizsgáltam (30-31. ábra). A vizsgálatból az 5 cm-es falvastagsághoz tartozó eredményeket a maximális szemmagyság figyelembevételével nem ábrázoltam a diagramokon. A 60 cm-es szélességgel

és magassággal rendelkező Zs-1 zsaluzat esetében a halmaztömörtség laza állapotban 2%-kal nőtt a falvastagság 10 cm-ről 50 cm-re való növelésével, míg túvibrátoros tömörítés mellett közel konstans. Az enyhe lineáris növekedés, valamint a kapott halmaztömörítési értékek hasonlóak, mint az OK 8/16 esetében. A 30 cm-es szélességű és magasságú (Zs-2) zsaluzat esetében a halmaztömörtség több mint 17%-kal nőtt laza állapotban, 15%-kal tömörített állapotban. A falvastagság 5-ről 20 cm-re való növelésével kismértékű, lineáris növekedés tapasztalható (3% laza, közel 5% tömörített állapotban), 20-ról 30 cm-re való növelésével jelentősebb. A tendencia hasonló, mint az OK 4/8 és OK 8/16 kavics frakciók esetében, a falvastagságonként mért értékek átlagosan 1-3% eltérést mutatnak. Az 5 cm-es falvastagsághoz tartozó értékek a Zs-1 zsaluzat esetében mindkét állapotban jelentősen alacsonyabbak (0.542 és 0.648), mint a 10 cm-es falvastagság esetében, a Zs-2 zsaluzat esetében laza állapotban alacsonyabb (0.537), tömörített állapotban magasabb (0.645).



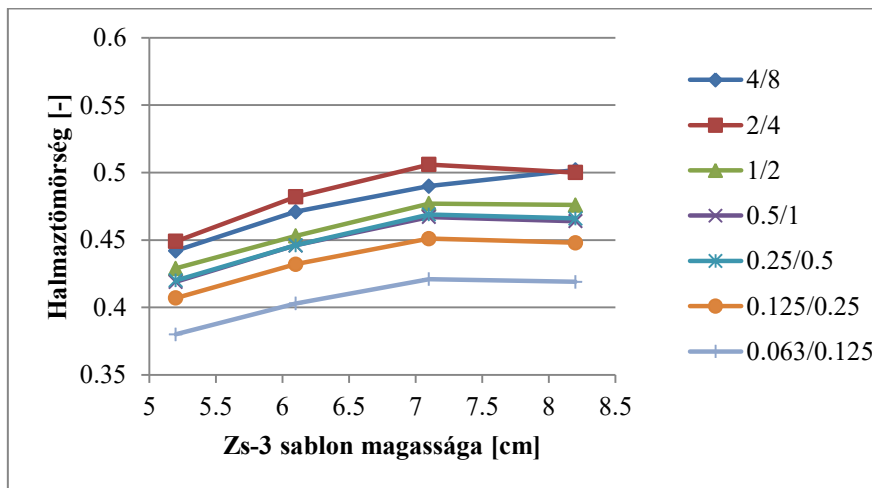
30. ábra: Halmaztömörtség értékei a Zs-1 zsaluzat alkalmazásával, egy mérési sorozat alapján



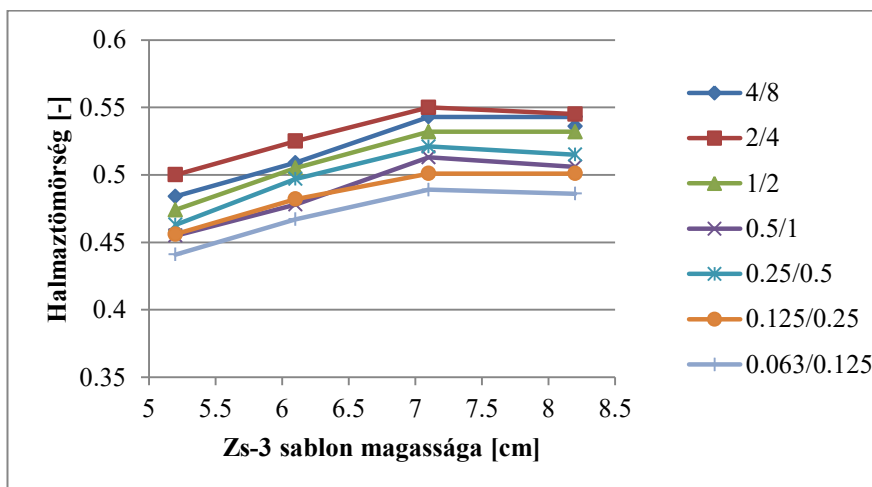
31. ábra: Halmaztömörtség értékei a Zs-2 zsaluzat alkalmazásával, 3 mérési sorozat átlagát véve

2.3.5 Komponensek vizsgálata

A szakirodalomban elsősorban a kisebb szemcseméretű kapcsán ismertek kísérleti adatok (2.1.3 Irodalmi adatok a zsaluzati méret és a halmaztömörtség összefüggéséről, 28. old.), így az összehasonlíthatóság érdekében az OH 0/4 finom frakció komponenseinek halmaztömörtségének változását vizsgáltam a 7.1 cm állandó átmérőjű, változó magasságú Zs-3 hengeres zsaluzatok alkalmazásával (32-33. ábra). A kis méretek miatt ejtéses kézi tömörítést használtam. A mérési adatokat a Melléklet 1.5 fejezete tartalmazza. Laza állapotban a henger magasságának 5.2 cm-ről 7.2 cm-re való növelésével a halmaztömörtség közel lineárisan nő, majd ezt követően konstans, ez a tendencia a tömörítés során sem változik. Az átlagos halmaztömörtség-növekedés 9-13%. A szemcseméret növelésével egyre nagyobb a halmaztömörtség értéke is, amely összhangban van a szakirodalmi adatokkal [50].



32. ábra: Finom frakció komponensek saját halmaztömörtsége a henger magasságának függvényében, laza állapotban, 3 mérési sorozat átlagát véve

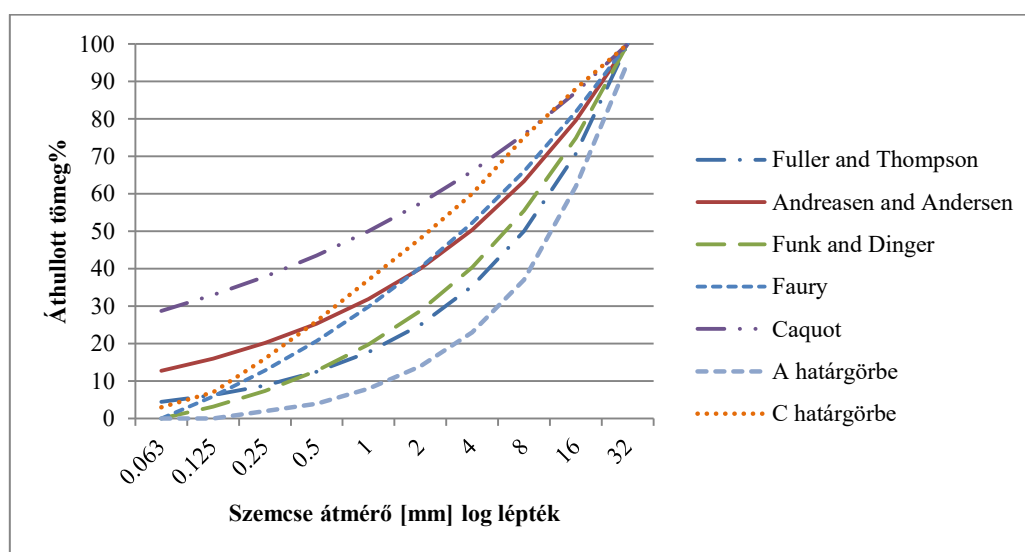


33. ábra: Finom frakció komponensek saját halmaztömörtsége a henger magasságának függvényében, tömörített állapotban, 3 mérési sorozat átlagát véve

2.3.6 Határgörbék vizsgálata

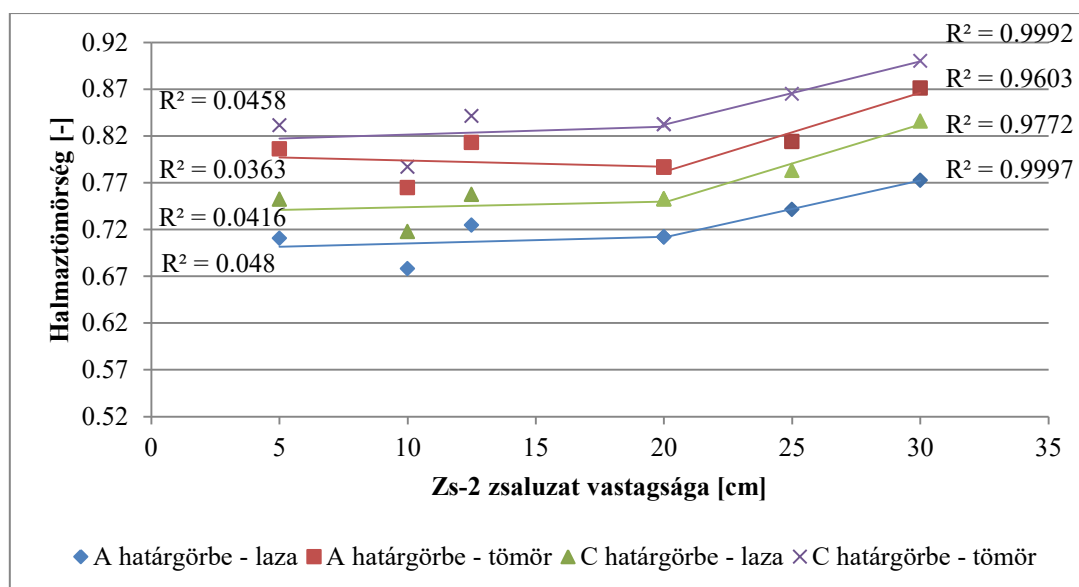
2.3.6.1 Halmaztömörség meghatározása száraz állapotban

A vizsgálatok során alkalmazott 4 frakciót szitavizsgálattal komponensekre bontottam, majd pontosan kikevertem az MSZ EN 12620:2013 szabvány [51] által meghatározott $D_{max}=32mm$ maximális szemnagysághoz tartozó „A” és „C” jelű határgörbék, amelyek szemeloszlási diagramját a 34. ábra mutatja, belefoglalva a 2.1.2.1 *Ideális szemeloszlási görbék (18. old.)* fejezetben bemutatott ideális szemeloszlási görbék diagramjába.



34. ábra: Az „A” és „C” jelű határgörbe szemeloszlása az ideális szemeloszlási görbékhez viszonyítva [50] (saját szerkesztés)

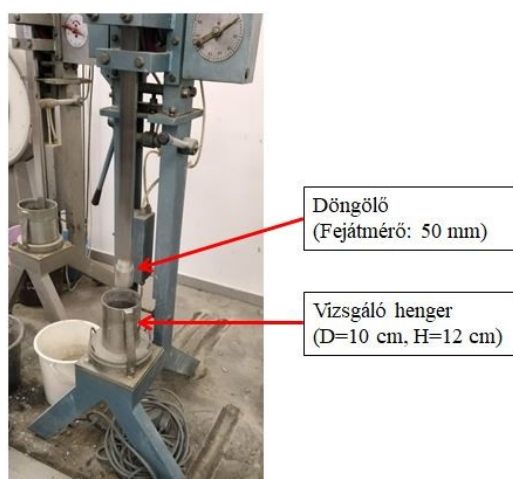
A két határgörbéhez tartozó mintát a 30 cm magassággal és szélességgel rendelkező Zs-2 zsaluzatban vizsgáltam, és rázóasztalos tömörítést alkalmaztam. A mintavételezés és a tömörítés módja megegyezik a 2.2.3.2 *Halmaztömörség meghatározása (34. old.)* fejezetben leírtakkal. A mérési adatokat a Melléklet 1.6 fejezete tartalmazza. Az „A” és a „C” jelű szemeloszlási görbéhez tartozó adalékanyag minta halmaztömörése mind laza, mind tömörített állapotban hasonló tendenciát mutat: a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével közel állandó, majd ezt követően lineárisan nő (35. ábra). A zsaluzat vastagságának 20-ról 30 cm-re növelésével az „A” jelű határgörbe halmaztömörése 9%-ot nő laza, és 11%-ot tömörített állapotban, míg a „C” jelű határgörbe esetében ezek az értékek 11% és 7%. Az egyes falvastagsághoz tartozó halmaztömörési értékek közötti eltéréseket vizsgálva, a nagyobb finomrészt tartalmazó „C” jelű adalékanyag laza állapotban átlagosan közel 6%-kal, tömörített állapotban közel 4%-kal nagyobb halmaztömörési értékeket ért el, mint a nagyobb szemcséket nagyobb arányban tartalmazó „A” jelű minta.



35. ábra: Az „A” és „C” jelű határgörbék alapján készített keverékek halmaztömöröse a zsaluzati méret függvényében, egy mérési sorozat eredményei

2.3.6.2 Tömöríthetőség vizsgálata

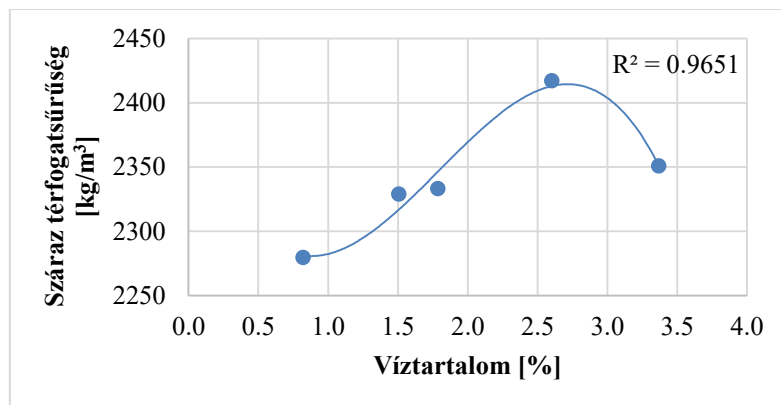
A mintákat az eddigiek során tömegállandóságig szárított állapotban vizsgáltam, azonban az adalékanyag halmaztömörségét, és így annak pépigényét befolyásolja a víztartalma is (2.1.1 A szemcsés halmazok tömörségét befolyásoló tényezők fejezet, 17. old.). A későbbi, betonösszetételre vonatkozó vizsgálatok során ezért szükséges ismerni az alkalmazott adalékanyag tömöríthetőségi jellemzőit. Emiatt a korábban vizsgált „A” és „C” jelű határgörbe esetén egyszerűsített Proctor vizsgálat [53] segítségével meghatároztam a minták tömöríthetőségét. A kísérleti berendezés a 36. ábrán látható.



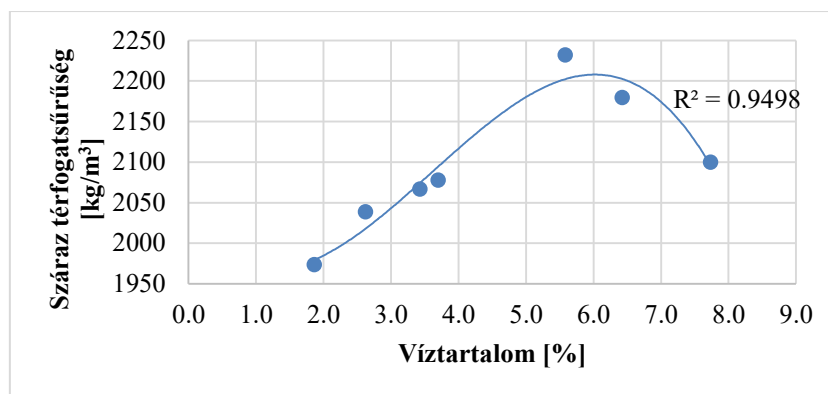
36. ábra: Az egyszerűsített Proctor vizsgálatához használt berendezés

Az „A” határgörbének megfelelő mintát 1 és 5% közötti, míg a „C” határgörbe szerinti mintát 1.5 és 7.5% közötti víztartalom mellett vizsgáltam, 1%-onként növelve azt. Az

előzőleg tömegállandóságig szárított mintákat a meghatározott vízmennyiséggel elkeverve a 10 cm átmérőjű és 12 cm magas acél hengerbe 3 rétegben, 25-25 ütéssel tömörítettem a 2.5 kg tömegű, 30.5 cm magasságból leejtett, 50 mm fejtátmérőjű döngölővel. A feltétgyűrűt levéve a felületet lehúztam, majd a henger térfogatából és a mért tömegből kiszámítottam a nedves térfogatsűrűséget. Ezt követően a vizsgált adalékanyagból kisebb mintákat vettem és kiszárítottam azokat, majd meghatároztam a tényleges víztartalmat és ennek ismeretében a száraz térfogatsűrűséget. A 37-38. ábrán a tényleges víztartalom függvényében láthatóak a két határgörbe száraz térfogatsűrűségének számított értékei, három mérési sorozat átlagát véve. A részletes mérési adatokat a Melléklet 1.7 fejezete tartalmazza. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az „A” jelű határgörbe szemeloszlásával rendelkező keverék száraz térfogatsűrűsége a víztartalmat 0.82%-ról 2.60%-ra növelve nő, majd ezután csökken. A 2.60%-os víztartalomhoz tartozó testsűrűség nedves állapotban 2518 kg/m^3 , a száraz térfogatsűrűség 2417 kg/m^3 . A „C” határgörbe esetében a víztartalmat 1.86%-ról 5.58%-ra növelve a testsűrűség és ezáltal a száraz térfogatsűrűség nő, majd ezt követően csökken. Az 5.58%-os víztartalomhoz tartozó testsűrűség 2319 kg/m^3 , a száraz térfogatsűrűség 2232 kg/m^3 . A mérési adatok közül a legnagyobb térfogatsűrűséget eredményező tényleges víztartalmat vettem figyelembe a további vizsgálatok során, így az „A” jelű határgörbe esetében 2.60%-ot, míg a „C” jelű görbe esetén 5.58%-ot.



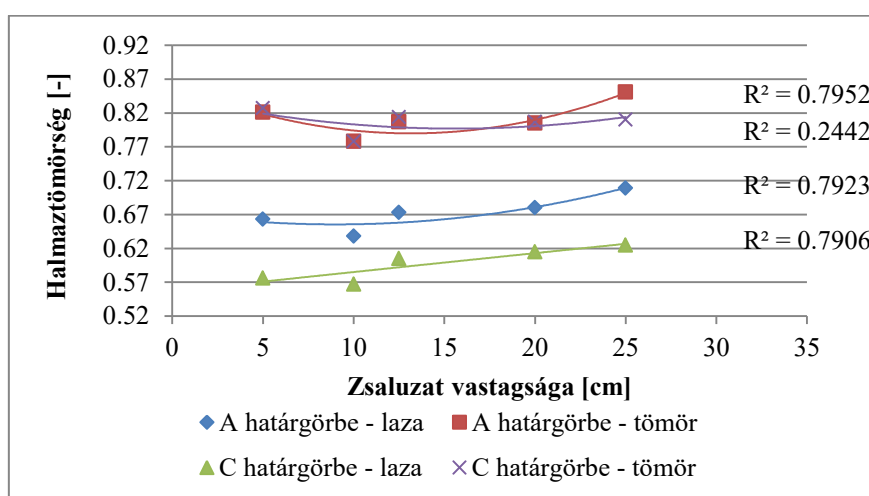
37. ábra: Az „A” jelű határgörbe tömöríthetőségi vizsgálata, három mérési adat átlagát véve



38. ábra: A „C” jelű határgörbe tömöríthetőségi vizsgálata, három mérési adat átlagát véve

2.3.6.3 Halmaztömörtség meghatározása víztartalommal

A mintákat az előzőekben meghatározott, maximális mért tömörséghez tartozó víztartalommal elkeverve, megvizsgáltam a halmaztömörség változását a 30 cm szélességű és magasságú, Zs-2 zsaluzatban rázóasztalos tömörítés mellett (39. ábra). A tömörítési mód megegyezett a 2.2.3.2 Halmaztömörtség meghatározása (34. old.) fejezetben leírtakkal. A mérési adatokat a Melléklet 1.8 fejezete tartalmazza. Laza állapotban – ellentétben a száraz vizsgálatok eredményeivel – a „C” határgörbe átlagosan alacsonyabb halmaztömörőségi értékeket mutat, mint az „A” görbe, a falvastagság 5 cm-ről 25 cm-re való növelésével a halmaztömörtség közel 9%-kal nő. Az „A” határgörbének megfelelő minta laza halmaztömörősége az 5 és 20 cm-es falvastagság-tartományban 3%-kal, ezt követően 4%-kal, így összesen 7%-kal nő. Tömörített állapotban a „C” görbe halmaztömörősége a falvastagság 5 cm-ről 25 cm-re való növelésével kismértékben csökken (2%). Az „A” görbe esetében a halmaztömörőség 4%-kal nő tömörített állapotban.

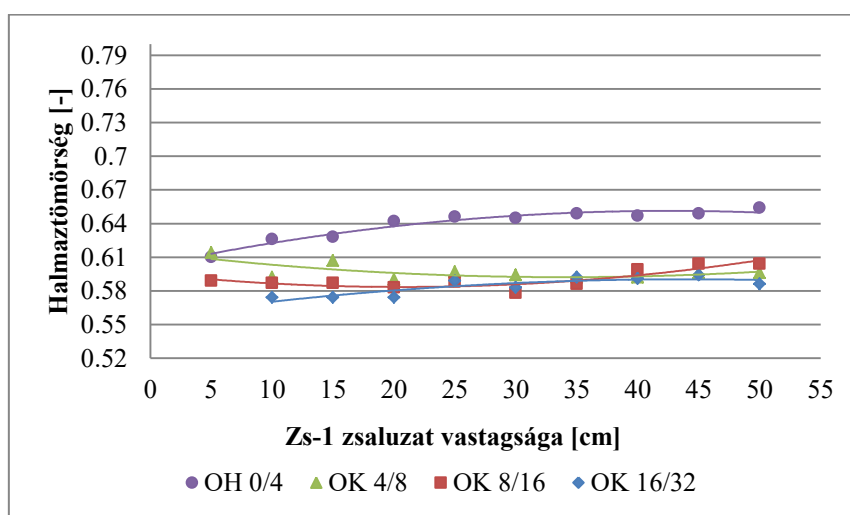


39. ábra: Az „A” és „C” jelű határgörbék alapján készített keverékek vizsgálata a maximális tömörséghez tartozó víztartalommal elkevert állapotban, egy mérési sorozat eredményei

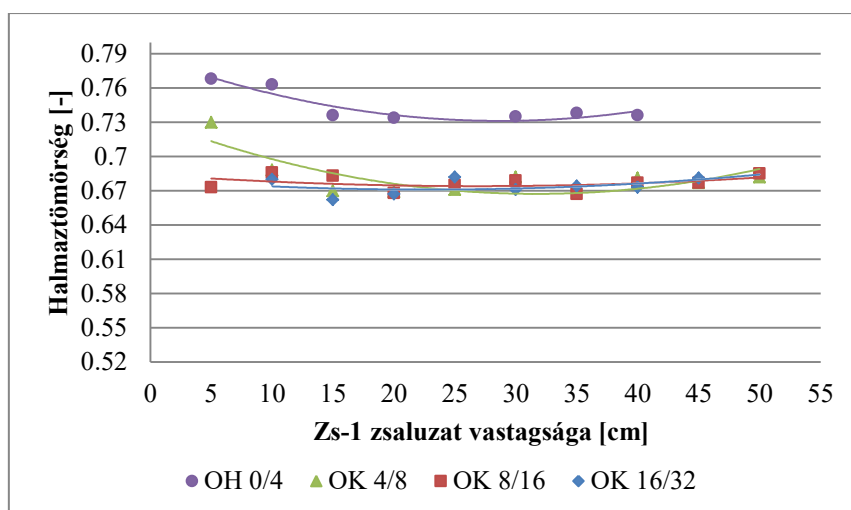
A halmaztömörtség változása a négy vizsgált esetben hasonló a száraz mintákéhoz: mind laza, mind tömörített állapotban az 5 és 20 cm-es falvastagság között nem változik jelentősen, ezt követően növekszik, valamint a 10 cm-es falvastagságnál minimumpontja van. A víztartalommal elkevert minták eredményeit összehasonlítva a száraz mintákkal kapott adatokkal, a laza halmaztömörség átlagosan 6%-kal kisebb az „A”, 26%-kal a „C” határgörbe esetén. Tömörített állapotban a halmaztömörség átlagosan 2%-kal nagyobb az „A” és 3%-kal kisebb a „C” határgörbe esetében.

2.3.7 Összefoglalás

A frakciók vizsgálati eredményeinek összefoglalását a 60 cm szélességű és magasságú Zs-1 zsaluzat esetében, laza állapotban és tűvibrátoros tömörítés mellett a 40-41. ábra mutatja. Az OH 0/4 homok frakció jól láthatóan elkülönül a kavics frakcióktól, a halmaztömörséget falvastagságonként vizsgálva, átlagosan 7-10%-kal magasabb laza állapotban, 9-11%-kal tömörített állapotban, mint a másik három frakcióé (8. táblázat). A homok frakció változása a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelése során jelentősebb, laza állapotban 5%-kal nő, tömörített állapotban 4.5%-kal csökken, a falvastagság további növelésével kismértékű a változás mindkét állapotban (0.5-2%).



40. ábra: Adalékanyag frakciók vizsgálata a Zs-1 zsaluzat alkalmazásával laza állapotban, egy mérési sorozat alapján



41. ábra: Adalékanyag frakciók vizsgálata a Zs-1 zsaluzat alkalmazásával tömörített állapotban, egy mérési sorozat alapján

A kavics frakciók esetében az összehasonlíthatóság érdekében a 10 cm-es falvastagságot tekintem a legkisebbnek. A halmaztömörség laza állapotban a falvastagság 10 cm-ről 50 cm-re való növelésével enyhén növekszik (0.5-3%), tömörített állapotban az OK 4/8 kavics frakció halmaztömörése enyhén csökken, az OK 8/16 és OK 16/32 frakcióké nem változik (9-10. táblázat). A maximális falvastagsághoz tartozó értékek közel azonosak a kavics frakcióknál.

8. táblázat: A halmaztömörési értékek összehasonlítása frakciónként a Zs-1 zsaluzat esetében

Vizsgált frakciók	A falvastagságonként mért halmaztömörési értékek közötti eltérések átlaga laza állapotban (absz. érték)	A falvastagságonként mért halmaztömörési értékek közötti eltérések átlaga tömörített állapotban (absz. érték)
OK 16/32 - OK 8/16	2%	1%
OK 16/32 - OK 4/8	3%	3%
OK 16/32 - OH 0/4	10%	11%
OK 8/16 - OK 4/8	1%	2%
OK 8/16 - OH 0/4	8%	10%
OK 4/8 - OH 0/4	7%	9%

9. táblázat: Halmaztömörség változása a Zs-1 zsaluzat esetében laza állapotban

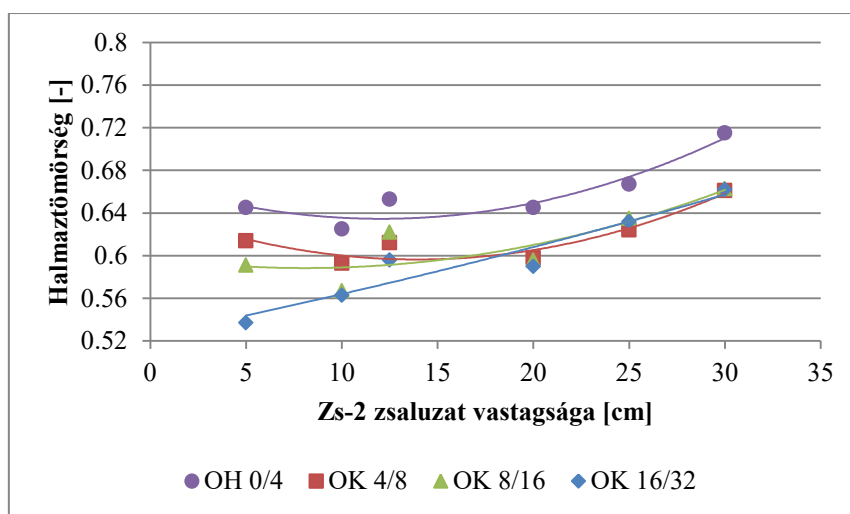
Vizsgált frakció	Halmaztömörség változása a falvastagság 10 cm-ről 20 cm-re való növelésével	Halmaztömörség változása a falvastagság 20 cm-ről 50 cm-re való növelésével	Halmaztömörség változása a falvastagság 10 cm-ről 50 cm-re való növelésével
OK 4/8	-0.5%	+1%	+0.5%
OK 8/16	-1%	+4%	+3%
OK 16/32	0%	+2%	+2%

A falvastagság 10 cm-ről 20 cm-re való növelésével a halmaztömörtség kismértékben csökken vagy stagnál, tömörített állapotban 2-3%-kal csökken. A falvastagság további növelésével a halmaztömörtség laza és tömörített állapotban egyaránt kismértékben nő. A frakciók halmaztömörősége tömörített állapotban átlagosan 14-16%-kal magasabb, mint laza állapotban. A falvastagságonként mért eredmények között a kavics frakciók esetében nincs jelentős különbség, átlagosan 1-3%.

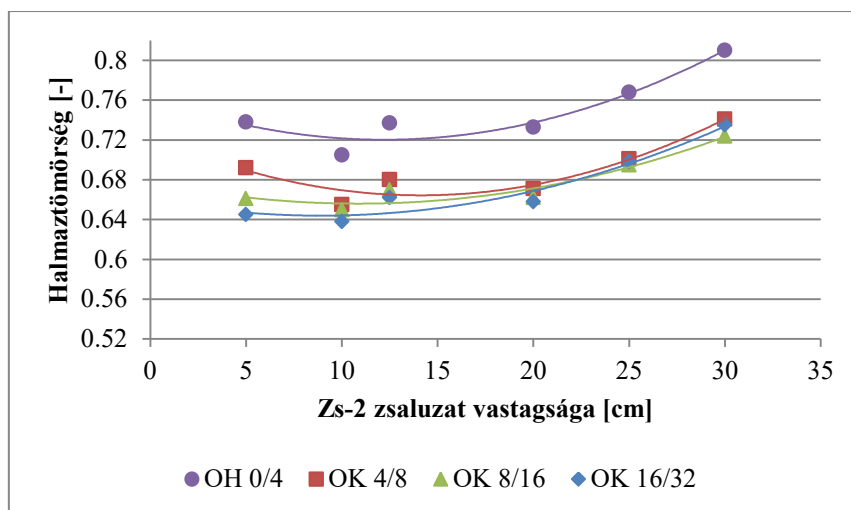
10. táblázat: Halmaztömörség változása a Zs-1 zsaluzat esetében tömörített állapotban

Vizsgált frakció	Halmaztömörség változása a falvastaság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével	Halmaztömörség változása a falvastaság 20 cm-ről 50 cm-re való növelésével	Halmaztömörség változása a falvastaság 5 cm-ről 50 cm-re való növelésével
OK 4/8	-3%	+2%	-1%
OK 8/16	-2.5%	+2.5%	0%
OK 16/32	-2%	+2%	0%

A frakciók vizsgálati eredményeinek összefoglalását a 30 cm szélességű és magasságú Zs-2 zsaluzat esetében, rázóasztalos tömörítés mellett a 42-43. ábra mutatja. A falvastagság 5 cm-ről 30 cm-re való növelése során a halmaztömörtség laza állapotban átlagosan 11%-os, tömörített állapotban 10.5%-os növekedést mutat a négy frakció eredményei alapján. Az OH 0/4 homok frakció halmaztömörőségi értéke átlagosan 7-11%-kal magasabb a kavics frakciókénál laza állapotban és 9-11%-kal tömörített állapotban (11. táblázat). A kavics frakciók esetében a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével a halmaztömörtség közel konstans a tömörítéstől függetlenül, ezt követően 10-11%-kal nő.



42. ábra: Adalékanyag frakciók vizsgálata a Zs-2 zsaluzat alkalmazásával laza állapotban, három mérési sorozat alapján



43. ábra: Adalékanyag frakciók vizsgálata a Zs-2 zsályzat alkalmazásával tömörített állapotban, három mérési sorozat alapján

11. táblázat: A halmaztömörési értékek összehasonlítása frakciónként a Zs-2 zsályzat esetében

Vizsgált frakciók	A falvastagságonként mért halmaztömörési értékek közötti eltérések átlaga laza állapotban (absz. érték)	A falvastagságonként mért halmaztömörési értékek közötti eltérések átlaga tömörített állapotban (absz. érték)
OK 16/32 + OK 8/16	3%	1%
OK 16/32 + OK 4/8	4%	3%
OK 16/32 + OH 0/4	11%	11%
OK 8/16 + OK 4/8	2%	2%
OK 8/16 + OH 0/4	8%	11%
OK 4/8 + OH 0/4	7%	9%

12. táblázat: Halmaztömörés változása a Zs-2 zsályzat esetében laza állapotban

Vizsgált frakció	Halmaztömörés változása a falvastagság 10 cm-ről 20 cm-re való növelésével	Halmaztömörés változása a falvastagság 20 cm-ről 30 cm-re való növelésével	Halmaztömörés változása a falvastagság 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével
OK 4/8	+1%	+10.5%	+11.5%
OK 8/16	+5%	+11%	+17%
OK 16/32	+5%	+12%	+17.5%

A kavics frakciók esetében a falvastagságonként mért értékek között kismértékű (1-4%) különbség van (11. táblázat). Az összehasonlíthatóság érdekében a továbbiakban is a 10 cm-es falvastagságot tekintem a legkisebbnek a kavics frakciónál. Laza állapotban a falvastagság 10 cm- 20 cm-re való növelésével a halmaztömörés enyhén nő, majd 30 cm-re való növelésével nagyobb mértékben nő (12. táblázat). Tömörített állapotban hasonló a

tendencia, jelentősebb változás itt is a 20 cm-es falvastagság 30 cm-re való növelésével tapasztalható (13. táblázat).

13. táblázat: Halmaztömörtség változása a Zs-2 zsaluzat esetében tömörített állapotban

Vizsgált frakció	Halmaztömörtség változása a falvastagság 10 cm-ről 20 cm-re való növelésével	Halmaztömörtség változása a falvastagság 20 cm-ről 30 cm-re való növelésével	Halmaztömörtség változása a falvastagság 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével
OK 4/8	+2.5%	+10.5%	+13%
OK 8/16	+2%	+9.5%	+11.5%
OK 16/32	+3%	+12%	+15%

A komponensek vizsgálata során a henger magasságának 5.2-ről 8.2 cm-re való növelésével átlagosan 9-13% halmaztömörtség-növekedést tapasztaltam, a változás lefutása hasonló Lecomte [50] vizsgálati eredményeihez, értéke pedig az eltérő adalékanyag minta és tömörítési módszer miatt különbözik. A szemcseméret növelésével az elérhető halmaztömörtség is nő, amely azonban így is jelentősen alulmarad a frakciókhoz képest.

A határgörbék halmaztömörősége száraz állapotban 20 cm-es falvastagságig elhanyagolható mértékben változik, ezt követően közel lineárisan nő mind laza, mind tömörített állapotban (14. táblázat). Száraz állapotban a „C” jelű határgörbe laza halmaztömörősége nagyobb, tömörített állapotban pedig azonos halmaztömörőség növekedést mutat, mint az „A” görbe. A víztartalom kedvezőtlen hatást gyakorol a „C” görbe tömöríthetőségére, a falvastagságonként mért értékek tömörített állapotban átlagosan 3%-kal alacsonyabbak, a 25 cm-es falvastagsághoz tartozó érték pedig közel 7%-kal alacsonyabb a száraz állapothoz képest (15. táblázat).

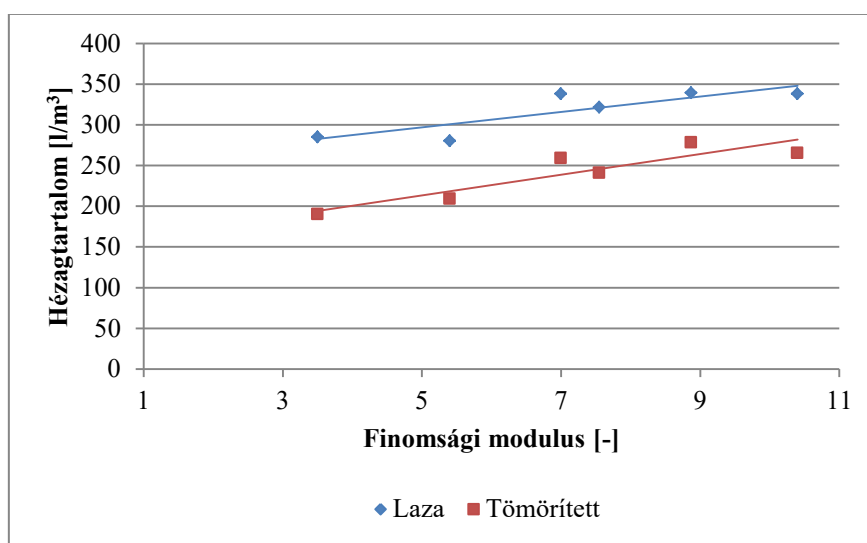
14. táblázat: Határgörbék halmaztömörségének változása a Zs-2 zsaluzat esetében száraz állapotban

Vizsgált minta	Halmaztömörtség változása a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével	Halmaztömörtség változása a falvastagság 20 cm-ről 30 cm-re való növelésével	Halmaztömörtség változása a falvastagság 5 cm-ről 30 cm-re való növelésével
A laza	0%	+8.5%	+8.5%
C laza	+0.5%	+10.5%	+11%
A tömörített	-2.5%	+10.5%	+8%
C tömörített	+1%	+7%	+8%

15. táblázat: Határgörbék halmaztömörségének változása a Zs-2 zsaluzat esetében vízzel elkevert állapotban

Vizsgált minta	Halmaztömörség változása a falvastaság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével	Halmaztömörség változása a falvastaság 20 cm-ről 25 cm-re való növelésével	Halmaztömörség változása a falvastaság 5 cm-ről 25 cm-re való növelésével
A laza	+2.5%	+4.5%	+7%
C laza	+7%	+1.5%	+8.5%
A tömörített	-2%	+5.5%	+3.5%
C tömörített	-2.5%	+0.5%	-2%

A vizsgálatok során mért halmaztömörégi értékek átlagát véve a (2) képlet segítségével meghatároztam az adalékanyag váz hézagtartalmát a négy frakció és a két határgörbe esetében száraz állapotban. A hézagtartalom és a finomsági modulus összefüggéseit a 44. ábra szemlélteti, mely alapján a finomsági modulus növelésével 19%-kal nő a hézagtartalom laza és 40%-kal tömörített állapotban.



44. ábra: A finomsági modulus és a hézagterfogat összefüggései

1. Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy a zsaluzat vastagságának változása befolyásolja az adalékanyag halmaztömörtségét. Az alábbi összefüggéseket állapítottam meg:

1.1 Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált, 4/8, 8/16 és 16/32 mm szemnagyságú bányászott kvarckavics adalékanyag frakciók halmaztömörősége fenolfilm bevonattal ellátott nyír rétegelt lemez zsaluhéj alkalmazásával, tűvibrátoros tömörítés mellett, 60 cm szélességű és magasságú zsaluzat esetében a falvastagság 10-20 cm közötti változtatásával csökken, 20-50 cm közötti változtatásával kismértékben nő.

1.2 Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált, 4/8, 8/16 és 16/32 mm szemnagyságú bányászott kvarckavics adalékanyag frakciók halmaztömörősége furnérlemez zsaluhéj alkalmazásával, rázóasztalos tömörítés mellett, 30 cm szélességű és magasságú zsaluzat esetében a falvastagság 10 cm-ről 20 cm-re való növelésével nem változik jelentősen, 20 cm-ről 30 cm-re való növelésével nő.

1.3 Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált, 0/4 mm szemnagyságú bányászott kvarchomok adalékanyag frakció halmaztömörősége 60 cm szélességű és magasságú, fenolfilm bevonattal ellátott nyír rétegelt lemez zsaluzat alkalmazásával tűvibrátoros tömörítés mellett, valamint 30 cm szélességű és magasságú furnérlemez zsaluzat alkalmazásával rázóasztalos tömörítés mellett magasabb a 4/8, 8/16 és 16/32 mm szemnagyságú bányászott kvarckavics frakciók halmaztömörőségénél.

1.4 Tézis

Az MSZ EN 12620:2003 szabvány szerinti „A” és „C” ($D_{\max}=32$ mm) határgörbének megfelelő adalékanyag minta halmaztömörősége furnérlemez zsaluhéj alkalmazásával, rázóasztalos tömörítés mellett, 30 cm szélességű és magasságú zsaluzat esetében a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével nem változik jelentősen, 20 cm-ről 30 cm-re való növelésével nő.

Vonatkozó saját publikációk: [b] [h]

3. A ZSALUZATI MÉRET ÉS A PÉPTELÍTETTSÉG HATÁSA A LÁTSZÓBETON SZERKEZETEK MINŐSÉGÉRE

3.1 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1.1 A látszóbeton fogalma

Látszóbeton alatt olyan minőségi betonszerkezetet értünk, amely az épületszerkezeti követelmények kielégítése mellett előre meghatározott, a kizsaluzást követően nyersen maradó, esztétikus felülettel bír. Jelen dolgozatban a monolit technológiával készített látszóbeton szerkezetekkel foglalkozom. Ujhelyi [54] alapján akkor beszélünk látszóbeton minőségről, ha teljesülnek a következő feltételek:

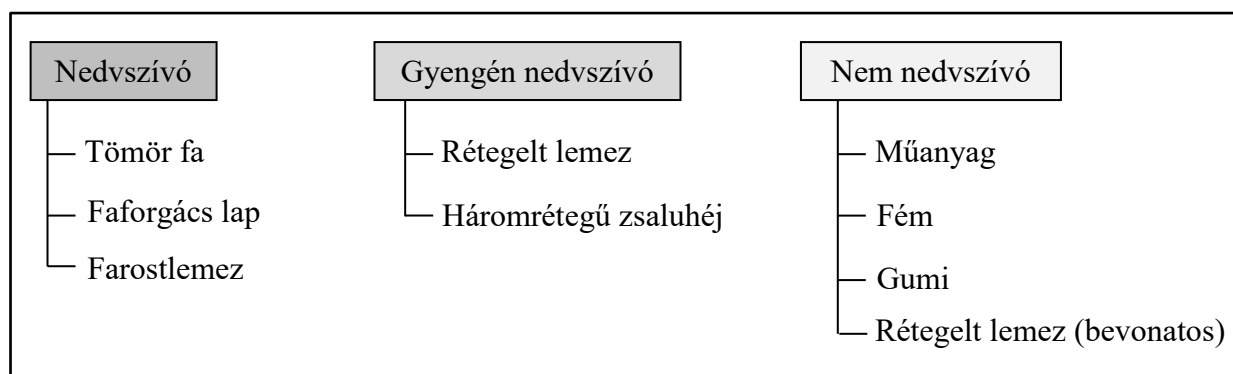
- a felületen sem a betonösszetétel, sem a kivitelezés módja, sem pedig külső szennyeződések hatására nem keletkeznek színeltérések,
- nem jelentkezik rajta karbonátosodás okozta egyenlőtlen kivirágzás,
- felülete egyenletes vagy a tervezettnél megfelelő,
- a sima felületen nem látszanak át a kavicszemek sötét foltokként,
- nincs rajta kivitelezési hiba okozta síkbeli eltérés,
- nem fészkes és nem porlékony,
- a pórusok mennyisége egy előre meghatározott határérték alatt marad.

A felület minőségét jelentős mértékben befolyásolja az alkalmazott alapanyagok és zsaluzatok típusa, minősége, a betonösszetétel, a kivitelezés módja és minősége, valamint az időjárási körülmények.

3.1.2 A zsaluhéjjal és formaleválasztóval szemben támasztott követelmények

3.1.2.1 Zsaluhéj

A láthatóan maradó betonfelületet egy finomrészben gazdag cement-film réteg adja, amely az alkalmazott zsaluzat tökéletes tükörképe, így annak minősége döntő jelentőséggel bír a végső megjelenés során. A felületi hibák előfordulása, valamint azok mértéke szoros összefüggésben van a zsaluzat nedvszívó képességével, így elsősorban e szempont szerint csoportosítjuk azokat (45. ábra).



45. ábra: Zsaluhéjak csoportosítása nedvszívó képesség alapján [55]

A nedvszívó zsaluhéjak a frissbetonból vizet vesznek fel, csökkentve ezzel a felület közeli réteg víz-cement tényezőjét, amely eredményeként sötétebb felület jön létre [56]. A zsaluhéj nedvszívó képességének a betonfelületre gyakorolt hatását a 16. táblázat tartalmazza.

16. táblázat: A zsaluzat nedvszívó képességének hatása a betonfelületre [57]

vizsgált hatás	nedvszívó	nem nedvszívó
betonfelület színe	sötétebb	világosabb
határfelülethez közeli víz-cement tényező	alacsonyabb	magasabb
víz- és légpórusok száma	kevesebb	több
porlékonysági hajlam	valamivel magasabb	alacsony
színeltérések	több	kevesebb
finomrész felgyülemelésének veszélye	kisebb	nagyobb
zsugorodásra és duzzadásra való hajlam	magasabb	alacsonyabb

Schulz [58,59,60] könyveiben részletesen foglalkozik az egyes nedvszívó és nem nedvszívó zsaluhéjak felületre gyakorolt hatásával, a felületi hibák lehetséges okaival. Mivel a nedvszívó képesség a felhasználási szám függvényében változik, ezért egymás mellett csak azonos korú és minőségű zsaluhéjakat szabad alkalmazni. A 17. táblázat a látszóbeton készítés során gyakran alkalmazott zsaluhéjak felületre gyakorolt hatását, valamint felhasználhatóságát foglalja össze. A végleges felület különbözőségét jól illusztrálja a 46. ábrán látható, különböző faanyagú zsaluhéjakkal készült felületek színe, textúrája, pórustartalma.

17. táblázat: Az egyes zsaluhéjak felületre gyakorolt hatása és felhasználhatósága [57]

Zsaluhéj típusa	A betonfelület jellemzői	Egyéb lehetséges hatások	Ajánlott felhasználási szám	
nedvszívó				
1	Fűrészelt deszka	sötét (magas nedvszívó képesség), a fa erezetét visszaadó felület	a betonfelületre ragadt farostok, facukor kiválásának veszélye, gyenge pórusképződés	1-4
2	Gyalult deszka	világosabb felület (kissé alacsonyabb nedvszívó képesség), simább struktúra	facukor kiválásának veszélye, erősebb pórusképződés	6-10
3	Faforgácslap	sötét felület (magas nedvszívó képesség)	jelentős színeltérések, foltosodás, gyenge pórusképződés	1-5
4	Farostlemez (sűrű, tömörített farost)	a faforgácslapnál is sötétebb felület (magas nedvszívó képesség)	szinte pórusmentes	7-12
gyengén nedvszívó				
5	Rétegelt lemez (nedvszívó filmréteggel bevont)	fényes, strukturálatlan, illetve enyhén strukturált, homogén felület	gyenge pórusképződés	4-10
6	Háromrétegű zsaluhéj (fenyődeszkák két irányban történő fektetése)	első használatnál sötétebb, majd egyre világosabb felület, enyhén strukturált	érzékeny a nedvességre, napsütésre – repedés, vetemedés	10-30
nem nedvszívó				
7	Műanyag	sima, világos felület	éleknél, átkötéseknél vízkiválás veszélye, kevés, nagyobb pórusok	30-100
8	Fém (acél)	sima, világos felület	rozsdafoltok, színeltérések, felhőképződés, kivirágzás veszélye	500-ig
9	Gumi (zsalumatrix)	matricától függően sima, fényes vagy strukturált felület, világos tónus	erősebb pórusképződés	50-ig
10	Rétegelt lemez (nem nedvszívó réteggel bevont)	fényes, világos, homogén felület	színeltérések, erősebb pórusképződés, felhőképződés, kivirágzás veszélye	30-40

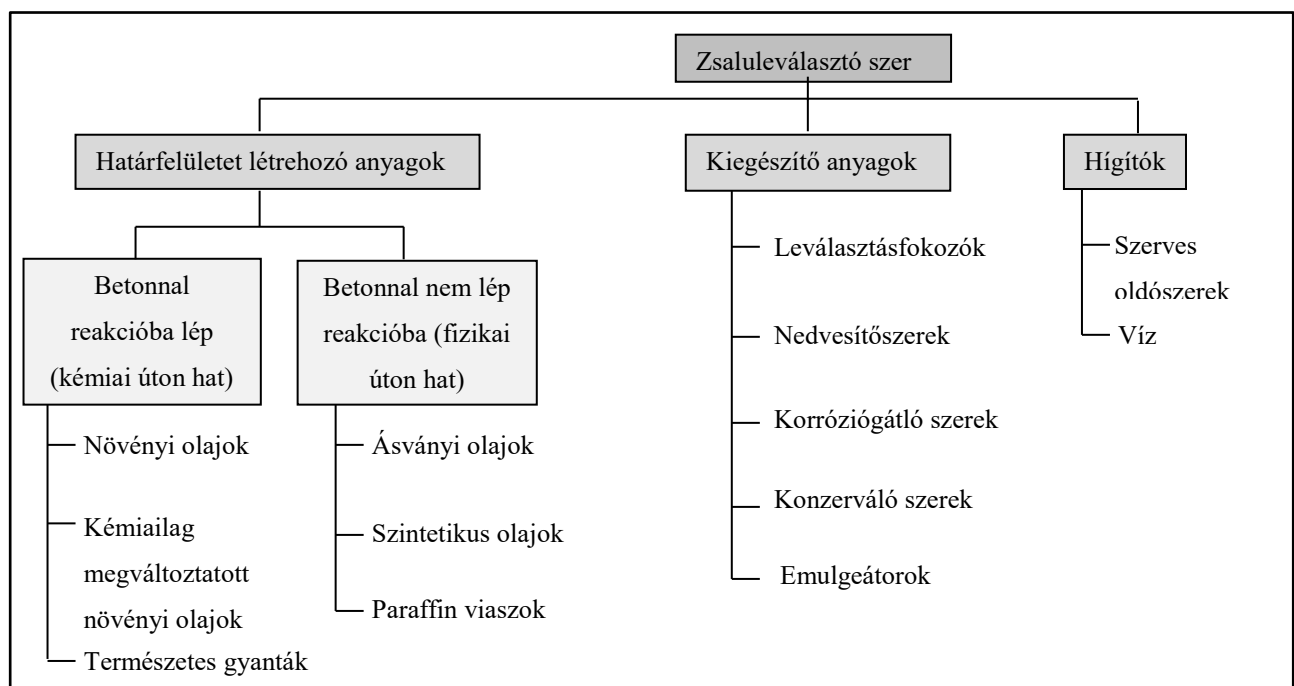


46. ábra: Különböző faanyagú zsaluhéjakkal készült betonfelületek [61]

A zsaluhéjon található hibák, karcolások, az átkötések helyei, az illesztések lenyomata ugyancsak megjelenik a betonfelületen, ezért a táblák kiosztását, az ankerlyukak helyét gondosan meg kell tervezni. A csatlakozások, valamint az élek kialakítása gyakran képezi hibák forrását az értékelés során, ezért fontos a zsalutáblák illesztéseinek megfelelő tömítése, az élek esetében pedig javasolt a gyakorlatban kedvelt háromszög alakú élképző alkalmazása. Az esetleges hibák elkerülése érdekében minden esetben – de főként a magas és különleges követelményszint esetében – érdemes próbafelületet készíteni, amely tartalmazza az összes olyan részletet (áttörés, kirekesztés, munkahézag, élképzés), amelyek a végleges szerkezeten is megjelennek [62].

3.1.2.2 Formaleválasztó szer

A zsaluleválasztó szer a beton zsaluzathoz tapadását megelőzve biztosítja annak sérülésmentes kizsaluzását. Ehhez egy határfelületet képez a frissbeton és a zsaluhéj között. Hatásmechanizmusuk alapján megkülönböztetünk olyan leválasztó szereket, amelyek fizikai úton hatnak, azaz nem lépnek közvetlen reakcióba a betonnal, míg a másik csoportba a kémiai úton ható szereket soroljuk. A leválasztó szer lehetséges összetevőit a 47. ábra mutatja.



47. ábra: Formaleválasztók csoportosítása [55]

A leválasztó szer további fontos tulajdonsága a nedvesítő képessége és viszkozitása, amely a zsaluzat és a frissbeton felület közötti tapadást befolyásolja. A leválasztó szer típusa, összetétele és a zsaluhéjjal, valamint a betonfelülettel való, úgynevezett határfelületi kölcsönhatása jelentős hatást gyakorol a látszóbeton felület minőségére. Schubert és Schäufele [63] kísérleti úton igazolta, hogy a leválasztó szer típusa, alkalmazott mennyisége közvetlen hatást gyakorol a pórusképződésre, valamint a felület közeli betonréteg hidratációjára is, így a nem megfelelő alkalmazása színeltérésekhez vezethet. A kutatók által kidolgozásra került az általuk vizsgált zsaluhéjak és leválasztó szerek tekintetében egy alkalmazási javaslat a kombinálhatóságra és a felhordási mennyiségre, azonban ez minden esetben ellenőrizendő. Mivel a legtöbb leválasztó szerre és zsaluhéjra nem rendelkezünk ilyen előírással, ezért érdemes próbafelületen tesztelni. Általános alapelv, hogy csak a szükséges mennyiséget szabad felhordani a megtisztított felületre egyenletesen, a felesleget pedig el kell távolítani.

3.1.3 A beton alapanyagaival és összetételével szemben támasztott követelmények

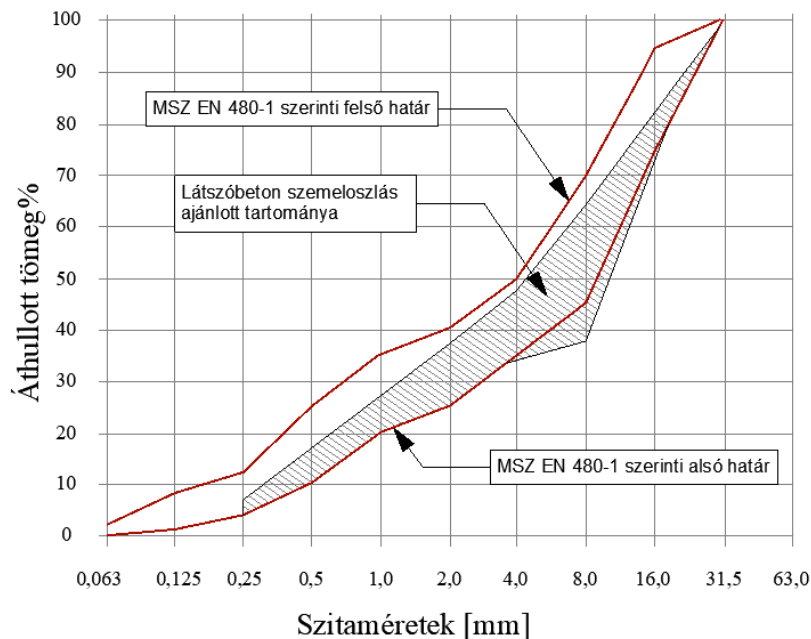
3.1.3.1 Betonösszetétel

Látszóbeton felületek esetében a betonösszetétel tervezése során a szokásos követelmények (szilárdság, tömörség, eltarthatóság, konzisztencia, bedolgozhatóság, stb.) mellett az előírt esztétikai követelményeket is teljesíteni kell. Fontos szempont, hogy a keverék szétosztályozódás-mentes legyen, a finomrész-tartalmat pedig úgy kell beállítani, hogy a felületi minőség elérése mellett a repedésérzékenység és a zsugorodási hajlam ne növekedjen káros mértékben. Tagolatlan, sima felületű látszóbeton esetében az adalékanyag maximális szemnagyságától függően F3-F4, átlagosnál jobb minőségű vagy strukturált felületek esetében F5, öntömörödő betonok esetében F6 jelű konzisztencia javasolt. Adalékszer nélküli beton esetében az F2 konzisztenciához tartozó víztartalmat nem ajánlott alulmúlni [64]. A betonösszetétellel szemben támasztott további fontos követelmény látszóbeton technológia esetén az összetevők minőségének változatlansága. A víz-cement tényező, a keverési, tömörítési és utókezelési időtartam és módszer, valamint lehetőleg a kötési hőmérséklet is a látszóbeton készítés teljes folyamata során maradjon állandó [65]. A víz-cement tényezőt maximum 0.55 vagy az alatti értékre javasolt beállítani [61].

3.1.3.1.1 Adalékanyag

Javasolt a finomrészben ($d < 0.125 \text{ mm}$) gazdag, folyamatos szemeloszlású adalékanyag alkalmazása (48. ábra), melynek minimális mennyisége a maximális szemnagyság

függvénye. Erre többféle ajánlás született [54,65,66], az Asztalos [55] által javasolt, a cementtel együtt értelmezett minimális finomrész tartalmat a 18. táblázat tartalmazza. A túlságosan sok finomrész tartalom hatására azonban esetenként a kavicszemek átlátszanak a külső betonrétegen, amely elsősorban a lépcsős szemeloszlás alkalmazásánál fordul elő.



48. ábra: Javaslat látszóbeton szemeloszlási görbére [55] (saját szerkesztés)

18. táblázat: Ajánlás a minimális finomrész tartalomra [65]

D_{\max} [mm]	Gömbölyű szemű adalékanyag [kg/m ³]	Zúzott adalékanyag [kg/m ³]
8	500	525
16	425	450
32	375	400

Célszerű gömbölyű szemű adalékanyag alkalmazása, melyben a 4-8 mm közötti frakció mennyiségét a folyamatos szemmegoszlás biztosítása mellett javasolt alacsonyan tartani [65]. A betonfelület színét jelentősen befolyásolja a homok színe, ezért a szükséges adalékanyag mennyiséget célszerű egy lelőhelyről, egy kotrásból leszállítani.

3.1.3.1.2 Cement és kiegészítő anyagok

Látszóbeton készítéséhez minden érvényben lévő cementfajta felhasználható, azonban a tervezés során figyelembe kell venni a cement színét és ezáltal a felületre gyakorolt hatását. Mivel a portlandcement összetétele egy gyáron belül is ingadozhat, - ami akár a beton színén is megjelenhet - ezért érdemes a kellő mennyiséget egy gyártási ciklusból megrendelni. Fehér

cement alkalmazása esetén meglehetősen világos árnyalat érhető el, míg szürke vagy sötétszürke portlandcement használatával erőteljes, sötét színt érhetünk el. A magasabb kohósalak vagy mészkő tartalmú cementek világosabb, míg a pernyét tartalmazó cementek sötétebb színt eredményeznek (49. ábra) [67].



49. ábra: Különböző cement alkalmazásával készített felület: a) kohósalak-cement, b) pernyét tartalmazó cement, c) mészkő-tartalmú cement [67]

Mivel a hidratáció során felszabadult kalcium-hidroxid a felületre diffundál, majd ott karbonátosodik, a portlandcementekből készített beton felülete kezdetben sötét, majd egyre világosabbá válik. Azonban ha a beton tömörsége nem egyenletes, a folyamat erőteljes színeltérésekhez vezethet. Tekintettel kell lenni arra is, hogy a különböző fajtájú cementek kötési ideje változó, ebből adódóan a hőfejlődés mértéke is eltérő lehet. Látszóbetonok esetén ajánlatos lassan szilárduló, kis hőfejlődésű, kivérzésre kevésbé hajlamos cementet választani. A Sika [54,55] ajánlása szerinti minimális cementtartalmat a maximális szemnagyság függvényében a 19. táblázat tartalmazza.

19. táblázat: Ajánlás a legkisebb cementtartalomra [55]

D_{\max} [mm]	Gömbölyű szemű adalékanyag [kg/m ³]	Zúzott adalékanyag [kg/m ³]
8	380	420
16	330	360
32	300	330

A friss vagy megszilárdult beton tulajdonságainak javítására gyakran alkalmaznak kiegészítő, finom szemű adalékokat, amelyet általában jelentős mennyiségben, 5-20 tömeg%-ban adnak a betonhoz. Ezeket a kiegészítő anyagokat két csoportba soroljuk:

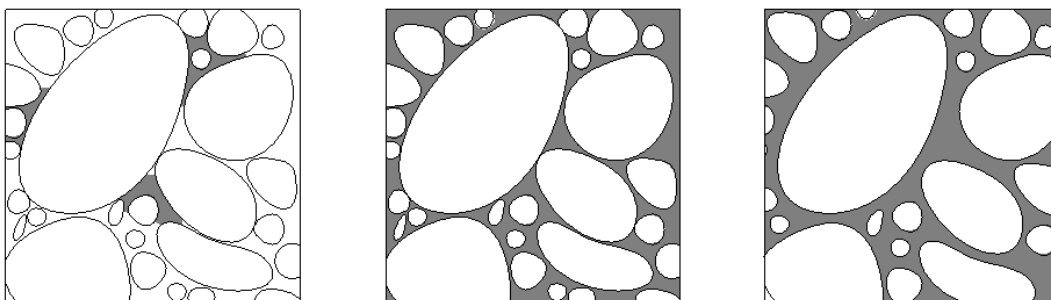
- típus: a közel inert, azaz kémiai reakcióba nem lépő anyagok
- típus: a puccolános vagy látens hirtraulikus anyagok, amelyek különböző mértékben kémiai reakcióba is lépnek.

Az első típusba tartoznak a szemeloszlás javítására alkalmazott mészköliszt vagy kvarcliszt, illetve a beton színezéséhez használatos pigmentek. A második típusba tartozik a beton

szilárdsági és tartóssági tulajdonságainak javítására használt pernye, szilikapor, valamint a kohósalak. A kiegészítő anyagok frissbetonra gyakorolt hátrányos hatásait egyensúlyban kell tartani a felület esztétikai követelményeivel. A finom szemű kiegészítő anyagok hatására megnő a keverék vízigénye, amely látszóbeton esetén különös odafigyelést igényel. A színeltérések és megnövekedett porozitás elkerülése miatt a víztartalom ingadozása kerülendő, valamint meg kell előzni a vízkiválást.

3.1.4 A péptelítettség hatása a beton mechanikai tulajdonságaira

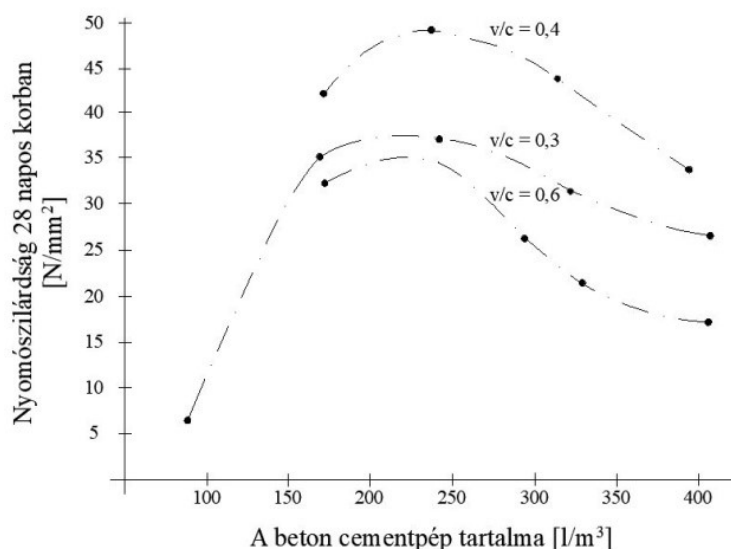
A megszilárdult beton szilárdságára és tartósságára hatással van a beton porozitása, melynek mértékét a frissbeton levegőtartalma és a kötéshez szükségesen túli víz mennyisége határozza meg. A frissbeton levegőtartalmát pedig elsősorban a beton péptelítettsége befolyásolja, de függ továbbá a tömörítés módjától és mértékétől, az adalékanyag minőségétől és az esetlegesen alkalmazott légpórus képző adalékszertől. A péptelítettség fogalma azt fejezi ki, hogy a frissbetonban a cementpép milyen mértékben tölti ki az adalékanyag váz hézagait. Telítetlen állapot esetében a cementpép nem tölti ki teljesen a hézagokat, ebben az esetben a keverék cementpép tartalma kisebb, mint az adalékanyag pépigénye. Telített állapotban ez a két érték megegyezik és a cementpép épp kitölti a hézagokat. Túltelített állapotban több cementpépet alkalmazunk, mint az adalékanyag pépigénye, így az adalékanyag szemcsék kissé eltávolodnak egymástól, úsznak a pépben (50. ábra).



50. ábra: Péptelítettség, a) telítetlen, b) telített, c) túltelített keverék (saját szerkesztés)

A telített vagy túltelített beton levegőtartalma megfelelő tömörítés mellett elméletileg zérus, ezzel szemben a jól tömörített, de telítetlen beton nem lehet levegőmentes, ezáltal a szilárdsága is kisebb lesz. A 0.38-nál nagyobb, állandó víz-cement tényező mellett azonban a túltelített beton porozitása is nagyobb lesz, mint a telített betoné, ebből adódóan csökken a szilárdsága [13,68]. Azonos szemeloszlású adalékanyagból és állandó víz-cement tényezővel készített, különböző péptartalmú keverékek nyomószilárdságának változását mutatja az 51. ábra, Ujhelyi [13] alapján. A nyomószilárdság a beton telített állapotában a legnagyobb, ha a

beton fokozatosan telítetlenné válik, a szilárdság jelentős mértékben csökken, míg ha fokozatosan túltelítetté válik, a szilárdság kisebb mértékben csökken.



51. ábra: A beton nyomószilárdságának változása a péptartalom függvényében, $D_{max}=32$ mm, $m=6.87$ [13] (saját szerkesztés)

A porozitás csökkentésének és ezáltal a nyomószilárdság növelésének egyik lehetséges módja az egyre kisebb víz-cement tényező alkalmazása túltelített beton esetében, ahol a konzisztenciát adalékszerek használatával lehet állandó szinten tartani. A beton mechanikai tulajdonságait tekintve az adalékanyag pépigényén túl a cementtartalom növelésének csekély gyakorlati haszna van, a szilárdságnövekedés ugyanis nem arányos a többlet cementmennyiséggel azonos konzisztencia esetében. Azonos víz-cement tényező mellett pedig az elérhető szilárdság általában kisebb, mint telített betonnál, továbbá felmerül a kivérzés problémája a túlzott folyósság miatt [68].

3.1.5 A péptelítettség hatása a látszóbeton felületi minőségére

Látszóbeton esetében a gyakorlatban általában túltelített betonösszetételt szoktak alkalmazni a jobb felületi minőség elérése érdekében. Ellentétben a péptelítettség mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával, ez a téma rendkívül kevésbé kutatott, szakirodalmi anyagok jelenlegi ismereteim szerint nem állnak rendelkezésre. Látszóbetonnal, betontechnológiával foglalkozó szakemberek tapasztalatai alapján az 50-70 l/m³-rel túltelített keverék ideális minőségi felület létrehozására. Ebből kiindulva 2017-ben vizsgáltam a péptelítettség és felületi minőség összefüggéseit egy nedvszívó és egy nem nedvszívó zsaluhéj esetében [a]. A kísérleti eredmények alapján a péptelítettség növelésével jelentősen javul a felület minősége, a felületi pórustartalom, a textúra és a színtónus egyenlőség

szempontjai alapján a legmagasabb követelményszintet a jelentősen tútelített (+121 l/m³) keverék adta. A vizsgált zsaluzat falvastagsága 10 cm volt. Arról azonban továbbra sincs információnk, hogy egy adott péptelítettségű keverék ugyanazt a felületi minőséget eredményezi-e különböző falvastagságú zsaluzatok esetében is.

3.2 KÍSÉRLETEK FELÉPÍTÉSE

3.2.1 Alkalmazott anyagok

3.2.1.1 Alkalmazott adalékanyag

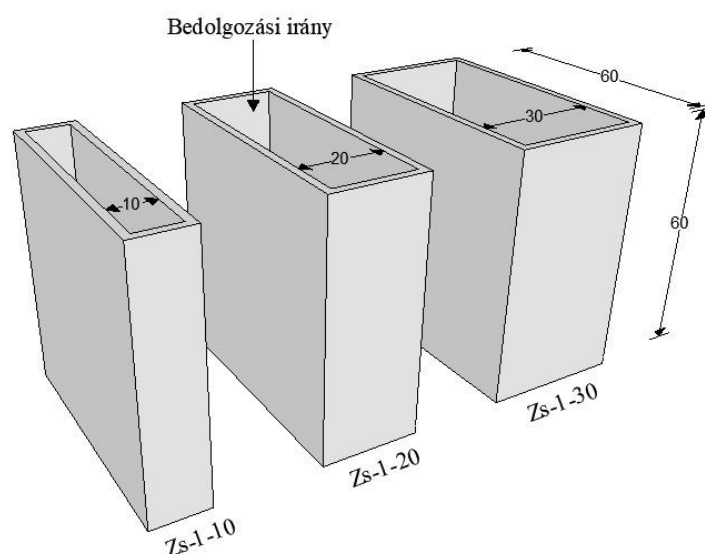
A vizsgálatok során a 2.2.1 *Alkalmazott adalékanyag* (31. old.) fejezetben bemutatott, a levéli Ing. Kotzian Kft. telephelyéről származó bányászott osztályozott kvarckavics és kvarchomok frakciókat alkalmaztam. Az adalékanyagot szitálás során 0.063; 0.125; 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8; 16; 32 mm átmérőjű komponensekre bontottam, melyekből az MSZ EN 12620:2013 szabvány szerinti „C” jelű határgörbének megfelelő szemeloszlású keveréket állítottam elő.

3.2.1.2 Alkalmazott cement és adalékszerek

A próbatestek készítéséhez Lafarge Pro EN 197-1 – CEM II/A-S 42,5 R típusú cementet használtam egy gyártási ciklusból, $\rho_c = 3.12 \text{ g/cm}^3$ testsűrűséggel. Az azonos konzisztencia beállítása érdekében Sika ViscoCrete – 4025 Ultra típusú polikarboxilát alapú folyósítószer alkalmaztam.

3.2.1.3 Alkalmazott zsaluhéj és zsaluleválasztó szer

A vizsgálatok során a 2.2.2 *Alkalmazott zsaluzatok* (32. old.) fejezetben bemutatott 60 cm-es magassággal és szélességgel rendelkező, Zs-1 zsaluzatot használtam, 10 (Zs-1-10), 20 (Zs-1-20) és 30 cm-es (Zs-1-30) vastagságokkal (52. ábra). Az alkalmazott falvastagságok méreteit a magasepítési gyakorlatban általánosan használt méretek alapján választottam meg.



52. ábra: Alkalmazott zsaluzatok és jelölésük (méretek [cm]-ben)

A nem nedvszívó zsaluzat a 2.2.2 *Alkalmazott zsaluzatok (32. old.)* fejezetben bemutatott vizsgálatokhoz hasonlóan, a JAF Holz Magyarország Kft. által gyártott 21 mm vastag nyír rétegelt lemezből készült, 120 g/m² fenolfilm bevonattal mindkét oldalán (53. ábra). Mindhárom vastagsági méret esetében új zsaluhéjat alkalmaztam a próbatestek összehasonlíthatósága érdekében.



53. ábra: Alkalmazott zsaluhéj [69]

A sérülésmentes kiszaluzás érdekében Sika Separol N ásványi olaj bázisú formaleválasztó szert használtam a zsaluzatokon. A formaleválasztó szer alkalmazható nedvszívó és nem nedvszívó zsaluzatokhoz, érzéketlen a vibrálás okozta rázkódásra, így alkalmas a választott zsaluhéjhoz. A leválasztó szert szórófej segítségével vittem fel a felületre.

3.2.2 Betonösszetételek meghatározása

3.2.2.1 Pépigény meghatározása

A halmaztömörség értékéből meghatározható az adalékanyag mértékadó térfogata (V_{ao} [liter/m³]), amely megmutatja, hogy egységnyi térfogatba mennyi adalékanyagot lehet betömöríteni. Az adalékanyag váz hézagait kitöltő cementpép tartalmát pedig az adalékanyag pépigényének (V_{po}) nevezzük:

$$V_{po} = 1000 - V_{ao} \text{ [liter/m}^3\text{]} \quad (27)$$

A beton telítettségét (ΔV_p) pedig az adalékanyag pépigényének és a beton tényleges péptartalmának (V_p) különbsége adja:

$$\Delta V_p = V_p - V_{po} \text{ [liter/m}^3\text{]} \quad (28)$$

Telítetlen a beton, ha $\Delta V_p < 0$, azaz $V_p < V_{po}$, tehát a péptartalom kisebb, mint az adalékanyag pépigénye. Telített a beton, ha $\Delta V_p = 0$, azaz $V_p = V_{po}$, tehát a péptartalom egyenlő az adalékanyag pépigényével. Túltelített a beton, ha $\Delta V_p > 0$, azaz $V_p > V_{po}$, tehát a péptartalom nagyobb, mint az adalékanyag pépigénye.

Az alkalmazott „C” jelű határgörbe szerinti szemeloszlás esetében a mértékadó térfogat meghatározásához a 2.3.6.3 *Halmaztömörség meghatározása víztartalommal* (46. old.) fejezetben bemutatott, maximális száraz testsűrűséghez tartozó víztartalommal elkevert minták tömörített állapotban mért halmaztömörégi értékek (39. ábra) átlagát vettem alapul:

$$\phi_{C, \text{átlag}} = 0.805 \quad (29)$$

A vizsgálatok során tehát azzal a feltételezéssel élek, hogy megfelelő tömörítés mellett a „C” határgörbe szerinti szemeloszlás alkalmazásával az adalékanyag halmaztömörége eléri a 0.805-ös értéket. Ez alapján az adalékanyag mértékadó térfogata:

$$V_{ao,C} = 805 \text{ liter}/m^3 \quad (30)$$

Ez alapján az alkalmazott adalékanyag telített állapothoz szükséges pépigénye:

$$V_{po,C} = 1000 \text{ liter}/m^3 - V_{ao,C} = 1000 - 805 = 195 \text{ liter}/m^3 \quad (31)$$

3.2.2.2 Alkalmazott betonösszetételek

A betonösszetételek tervezésekor a frakciók mért testsűrűségének az átlagát, $\rho_a = 2628 \text{ kg}/m^3$ vettem alapul. Négy betonösszetételt határoztam meg oly módon, hogy a kiindulási péptelítettség értéke a gyakorlatban javasolt értékhez közeli legyen. Állandó ($v/c=0.50$) víz-cement tényező mellett a cement és víz mennyiségét három lépcsőben emeltem, így a keverékek túltelítettsége +76 és +150 l/m^3 között változik (20. táblázat).

20. táblázat: Alkalmazott betonösszetételek

Keverék jelölése	Cement	Víz	Adalékanyag	Telítettség	Víz-cement tényező	Folyósítószer
	[kg/m^3]	[l/m^3]	[kg/m^3]	[l/m^3]		Cement tömeg%
1.	330	165	1893	+76	0.50	1.11
2.	360	180	1828	+101	0.50	1.18
3.	390	195	1763	+126	0.50	0.50
4.	420	210	1698	+150	0.50	0

3.2.3 Kísérletek végrehajtásának a menete

3.2.3.1 Vizsgálatok előkészítése

A két szabványos határgörbe közül a megfelelő szemeloszlás kiválasztásához próbakeverést végeztem a 2. jelű keverék alkalmazásával, melynek során az „A” jelű határgörbével előállított keverék szétosztályozódást mutatott, nehezen bedolgozható volt. Ezzel szemben a „C” jelű határgörbével előállított keverék konzisztenciája és bedolgozhatósága megfelelőnek bizonyult, így a továbbiakban ezt a szemeloszlást alkalmaztam a próbatestek készítéséhez.

3.2.3.2 Próbatestek készítése

A négy keverék és három zsaluzati vastagság (Zs-1-10, Zs-1-20, Zs-1-30) alkalmazásával összesen 12 látszóbeton próbatestet készítettem, a 21. táblázat szerinti jelöléssel. Egy sorozatnak az azonos vastagságú, a négy meghatározott keverékkel készített próbatesteket vettem, ahol minden sorozat esetében új zsaluhéjat alkalmaztam. Minden sorozatot az 1. számú keverékkel kezdtem és sorban haladtam. A keverékek területmérés szerinti konzisztencia értékét folyósítószer adagolásával az F4 osztályra állítottam be minden összetétel esetében. A frissbetont három rétegben, 5x5 cm-es hálóban tűvibrátoros tömörítést alkalmazva dolgoztam be a zsaluzatba. Minden keverékből legalább 6 db szabványos 150mm élhosszúságú kockát, valamint legalább 3 db 70x70x250 mm méretű hasábot készítettem a péptelítettség a beton mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálatához.

21. táblázat: Próbatestek jelölése

Zsaluzat	Keverék	Próbatest jelölése	Kétoldali felület jelölése
Zs-1-10	1.	P11	P11_01; P11_02
	2.	P12	P12_01; P12_02
	3.	P13	P13_01; P13_02
	4.	P14	P14_01; P14_02
Zs-1-20	1.	P21	P21_01; P21_02
	2.	P22	P22_01; P22_02
	3.	P23	P23_01; P23_02
	4.	P24	P24_01; P24_02
Zs-1-30	1.	P31	P31_01; P31_02
	2.	P32	P32_01; P32_02
	3.	P33	P33_01; P33_02
	4.	P34	P34_01; P34_02

3.2.3.3 Nyomószilárdság vizsgálata

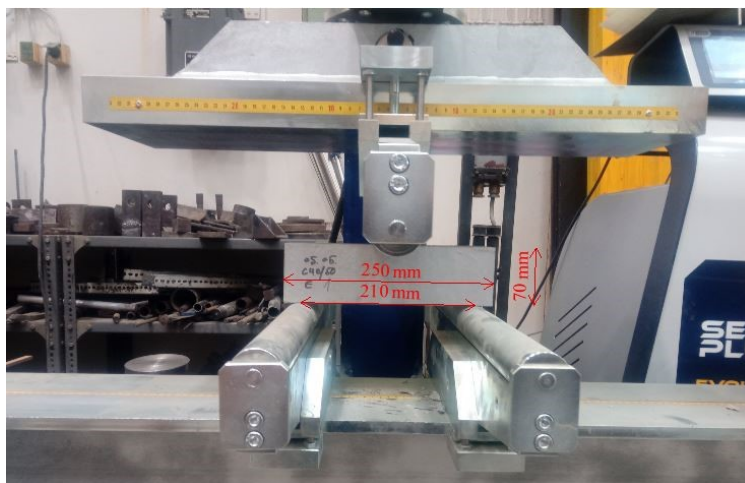
A megszilárdult beton nyomószilárdságának vizsgálatához a betonkockák élhosszúsága a szabvány előírásainak megfelelően 150 mm volt. A betonkockákat vegyes tárolás (7 napos korrig víz alatti, majd 21 napos korrig laborlevegőn való tárolás) után 28 napos korban, ELE ADR2000 típusú törőgép segítségével vizsgáltam keverékenként legalább 3 db próbatesten (54. ábra).



54. ábra: A nyomószilárdsági vizsgálat kísérleti összeállítása

3.2.3.4 Hajlító-húzószilárdság vizsgálata

A megszilárdult beton hajlító-húzószilárdságának vizsgálatához alkalmazott hasábok mérete 70x70x250 mm volt. A próbatesteket vegyes tárolás után 28 napos korban vizsgáltam központos terhelés alkalmazásával MATEST – YIMC091 típusú gép segítségével keverékenként legalább 3 db próbatesten (55. ábra).



55. ábra: A hajlító-húzószilárdság vizsgálat kísérleti összeállítása

3.2.3.5 Vízáróság vizsgálata

A megszilárdult beton vízáróságának vizsgálatához a betonkockák élhosszúsága a szabvány előírásainak megfelelően 150 mm volt. A betonkockákat vegyes tárolás után 28 napos korban 72 órára 5 bar víznyomás alá helyeztem, majd a víznyomásnak kitett oldalára merőlegesen Z+2 Kft-30/2003 típusú gép segítségével hasítottam félbe, majd tolómérő segítségével meghatároztam a maximális vízbehatolási mélységet [mm]-ben keverékenként 3 db próbatesten (56. ábra).



56. ábra: A vízáróság vizsgálat kísérleti összeállítása

3.2.3.6 Felületi minőség értékelése

Az értékelés során a próbatestek két 60x60 cm-es zsaluzott felületét vettem figyelembe (továbbiakban a jelölésük pl. P11_01 és P11_02, ld. 21. táblázat). Az értékelési szempontokat és vizsgálati módszereket az MSZ 24803-6-3:2010 [70] szabvány, a német *Merkblatt Sichtbeton* [71] irányelv, valamint az osztrák *Richtlinie Geschalte Betonflächen* irányelv [72] alapján határoztam meg. A hazai és nemzetközi szabályozásról, az értékelési szempontokról és vizsgálati módszerekről részletesen a 4. fejezetben írok. Az értékelés során felhasználtam továbbá a 4.2 *Új vizsgálati módszer kidolgozása (98. old.)* fejezetben bemutatott digitális képfeldolgozáson alapuló módszert a felületi pórustartalom meghatározásához. A felület értékelésekor a vizsgálati szempontok az alábbiak voltak:

- felületi pórustartalom
- színeltérés
- kivérzés
- fészkeség.

3.3 KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

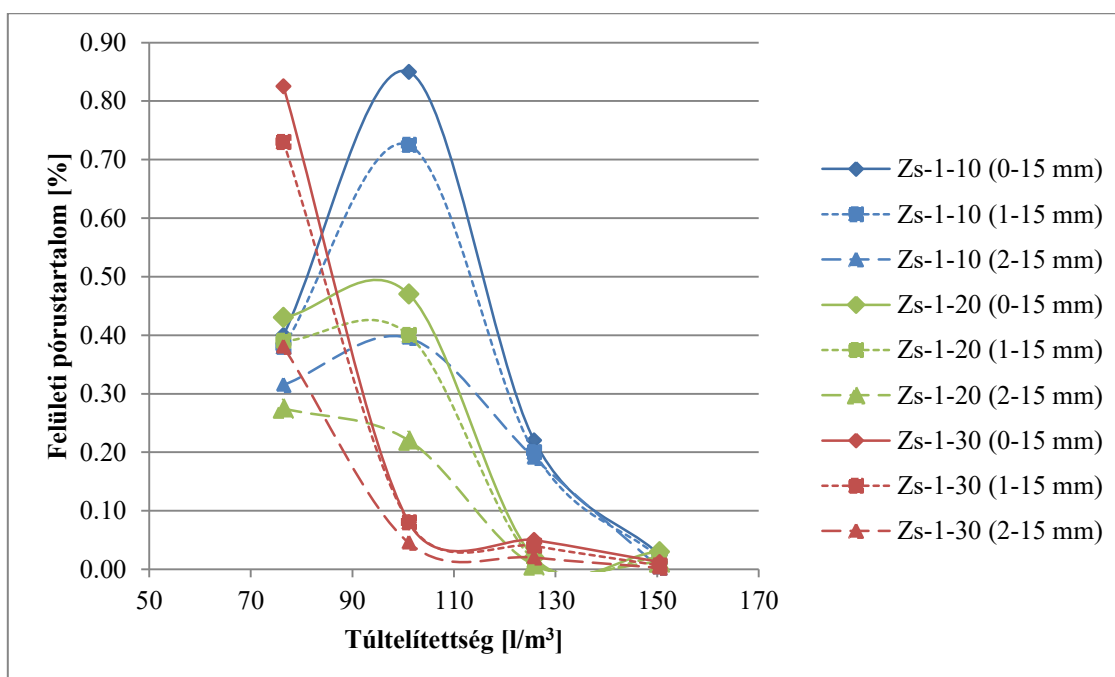
3.3.1 A péptelítettség és a zsaluzati méret hatása a felületi minőségre

3.3.1.1 Felületi pórustartalom vizsgálata

A felületi pórustartalmat a 4.2 Új vizsgálati módszer kidolgozása (98. old.) fejezetben részletezett képfeldolgozó program segítségével vizsgáltam a próbatestek két oldaláról készített fényképekből kivágott 50x50 cm-es felületeken. A pórustartalmat három átmérő intervallumban értékeltem:

- 0.5 és 15 mm között,
- 1 és 15 mm között a magyar szabvány [70], valamint az osztrák irányelv [71] szerint,
- 2 és 15 mm között a német irányelv [72] szerint.

A felületi pórustartalom alakulását a péptelítettség függvényében az 57. ábra mutatja a három átmérő intervallum szerint. A mérési adatokat a Melléklet 2.1 fejezete tartalmazza. A három intervallum szerinti érték több esetben jelentős különbségeket mutat: a pórusok minimális átmérőjének 0.5-ről 1 mm-re való növelésével az első három keverék esetében 5-15%-kal csökken a pórustartalom, a 4. keverék esetében drasztikusabb a csökkenés (20-48%) a felületre jellemző alapvetően kis pórusátmérők miatt. A minimális átmérő 1-ről 2 mm-re való növelésével a legtöbb felület esetében kevesebb, mint a felére csökken a pórustartalom.



57. ábra: Felületi pórustartalom vizsgálat eredményei különböző átmérő-intervallumok figyelembevételével

A szabványos, illetve az irányelvek szerinti osztályba sorolást a 22. táblázat tartalmazza. A német irányelv négy osztályba sorolja a felületeket (P1-P4) melyek esetében 1.2 – 0.9 – 0.6 – 0.3%-ban korlátozza a felületi pórustartalmat. Az osztrák irányelv három kategóriát határoz meg (3P, 3P, P), melyek esetében 0.9 – 0.6 – 0.3%-os küszöbértéket határoz meg. A magyar szabvány csak a különleges követelményszint esetén határoz meg, egy az irányelveknél megengedőbb maximum 0.6%-os pórustartalmat. A péptelítettség növelésével egyazon zsaluzati méret mellett az elért felületi minőség mind az osztrák, mind a német irányelv szerint nő. A 3-4. keverék esetében minden felület eléri a legmagasabb, különleges követelményszintet az előírások szerint. A zsaluzati vastagság növelésével egyazon keverék alkalmazása mellett stagnál (1. keverék), vagy eggyel magasabb osztályba sorolható be a felületi minőség. A magyar szabvány alapján a P12 és P31 próbatestek kivételével minden felület a legmagasabb kategóriába sorolható.

22. táblázat: *Próbatestek osztályba sorolása a felületi pórustartalom alapján*

Próbatest	Merkblatt Sichtbeton [70] szerinti osztály	Richtlinie Geschalte Betonflächen [71] szerinti osztály	MSZ 24803 [69] szerinti osztály
P11	P3	2P	különleges
P12	P3	3P	nem besorolható
P13	P4	P	különleges
P14	P4	P	különleges
P21	P4	2P	különleges
P22	P4	2P	különleges
P23	P4	P	különleges
P24	P4	P	különleges
P31	P2	3P	nem besorolható
P32	P4	P	különleges
P33	P4	P	különleges
P34	P4	P	különleges

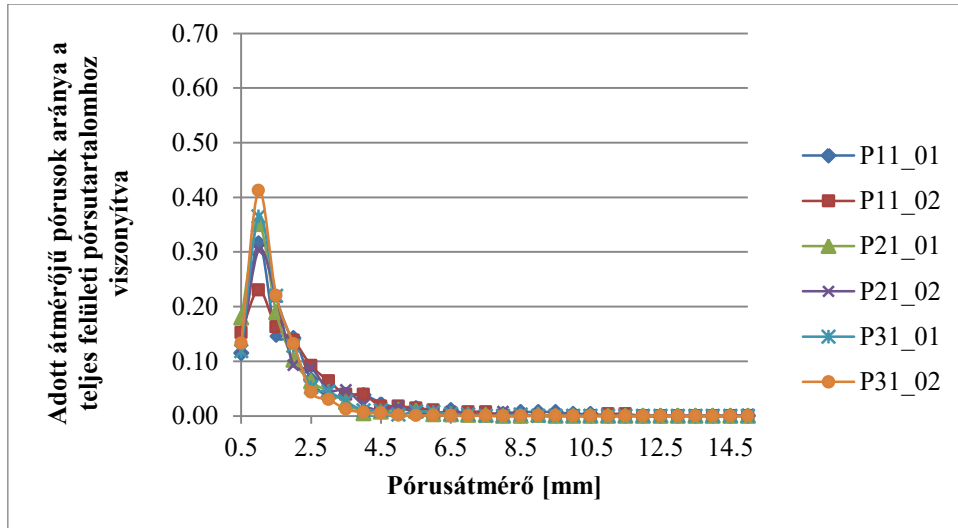
A 23. táblázatban a főbb vizsgálati eredmények láthatóak külön átlagolva keverékenként és zsaluzatonként. Az adatok a 0.5 és 15 mm közötti átmérővel rendelkező pórusokra vonatkoznak. A péptelítettség 76 l/m³-ről 150 l/m³-re való növelésével a három zsaluzati vastagság esetében a pórustartalom átlagosan 95%-kal csökken, az átlagos átmérő 30%-kal, a variancia 77%-kal, a szórás 53%-kal, az átlagos felületi pórustartalom 96%-kal. A zsaluzati vastagság 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével a pórusok átlagos darabszáma 21%-kal, az átlagos átmérő 1%-kal, a variancia átlagos értéke 54%-kal, a szórás 29%-kal, az átlagos felületi pórustartalom pedig 35%-kal csökkent.

23. táblázat: Felületi pórustartalom vizsgálat főbb eredményei ($0.5 \text{ mm} \leq d \leq 15 \text{ mm}$)

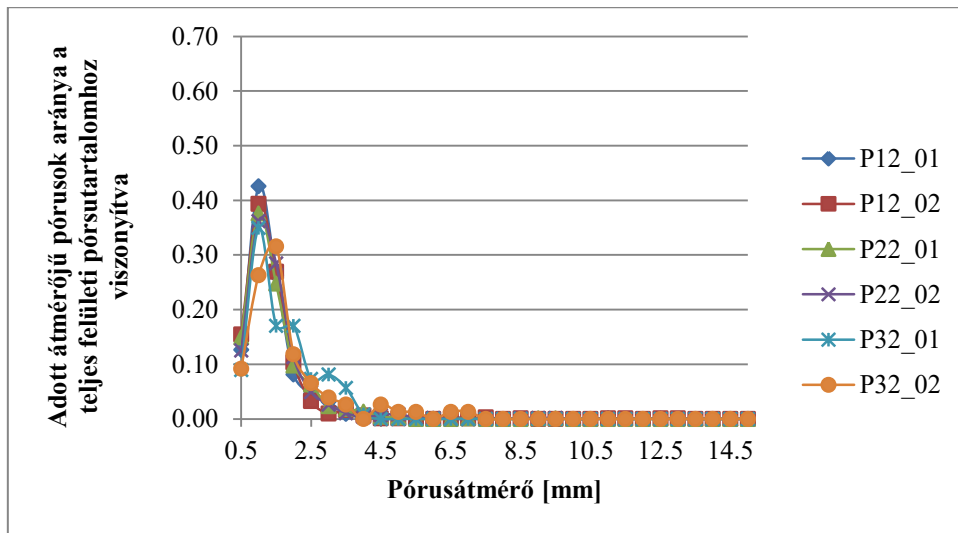
Vizsgálati szempont		Vizsgált keverék				Vizsgált zsaluzat		
		1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.
Pórusok átlagos mennyisége	[db]	680	696	107	56	453	343	358
Átlagos átmérő	[mm]	1.76	1.52	1.37	1.24	1.50	1.43	1.48
Variancia átlagos értéke	[mm]	1.87	0.99	1.41	0.43	1.74	0.98	0.80
Szórás átlaga	[mm]	1.32	0.98	1.10	0.62	1.21	0.95	0.86
Átlagos felületi pórustartalom	[%]	0.55	0.47	0.10	0.02	0.37	0.24	0.24
Az eloszlásfüggvény átlagos ferdeségi együtthatója	[-]	2.78	2.99	3.49	3.55	3.32	2.98	3.32
Az eloszlásfüggvény átlagos csúcsossági együtthatója	[-]	7.56	8.36	11.98	12.71	11.01	8.35	11.10

Ahogy az az 57. ábrán látható, a 10 és 20 cm-es zsaluzati vastagság esetében a péptelítettség 76-ról 101 l/m³-re való növelésével a pórustartalom növekszik, a Zs-1-10 zsaluzat esetében több mint duplájára nő, a Zs-1-20 zsaluzat esetében 9%-kal nő. A péptelítettség további növelésével a pórustartalom jelentősen csökken. Ennek egyik lehetséges oka az adalékanyag pépigényének számítási módja: a „C” határgörbe szerinti adalékanyag halmaz mértékadó térfogatát az 5.58%-os víztartalommal elkevert állapotban, a Zs-2 zsaluzat alkalmazásával, rázóasztalos tömörítés mellett mért halmaztömörítési értékek átlagaként határoztam meg: $V_{ao} = 805 \text{ l/m}^3$. Így az adalékanyag pépigénye $V_{po} = 195 \text{ l/m}^3$, amely alapján a túltelítettség értékét számítottam keverékenként. A 10 és 20 cm-es falvastagságok esetében a halmaztömörítés azonban a Zs-2 zsaluzatban mért eredmények alapján az átlagnál kisebb, ezáltal az adalékanyag pépigénye ezekben az esetekben nagyobb, így a keverék tényleges túltelítettsége kisebb, amely gyengébb felületi minőséghez vezethet.

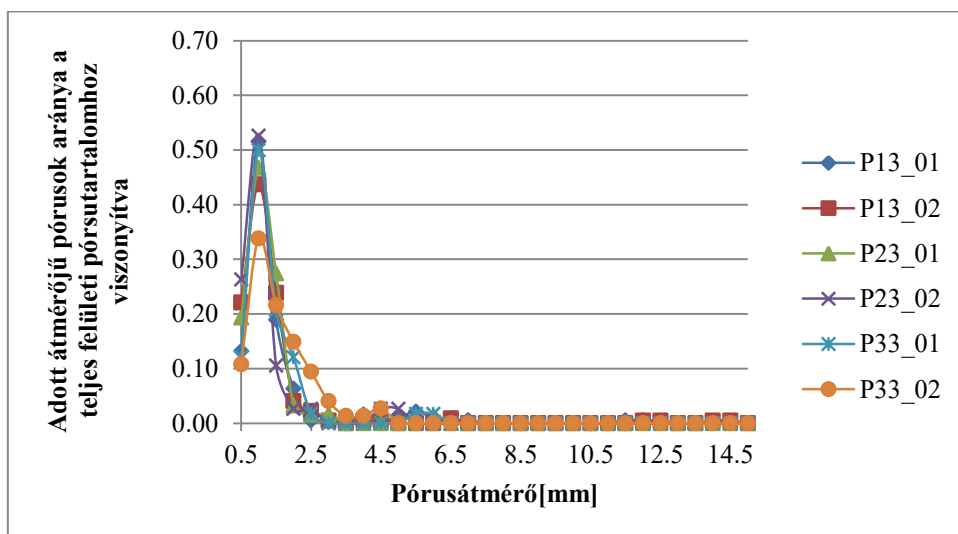
A pórusokat átmérő szerint 0.5 mm-ként csoportokra bontva vizsgáltam az átmérő szerinti eloszlást (58-62. ábra). A póruseloszlás ferdeségi együtthatója minden esetben pozitív, azaz jobbra ferde, a kis átmérők felé tolódik el. A csúcsossági együttható szintén minden esetben pozitív, azaz a normál eloszlásnál csúcsosabb. Az eloszlásfüggvényt keverékenként ábrázolva jól látszik, hogy a péptelítettség növelésével mind a ferdeség, mind a csúcsosság pozitív irányban változik. Eszerint a felületi pórustartalom csökkenésével párhuzamosan nő a kisebb átmérőjű pórusok aránya és az eloszlás szűkebb átmérő tartományt fed le. Az eloszlásfüggvény ferdeségi együtthatója 28%-kal, csúcsossági együtthatója pedig 68%-kal nőtt a péptelítettség 76-ról 150 l/m³-re való növelésével. A zsaluzati vastagság 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével az eloszlásfüggvény átlagos ferdeségi és csúcsossági együtthatója elhanyagolható változást mutat vagy stagnál (23. táblázat).



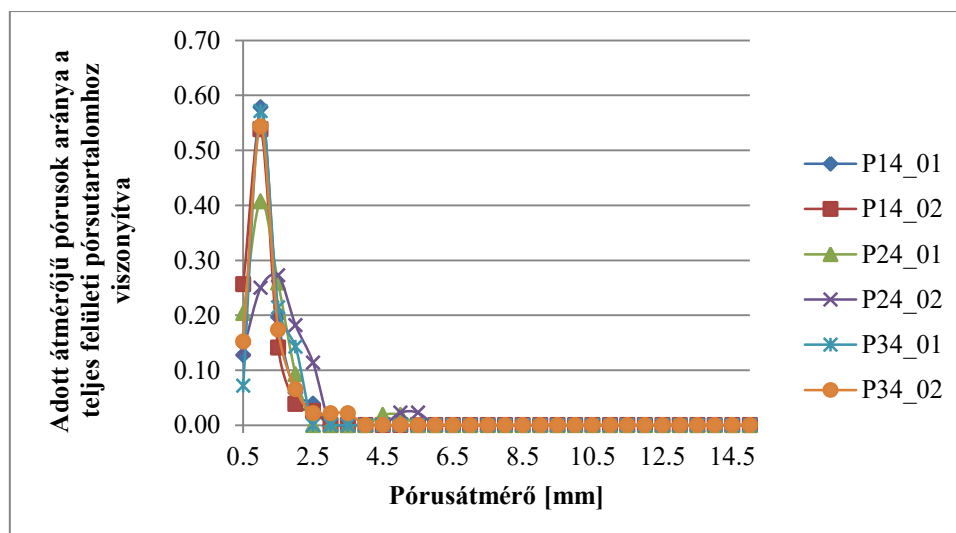
58. ábra: Pórusok méret szerinti eloszlása az 1. keverék esetében



59. ábra: Pórusok méret szerinti eloszlása a 2. keverék esetében

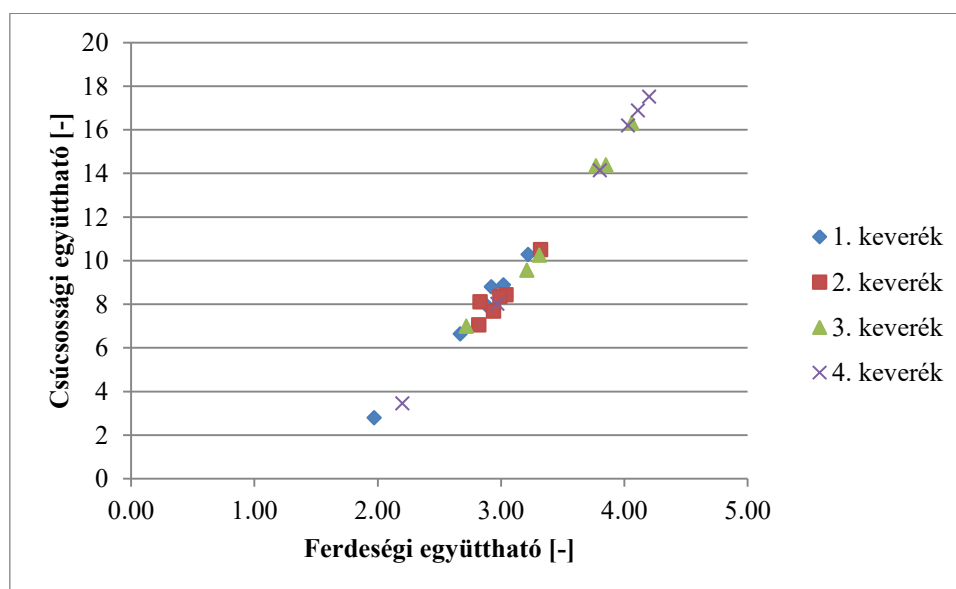


60. ábra: Pórusok méret szerinti eloszlása a 3. keverék esetében



61. ábra: Pórusok méret szerinti eloszlása a 4. keverék esetében

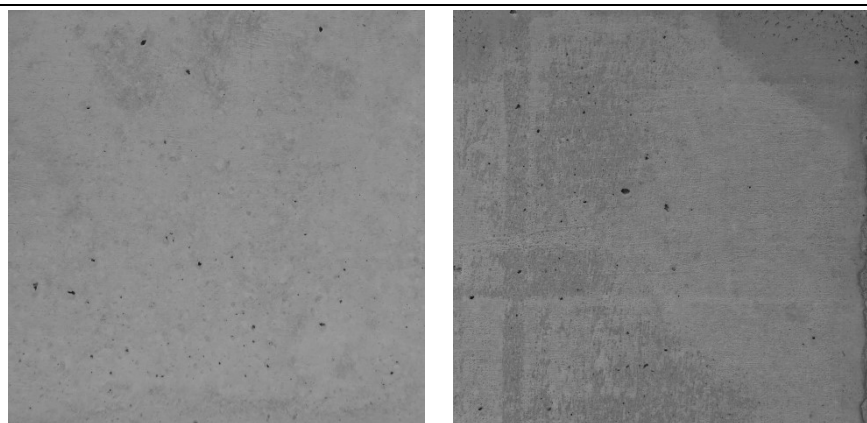
Az eloszlásfüggvény ferdeségi és csúcsossági együtthatóját az alkalmazott keverékek függvényében vizsgálva (62. ábra) közel lineáris összefüggés tapasztalható: minél inkább eltolódik az eloszlás, annál csúcsosabbá válik, azaz minél inkább nő a kisebb átmérőjű pórusok aránya, annál szűkebb tartományt fed le az eloszlás. A péptelítettség növelésével pedig az együttható értékek által lefedett intervallum pozitív irányban tolódik el.



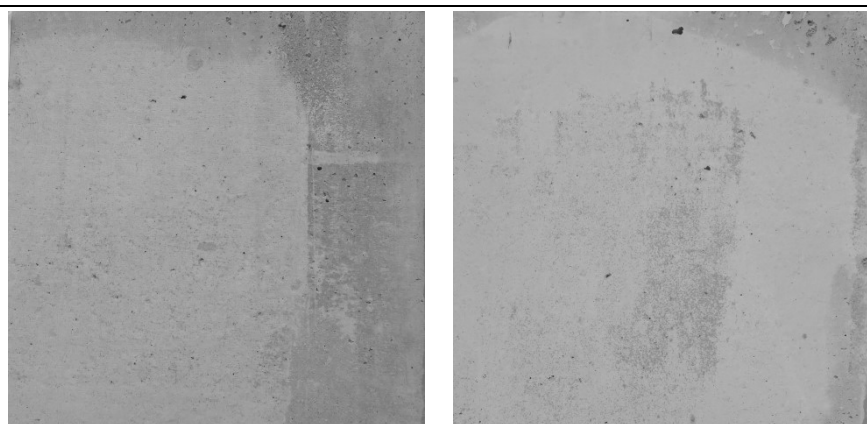
62. ábra: Az eloszlásfüggvény ferdeségi és csúcsossági együtthatója az alkalmazott keverékek függvényében

3.3.1.2 Színeltérések vizsgálata

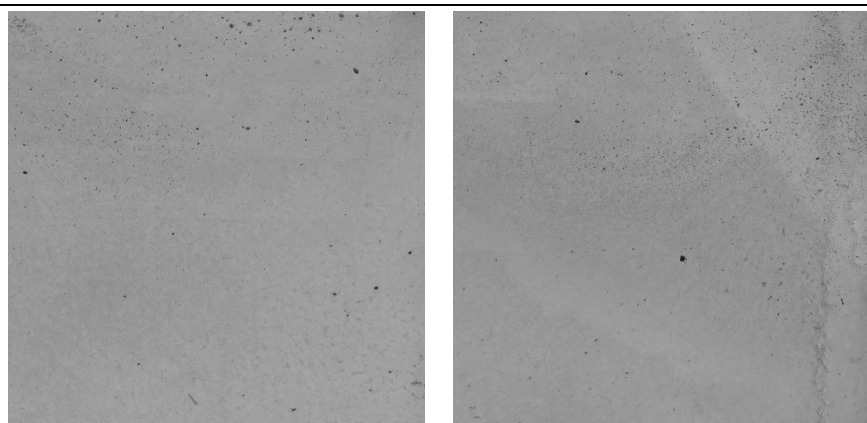
Az 1. keverékkel készített próbatestek felületein (63. ábra) a Zs-1-10 és a Zs-1-20 zsaluzat esetében egyenlőtlen, nagy kiterjedésű sötét elszíneződések találhatók. A Zs-1-30 zsaluzattal készült felületek összképe homogén, az egyik oldalán nagyon enyhe sötét elszíneződéssel. A felületeken szennyeződés, minőségromlást eredményező foltosság nem található.



P11



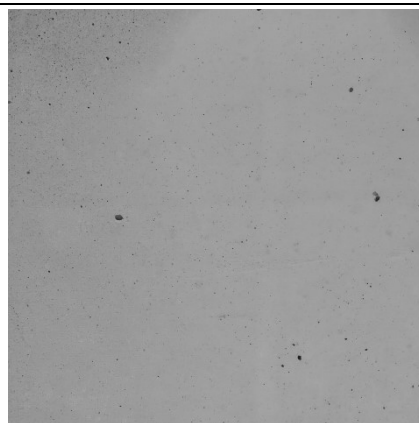
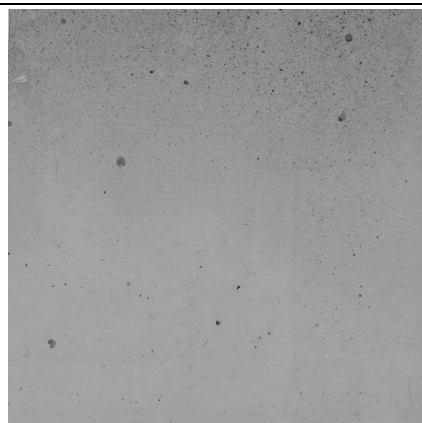
P21



P31

63. ábra: Az 1. keverékkel készített próbatestek felületei

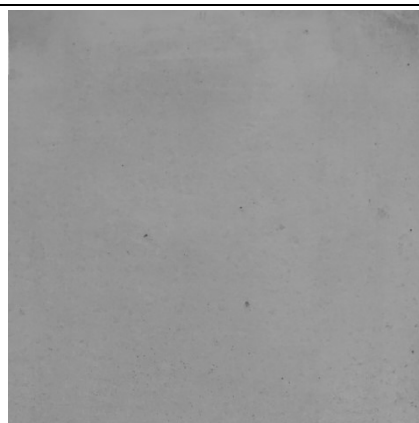
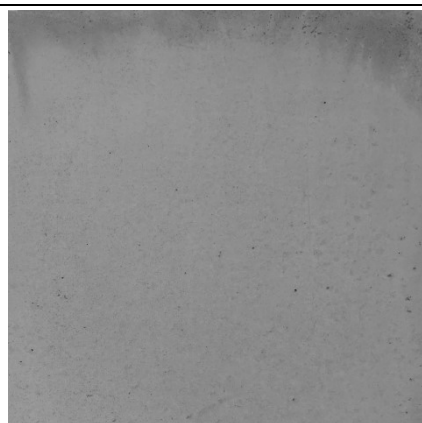
A 2. keverékkel készített próbatestek (64. ábra) felületén a Zs-1-10 zsaluzat esetében egyenletes, nagy kiterjedésű, enyhe sötét elszíneződés látható, a Zs-1-20 és Zs-1-30 zsaluzattal készült próbatestek egy oldalán pedig kis kiterjedésű, egyenlőtlen sötét elszíneződés tapasztalható.



P12



P22



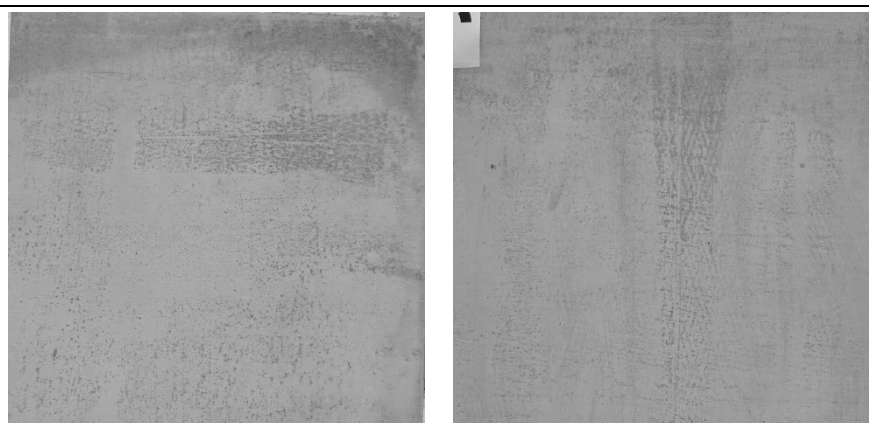
P32

64. ábra: A 2. keverékkel készített próbatestek felületei

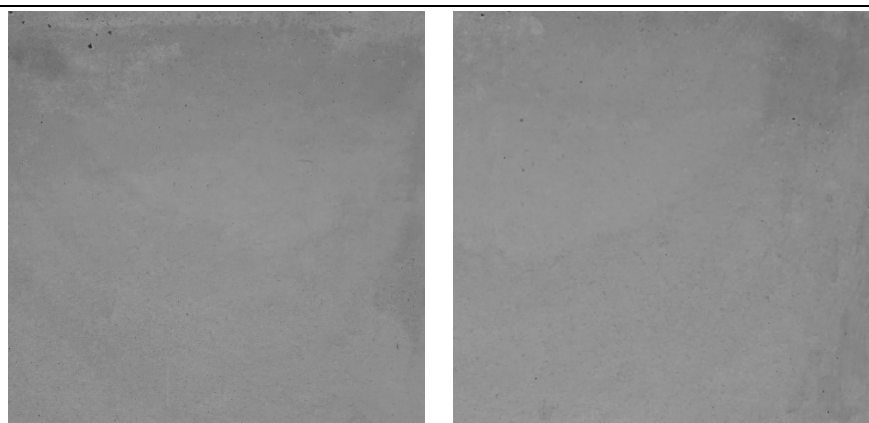
A 3. keverékkel készített próbatestek felületei a 65. ábrán láthatóak. Kismértékű, egyenletes sötét elszíneződés található a Zs-1-10 és Zs-1-30 zsaluzattal készült felületeken, a Zs-1-20 zsaluzat esetében pedig kis kiterjedésű, egyenlőtlen színeltérés tapasztalható.



P13



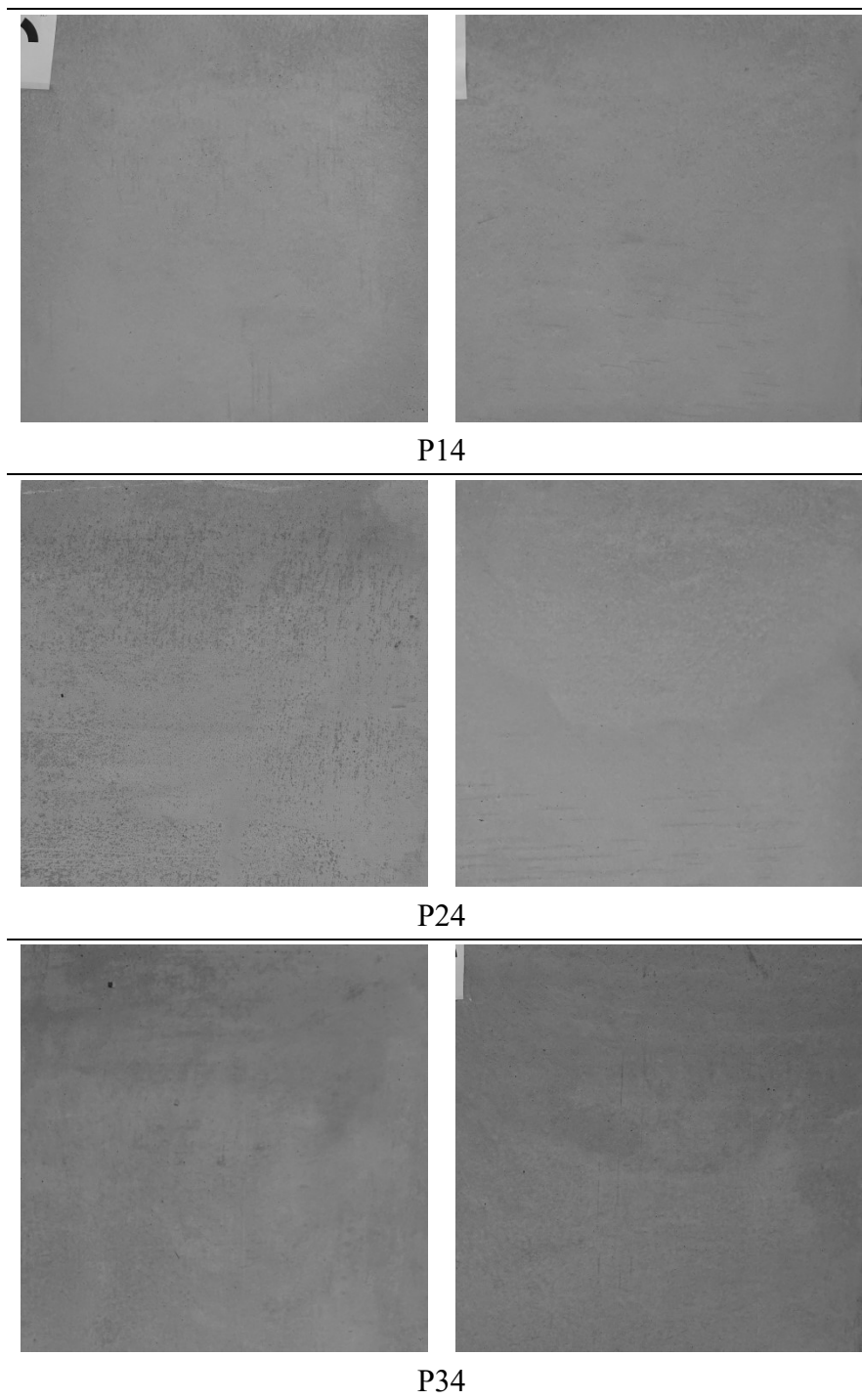
P23



P33

65. ábra: A 3. keverékkel készített próbatestek felületei

A 4. keverékkel készített próbatestek (66. ábra) esetében egyenletes, enyhe sötét elszíneződés tapasztalható a felületeken, kivéve a Zs-1-20 próbatest egyik oldalát, amelyen az elszíneződés kissé egyenlőtlen.



66. ábra: A 4. keverékkel készített próbatestek felületei

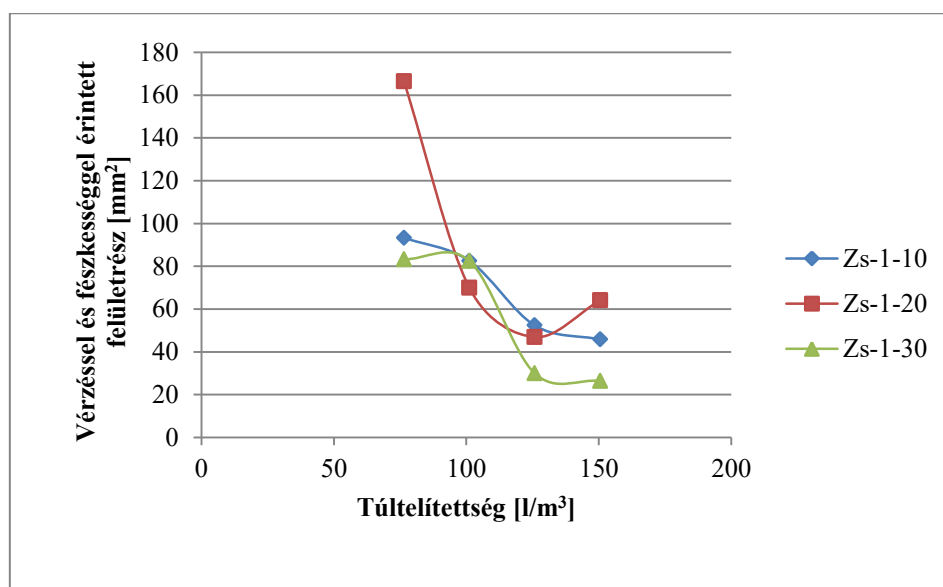
A színeltérés szempontjából a tútelítettség 76-ról 150 l/m³-re való növelésével azonos zsaluzati vastagság mellett jelentős minőségbeli javulás tapasztalható. Ugyanez igaz azonos keverék alkalmazása mellett a zsaluzati vastagság 10-ről 30 cm-re való növelésére is. A próbatestek osztálya sorolását a 24. táblázat tartalmazza a német és osztrák előírás szerint. Abban az esetben, ha a próbatest két vizsgált felülete különböző osztályba került, a gyengébb besorolást alkalmaztam. A magyar szabvány szerinti osztályozás a minőségromlást (nem) eredményező foltosság vizsgálata során a referenciafelülethez való viszonyítást veszi alapul, ezért ebben az esetben ez nem releváns. A felületeken szennyeződés, a betontól láthatóan eltérő, azaz minőségromlást eredményező anyag nem található. A német irányelv szerint osztályba sorolva a próbatesteket látható, hogy a pételítettség, illetve a zsaluzati vastagság növelésével egyre magasabb követelményszintet teljesítenek a vizsgált felületek. A 4-es keverékkel készített próbatestek minden esetben teljesítik a legmagasabb követelményszintet. A tendencia hasonló az osztrák irányelv szerinti osztályba sorolás esetén is. Az irányelvek szerinti vizsgálati szempontokról részletesen a *4.1 Irodalmi áttekintés (87. old.)* fejezetben írok.

24. táblázat: Próbatestek osztályba sorolása a színeltérések alapján

Próbatest	Merkblatt Sichtbeton [71] szerinti osztály	Richtlinie Geschalte Betonflächen [72] szerinti osztály
P11	FT1	FT1
P21	FT1	FT2
P31	FT3	FT3
P12	FT2	FT2
P22	FT3	FT2
P32	FT3	FT2
P13	FT3	FT3
P23	FT1	FT2
P33	FT3	FT3
P14	FT3	FT3
P24	FT3	FT3
P34	FT3	FT3

3.3.1.3 Kivérzés és fészesség vizsgálata

A kivérzés és a fészesség az elkerülhető hibák közé sorolható, ezért nem megengedett felületi eltérés látszóbeton minőség esetében, így vizsgálati módszer sem tartozik hozzá. Megfelelő tömörítés alkalmazásával és az élek tömítésével megelőzhető a kialakulásuk. A próbatestek készítésénél nem alkalmaztam tömítést az élek mentén, így szinte minden esetben különböző mértékű vérzés és ezzel együtt fészesség jelent meg a sarkokon. Az érintett felületrészek nagyságát a 67. ábra mutatja a zsaluzati vastagság és a tútelítettség függvényében. A péptelítettség 76-ról 150 l/m³-re való növelésével a hibás felületrész nagysága minden esetben csökken, a legkisebb eltérést a Zs-1-30 zsaluzat alkalmazásával készített próbatestek mutatják.



67. ábra: A vérzéssel és fészességgel érintett felületrészek a zsaluzati vastagság és keverék függvényében

3.3.1.4 Próbatestek osztályba sorolása

A próbatesteket az eddig bemutatott vizsgálati szempontok alapján a német és osztrák irányelv szerint soroltam osztályba (25. táblázat). Az egyes zsaluzati méreteken belül a péptelítettség 76-ról 150 l/m³-re való növelésével a próbatestek által elért követelményszint minden esetben legalább két osztállyal nő a német és egy osztállyal az osztrák irányelv alapján. Az azonos keverékkel készített próbatestek esetében a zsaluzati vastagság 10-ről 30 cm-re való növelésével a felületi minőség egy-egy kategóriával feljebb sorolható be, vagy nem változik. A 4. keverékkel készített próbatestek minden esetben elérik a legmagasabb követelményszintet.

25. táblázat: Próbatestek osztályba sorolása a színeltérés és pórustartalom szerint

Próbatest	Merkblatt Sichtbeton [71] szerinti osztály	Richtlinie Geschalte Betonflächen [72] szerinti osztály
P11	SB1	SB1
P12	SB2	SB2
P13	SB4	SB3
P14	SB4	SB3
P21	SB1	SB2
P22	SB3	SB2
P23	SB1	SB2
P24	SB4	SB3
P31	SB2	SB1
P32	SB4	SB2
P33	SB4	SB3
P34	SB4	SB3

A próbatesteket Schulz [60] által javasolt csökkentő tényezős eljárás (4.1.3 *Értékelési módszerek, 91. old.*) alapján is értékeltem a 26. táblázat szerint. A vizsgálati szempontokhoz a felület összképét befolyásoló hatásuk szerint súlyozó tényezőket rendeltem. Az egyes próbatestekhez minden vizsgálati szempont esetén meghatároztam a csökkentő tényező (30. táblázat) értékét. Az egyes próbatestekhez tartozó csökkentő tényezők és a vizsgált szempontok súlyozó tényezőinek szorzatát összegezve megkapható a próbatestre vonatkozó csökkentő tényező, melyből százalékosan kifejezhető a megjelenés minősége.

26. táblázat: Felületi minőség értékelése Schulz [60] csökkentő tényezős módszere alapján

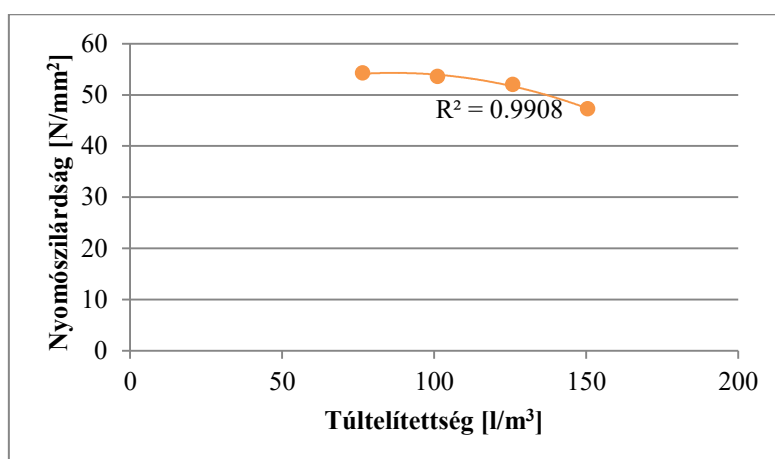
Próbatest	Vizsgálati szempontok			Csökkentő tényező	Megjelenés minősége [%]
	Felületi pórustartalom	Színeltérések	Vérzés, fészkesség		
	30 %	55 %	15 %		
P11	0.50	0.40	0.40	0.43	57
P12	0.40	0.30	0.30	0.33	67
P13	0.20	0.30	0.20	0.26	74
P14	0.10	0.10	0.20	0.13	88
P21	0.30	0.40	0.40	0.37	63
P22	0.20	0.30	0.20	0.26	74
P23	0.20	0.40	0.10	0.30	70
P24	0.10	0.20	0.20	0.17	83
P31	0.30	0.20	0.20	0.23	77
P32	0.20	0.30	0.20	0.26	74
P33	0.10	0.20	0.10	0.16	84
P34	0.10	0.20	0.20	0.17	83

Schulz [60] módszere alapján is jól látható, hogy a megjelenés minősége a péptelítettség növelésével jelentősen javul, a 4. keverék minden esetben 80% felett teljesített. Az eredményekből az is látható, hogy a zsaluzati vastagság növelésével ugyancsak nő a felületek által teljesített minőség.

3.3.2 A péptelítettség hatása a beton mechanikai tulajdonságaira

3.3.2.1 A péptelítettség hatása a nyomószilárdságra

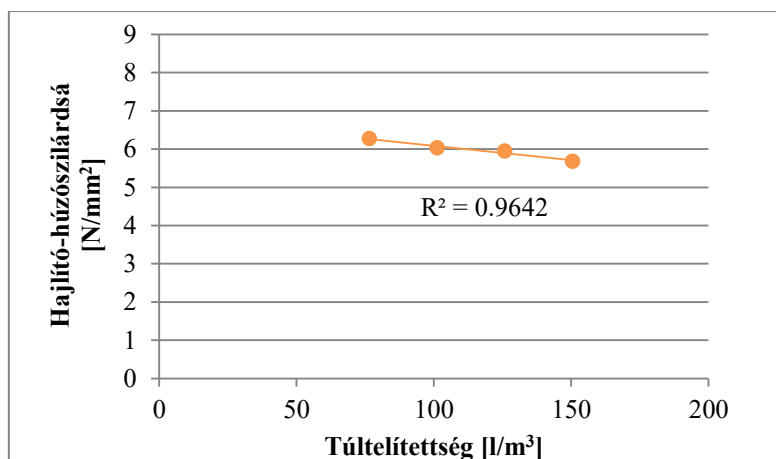
A próbakockákon mért nyomószilárdsági értékek átlaga láthatók a 68. ábrán. A tútelítettség növelésével a nyomószilárdság csökken; az 1. keverékhez képest a 4. keverék esetében 13%-os csökkenés tapasztalható, mely összhangban van a szakirodalmi adatokkal. A mérési adatokat a Melléklet 2.2 fejezete tartalmazza.



68. ábra: A nyomószilárdság átlagos értékei a tútelítettség függvényében

3.3.2.2 A péptelítettség hatása a beton hajlító-húzószilárdságára

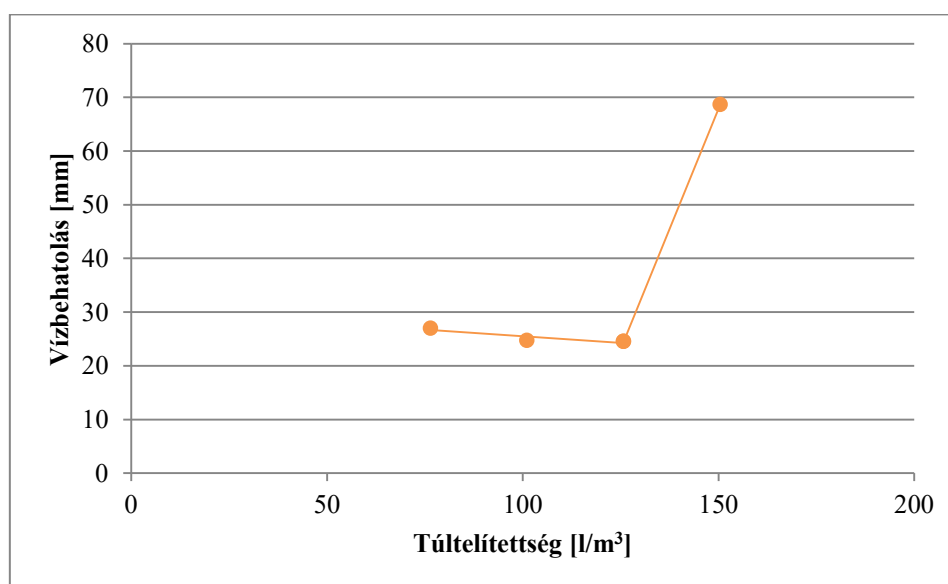
A péptelítettség és a beton hajlító-húzószilárdságának összefüggése a 69. ábrán látható. A tútelítettség 76-ról 150 l/m³-re való növelésével a szilárdság értéke 9%-kal csökkent. A mérési adatokat a Melléklet 2.3 fejezete tartalmazza.



69. ábra: A hajlító-húzószilárdság átlagos értékei a tútelítettség függvényében

3.3.2.3 A péptelítettség hatása a vízzáróságra

A péptelítettség és a vízbehatolási mélység összefüggéseit a 70. ábra mutatja. A tútelítettség növelésével 126 l/m³-ig közel azonos mértékű volt a vízbehatolás, amely aztán a 4. keverék esetében nagymértékben nőtt, ebből adódóan a vízzárósága csökkent, amely különös jelentőséggel bír a környezeti hatásoknak kitett látszóbeton szerkezetek esetében. A mérési adatokat a Melléklet 2.4 fejezete tartalmazza.



70. ábra: Vízbehatolás mélysége a tútelítettség függvényében

3.3.3 Összefoglalás

A különböző péptelítettségű betonösszetételek és különböző zsaluzati vastagságok vizsgálata során megállapítható, hogy mindkét tényező befolyásolja a látszóbeton felület minőségét a vizsgált keretek között. A péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével jelentősen csökken a színeltérések mértéke és mennyisége, a kivézés és fészkeség kiterjedése. A felületi pórustartalom a péptelítettség 76 l/m^3 -ról 101 l/m^3 -re való növelésével a 10 és 20 cm-es zsaluzati vastagság esetében nő, majd a péptelítettség további növelésével jelentősen csökken. A 150 l/m^3 túltelítettséggel készült keverék minden zsaluzati vastagság esetében és minden vizsgálati szempont szerint elérte a legmagasabb követelményszintet a vizsgált előírások szerint. A péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével a nyomószilárdság 13%-kal, a hajlító-húzószilárdság 9%-kal csökkent, a vízbehatolás mértéke 55%-kal nőtt. A zsaluzati méret 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével a felületi minőség – kisebb mértékben, mint a péptelítettség növelése esetén – javulást mutat a vizsgált szempontok tekintetében. A vizsgálatok alapján a beltéri látszóbeton felületek tervezése során a magas és különleges követelményszint elérése érdekében javaslom a kis geometriai méretekkel rendelkező látszóbeton szerkezetek esetében a $125\text{-}150 \text{ l/m}^3$ körüli túltelítettség alkalmazását, figyelembe véve a mechanikai tulajdonságok változását. A felületi pórustartalom vizsgálata során javaslom az 1 és 15 mm közötti átmérőjű pórusok figyelembevételét a manuális, a 0.5 és 15 mm közötti átmérőjű pórusok figyelembevételét a gépi eljárások esetében a szemléletesebb és pontosabb értékelés érdekében. Javaslom továbbá a felületi pórustartalom német irányelv szerinti részletesebb osztályozási rendszerének alkalmazását.

2. Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy a betonkeverék péptelítettsége és a zsaluzat vastagságának változása befolyásolja a látszóbeton felületek minőségét. Nem nedvszívó, fenolfilm bevonattal ellátott nyír rétegelt lemez zsaluhéj alkalmazásával, 60 cm szélességű és magasságú zsaluzat esetében, CEM II/A-S 42,5 R típusú cement és $v/c = 0.50$ víz-cement tényező, valamint MSZ EN 12620 szerinti „C” határgörbének megfelelő adalékanyag alkalmazásával, tűvibrátoros tömörítés mellett az alábbi összefüggéseket állapítottam meg:

2.1. Tézis

A péptelítettség 76 l/m^3 -ról 101 l/m^3 -re való növelésével, 10 és 20 cm-es zsaluzati vastagság mellett a látszóbeton felületek 0.5 és 15 mm közötti átmérő tartományban vizsgált pórustartalma nő, a péptelítettség 101 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével jelentősen csökken. 30 cm-es zsaluzati vastagság alkalmazása mellett a péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével a felületi pórustartalom jelentősen, 98%-kal csökken. A felületi pórustartalom a 30 cm-es zsaluzati vastagsághoz viszonyított eltérő változásának oka a 10 és 20 cm-es zsaluzati vastagság esetében az adalékanyagok a számított átlagnál kisebb halmaztömörősége és nagyobb pépigénye. A póruseloszlást 0.5 mm-re kerekített átmérőnként vizsgálva **a péptelítettség 76 l/m^3 -ról 101 l/m^3 -re való növelésével a pórusok átlagos átmérője, valamint szórása csökken. A zsaluzati vastagság 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével a látszóbeton felületek átlagos pórustartalma 35%-kal csökken, a pórusok eloszlása, valamint az átlagos átmérő nem mutat jelentős változást.** A 126 l/m^3 és 150 l/m^3 péptelítettséggel készült próbatestek felületi pórustartalma 0.3% alatt van minden zsaluzati vastagság mellett, így **teljesítik a legmagasabb követelményszintet** az MSZ 24803 magyar szabvány, az osztrák Richtlinie Geschalte Betonflächen és a német Merkblatt Sichtbeton irányelvek szerint.

2.2. Tézis

A péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével a színeltérés mértéke és mennyisége jelentősen csökken. A zsaluzati vastagság 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével a színeltérések mértéke és mennyisége jelentősen csökken, a 30 cm vastagságú zsaluzattal készített felületek összképe homogén. A színeltérés szempontjából **a 150 l/m^3 péptelítettséggel készült próbatestek felületei teljesítik a legmagasabb követelményszintet** az MSZ 24803 magyar szabvány, az osztrák Richtlinie Geschalte Betonflächen és a német Merkblatt Sichtbeton irányelvek szerint. **A kivérzés és fészesség**

mértéke a péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével jelentősen, a zsaluzati vastagság 10 cm -ről 30 cm -re való növelésével kismértékben csökken.

2.3. Tézis

Kimutattam, hogy a látszóbeton felületek póruseloszlása és az eloszlásfüggvény jellemzői összefüggésben állnak a betonösszetétel változásával. A péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével nő a kisebb átmérőjű pórusok aránya, így csökken az átlagos átmérő és a szórás, azaz az eloszlás egyre kisebb intervallumot fed le, melyet alátámaszt az eloszlásfüggvény ferdeségi együtthatójának 28% -os, csúcsossági együtthatójának 68% -os növekedése, valamint a két együttható közötti lineáris összefüggés.

Vonatkozó saját publikációk: [a] [b] [i]

4 LÁTSZÓBETON FELÜLETEK POROZITÁSÁNAK VIZSGÁLATA DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁSSAL

4.1 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A látszóbeton felület megjelenési módjának pontos meghatározása a tervező feladata, amely magába foglalja a készítendő szerkezettel kapcsolatos elvárásokat, követelményeket, az alkalmazandó vizsgálati módszereket és a megfelelőség feltételeit. A megjelenési mód meghatározása a magyar szabványokra, más nemzetek szabványaira, illetve irányelveire való hivatkozással, vagy a tervező által meghatározott vizsgálati szempontok, módszerek és tűrési értékek definiálásával történhet [65]. A felületek minőségének értékelését éppen a látszóbeton sokoldalúsága nehezíti, megítélése még a legjobb esetben is többnyire szubjektív, az ország kultúrájától függő, ezért szabályozása, szabványosítása is kihívást jelentő feladat.

4.1.1 Hazai szabályozás

A betonszerkezetekkel szemben támasztott követelményeket a '80-as, '90-es évek hazai szabványai két csoportra bontották; alapvető és kiegészítő követelményekre. Az alapvető biztonsági követelmények betartása kötelező, ide sorolhatók a szilárdsági és stabilitási követelmények, a tűzbiztonság, az egészségvédelem, a használhatósági előírások, stb. A kiegészítő követelmények a megjelenési módra, használati funkcióra, vagy az élettartamra vonatkozó, a terven és/vagy szerződésben rögzített követelmények. A kiegészítő követelmények kapcsán az MSZ 04-800 szabvány két fő vizsgálati szempontot különböztet meg; a vízszintes és függőleges síktól való eltéréseket, mely alapján a szerkezeteket három minőségi osztályba sorolta. A mintavételezés azonban véletlenszerű, a mérési módszerek bizonytalanok, a gyakorlatban sokszor más és más eredményhez vezetnek. Ez és a kapcsolódó, monolit vasbeton szerkezetekre vonatkozó szabványok számos hiányosságot és pontatlanságot tartalmaztak, amelyek gyakran nézeteltérésekhez vezettek a kivitelező és az építető között [65]. A szabályozással kapcsolatban felmerült problémák elvezettek a szerkezetek megjelenési módjával foglalkozó szabványsorozat, az MSZ 24803 kidolgozásához, amely az összes épületszerkezetekre vonatkozó munkanemet szabályozza és megteremti a szakmák közötti összhangot. Kifejezetten a látszóbeton felületekre vonatkozó szabvány nem készült, ebben az esetben az MSZ 24803:2010 Épületszerkezetek megjelenési módjának előírásai szabványsorozat 6-3, a monolit vasbeton szerkezetekre vonatkozó eleme [70] alkalmazható. Hasonlóan a nemzetközi példákhoz, négy látszóbeton osztályt különböztet

meg; az alap, a normál, a magas és a különleges követelményszintet. A vizsgálati szempontok tekintetében két fő csoportot különít el; a helyi alakhűség és a felületi állapot követelményeit, mely szempontokhoz osztályonként eltérő tűréshatárokat rendel. A szabvány meghatározza a vizsgálati módszereket és az osztályba sorolás módját. Szemben a korábbi szabályozással, az elkészült szerkezet minden részének meg kell felelnie az előírt követelményeknek, a mintavétel pedig ott történik, ahol az értékelésnél bizonytalanság merül fel [65]. A helyi alakhűség és felületi állapot különböző követelményszintekhez tartozó vizsgálati szempontjait és tűréshatárait a 27. táblázat tartalmazza.

27. táblázat: A látszóbeton követelményszintekhez tartozó követelmények és tűrési értékek, *n* = nem kell vizsgálni, *nm* = nincs megengedve, *t* = terv szerint [70]

Vizsgálati szempont	Követelményszint			
	Alap	Normál	Magas	Különleges
Helyi alakhűség követelményei	Tűrési érték [mm]			
zsaluzott felület hullámossága	7	5	4	3
zsaluzattal nem érintkező felület hullámossága	13	7	5	4
zsaluzott felület domborulata (homorulata)	4	3	2	1
zsaluzattal nem érintkező felület domborulata	6	5	3	2
zsaluzott felület fogassága	10	5	3	2
zsaluzatlan felület fogassága	15	7	4	3
cementpépkifolyás	10	3	2	1
vonalszerű fészesség szélessége	n	5	3	2
él hullámossága	6	4	3	2
élképzés kialakításának hibája	n	n	t	t
él menti betonkitüremkedés	n	n	3	2
élek csorbultsága	n	n	4	2
átkötési helyek állapota	n	t	5	t
csatlakozások fogassága	20	11	6	3
csatlakozások folytonossági hiánya	n	7	4	3
Felületi állapot követelményei				
fészesség	nm	nm	nm	nm
pórusosság (figyelembe vett átmérő: $1 \leq d \leq 15$ mm)	n	n	n	0.6%
felületi vésések	n	n	nm	nm
betonlerakódás	n	nm	nm	nm
eltérő zsalukiosztási kép	n	n	n	t
minőségromlást eredményező anyag a felületen	nm	nm	nm	nm
minőségromlást nem eredményező anyag a felületen	n	n	n	nm
minőségromlást eredményező foltosság a felületen	nm	nm	nm	nm
minőségromlást nem eredményező foltosság a felületen	n	n	n	m

A szabvány különlegessége, hogy szemben a német és osztrák irányelvekkel, lehetőséget ad egyéni követelmények kialakítására is, amely lehetővé teszi például strukturált vagy mintás látszóbeton felületek minősítését is.

4.1.2 Nemzetközi szabványok és irányelvek

A hazai szabályozás hiányában a tervezők az elmúlt években – és gyakran még ma is – az elsősorban német nyelvterületekről származó előírásokat alkalmazták a kritériumok meghatározásakor. Egyedüli szabványként az osztrák ÖNORM B 2211 [73] használható, de mind Németországban, mind Ausztriában kidolgozásra kerültek a kifejezetten látszóbetonra vonatkozó irányelvek [71,72].

4.1.2.1 Németországi szabályozás

A német szabályozások közül említést kell tenni a DIN 18217 *Betonflächen und Schalungshaut (Betonfelületek és zsaluhéjak)* [74] című szabványról, amely azonban nem tér ki konkrétan a látszóbeton felületekre. A 2004-ben kiadott német *Merkblatt Sichtbeton (Látszóbeton irányelv)* [71] előzményének tekinthető a svájci SIA 118/262 szabvány [75], amely a látszóbeton felületek esetében négy zsaluhéj típust vezetett be. Ezt kiegészítve a német irányelv már négy látszóbeton osztályt különböztet meg (SB1-SB4), melyekhez jól definiált kritériumokat és alosztályokat rendel. A magyar szabvánnyal összehasonlítva viszont kevesebb vizsgálati szempontot tartalmaz: hiányzik többek között a domborulatra, a vonalszerű fészkessegre, az élek állapotára és az átkötési helyekre vonatkozó kritérium. Továbbá nem határoz meg vizsgálati módszereket, amely még inkább szubjektívvá teszi az értékelést. Ezzel szemben az egyes kritériumokhoz tartozó alosztályok sok esetben jobban differenciáltak, mint a hazai szabványban. Az irányelv látszóbeton osztályaihoz tartozó kritériumok a következők:

- textúra
- **felületi pórustartalom**
- színazonosság
- felületi egyenletesség, méretpontosság
- munkahézagok és fugák
- zsaluhéj osztályok.

A *textúra* követelménye alatt a zárt és egységes megjelenésű betonfelületet értjük, melyek esetében az irányelv korlátozza a zsaluelemek illesztésénél kifolyó cementlé méretét, a

viisszamaradó sorja mélységét. Ezen túl előírja az azonos minőségű zsaluhéjak alkalmazását egy adott épületrészen vagy felületen belül, valamint a betonösszetétel állandóságát azonos osztályon belül. A kritérium három alosztályra (T1-T3) bomlik.

A *felületi pórustartalom* kritériuma szigorúbb, mint a magyar szabványé; négy alosztályt különböztet meg (P1-P4), melyek esetében 1.2 – 0.9 – 0.6 – 0.3%-ban korlátozza a felületi pórustartalmat. A vizsgálat során egy 50x50 cm-es mintafelületen vizsgálja a 2 és 15 mm közötti átmérővel rendelkező pórusokat.

A *színazonosság* kritériuma a megépített épületrész egységében vizsgálja a megengedhető színeltérés fokozatait. Három alosztályra bomlik (FT1-FT3), melyek közül a rozsdá és szennyeződési foltok egyikben sem megengedettek, a világos vagy sötét elszíneződések az alacsonyabb osztályoknál megengedettek, míg a legmagasabb osztály esetében csekély mértékű színeltérés fogadható el.

A *felületi egyenletesség, méretpontosság* kritériuma három alosztályt tartalmaz (E1-E3), melyek vizsgálatakor az irányelv a DIN 18202 szabványra hivatkozik. Az előírások a zsaluzat felületének síktól való eltérését, a zsalutáblák és ankerek kiosztását szabályozza.

A *munkahézagok és fugák* az egyes zsaluzott felületek egymáshoz viszonyított elhelyezkedését, a betonozási fázisok közötti felületi eltérést és cementpép kifolyást, valamint a fugaképzés módját vizsgálja, mely során a DIN 1045 szabvány a mértékadó.

Az irányelv három *zsaluhéj osztályt* különböztet meg (SHK1-SHK3), melyek a zsaluhéj állapotára és felhasználási módjára vonatkozó kritériumokat tartalmaznak. Ide sorolhatók a felületi karcolások, a betonmaradványok, a cementfátyol, vagy a fűrt, illetve a szeg- és csavarlyukak korlátozása.

4.1.2.2 Ausztriai szabályozás

Az 1998-ban kiadott osztrák *ÖNORM B 2211 Beton- Stahlbeton- und Spannbetonarbeiten (Beton- vasbeton és feszített betonmunkák)* [73] szabvány a pórusosságra, a felületi egyenletességre, a struktúrára, a munkahézagokra, valamint a színtónus egyenlőségre fogalmaz meg kritériumokat. Az egyes vizsgálati szempontok azonban kevésbé differenciáltak, a pórusosságra három alosztályt (P, 2P, 3P) különböztet meg, a struktúra tekintetében négyet (S1-S4), a munkahézagok kapcsán négyet (A1-A4), a színtónus egyenlőség tekintetében pedig kettőt (F1, F2).

Az osztrák *Richtlinie Geschalte Betonflächen (Irányelv zsaluzott betonfelületekhez)* [72] irányelv a szabványra alapozva tovább pontosítja a vizsgálati szempontokat, bevezeti a zsaluhéj osztályokat, valamint kitér a kivitelezéssel kapcsolatos szempontokra is úgy, mint: a zsaluhéjak állapotára és tisztítására, az ankerlyukak kialakítására és kiosztására, a zsalulevélasztó szer alkalmazására, a vasalás kialakítására, a betonkeverék előállítására és szállítására, a beton tömörítésére, valamint az utókezelésre. Az irányelv négy osztályt különböztet meg (SB1, SB2, SB3, SBS), melyekhez a német irányelvhez nagyon hasonló kritériumokat és alosztályokat rendel, így rugalmasabban és hatékonyabban alkalmazható a szabványnál [76,77].

4.1.3 Értékelési módszerek

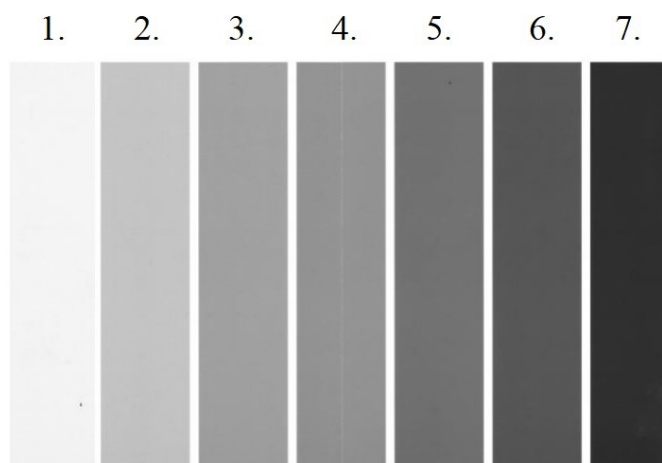
A hazai szabvány minden vizsgálati szemponthoz vizsgálati módszert is definiál. Ezek a módszerek kivétel nélkül kézi mérésen alapuló, illetve néhány esetben szemrevételezéses eljárások. Azok a vizsgálati szempontok, amelyek esetében a megfelelőségi kritériumok jól definiáltak és egyértelmű mérésekkel alátámaszthatók, könnyen és gyorsan értékelhetők. Ilyen szempontok például az él hullámossága, a felületek fogassága, vagy a cementpépkifolyás, melyek mértéke [mm]-ben meghatározható és ez alapján osztályba sorolható. Vannak azonban olyan vizsgálati szempontok, ahol a vizsgálat időtartama aránytalanul hosszú, vagy csak szubjektíven értékelhető az adott szempont. Előbbire példa a *felületi pórustartalom*, amely az esztétikai megjelenésen túl többletinformációt hordozhat az adott szerkezet kivitelezési módjáról, az alkalmazott anyagok minőségéről is, így nem csak esztétikai, de akár technológiai szempontból is fontos lehet az elemzése. A szabványos vizsgálat egy 50x50 cm-es mintafelületet vesz alapul, amelyen egy átlátszó papír felragasztását követően át kell rajzolni és össze kell számolni milliméterpapír segítségével az 1 és 15 mm közötti átmérővel rendelkező pórusok területét. Emiatt egy vizsgálat legalább másfél órát vesz igénybe, valamint szabad szemmel nehezen különböztethető meg az 1 mm-nél kisebb és az 1 mm-es átmérővel rendelkező pórus, ezért az emberi hibából adódó eltérés akár számottevő is lehet. A felületi pórustartalom vizsgálata ugyanilyen módon zajlik az osztrák irányelv esetében is, a német irányelv pedig nem határoz meg vizsgálati módszert, a pórusok számításánál azonban szemben a magyar és osztrák előírással, a 2 mm alatti átmérővel rendelkező pórusokat figyelmen kívül hagyja.

Ugyancsak nehézkes a *minőségromást (nem) eredményező foltosság* megállapítása, azaz ahogy a nemzetközi szakirodalomban nevezik, a *színtónus egyenlőség* vagy *színeltérés* vizsgálata, amely elsősorban a referenciafelület és a mintafelület szemrevételezés útján történő összehasonlításán alapul. A hazai szabvány minőségromlást eredményező foltosság alatt a rozsdafoltokat és szennyeződéseket érti, így ezek megjelenése a felületen nem megengedett, további színeltérésekre azonban nem tér ki. A német irányelv a különböző színtónusbeli osztályokhoz leírással határozza meg, milyen mértékű, illetve egyenletes vagy egyenlőtlen sötét és világos elszíneződést enged meg (28. táblázat).

28. táblázat: Színtónus egyenlőség értékelése a Merkblatt Sichtbeton [71] szerint

Alosztály	Értékelési szempontok
FT1	<ul style="list-style-type: none"> világos vagy sötét elszíneződések megengedettek rozsdá- és szennyeződési foltok nem megengedettek
FT2	<ul style="list-style-type: none"> egyenletes, nagyméretű világos vagy sötét elszíneződések megengedettek eltérő típusú és származású zsaluhéjak valamint alapanyagok alkalmazása nem megengedett
FT3	<ul style="list-style-type: none"> csekély méretű világos vagy sötét elszíneződések megengedettek eltérő típusú zsaluzatok, különböző származású alapanyagok és szakszerűtlen elő- vagy utókezelés miatti nagyméretű elszíneződések nem megengedettek rozsdá- és szennyeződési foltok, valamint tisztán látható betonozási rétegek nem megengedettek egy technológiához illő zsaluleválasztó szer választása szükséges

Az osztrák irányelv egy szürkeszín skálát (71. ábra) alkalmaz a színeltérés mértékének megállapításához, mely alapján minden alosztály esetében meghatározza, legfeljebb hány szomszédos kategóriát térhet el a vizsgált felületek színtónusa (29. táblázat).



71. ábra: Szürkeszín skála az osztrák irányelv szerinti színeltérés vizsgálatához [72]

29. táblázat: Színtónus egyenlőség vizsgálata az osztrák irányelv szerint [72]

Alosztály	Értékelési szempontok
FT1	<ul style="list-style-type: none"> Világos és sötét elszíneződések megengedettek (a színskálán maximum 5 szomszédos színtónusbeli eltérés) Rozsda és szennyeződési foltok nem megengedettek
FT2	<ul style="list-style-type: none"> mint az FT1, illetve: egységes, nagy felületű világos és sötét elszíneződések megengedettek (a színskálán maximum 4 szomszédos színtónusbeli eltérés) jól látható színbeli eltérés a betonozási rétegek között nem megengedett
FT3	<ul style="list-style-type: none"> mint az FT2, illetve: enyhe világos és sötét elszíneződések (enyhe felhőképződés) megengedettek (a színskálán maximum 3 szomszédos színtónusbeli eltérés) a beton helytelen utókezeléséből fakadó színeltérések nem megengedettek

A látszóbeton felületi minőségét számos tényező befolyásolja, ezért a félreértések elkerülése érdekében az osztrák irányelv három kategóriába sorolja a követelményeket és hibajelenségeket [72]:

- teljes biztonsággal nem elérhető követelmények
- korlátozottan elkerülhető eltérések
- elkerülhető eltérések.

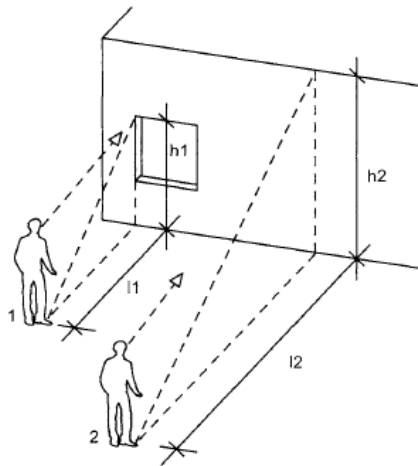
Az összes felületre jellemző egyenletes színtónus, a pórusmentesség, az egyenletes pórusszerkezet, a monolit felületek kivirágzás-mentessége, a kisebb letörésektől, kivérzéstől és szín- illetve textúrabeli különbségektől mentes élek kialakítása, a színtónus- és mintázatazonosság a zsalutáblák toldásainál a *teljes biztonsággal nem elérhető követelmények* közé tartozik.

A *korlátozottan elkerülhető eltérések* közé soroljuk a betonozási rétegek közötti enyhe színeltérést, a függőleges felületek felső részének túlzott pórusosságát, a nagyobb adalékanyag szemcsék vagy a vasalás kirajzolódását, a zsalutáblák illesztéseinél vagy az ankerlyukak körül megjelenő csekély mértékű vérzést, a nem elégséges tömörítés okozta enyhe vízkiválást, a felhőképződést, a kivirágzást, a függőleges felületeken megjelenő kisebb karcolásokat, valamint a lemezek alsó felületén megjelenő enyhe rozsdafoltokat.

A megfelelő tervezéssel és kivitelezéssel *elkerülhető eltérések* közé tartozik a nem megfelelő tömörítés okozta fészkeség, a függőleges és vízszintes felületeken a vasalás okozta rozsdafoltok megjelenése, a függőleges felületeken végigfutó habarcsorr megjelenése, a rendezetlen ankerlúd kiosztás, a csatlakozásoknál megjelenő jelentős síkbeli eltérés, a

zsalutáblák toldásainál megjelenő erős vérzés, a zsalutáblák helytelen tárolása és kezelése által eredményezett különböző felületi minőségek, a hibás élképzés, valamint a nem egységes zárás az ankerlyukak helyén [72].

A német irányelv szerint a látszóbeton felületek az összhatásuk alapján is értékelhetők, függetlenül az egyes kritériumoknak való megfeleléstől. Ennek során két fő szempontra kell figyelmet fordítani: a megfelelő vizsgálati távolságra és a fényviszonyokra. A vizsgálati távolság igazodik az értékelni kívánt felület méretéhez a 72. ábra szerint [60,71].



72. ábra: Vizsgálati távolság a látszóbeton felületek összképének értékeléséhez [60]

A vizsgálatot normál nappali fényviszonyok között kell elvégezni, s amennyiben több személy végzi a vizsgálatot, fontos, hogy arra azonos napszakban, azonos pozícióból kerüljön sor. A mesterséges megvilágítás magasabb követelményeket támaszt a látszóbeton felületekkel szemben, így a tervezésüket a villamos tervekkel össze kell hangolni. Az értékelés során azonban mesterséges fényforrás alkalmazása nem megengedett [60]. A vizsgálat során fotódokumentáció készül, valamint rögzítésre kerülnek a detektált felületi eltérések.

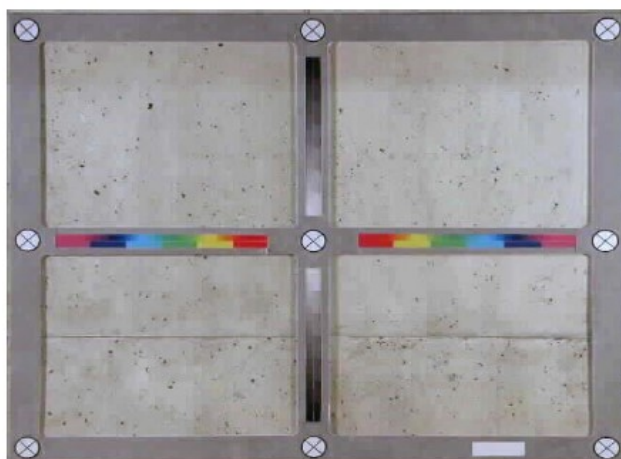
Schulz [60] egy csökkentő tényezős értékelési eljárást javasolt, mely szerint a vizsgálni kívánt épülettel vagy épületrésszel szemben támasztott főbb követelményekhez (pl. funkció, esztétikai érték, gazdaságosság, stb.) súlyozó tényezőket határoz meg, majd az egyes tényezőkhöz az elvárt és teljesített követelmények összehasonlításával csökkentő tényezőket rendel a 30. táblázat szerint. A végeredmény egy százalékos érték, mely megmutatja, milyen mértékben teljesíti a vizsgált objektum a vele szemben támasztott követelményeket.

30. táblázat: Csökkentő tényezők meghatározása Schulz alapján [60]

Csökkentő tényező (T)	Állapot, hiba mértéke
0.00	elvárt állapot=hibátlan
0.10	csaknem hibátlan
0.20	kis hiba
0.30	közepes hiba
0.40	számottevő hiba
0.50	durva hiba
0.60	nagyon durva hiba
0.70	súlyos hiba
0.80	nagyon súlyos hiba
0.90	elégtelen állapot
1.00	értékelhetetlen állapot

4.1.4 Digitális képfeldolgozás alkalmazása a felületek értékelésében

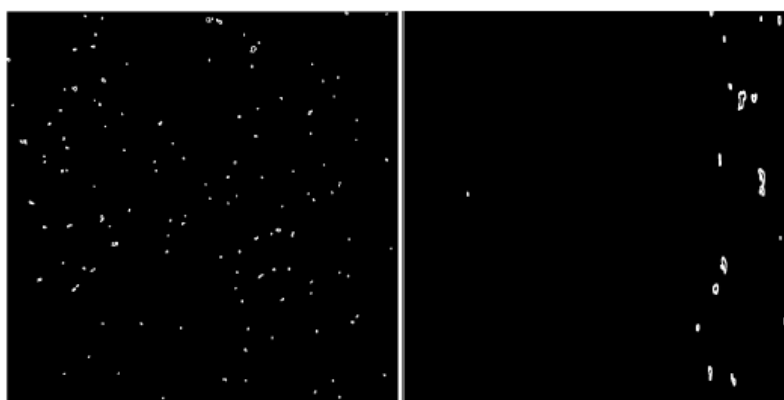
A digitális képfeldolgozás alkalmazási területe rendkívül tág, az orvosi diagnosztikától [78] kezdve a biztonságtechnikán [79] át a számítógépes látásig [80] számos feladatot lát el. Az építészeti és építőmérnöki szakmában gyakran alkalmazzák fotogrammetriai felmérések során [81], de számos eljárás létezik a vasbetonszerkezetek roncsolásmentes diagnosztikai vizsgálatára [82,83,84], amely elsősorban a szerkezet teherbírásának ellenőrzésére szolgál. Ezzel szemben a látszóbeton felületek esztétikai értékének megítélése kapcsán eddig kevés példa található a digitális képfeldolgozás alkalmazására annak ellenére, hogy a jelenleg érvényes manuális vizsgálati módszerek hatékonyságának, valamint pontosságának növelése aktuális téma. Stanke [85] vezetésével 2003-ban végzett kutatás során fotogrammetriai módszeren alapuló képfeldolgozási eljárás került kidolgozásra, amely a felületi pórustartalom és a színeltérés objektív értékelését célozta meg. A fényképek készítéséhez egy egyedi, referenciaponttal és színskálával ellátott keretet használtak (73. ábra). A képek kiértékeléséhez az Optimas [86] szoftvert, az adatok feldolgozásához az Excel programot használták. Az alkalmazott keret lehetővé teszi a kép valós méretre állítását, felosztását, valamint a színskála alkalmazásával a színeltérés vizsgálatát. A képek kiegyenlítését követően a pórusosság vizsgálatát a hisztogramon egy választott küszöbérték beállításával végezték el, az így kapott érték általában néhány százalékkal magasabb a kézi módszerrel kapott eredményeknél.



73. ábra: G. Stanke által alkalmazott keret a fényképek készítéséhez [85]

Különböző kameraállásokból és megvilágítási viszonyok között készített fényképeken vizsgálták a látszólagos pórussterületek eltérését, amelyek közel 95%-ban megegyezőnek bizonyultak, tehát a torzítás és megvilágítás a pórusok detektálására gyakorolt hatása nem jelentős.

Stanke et al. [87] későbbi kutatási jelentésükben továbbfejlesztve az eljárást, a mintafelületet 16 egységre felbontva vizsgálják a pórusok eloszlását, valamint az átmérők átlagát és szórását a vizsgálati egységekben. Kutatásaik alapján megállapították, hogy a póruseloszlás vizsgálata szerinti osztályozás szemléletesebben fejezi ki a látszóbeton minőségét, amelyet alátámaszt az azonos pórustartalmú felületek eltérő megjelenése (74. ábra).



74. ábra: Azonos pórustartalmú (0.25 %) felületek [87]

A pórustartalom szerinti osztályba sorolásra javaslatokat fogalmaznak meg a német Merkblatt Sichtbeton [71] irányelv számára, miszerint a teljes felület átlagos pórustartalmától való eltérést korlátozni kell a vizsgálati egységekben. A színeltérés vizsgálata során szűrkeszínskálát alkalmazva meghatározásra került egy referenciaszín, amely általában a skála közepét jelenti, majd az intenzitásértékek kiszámítását követően meghatározták a

szomszédos tónusok a referenciától és egymástól való eltérését. Ezek alapján osztályokat hoztak létre, majd a vizsgált felület intenzitásértékeit meghatározva és a szintónusoknak megfelelően megállapítható, melyik osztály milyen arányban van jelen a felületen. A textúra értékelési szempontjához a képet a póruseloszlás vizsgálatához hasonlóan 16 vizsgálati egységre bontják, melyekben különböző jellemzőket határoznak meg úgy, mint az intenzitásértékek, az intenzitástartomány és annak szimmetriája, a kontraszt változása, stb. Ezen jellemzők alapján konkrét értéket rendelnek például az entrópia és a homogenitás vizsgálati szempontjához, melyek alkalmazásával meghatározásra kerültek a textúra osztályok [87].

A fentiekben bemutatott kidolgozott módszerek előremutatóak a látszóbeton felületek értékelésének objektívabbá és hatékonyabbá tételére kapcsán. Ezek az eljárások azonban több eszköz és szoftver alkalmazását kívánják meg, valamint a póruseloszlás vizsgálata során egy állandó értékben határozzák meg az alkalmazott küszöbértéket, amelyet a vizsgált mintafelületektől eltérő szintónusú felületek esetében újból kalibrálni kell. Jelenlegi ismereteim szerint továbbá nem áll rendelkezésre olyan módszer, amely alkalmas egyszerre több szempont értékelésére.

4.2 ÚJ VIZSGÁLATI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA

A kutatás célja olyan eljárás kidolgozása a látszóbeton felületek porozitásának értékelésére, amely egyetlen fénykép alapján, a lehető legkevesebb időráfordítással, automatikusan elvégezhető. Cél volt továbbá az ingyenes platform használata a módszer hozzáférhetőségének és alkalmazhatóságának érdekében. A vizsgálati szempontok kiválasztásakor a kézi módszerrel csak jelentős időráfordítással értékelhető felületi eltérésre helyeztem a hangsúlyt, így elsősorban a porozitás vizsgálatát dolgoztam ki részletesen, az értékelés alapjául kidolgozott eljárás azonban további szempontok vizsgálatát is lehetővé teszi.

4.2.1 Alkalmazott eszközök és szoftverek

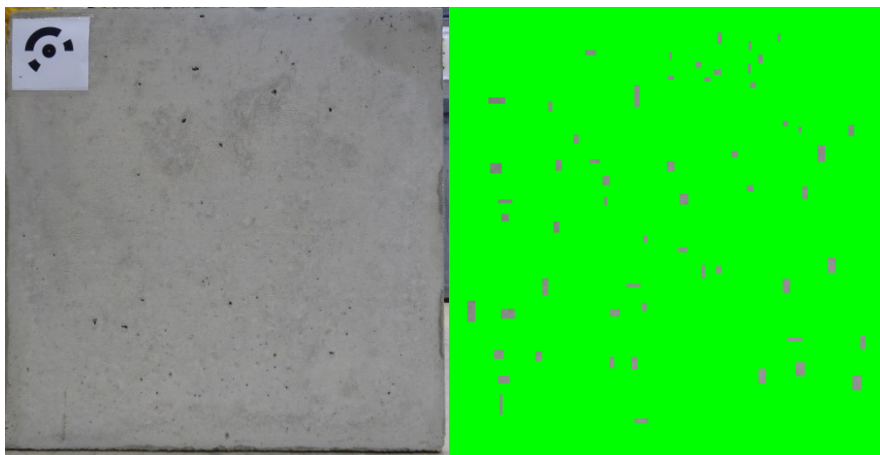
Az eljárás kidolgozásához a Python [88] programozási nyelvet, valamint a GIMP [89] képszerkesztő szoftvert alkalmaztam. A mintavételezéshez SONY DSC-HX350 típusú digitális fényképezőgépet használtam. A program kidolgozásához a Széchenyi István Egyetem Új Tudástér, mélygarázs, valamint Inno-Share épületrészeinek látszóbeton felületeiről készítettem fényképeket. A fotók készítésekor a közel azonos fényviszonyok biztosításához minden esetben vakut használtam. A képeket azonos napon, rövid időbeli eltéréssel készítettem. A program kidolgozásához a Python 3.6 programverziót, illetve annak kiegészítőit (OpenCV, NumPy, Scipy) használtam. A vizsgálathoz használt hardver környezet az alábbi:

- Processzor: Intel Core i7-5500U CPU 2.40 GHz
- Memória: 8 GB

4.2.2 Az eljárás bemutatása

4.2.2.1 Bemelő adatok

A feldolgozáshoz a felületre közel merőleges pozícióból készített és referenciával ellátott fénykép szükséges. A program egyetlen manuális lépése, amely a feldolgozás előtt elvégzendő, a fényképből felületi hibától mentes részek kiválasztása és a kép többi részének egy adott színnel való kitöltése. Ehhez a lépéshez a GIMP [89] képszerkesztő programot alkalmaztam. E két kép szolgál a program bemenő adataként (75. ábra).



75. ábra: A program bemenő adatai: a) Referenciával ellátott fénykép a vizsgálandó felületről; b) Manuálisan kiválasztott hibától mentes felületrészek

4.2.2.2 Referenciafelület előállítása

A referenciakör átmérőjének ismeretében a fénykép pontos mérete meghatározható. Az OpenCV modul kontúrkereső algoritmusának segítségével a program megkeresi a referencián található kört (76. ábra), melyhez az alábbi szűrőfeltételeket definiáltam:

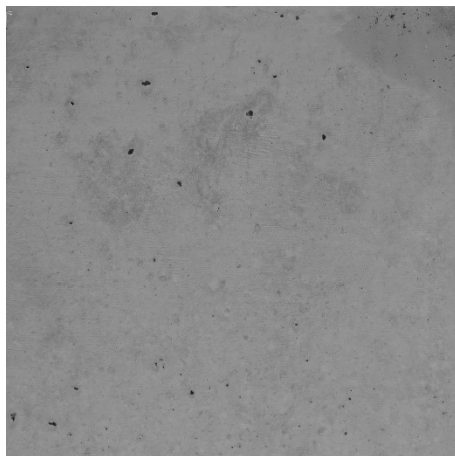
- az objektum területe,
- az objektum konvexitása, amely a kontúr területének és a minimális területű befoglaló konvex poligon területének a hányadosa.
- az objektum körszerűsége, amely a detektált objektum kerületének, illetve a terület nagyságából számított kör kerületének a hányadosa.

A kör detektálását követően meghatározhatók a kör középpontjának koordinátái, a kép mérete és a pixel-milliméter átváltás tényezői.



76. ábra: Referencia felismerése és a kép skálázása; 1 pixel = 0.196 mm

Ezt követően mind az eredeti, mind a hibamentes részeket tartalmazó képen kivágásra kerül az 50x50 cm-es mintafelület (77. ábra), melynek sarokponti koordinátái a kör középpontjának ismeretében megadhatók. A kivágott mintafelület lesz a vizsgálat tárgya, melynek nagysága szabadon változtatható, jelen esetben a választott méret a szabvány által megadott referenciafelület nagyságához igazodik.



77. ábra: 50x50 cm-es kivágott mintafelület

A digitális kamerák és az emberi szem más módon méri a beérkező fényenergiát, így a képernyőn megjelenő kép karakterisztikája eltér a való világban a szemünk által érzékelttől [90]. Ez azt jelenti, hogy egy színcsatorna Q értéke helyett a kijelző tartalma az alábbi képlettel írható fel:

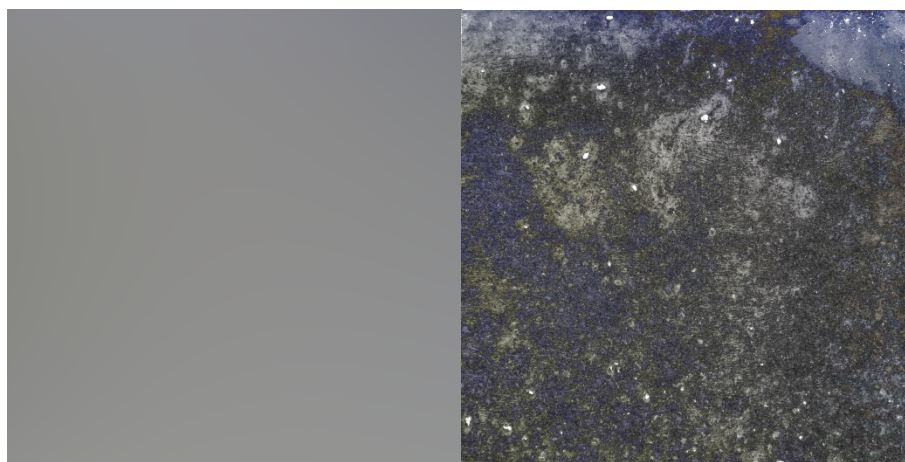
$$C_{\gamma}(Q) = C_m \cdot \left(\frac{Q}{Q_m}\right)^{\gamma} \quad (32)$$

ahol Q_m a maximális színcsatorna-érték, C_m a maximális kódolt érték, γ a transzformáció kitevője. A fenti nemlineáris összefüggés miatt a képernyőn a színcsatornák egységnyi változása kis változásként jelenik meg a sötét, és nagyként a világos tartományban. Ahhoz, hogy a képernyőn megjelenő raszterkép érzete megegyezzen a valósággal, szükség van az intenzitásértékek transzformálására, mely során a kódolt értéket $1/\gamma$ hatványra emeljük, amely az úgynevezett gamma korrekció. A gamma kitevő értéke függ a konkrét berendezéstől, általában 2.0 és 2.5 közötti, de a 2.2 a nemzetközi gyakorlat által elfogadott közepes érték [91], így ezt alkalmaztam a korrekció során, amelyet a már kivágott képeken végeztem el.

4.2.2.3 Illesztés

A módszer alapja a hibamentes felületrészekre, mint háttérre egy kétváltozós, harmadfokú polinom illesztése, majd az eredeti képtől való eltérések hibaként történő megfeleltetése. Az

illesztés a háttér RGB csatornáira a legkisebb négyzetek módszerével történik. Az eredmény (illesztett kép) a referenciafelület hibamentes változata. A program segítségével az illesztés pontossága számítható. Ezután létrehozom az eredeti és az illesztett kép különbségét, amelyen az egyes felületi hibák már jól kivehetők (78. ábra).



78. ábra: a) Az illesztett kép; b) Az illesztett és az eredeti kép különbsége 5-szörös szorzóval; az illesztés átlagos hibája: 1.4%

4.2.2.4 Szegmentálás

Képek szegmentálása alatt a kép meghatározott tulajdonságok alapján történő részekre bontását értjük. Az egy homogén régióba tartozó pixelek kiválasztásának alapját leggyakrabban a hasonló intenzitásérték vagy szín, illetve a mintázat képezi [92]. A szegmentálás alapját jelen esetben az illesztett és az eredeti kép intenzitásértékeinek összehasonlítása adja. Az átlagosnál (az illesztett képhez viszonyítva) sötétebb illetve világosabb pixelek háttértől való elkülönítéséhez és a nem valós pórusok kiszűréséhez bevezettem egy toleranciafaktort. A szegmentált képet így az alábbi összefüggések segítségével hoztam létre:

$$A_{R,G,B} = I_{R,G,B} > F_{R,G,B} + TF \cdot e_{R,G,B} \quad (33)$$

$$B_{R,G,B} = I_{R,G,B} > F_{R,G,B} - TF \cdot e_{R,G,B} \quad (34)$$

ahol

$A_{R,G,B}$: az átlagosnál világosabb pixeleket tartalmazó kép

$B_{R,G,B}$: az átlagosnál sötétebb pixeleket tartalmazó kép

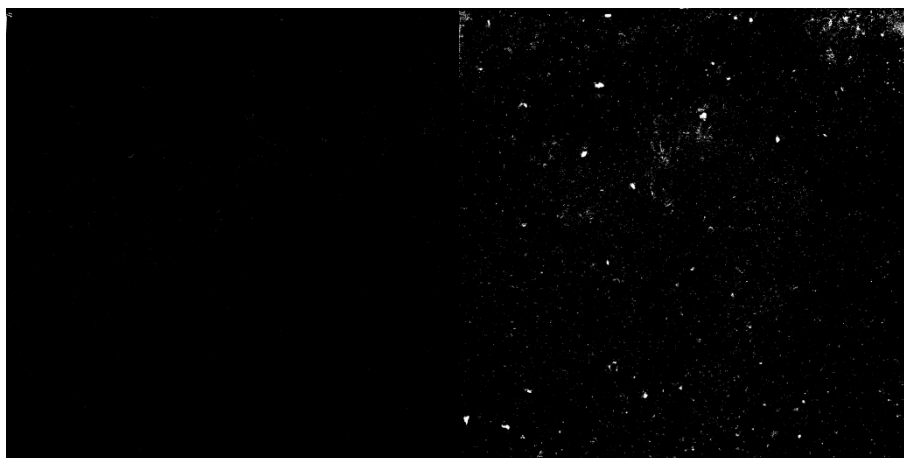
$I_{R,G,B}$: az eredeti kép

$F_{R,G,B}$: az illesztett kép

TF : toleranciafaktor

$e_{R,G,B}$: az illesztés hibája.

A toleranciafaktor értékét a manuális vizsgálatokkal kapott eredmények segítségével kalibráltam. Az így kapott szegmentált képeken (79. ábra) simítást alkalmaztam a nem valós pórusok kiszűrésére.



79. ábra: A képszegmentálás eredménye $TF=6.5$ alkalmazásával: a) az átlagnál világosabb pixeleket tartalmazó kép ($A_{R,G,B}$); b) az átlagnál sötétebb pixeleket tartalmazó kép ($B_{R,G,B}$)

A zajszűréshez Gauss-szűrőt használtam, amely módszer lényege, hogy minden pixel esetében az öt körülvevő pixel intenzitásának súlyozott átlagát vesszük figyelembe [93]. A maszk mérete jelen esetben egy 11×11 pixel méretű kernel, az így kapott simított képek a 80. ábrán láthatóak.



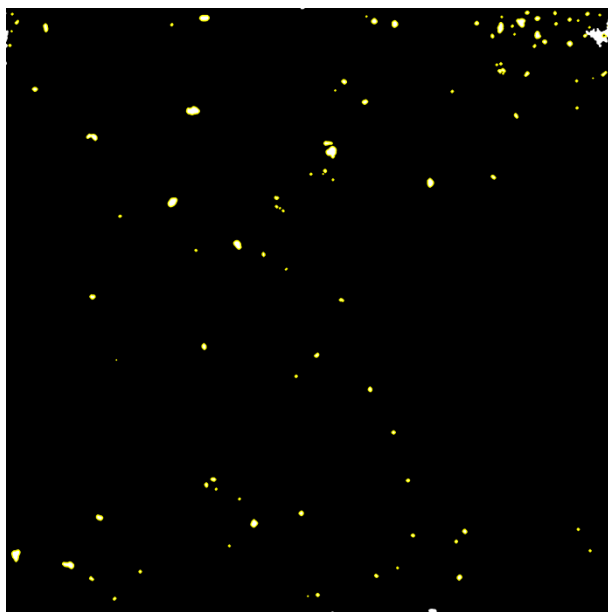
80. ábra: Gauss-szűrő alkalmazása az a) átlagnál világosabb pixeleket tartalmazó képen, illetve a b) átlagnál sötétebb pixeleket tartalmazó képen

Az objektumok háttértől való elválasztásának, azaz jelen esetben a felületi pórusok detektálásának alapja az átlagnál sötétebb pixeleket tartalmazó simított kép (80. b) ábra). A képen adaptív (lokális) küszöbölést alkalmaztam, amely során a küszöbérték paraméterét a vizsgált pixel egy lokális környezetének intenzitásértékei alapján határozzuk meg, vagyis ez pixelenként változó lehet [94]. Az alkalmazás során a vizsgált pixel 5×5 pixel méretű környezetét vettem figyelembe. Ezt követően az OpenCV modul kontúrkereső funkcióját

futtatva a küszöbölt képen, detektálhatóak az objektumok. A felületi pórusok felismeréséhez a talált objektumokon szűrést kell végezni. A szűrőfeltételeket a pórusok általános jellemzői alapján határoztam meg:

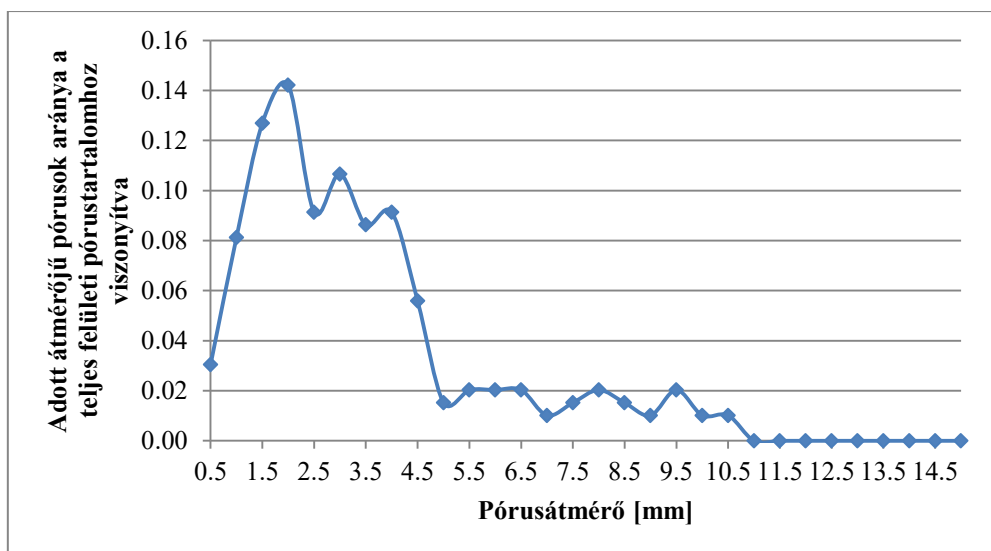
- a pórusok átmérője meghatározott intervallumon belül mozoghat; a magyar szabvány az 1 és 15 mm közötti, míg a német és osztrák irányelv, illetve szabvány a 2 és 15 mm közötti pórusokat veszi figyelembe. A pórusok eloszlásának szélesebb körű vizsgálata érdekében a 0.5 és 15 mm közötti pórusokat vettem figyelembe.
- a pórusok jellemzően konvex alakzatok, így szűrőfeltételt írtam elő a *konvexitás* értékére,
- a pórusok formája általában a körhöz hasonló, ezért a harmadik szűrőfeltétel az objektumok *körszerűsége*.

Az ilyen módon detektált pórusok a 81. ábrán láthatóak. A pórusok szelektálását követően meghatározható azok darabszáma, így a felület porozitása százalékosan kifejezve, a várható érték, a szórás és a variancia.



81. ábra: Detektált pórusok sárga színnel jelölve – darabszám: 197, felületi pórustartalom: 0.66%, várható érték: 3.45 mm, variancia: 5.30 mm

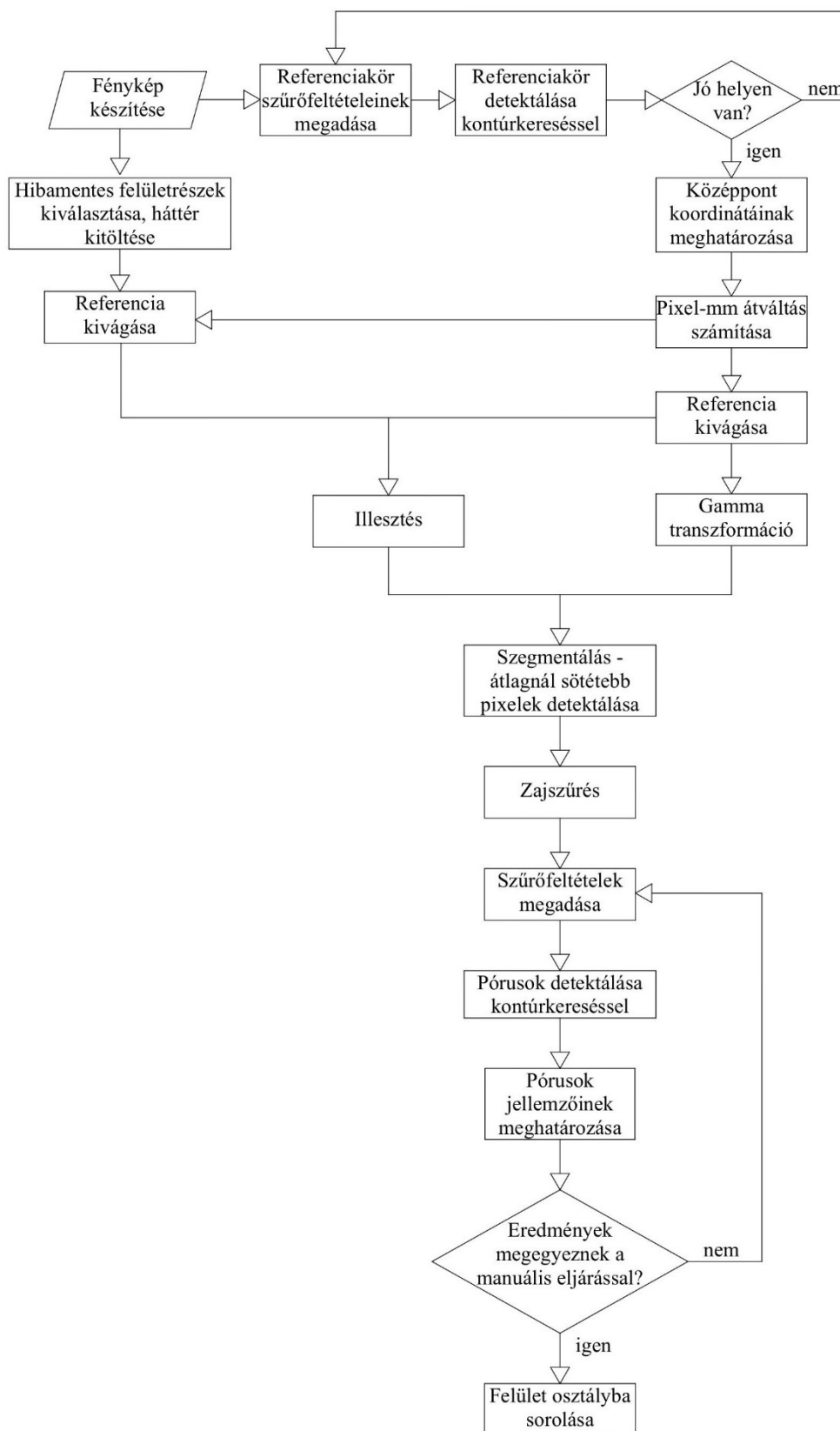
A pórusok átmérő szerinti eloszlásának vizsgálatához 0.5 mm-ként osztályokba soroltam őket, az egyes osztályokhoz tartozó darabszám értékeket, az eloszlásfüggvény a normális eloszláshoz viszonyított ferdeségét és csúcosságát a program automatikusan számítja. Az eloszlás diagramok elkészítéséhez az Excel szoftvert alkalmaztam (82. ábra).



82. ábra: A vizsgált felület átmérő szerinti póruseloszlása

A példában vizsgált felület póruseloszlás diagramjának ferdeségi együtthatója +1.26, azaz a sűrűségfüggvény aszimmetrikus, jobbra ferde. Ez azt jelenti, hogy a kisebb átmérőjű pórusok nagyobb arányban vannak jelen a teljes felületi pórustartalomhoz viszonyítva. Az átmérő növelésével az előfordulási valószínűségük egyre csökken. Az eloszlás diagram csúcsossági (vagy lapultsági) együtthatója +0.23, azaz a normális eloszláshoz képest csúcsosabb a sűrűségfüggvény, a pórusok eloszlása szűkebb tartományt fed le.

A kidolgozott módszer folyamatábráját a 83. ábra mutatja.



83. ábra: A kidolgozott eljárás folyamatábrája

4.2.3 A kidolgozott eljárás alkalmazhatósága

4.2.3.1 Esettanulmány bemutatása

Az eljárás kidolgozásához és teszteléséhez összesen 40 fényképet készítettem, 20 darabot az egyetem belső látszóbeton felületeiről (a továbbiakban a fotók jelölése: P01-P20), 20 darabot pedig a mélygarázs kültéri látszóbeton felületeiről (a továbbiakban a fotók jelölése: P21-P40). A kivitelezőtől kapott információk alapján a kivitelezés módja és az alkalmazott zsaluzat mind a beltéri, mind a kültéri felületek esetében azonos volt, különbség elsősorban a betonösszetételben volt. Minden fényképen lefuttattam a programot, amely során a detektált pórusokat szemrevételezéssel ellenőriztem. A 40 mintából 10 mintán végeztem el az MSZ 24803 szabvány [70] szerinti kézi vizsgálatot, melynek eredményeit a 31. táblázat tartalmazza. A mérési eredményeket a Melléklet 3.1 fejezete tartalmazza.

31. táblázat: Automatikus és manuális vizsgálat eredményeinek összehasonlítása

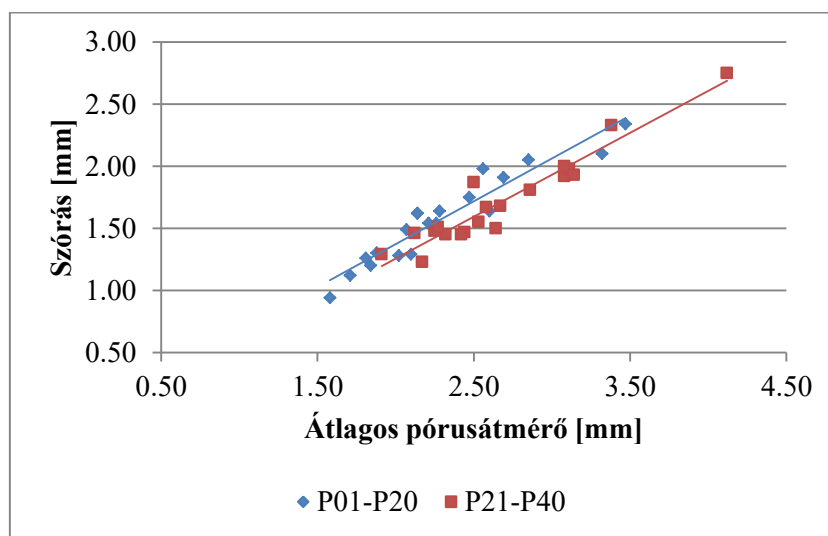
Vizsgált felület	Felületi pórustartalom a program szerint [%]	Felületi pórustartalom a manuális vizsgálat szerint [%]	Eltérés [%]
P01	1.23	1.29	4.9
P03	1.64	1.73	5.5
P07	1.39	1.45	4.3
P12	0.58	0.61	5.2
P18	0.94	0.98	4.3
P21	1.06	1.11	4.7
P24	1.37	1.44	5.1
P28	1.41	1.45	2.8
P31	0.67	0.70	4.5
P36	1.08	1.13	4.6
Átlagos eltérés:			4.6

A programmal kapott eredmények átlagosan 5%-kal magasabb felületi pórustartalmat mutatnak, mint a kézi vizsgálatnál kapott eredmények. A felületi pórustartalom felülbecslésének az oka egyrészt feltehetően a kézi vizsgálatban rejlő hibalehetőségek, másrészt mivel a program futtatása során minden fényképen ugyanazokat a beállításokat alkalmaztam, ezért előfordulhat téves pórusok detektálása is, például egy erősebb lokális színeltérés is megjelenhet pórusként. A kézi ellenőrzés, valamint az eredmények szemrevételezéses ellenőrzése során a módszer pontosságát elfogadhatónak találtam, a pontosság vizsgálatát követően értékeltem a kapott eredményeket. A mintafelületek pórustartalom vizsgálatának főbb eredményeit a 32. táblázat tartalmazza.

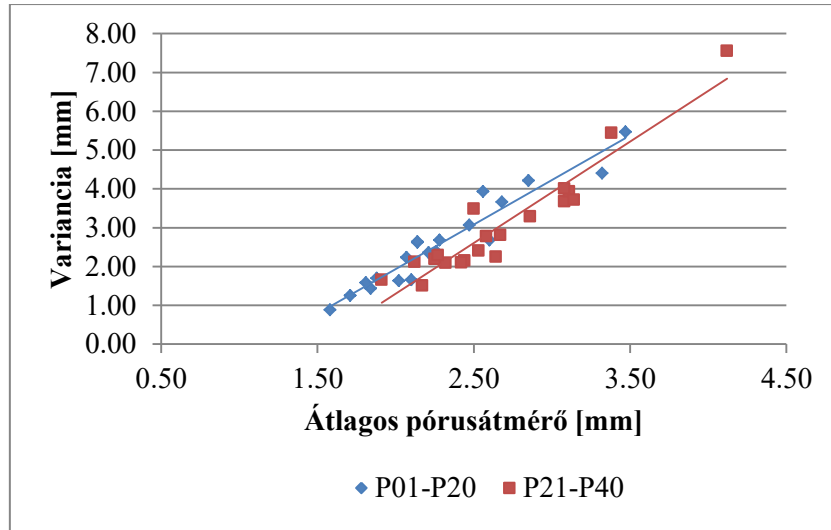
32. táblázat: A felületi pórustartalom vizsgálat főbb eredményei

Vizsgálati szempont		Vizsgált felület	
		P01 – P20	P21 – P40
Átlagos átmérő	[mm]	2.30	2.68
Variancia átlagos értéke	[mm]	2.62	3.07
Szórás átlaga	[mm]	1.58	1.72
Minimális felületi pórustartalom	[%]	0.37	0.05
Maximális felületi pórustartalom	[%]	2.68	2.51
Átlagos felületi pórustartalom	[%]	2.52	1.39
Az eloszlásfüggvény átlagos ferdeségi együtthatója	[-]	+1.91	+1.56
Az eloszlásfüggvény átlagos csúcsossági együtthatója	[-]	+2.52	+1.39

Összehasonlítva a bel- és kültéri látszóbeton felületek pórustartalmának jellemzőit megállapítható, hogy a beltéri felületeken átlagosan kisebb pórusok vannak nagyobb arányban jelen, valamint a szórás és a variancia is kisebb, mint a kültéri felületeken. Az átlagos pórusátmérő növekedésével nő a szórás mind a kültéri, mind a beltéri felületek esetében (84. ábra). Hasonlóképpen a variancia értéke lineárisan nő a pórusátmérő növekedésével mindkét csoport esetében (85. ábra).

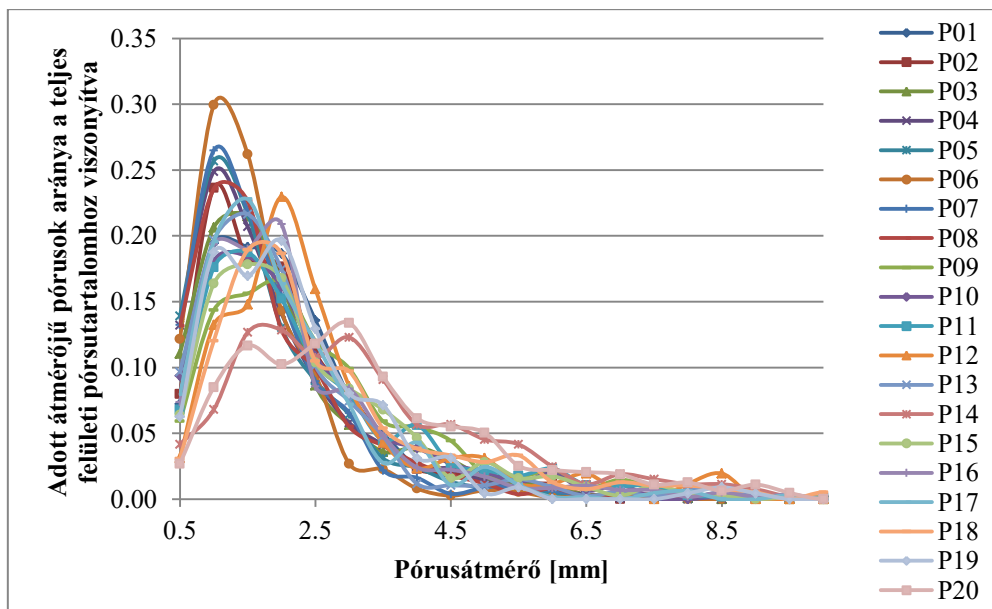


84. ábra: Az átlagos pórusátmérő és a szórás összefüggései

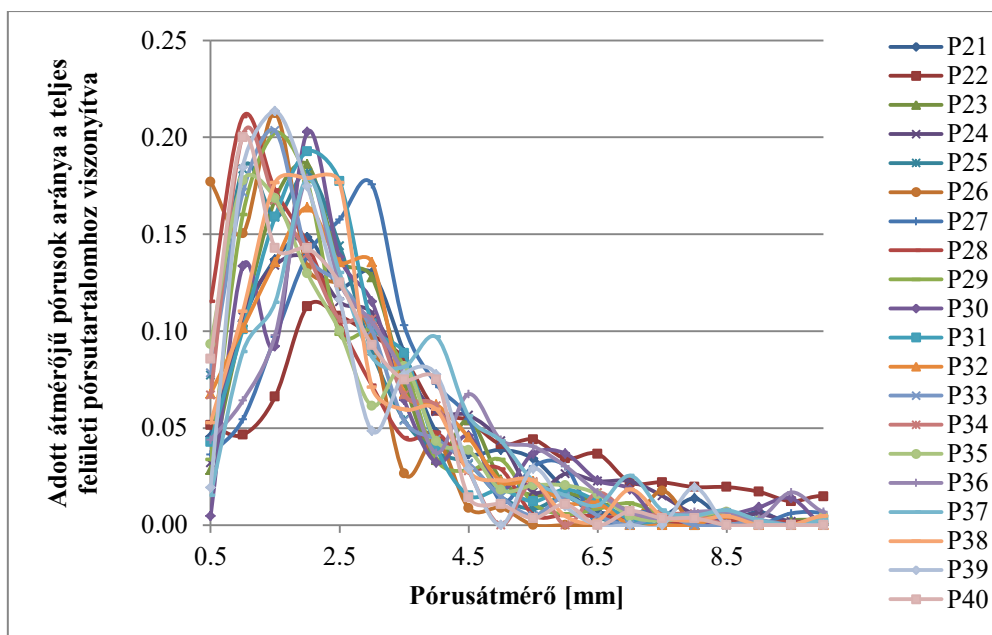


85. ábra: Az átlagos pórusátmérő és a variancia összefüggései

A pórusok átmérő szerinti eloszlás diagramja minden esetben jobbra ferde, illetve csúcsosabb, mint a normális eloszlás. Külön vizsgálva a bel- és kültéri felületek póruseloszlását (86-87. ábra) jól látható, hogy a beltéri felületek esetében a pórusok szűkebb átmérő tartományban mozognak, az eloszlás jellemzően csúcsosabb. A kültéri felületek póruseloszlása nagyobb pórusátmérő tartományt fed le, ezáltal kisebb a csúcsossági együttható és gyakran két csúcs is megfigyelhető az eloszlás diagramokon. Mivel az átlagos pórusátmérő nagyobb, mint a beltéri felületek esetében, a ferdeségi együttható emiatt átlagosan kisebb.

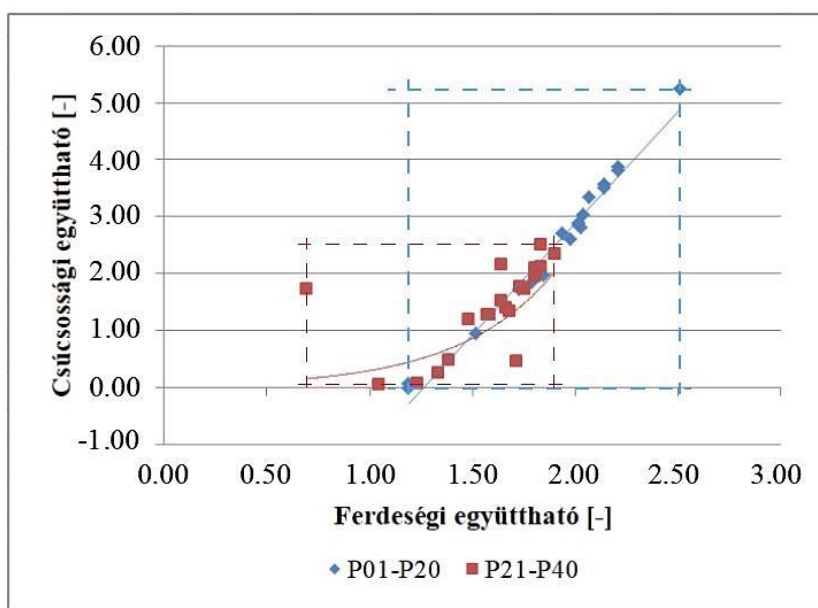


86. ábra: A beltéri látszóbeton felületek pórusainak átmérő szerinti eloszlása

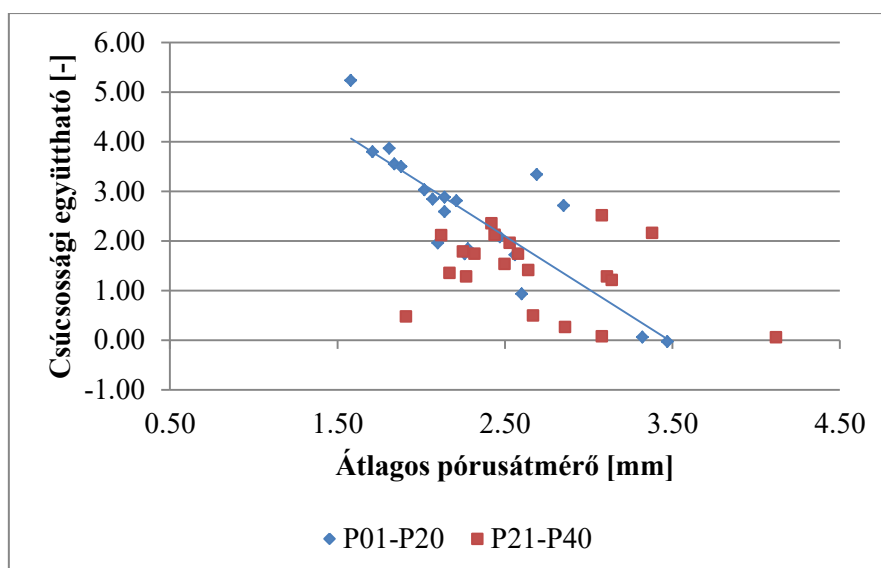


87. ábra: A kültéri látszóbeton felületek pórusainak átmérő szerinti eloszlása

Az eloszlás diagramok ferdeségi és csúcsossági együtthatójának összefüggései láthatók a 88. ábrán. A beltéri és kültéri felületek jól elkülönülnek, előbbi nagyobb, utóbbi kisebb tartományt fed le. A ferdeségi együttható növelésével a csúcsossági együttható nő, azaz minél kisebb az átlagos átmérő, annál szűkebb intervallumot fed le a pórusok átmérő szerinti eloszlása, amelyet a 89. ábra összefüggései is igazolnak. A beltéri, P01-P20 felületek esetében az értékek közel lineáris összefüggést mutatnak kis szórással, szemben a kültéri, P21-P40 felületekkel.

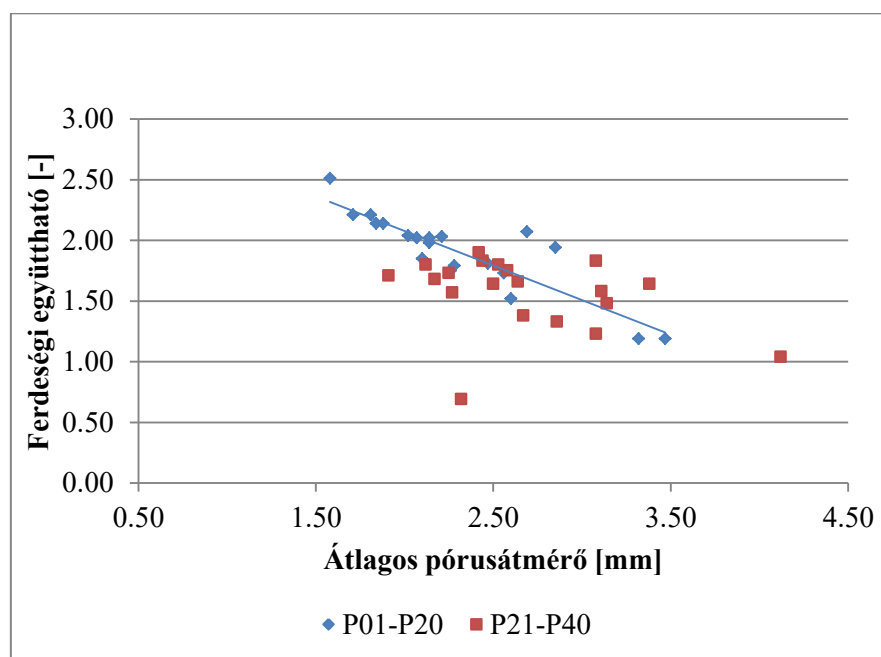


88. ábra: A pórusok átmérő szerinti eloszlásdiagramjának ferdeségi együtthatója a csúcsossági együttható függvényében



89. ábra: Az átlagos pórusátmérő és az eloszlás diagram csúcossági együtthatójának összefüggései

Az átlagos átmérő és az eloszlás diagram ferdeségi együtthatójának összefüggései láthatók a 90. ábrán, mely szerint az átlagos átmérő növekedésével a ferdeségi együttható csökken. Hasonlóan a csúcossági együtthatóval való korrelációhoz, a beltéri látszóbeton felületek esetében kisebb szórás tapasztalható.



90. ábra: Az átlagos pórusátmérő és az eloszlás diagram ferdeségi együtthatójának összefüggései

A vizsgálat időtartamát 10 db mintafelület esetében mértem. A részletes mérési adatokat a Melléklet 3.1 fejezete tartalmazza. A manuális vizsgálat során egy mintafelület esetében a pórusok pauszpapírra történő átrajzolása átlagosan 57 percet, a területük megállapítása 14 percet, a teljes pórussterület és így a felületi porozitás számítása 7 percet vett igénybe, így a

kézi vizsgálat átlagos időtartama 78 perc. A gépi vizsgálat során a marker felragasztása és a fénykép készítése 2 percet, a fotók válogatása 4 percet, a hibamentes felületrészek kiválasztása 6 percet, a program futtatása maximum 0.2 percet vett igénybe, az átlagos időszükséglet így 12 perc. A gépi vizsgálat ezek alapján átlagosan 85%-kal csökkenti a vizsgálatához szükséges időtartamot.

4.2.3.2 A kidolgozott eljárás alkalmazása a próbatetek vizsgálata során

Az általam készített próbatetek esetében a 3.3.1.1 *Felületi pórustartalom vizsgálata (70.old.)* fejezetben bemutatott eredményeket a gépi módszer paramétereinek 33. táblázatban szereplő értékeinek alkalmazásával kaptam. Az eredeti képből kivágott 50x50 cm-es felületek átlagosan 2500-2800 pixel nagyságúak, azaz 1 pixel átlagosan 0.17-0.2 mm-nek felel meg.

33. táblázat: Gépi vizsgálat paramétere a saját próbatetek vizsgálata esetében

Kör detektálásához használt szűrőfeltételek	Terület [pixel]	$5000 < A < 25\ 000$
	Konvexitás [-]	> 0.8
	Körszerűség [-]	> 0.8
Pórusok detektálásához használt szűrőfeltételek	A detektált kontúrra illesztett kör átmérője [mm]	Vizsgálati tartománynak megfelelően: a) $0.5 \leq d \leq 15$ b) $1 \leq d \leq 15$ c) $2 \leq d \leq 15$
	Konvexitás [-]	> 0.5
	Körszerűség [-]	> 0.5
Toleranciafaktor értéke [-]		12.0
Gauss simítás kernel mérete [pixel]		11
Adaptív küszöbölés kernel mérete [pixel]		5

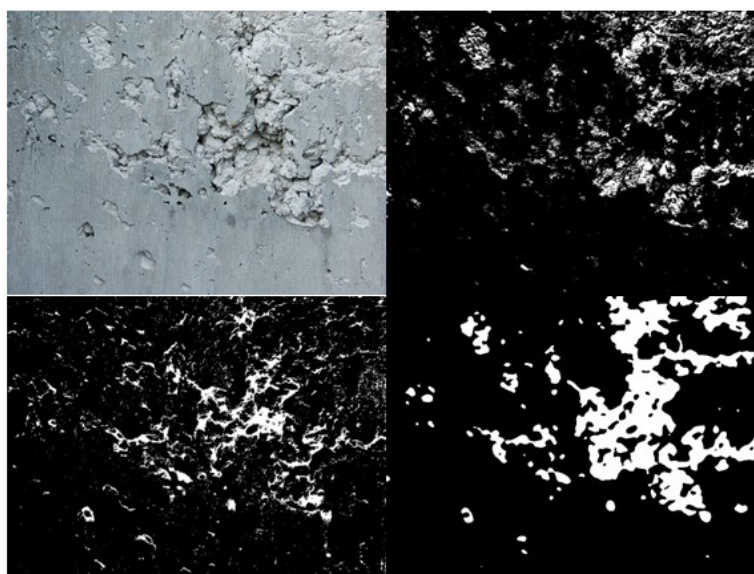
A vizsgált 24 felület közül két esetben volt szükség a referenciakör szűrőfeltételének módosítására, mely során a körszerűségre vonatkozó küszöbértéket 0.6-ra csökkentettem.

4.2.4 A kidolgozott eljárás további felhasználási lehetőségei

A látszóbeton felületi minőségének értékeléséhez kidolgozott módszernek számos fejlesztési lehetősége adott. Az illesztéssel történő hibakeresés módszerének legfőbb előnye, hogy a vizsgálat mindig relatív, azaz az eredeti képet annak hibamentes verziójával hasonlítjuk össze. Ebből adódóan a felületi pórustartalmon túl számos egyéb hiba detektálására van lehetőség egyetlen fénykép készítésével. Az Új Nemzeti Kiválóság Program keretein belül korábban végzett és jelenleg is folyó kutatásom során vizsgáltam a fészesség és a

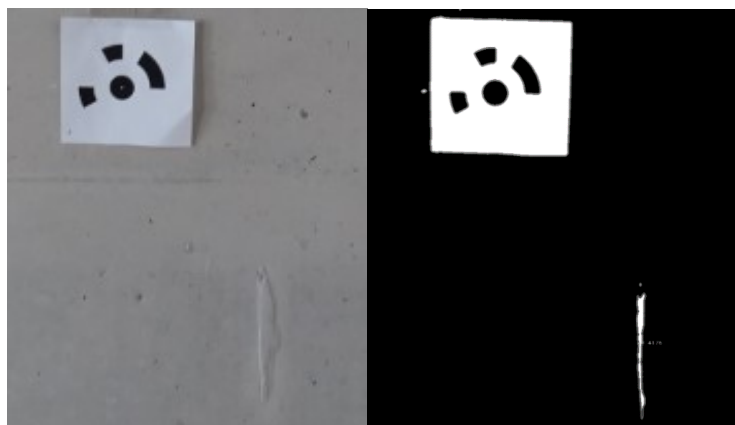
betonlerakódás detektálásának lehetőségét, valamint a színeltérés objektív értékelésének módszerét.

A fészesség képi megjelenése összetett; a sötét kontúron belül általában egy világosabb rész található, ezért a vizsgálatához a 4.2.2.4 *Szegmentálás (101. old.)* fejezetben bemutatott módszerrel előállított, az átlagosnál sötétebb és az átlagosnál világosabb pixeleket tartalmazó képet együttesen alkalmaztam. A zajszűrést az összegzett képen elvégezve meghatároztam a fészkes felület főbb jellemzőit, amely elsősorban az alacsony konvexitás és az alacsony körszerűség volt. Ezek alapján a fészkes felületrész detektálható, a teljes felülethez viszonyított aránya számítható és értékelhető (91. ábra).



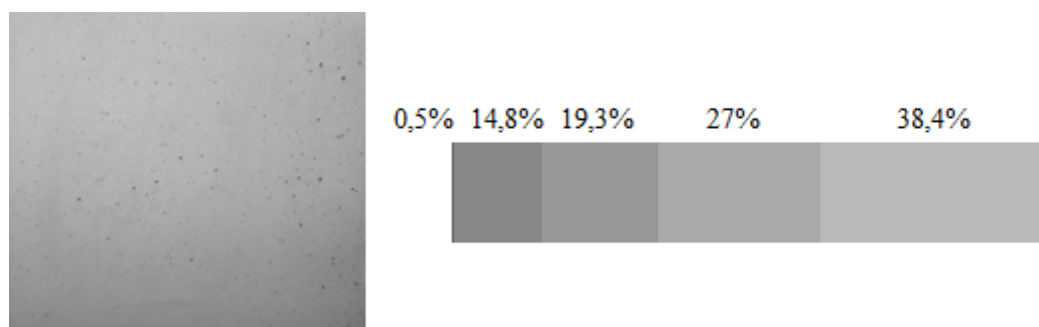
91. ábra: Fészesség vizsgálata a) eredeti kép, b) átlagnál világosabb pixeleket tartalmazó kép, c) átlagnál sötétebb pixeleket tartalmazó kép, d) összegzett kép zajszűrést követően

A betonlerakódás az átlagosnál világosabb pixeleket tartalmazó képen, a területre és konvexitásra vonatkozó szűrőfeltételek segítségével detektálható és mérhető (92. ábra).



92. ábra: Betonlerakódás detektálása

A színeltérés vizsgálatához a 4.1.3 *Értékelési módszerek (91. old.)* fejezetben bemutatott, a felület színének megadott szürkeszínskálához való viszonyítását szeretném alkalmazni az osztrák irányelv által javasolt skála felhasználásával [72]. Az intenzitásértékek szerinti csoportosítás módszerét a program már tartalmazza (93. ábra), a továbbiakban az eredeti képek színhelyes beállítása és az intenzitásértékek minősített színskála szerinti kiértékelése a feladat.



93. ábra: Színeltérés vizsgálata intenzitásértékek alapján

A fentiekben bemutatott eljárások egyelőre kidolgozás alatt vannak. Az alkalmazott módszer egyik előnye, hogy ezek a kritériumok egy fénykép készítésével egy programba foglalva vizsgálhatók. A kutatás fő célja egy olyan automatizált módszer kidolgozása, amely a lehető legtöbb szempont objektív és automatikus értékelését teszi lehetővé rövid idő alatt.

4.2.5 Összefoglalás

A kutatás harmadik részében egy digitális képfeldolgozáson alapuló módszert dolgoztam ki a látszóbeton felületek porozitásának értékelésére. Az eljárást 40 mintán, a Széchenyi István Egyetem beltéri és kültéri, eltérő betonösszetétellel készült látszóbeton felületeiről készített fényképeken teszteltem. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az alkalmazott módszer elfogadhatóan pontos, a manuális eljárással kapott eredményekkel összehasonlítva átlagosan 5%-kal nagyobb felületi pórustartalmat eredményez, a vizsgálathoz szükséges időtartamot azonban 85%-kal csökkenti. A pórusok eloszlását vizsgálva megállapítottam, hogy az összetételbeli különbségek megmutatkoznak mind a pórusok átlagos átmérőjének, szórásának és a varianciának az értékében, valamint az eloszlás jellegében. A módszert az általam készített próbatestek esetében is alkalmaztam, mely eredmények szerint a péptelítettség növelésével ugyancsak változás figyelhető meg a pórusok és az eloszlásfüggvény jellemzőiben. A kidolgozott eljárás további vizsgálatok integrálását is lehetővé teszi, amelyre a 4.2.4 *A kidolgozott eljárás további felhasználási lehetőségei (111. old.)* fejezetben tettem javaslatokat.

3. Tézis

Kidolgoztam egy módszert a látszóbeton felületek porozitásának digitális képfeldolgozáson alapuló értékelésére. A vizsgálathoz a felületről közel merőleges pozícióból, jelölőkörrel ellátott fénykép készítése szükséges. A módszer alapja az eredeti képen manuálisan kijelölt hibamentes felületrészekre, mint háttérre egy kétváltozós, harmadfokú polinom illesztése a legkisebb négyzetek módszerével, majd az eredeti képtől való eltérések hibaként történő megfeleltetése. A felületi pórusok detektálása az eredeti képből kivágott, 50x50 cm-es referenciafelületen, a szegmentálás módszerével történik, melynek szűrőfeltételeit a manuális vizsgálatokkal kapott eredmények alapján állítottam be. A kidolgozott módszerrel kapott eredmények átlagosan 5%-kal magasabbak a kézi módszerrel kapott eredményeknél. A gépi módszer átlagos időtartama 12 perc, amely így 85%-kal csökkenti a vizsgálati időt a kézi módszerhez viszonyítva.

Vonatkozó saját publikációk: [c] [d] [f] [g] [j]

5 AZ ÉRTEKEZÉS TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

1. Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy a zsaluzat vastagságának változása befolyásolja az adalékanyag halmaztömörtségét. Az alábbi összefüggéseket állapítottam meg:

1.1 Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált, 4/8, 8/16 és 16/32 mm szemmagyságú bányászott kvarckavics adalékanyag frakciók halmaztömörősége fenolfilm bevonattal ellátott nyír rétegelt lemez zsaluhéj alkalmazásával, tűvibrátoros tömörítés mellett, 60 cm szélességű és magasságú zsaluzat esetében a falvastagság 10-20 cm közötti változtatásával csökken, 20-50 cm közötti változtatásával kismértékben nő.

1.2 Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált, 4/8, 8/16 és 16/32 mm szemmagyságú bányászott kvarckavics adalékanyag frakciók halmaztömörősége furnérlemez zsaluhéj alkalmazásával, rázóasztalos tömörítés mellett, 30 cm szélességű és magasságú zsaluzat esetében a falvastagság 10 cm-ről 20 cm-re való növelésével nem változik jelentősen, 20 cm-ről 30 cm-re való növelésével nő.

1.3 Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált, 0/4 mm szemmagyságú bányászott kvarchomok adalékanyag frakció halmaztömörősége 60 cm szélességű és magasságú, fenolfilm bevonattal ellátott nyír rétegelt lemez zsaluzat alkalmazásával tűvibrátoros tömörítés mellett, valamint 30 cm szélességű és magasságú furnérlemez zsaluzat alkalmazásával rázóasztalos tömörítés mellett magasabb a 4/8, 8/16 és 16/32 mm szemmagyságú bányászott kvarckavics frakciók halmaztömörőségénél.

1.4 Tézis

Az MSZ EN 12620:2003 szabvány szerinti „A” és „C” ($D_{\max}=32$ mm) határgörbének megfelelő adalékanyag minta halmaztömörősége furnérlemez zsaluhéj alkalmazásával, rázóasztalos tömörítés mellett, 30 cm szélességű és magasságú zsaluzat esetében a falvastagság 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével nem változik jelentősen, 20 cm-ről 30 cm-re való növelésével nő.

Vonatkozó saját publikációk: [b] [h]

2. Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy a betonkeverék péptelítettsége és a zsaluzat vastagságának változása befolyásolja a látszóbeton felületek minőségét. Nem nedvszívó, fenolfilm bevonattal ellátott nyír rétegelt lemez zsaluhéj alkalmazásával, 60 cm szélességű és magasságú zsaluzat esetében, CEM II/A-S 42,5 R típusú cement és $v/c = 0.50$ víz-cement tényező, valamint MSZ EN 12620 szerinti „C” határgörbének megfelelő adalékanyag alkalmazásával, tűvibrátoros tömörítés mellett az alábbi összefüggéseket állapítottam meg:

2.1 Tézis

A péptelítettség 76 l/m^3 -ról 101 l/m^3 -re való növelésével, 10 és 20 cm-es zsaluzati vastagság mellett a látszóbeton felületek 0.5 és 15 mm közötti átmérő tartományban vizsgált pórustartalma nő, a péptelítettség 101 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével jelentősen csökken. 30 cm-es zsaluzati vastagság alkalmazása mellett a péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével a felületi pórustartalom jelentősen, 98%-kal csökken. A felületi pórustartalom a 30 cm-es zsaluzati vastagsághoz viszonyított eltérő változásának oka a 10 és 20 cm-es zsaluzati vastagság esetében az adalékanyagok a számított átlagnál kisebb halmaztömörsege és nagyobb pépigénye. A póruseloszlást 0.5 mm-re kerekített átmérőnként vizsgálva **a péptelítettség 76 l/m^3 -ról 101 l/m^3 -re való növelésével a pórusok átlagos átmérője, valamint szórása csökken. A zsaluzati vastagság 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével a látszóbeton felületek átlagos pórustartalma 35%-kal csökken, a pórusok eloszlása, valamint az átlagos átmérő nem mutat jelentős változást.** A 126 l/m^3 és 150 l/m^3 péptelítettséggel készült próbatestek felületi pórustartalma 0.3% alatt van minden zsaluzati vastagság mellett, így **teljesítik a legmagasabb követelményszintet** az MSZ 24803 magyar szabvány, az osztrák Richtlinie Geschalte Betonflächen és a német Merkblatt Sichtbeton irányelvek szerint.

2.2 Tézis

A péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével a színeltérés mértéke és mennyisége jelentősen csökken. A zsaluzati vastagság 10 cm-ről 30 cm-re való növelésével a színeltérések mértéke és mennyisége jelentősen csökken, a 30 cm vastagságú zsaluzattal készített felületek összképe homogén. A színeltérés szempontjából **a 150 l/m^3 péptelítettséggel készült próbatestek felületei teljesítik a legmagasabb követelményszintet** az MSZ 24803 magyar szabvány, az osztrák Richtlinie Geschalte Betonflächen és a német Merkblatt Sichtbeton irányelvek szerint. **A kivézés és fészkeség**

mértéke a péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével jelentősen, a zsaluzati vastagság 10 cm -ről 30 cm -re való növelésével kismértékben csökken.

2.3 Tézis

Kimutattam, hogy a látszóbeton felületek póruseloszlása és az eloszlásfüggvény jellemzői összefüggésben állnak a betonösszetétel változásával. A péptelítettség 76 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével nő a kisebb átmérőjű pórusok aránya, így csökken az átlagos átmérő és a szórás, azaz az eloszlás egyre kisebb intervallumot fed le, melyet alátámaszt az eloszlásfüggvény ferdeségi együtthatójának 28%-os, csúcossági együtthatójának 68%-os növekedése, valamint a két együttható közötti lineáris összefüggés.

Vonatkozó saját publikációk: [a] [b] [i]

3. Tézis

Kidolgoztam egy módszert a látszóbeton felületek porozitásának digitális képfeldolgozáson alapuló értékelésére. A vizsgálathoz a felületről közel merőleges pozícióból, jelölőkörrel ellátott fénykép készítése szükséges. A módszer alapja az eredeti képen manuálisan kijelölt hibamentes felületrészekre, mint háttérre egy kétváltozós, harmadfokú polinom illesztése a legkisebb négyzetek módszerével, majd az eredeti képtől való eltérések hibaként történő megfeleltetése. A felületi pórusok detektálása az eredeti képből kivágott, $50 \times 50 \text{ cm}$ -es referenciafelületen, a szegmentálás módszerével történik, melynek szűrőfeltételeit a manuális vizsgálatokkal kapott eredmények alapján állítottam be. A kidolgozott módszerrel kapott eredmények átlagosan 5%-kal magasabbak a kézi módszerrel kapott eredményeknél. A gépi módszer átlagos időtartama 12 perc, amely így 85%-kal csökkenti a vizsgálati időt a kézi módszerhez viszonyítva.

Vonatkozó saját publikációk: [c] [d] [f] [g] [j]

6. ÖSSZEGZÉS

Doktori kutatásomban a látszóbeton felületek tervezési és értékelési módszerével, szempontjaival foglalkoztam. A kutatás három részre tagolódik. Az első részben az adalékanyagok zsaluzati mérettől és tömörítési módszertől függő halmaztömörségét vizsgáltam laboratóriumi körülmények között. A második részben különböző péptelítettségű betonkeverékek és különböző méretű zsaluzatok alkalmazásával készített látszóbeton felületek minőségét vizsgáltam. A harmadik részben digitális képfeldolgozáson alapuló módszert javasoltam a látszóbeton felületek porozitásának értékelésére.

A zsaluzati méret halmaztömöriségre gyakorolt hatásának vizsgálata során négy bányászott kvarchomok (OH 0/4) és kvarckavics (OK 4/8, OK 8/16, OK 16/32) adalékanyag frakciót, a homok frakció komponenseit, valamint az MSZ EN 12620:2013 szerinti „A” és „C” határgörbét vizsgáltam. Három zsaluzati típust alkalmaztam, melyek esetében eltérő tömörítési módszert választottam a vizsgált minták léptéke miatt. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a vizsgált kvarckavics frakciók halmaztömörisége a 60 cm szélességű és magasságú zsaluzat vastagságának 10 és 20 cm közötti változtatásával csökken, 20-50 cm közötti változtatásával kismértékben nő tűvibrátoros tömörítés mellett. A kavics frakciók halmaztömörisége rázóasztalos tömörítés mellett a 30 cm szélességű és magasságú zsaluzat vastagságának 10 és 20 cm közötti változtatásával nem változik jelentősen, 20 és 30 cm közötti változtatásával növekszik. A homok frakció halmaztömörisége minden esetben jelentősen meghaladja a kavics frakciókét mindkét zsaluzat esetében. A homok frakció komponenseinek vizsgálata során megállapítottam, hogy a 7.1 cm átmérőjű henger magasságának 5.2 cm-ről 7.2 cm-re való növelésével kézi ejtéses tömörítés mellett a halmaztömöriség közel lineárisan nő, majd ezt követően konstans, mely tendencia a tömörítés során sem változik. Az „A” és „C” határgörbék halmaztömörisége száraz állapotban a 30 cm magasságú és szélességű zsaluzat vastagságának 5 cm-ről 20 cm-re való növelésével közel állandó marad, ezt követően nő, rázóasztalos tömörítés mellett. A határgörbék maximális, száraz térfogatsűrűséghez tartozó víztartalom mellett mért halmaztömörisége a 30 cm szélességű és magasságú zsaluzat alkalmazásával rázóasztalos tömörítés mellett hasonló tendenciát mutat, az értékek azonban alacsonyabbak, mint száraz állapotban.

A péptelítettség és zsaluzati méret a látszóbeton felületi minőségére gyakorolt hatását négy, egyre növekvő túltelítettségű (76, 101, 126 és 150 l/m³) keverék, 3 zsaluzati méret (60 cm szélességű és magasságú zsaluzat 10, 20 és 30 cm-es vastagsággal) valamint nem nedvszívó nyír rétegelt lemez zsaluhéj alkalmazásával vizsgáltam tűvibrátoros tömörítés mellett. A

keverékekhez az MSZ EN 12620:2013 szerinti „C” határgörbe szemeloszlását alkalmaztam, melynek halmaztömörégi értékének az első rész vizsgálatai alapján, 5.58%-os víztartalom mellett 30 cm szélességű és magasságú zsaluzatban, rázóasztalos tömörítés alkalmazásával mért halmaztömörégi értékek átlagát vettem. A felületeket a pórustartalom, a színeltérés, a fészesség és a kivérzés szempontjai alapján értékeltem a hazai és nemzetközi előírások alapján. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a péptelítettség 101 l/m^3 -ról 150 l/m^3 -re való növelésével jelentősen csökken a felületi pórustartalom. A péptelítettség 76 l/m^3 -ről 150 l/m^3 -re való növelésével csökken a színeltérés mértéke, valamint a kivérzéssel és fészességgel érintett felületrészek nagysága is. A 150 l/m^3 túltelítettséggel rendelkező keverék teljesíti különleges követelményszintet minden vizsgált zsaluzati vastagság esetében. A zsaluzati vastagság növelése kisebb mértékben, de ugyancsak növeli a felületi minőséget. A 30 cm vastagságú zsaluzat esetében a 101 l/m^3 túltelítettség elegendő a német irányelv szerinti legmagasabb osztály eléréséhez.

A felületi pórustartalom digitális képfeldolgozáson alapuló vizsgálatára tettem javaslatot a harmadik részben. A vizsgálati módszert 40 mintán teszteltem, valamint alkalmaztam azt az általam készített próbatestek értékelésekor. A módszer lehetővé teszi egy fénykép készítésével a felületi pórustartalom meghatározásán túl a pórusok jellemző paramétereinek, valamint az átmérő szerinti eloszlás vizsgálatát. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a pórusok átlagos átmérőjének, a szórásnak, a varianciának, valamint az eloszlásfüggvény ferdeségi és csúcsossági együtthatójának értékére hatással van az alkalmazott betonösszetétel. A 40 mintából 10 mintának az MSZ 24803 szerinti kézi eljárással is meghatároztam a felületi pórustartalmát. A gépi módszerhez szükséges időtartam 12 perc, amely a manuális eljárás átlagos 78 percéhez képest 85%-kal kevesebb. A gépi módszerrel kapott eredményeket megfelelően pontosnak találtam, ugyanis azok a manuális értékelési módszer eredményeinél átlagosan 5%-kal magasabbak. Vizsgálataim alapján javaslatot tettem a kidolgozott módszer további értékelési szempontokkal való fejlesztésére.

7. TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK

Az adalékanyag halmaztömörségének kutatása kapcsán szükségesnek tartom további zsaluzati méretek (pl. oszlopzsalu) és formák (hengeres zsaluzatok), valamint különböző szemeloszlású és típusú adalékanyagok kombinációinak vizsgálatát. Egy kiterjedt vizsgálat lehetővé tenné a diszkrét számítási eljárások a geometriai méreteket is figyelembe vevő fejlesztését. A vizsgálati adatok lehetőséget adnak továbbá az adalékanyag váz viselkedésének numerikus szimulációjára diszkrét elemes módszer (*Discrete Element Method* = *DEM*) segítségével. A kísérleti adatok alapján kalibrált numerikus modell alkalmazható lenne a halmaztömörség előrebecslésére is.

A péptelítettség és felületi minőség összefüggései kapcsán további betonösszetételek, adalékanyag fajták (például zúzott kő) és zsaluzati méret variációk vizsgálhatók. A kutatás nem tért ki például a kiegészítő anyagok alkalmazására, vagy a nemrégiben megjelent, a beton tömörödési tulajdonságainak és a látszóbeton felületek minőségének javítására szolgáló adalékszerek hatására. A betontechnológiai fejlődésnek köszönhetően látszóbeton felületeket öntömörödő betonból is készíthetünk, amely különösen előnyös kis szerkezeti vastagságok, sűrű vasalások esetében, a felületi minőségre gyakorolt hatásuk azonban egyelőre kevésbé kutatott.

A látszóbeton felületek értékelési módszerének számos fejlesztési lehetősége adott. A digitális képfeldolgozás felhasználásával a dolgozatban bemutatott példákon túl több vizsgálati szempont értékelése is lehetséges úgy, mint az élképzés hibája, az él hullámossága, az átkötési helyek állapota, vagy a rendezetlen ankerrúd- és zsalutábla kiosztás. A képfeldolgozásra használt szoftverek, mint például a Python OpenCV modulja is, számos alakfelismerő algoritmust tartalmaznak, amelyek hatékonyan felhasználhatóak a felületi hibák detektálásához és végső soron egy objektív és hatékony értékelési rendszer kidolgozásához.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton fejezem ki köszönetemet témavezetőmnek, *Dr. Papp Ferenc*nek, aki sok évvel ezelőtt építészhallgatóként felkarolt és a diplomamunkán át a doktori kutatásig végigkísérte és segítette az utamat. Hálás vagyok, hogy bevezetett a mérnöki gondolkodásmód és kutatás világába. Mindent köszönök, jó szívvel gondolok a közös munkára.

Köszönetemet fejezem ki a Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék vezetőjének, *Dr. Szép János*nak, aki támogató türelemmel kísérte végig a doktori tanulmányaimat, és akihez mindig bizalommal fordulhattam, bármilyen kérdésem is merült fel.

Köszönettel tartozom *Dr. Horváth András*nak, a Fizika és Kémia Tanszék egyetemi docensének, aki bevezetett a programozás és a digitális képfeldolgozás világába. A mindig jó kedélyű, segítőkész hozzáállása sokat jelentett és rengeteg motivációt adott.

Szeretném megköszönni *Zsoldos Gábor* betontechnológus mentoromnak, hogy az első TDK kutatásom óta mellettem áll és szakmai tapasztalatával, kreatív gondolkodásmódjával segítette és mindig a jó irányba terelte a munkámat.

Hálámat és köszönetemet fejezem ki *Harrach Dániel* és *Baranyai Gusztáv* kollégáimnak. A laboratóriumi vizsgálatok összeállításában és végrehajtásában nyújtott segítségetek nélkülözhetetlen volt a dolgozat megírásához.

Köszönetet mondok családomnak és barátaimnak, akik mindvégig bíztattak és támogattak az ide vezető úton.

IRODALOMJEGYZÉK

A disszertációban szereplő hivatkozások

- [1] Magyar Cementipari Szövetség: Beton-virágzás – Látszóbeton a 4-es metró Tétényi úti megállójánál (Online Hírlevél) http://hirlevel.ferlingpr.com/upload/1141646130/tovabb.php?id=430&hir_id=1909 (Letöltve: 2021. 01. 22.)
- [2] Hoffmann Petra: Laposa Pincészet – Badacsonytomaj (Stilblog) <https://stilblog.hu/2010/08/19/laposa-pinceszeti-badacsonytomaj/> (Letöltve: 2021. 02. 08.)
- [3] Kultúrpárt: Mi történt a 4-es metró állomásaival? https://kulturpart.hu/2015/02/10/mi_tortent_a_4-es_metro_allomasaival (Letöltve: 2021. 02. 08.)
- [4] Adam M. Neville: *Properties of concrete*, Pearson, Essex (1995)
- [5] Rene Féret: *Packing density of mortars*, Annales des Ponts et Chaussées, Vol. 4, N. 2, (1982) 5-16.
- [6] Duff Andrew Abrams: *Design of concrete mixtures*, Bulletin 1, Structural Material Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago (1919) 20
- [7] S.A.A.M Fennis: *Design of ecological concrete by particle packing optimization*, Delft University of Technology, Delft (2011) 256
- [8] Nicolas Roussel: *Understanding the rheology of concrete*, Woodhead Publishing, Cambridge (2012) 364
- [9] Davood Mostofinejad, Mohammad Reisi: *A new DEM-based method to predict packing density of coarse aggregates considering their grading and shapes*, Construction and Building Materials, 35 (2012) 414-420.
- [10] Tomaso Aste, Denis Weaire: *The pursuit of perfect packing*, Taylor & Francis Group, New York (2008) 196
- [11] Mark Alexander, Sidney Mindess: *Aggregates in Concrete*, Taylor & Francis e-Library (2010) 448
- [12] Francois De Larrard: *Concrete Mixture Proportioning – A Scientific Approach*, E&FN Spon, London (1999) 421
- [13] Ujhelyi János: *A beton levegőtartalmának hatása*, Magyar Építőipar, 8 (1980) 469-481.
- [14] Ondřej Koutný, Jiří Kratochvíl, Jiří Švec, Jan Bednárek: *Modelling of Packing Density for Particle Composites Design*, Periodica Engineering, 151 (2016) 198-205.
- [15] Chamod Hettiarachchi: *Development of a theoretical packing model incorporating the effect of vibration, shape and surface texture*, University of Moratuwa, Department of Civil Engineering (2018)
- [16] Dvaid Hilbert: *Mathematische Probleme*, Archiv Math. Physik 1 (1901), 44–63.
- [17] Thomas C. Hales: *A proof of the Kepler conjecture*, Annals of Mathematics, 162 (2005) 1065-1185. <https://annals.math.princeton.edu/wp-content/uploads/annals-v162-n3-p01.pdf> (Letöltve: 2021. 10. 15.)
- [18] Cell Aggregation and Sphere Packing <http://www.tiem.utk.edu/~gross/bioed/webmodules/spherepacking.htm> (Letöltve: 2021. 02. 25.)
- [19] M. Shekarchi, S. M. Mousavi, N. A. Libre, S. Soroush-Nia: *Verification of wet and dry packing methods with experimental data*, Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special

- Loadings and Structural Applications, Korea Concrete Institute, Korea (2010) 1322-1327.
- [20] Henry H. C. Wong, Albert K. H. Kwan: *Packing density of cementitious materials: Part 1 - Measurement using a wet packing method*, Materials and Structures, 41 (2008) 689-701.
- [21] MÉASZ ME-04.19:1195 *Beton és vasbeton készítése*, Magyar Építőanyagipari Szövetség, Budapest (1995)
- [22] William B. Fuller, Sanford E. Thompson: *The Laws of Proportioning Concrete*, Transactions of the American Society of Civil Engineers, LIX, 2, (1907) 67-143.
- [23] Arthur N. Talbot, Frank E Richart: *The strength of concrete its relation to the cement aggregates and water*, Engineering Experiment Station, Bulletin 137, University of Illinois, Urbana (1923)
- [24] A. H. M Andreason: *Relation between grain size and interstitial space in products of unconsolidated granules*, Kolloid-Zeitschrift, 50 (1930) 217-228.
- [25] J. E. Funk, D. R. Dinger, J. E. Funk Jr.: *Coal Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content*, Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation, New York (1980)
- [26] S. V. Kumar, Manu Santhanam: *Particle Packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review*, Indian Concrete Journal, 77 (9) (2003) 1324-1331.
- [27] Jingmin Zheng, Paul F. Johnson, James S. Reed: *Improved equation of the continuous particle size distribution for dense packing*, Journal of the American Ceramic Society, 73 (5) (1990) 479-483.
- [28] Ujhelyi János: *A beton struktúrájának és nyomószilárdságának a tervezése*, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest (1989)
- [29] K. L. Bidkar, K T. Phalak: *Concrete Mix Proportioning Using EMMA Software*, International Journal of Information Engineering and Technology, 2 (1) (2016), 7-18.
- [30] Sonja Fennis, Joost Walraven: *Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design*, Heron, 57 (2) (2012) 73-101.
- [31] S. Palm, A. Wolter: *Determining and optimizing the void filling of dry particle systems*, Cement International 7 (1) (2009) 96-102.
- [32] Piet Stroeven, Martijn Stroeven: *Assessment of packing characteristics by computer simulation*, Cement and Concrete Research, 29 (8) (1999) 1201-1206.
- [33] Ismael Lensol: *Investigation of reliability of particle packing models for aggregates*, Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering (2015)
- [34] C. C. Furnas: *Grading Aggregates - I. Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density*, Industrial and Engineering Chemistry, 23 (9) (1931) 1052-1058.
- [35] T. C. Powers: *Properties of fresh concrete*, Wiley, New York (1968) 664.
- [36] R. Ben Aïm, P. Le Goff: *Effet de paroi dans les empilements désordonnés sphères et application à la porosité de mélanges binaires*, Powder Technology, 1 (5) (1968) 281-290.
- [37] F. Schwanda: *Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für den Spannbetonbau*, Zement und Beton, 37 (13) (1966) 8-17.
- [38] Joe Dewar: *Computer Modelling of Concrete Mixtures*, E & FN Spon, London, New York (1999) 270

- [39] W. Toufar, M. Born, E. Klose: *Beitrag zur Optimierung der Packungsdichte polydispenser körniger Systeme*, Freiberg Forschungshefte A, 558, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1976) 29-44.
- [40] Per Goltermann, Vagn Johansen, Lars Palbøl: *Packing of Aggregates: An Alternative Tool to Determine the Optimal Aggregate Mix*, Materials Journal, 94 (5) (1997) 435-443.
- [41] A. K. H. Kwan, K. W. Chan, V. Wong: *A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect*, Powder Technology, 237 (2013) 172-179.
- [42] T. Stovall, F. de Larrard, M. Buil: *Linear packing density model of grain mixtures*, Powder technology, 48 (1) (1986) 1-12.
- [43] Thierry Sedran, Francois de Larrard, Daniel Angot: *Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. I. Fondements théoriques et étalonnage du modèle / Prediction of the packing density of granular mixtures using the solid suspension model. 1. Theoretical bases and calibration of the model*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 194 (1994) 59-70.
- [44] Thierry Sedran, Francois de Larrard, Daniel Angot: *Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide – II. Fondements théoriques et calibration du modèle*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 194 (1994) 71-86.
- [45] Francois de Larrard, Thierry Sedran: *Mixture-proportioning of high-performance concrete*, Cement and Concrete Research, 32 (11) (2002) 1699-1704.
- [46] I. Petersen: *Report on packing models*, FL Schmidt & Co. (1981)
- [47] M. R. Jones, L. Zheng, M. D. Newlands: *Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio*, Materials and Structures, 35 (5) (2002) 301-309.
- [48] R. K. McGearry: *Mechanical Packing of Spherical Particles*, Journal of the American Ceramic Society, 44 (10) (1961) 513-522.
- [49] J. E. Ayer, F. E. Soppet: *Vibratory Compaction: I, Compaction of Spherical Shapes*, Journal of the American Ceramic Society, 48 (4) (1965) 180-183.
- [50] André Lecomte: *The measurement of real and virtual packing density of soft grains*, Materials and Structures, 39 (2006) 63-80.
- [51] MSZ EN 12620:2013 *Kőanyagalmazok (adalékanyagok) betonhoz*, Magyar Szabványügyi Testület (2013) 57
- [52] MSZ EN 1097-6:2013 *Kőanyagalmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 6. rész: A testsűrűség és a vízfelvétel meghatározása*, Magyar Szabványügyi Testület (2013) 47
- [53] MSZ EN 13286-2:2011 *Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek. 2. rész: A laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és a víztartalom meghatározási módszerei. Proctor-tömörítés*, Magyar Szabványügyi Testület (2011) 31
- [54] Ujhelyi János: 8.10. *Esztétikus megjelenésű (látszó) betonok*, Cement – Beton Zsebkönyv, Duna-Dráva Cement Kft. (2007) 200-206.
- [55] Asztalos István: *Látszóbeton – Mi kell a jó végeredményhez?* (Power-Point előadás) Győr-Moson-Sopron Megyei Mérnöki Kamara, 2017. október 24.
- [56] Thomas Freimann: *Betonflächen mit Sichtbetonanforderungen*, Beton-Informationen, 4 (2004) 63-75.
- [57] Jacobs Frank: *Merkblatt für Sichtbetonbauten*, BetonSuisse (2020) 54
- [58] Joachim Schulz: *Sichtbeton-Mängel - Gutachterliche Einstufung, Mängelbeseitigung, Betoninstandsetzung und Betonkosmetik*, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2011) 233

- [59] Joachim Schulz: *Sichtbeton-Atlas – Planung – Ausführung – Beispiele*, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2009) 332
- [60] Joachim Schulz: *Sichtbeton – Planung – Kommentar Zur DIN 18 217 Betonflächen und Schalungshaut*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (2006) 202
- [61] *Leitfaden für Sichtbeton – Tipps aus der Praxis für Planung und Herstellung*, Holcim Süddeutschland GmbH, (2011) 46
- [62] Kapu László: *A látványbeton-készítés kulisszatitkai*, Építési megoldások, <https://www.epitesimegoldasok.hu/a-latvanybeton-keszites-kulisszatitkai.html> (Letöltve: 2021. 2. 05.)
- [63] Karsten Schubert, Immanuel Schäufele: *Neue Sichtbetontechnik – Integration der Erkenntnisse zu Wechselwirkungen zwischen Schalungshaut, Trennmittel und Betonoberfläche in die Prozesskette beim Sichtbeton*, Schlussbericht der Forschungsstelle(n) Nr. 2, Hochschule Karlsruhe, Technik und Wirtschaft Institut für Angewandte Forschung, AiF-Forschungsvereinigung, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e.V., Karlsruhe (2011) 174
- [64] Kapu László, Sulyok Tamás: 4.6.17. *Látzóbetonok, látványbetonok*, Cembeton Útmutató, Magyar Cement-, Beton- és Mészipari Szövetség, (2017) 240-245.
- [65] Kapu László: *Látzóbeton – Látványbeton*, TERC Kft, Budapest (2014) 304
- [66] Alexander Reinisch: *Sichtbeton – Know-how für die Praxis*, Opus-C – Architektur & Design mit Beton, 3 (2012) 78-89.
- [67] Franz Podhraski, Gernot Tritthart: *Betontechnologie – Sichtbetonkriterien für Ausgangsstoffe*, Expertenforum Beton – Sichtbeton Architektur pur, (2007) 28-32.
- [68] Salem Georges Nehme: *A beton porozitása*, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar (2004)
- [69] Zsalu nyír rétegelt lemez, JAF Holz, <https://www.jafholz.hu/shop/Konstruktiv-lapok/Retegelt-lemez/Zsalu-fenolfilmbevonatos-retegelt-lemez/zsalu-nyir-retegelt-lemez-bfu100~p1322270?q=01468%2F0400> (Letöltve: 2021. 02. 09.)
- [70] MSZ EN 24803-6-3:2010 *Épületszerkezetek megjelenési módjának előírásai, Monolit beton- és vasbeton szerkezetek. A helyi alakhűség és a felületi állapot követelményei*, Magyar Szabványügyi Testület (2010) 26
- [71] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e.V., Bundesverband der Deutschen Zementindustrie: *Merkblatt Sichtbeton*, (2004) 52
- [72] Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVB) Richtlinie: *Sichtbeton – Geschalte Betonflächen* (2002) 20
- [73] ÖNORM B 2211 - *Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonarbeiten – Werkvertragsnorm* (1998) 9
- [74] DIN 18217 *Betonflächen und Schalungshaut* (1981)
- [75] SIA 118/262:2004 - *Allgemeine Bedingungen für Betonbau*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2004) 32
- [76] Christian Hofstadler: *Angewandte Sichtbeton Normen, Richtlinien und Merkblätter in der österreichischen Baupraxis*, https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/BBW/images/Publikationen/sichtbeton/Regelwerke.pdf (Letöltve: 2021. 02. 24.)
- [77] Christian Hofstadler: *Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation*, Springer Verlag (2008) 517
- [78] Geoff Dougherty: *Digital Image Processing for Medical Applications*, Cambridge University Press (2009) 447
- [79] Jyotika Kapur, Akshay J. Baregar: *Security Using Image Processing*, International Journal of Managing Information Technology, 5 (2) (2013) 13-21.

- [80] Victor Wiley, Thomas Lucas: *Computer Vision and Image Processing: A Paper Review*, International Journal of Artificial Intelligence, 2 (2018) 29-36.
- [81] 3Dsurvey, <https://3dsurvey.si/> (Letöltve: 2021. 02. 24.)
- [82] Gajanan K. Choudhary, Sayan Dey: *Crack detection in concrete surfaces using image processing, fuzzy logic, and neural networks*, IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence, Nanjing (2012) 404-411.
- [83] Pang-jo Chun, Shota Izumi, Tatsuro Yamane: *Automatic detection method of cracks from concrete surface imagery using two-step light gradient boosting machine*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 36 (1) (2020) 61-72.
- [84] Tomoyuki Yamaguchi, Shingo Nakamura, Ryo Saegusa, Shuji Hashimoto: *Image-Based Crack Detection for Real Concrete Surfaces*, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 3 (1) (2008) 128-135.
- [85] Gerd Stanke: *Schlussbericht zum Verbundprojekt Baustellenphotogrammetrie - Photogrammetrisches Verfahren als objektorientiertes Ingenieursystem zur Produktionssicherung in der Bauwirtschaft - Teilvorhaben: Sichtbetonalayse*, TU Dresden, Rollei Fototechnik, Dywidag, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI), Berlin (2003) 36
- [86] Optimas, <http://www.adept.net.au/software/mediacy/optimas/index.shtml> (Letöltve: 2021. 02. 24.)
- [87] Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI), Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: *Schlussbericht Sichtbeton II./15940 B - Bildgeschützte Bewertungsverfahren für Sichtbetonoberflächen* (2003) 42
- [88] Python 3.6 <https://www.python.org/downloads/release/python-360/> (Letöltve: 2021. 10. 15.)
- [89] GIMP <https://www.gimp.org/> (Letöltve: 2021. 10. 15.)
- [90] Tanács Attila: *Gamma korrekció*, Szegedi Tudományegyetem, http://www.inf.u-szeged.hu/~tanacs/pyocv/gamma_korrekc.html (Letöltve: 2021. 02. 09.)
- [91] Horváth András: *A fényterjedés és -észlelés fizikája mérnököknek*, Széchenyi István Egyetem, Műszaki Tudományi Kar, (2013) 259
- [92] Czúni László, Tanács Attila: *Képi információ mérése*, Typotex Kiadó (2011) 144
- [93] Kató Zoltán: *3. Szűrés képtérben*, <http://www.inf.u-szeged.hu/~kato/teaching/DigitalisKepfeldolgozasTG/03-SpatialFiltering.pdf> (Letöltve: 2021. 02. 24.)
- [94] Tanács Attila: *Adaptív küszöbölés és vágás*, http://www.inf.u-szeged.hu/~tanacs/pyocv/adaptv_kszbls_s_vgs.html (Letöltve: 2021. 02. 24.)

A disszertáció témakörében megjelent publikációim

- [a] Kitti Károlyfi: *The effect of saturation degree of cement paste on fair-faced concrete surfaces*, Építőanyag: Journal of Silicate Based and Composite Materials, 69 (2) (2017) 55-58.
- [b] Kitti Károlyfi, Ferenc Papp: *The correspondences between formwork geometry and concrete composition in the case of fair-faced concrete elements*, Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences, 13 (2) (2018) 43-54.
- [c] Kitti Károlyfi, Ferenc Papp: *Evaluation of fair-faced concrete surfaces using digital image processing*, Proceedings of the 12th International PhD Symposium in Civil Engineering, Prague, Czech Republic, (2018) 1003-1010
- [d] Károlyfi Kitti: *Látszóbeton felületek értékelése digitális képfeldolgozással*, Új Nemzeti Kiválóság Program 2017/2018 Tanulmánykötet, Széchenyi István Egyetem, (2018) 161-169.
- [e] Károlyfi Kitti: *A digitális képfeldolgozás alkalmazási lehetőségei a katasztrófakezelésben*, Műszaki Katonai Közlöny, XXVIII. (1) (2018) 16-26.
- [f] Ajtayné Károlyfi Kitti: *Látszóbeton felületek értékelése digitális képfeldolgozással*, Új Nemzeti Kiválóság Program 2019/2020 Tanulmánykötet, Széchenyi István Egyetem, (2019) 225-231.
- [g] Kitti Ajtayné Károlyfi, András Horváth, Ferenc Papp: *A new assesment methodology for fair-faced concrete surfaces based on digital image processing*, Proceedings of the 13th International PhD Symposium in Civil Engineering, Paris, France (2020) 288-295.
- [h] Kitti Ajtayné Károlyfi, Dániel Harrach, Ferenc Papp: *Investigation of the effect of formwork shape on packing density of aggregates*, Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences, 15 (3) (2020) 124-135.
- [i] Kitti Ajtayné Károlyfi, Ferenc Papp: *Laboratory study of the effect of saturation degree on quality of fair-faced concrete surfaces*, Építőanyag: Journal of Silicate Based and Composite Materials, 73 (3) (2021) 115-118.
- [j] Ajtayné Károlyfi Kitti: *Látszóbeton felületek értékelése digitális képfeldolgozással*, Új Nemzeti Kiválóság Program 2020/2021 Tanulmánykötet, Széchenyi István Egyetem, (2021) 207-214.
- [k] Kitti Ajtayné Károlyfi, András Horváth, Ferenc Papp, *Digital image processing method for evaluation of discoloration on fair-faced concrete surfaces*, Építőanyag: Journal of Silicate Based and Composite Materials (beadott kézirat)

Más témában megjelent publikációim

- [l] Károlyfi Kitti, László Gabriella: *Lovasközpont a Csepel-szigeten*, Építészfórum, Online, <http://epiteszforum.hu/lovaskozpont-a-csepel-szigeten>, (2016)
- [m] László Gabriella, Károlyfi Kitti: *Szabad formájú épület koncepcionális tervezése – az építészeti és szerkezeti koncepció összefüggéseinek vizsgálata*, Magész Acélszerkezetek, 13 (3 (2016)) 116-125.
- [n] Kitti Károlyfi, Gabirella László, Raymond Bükkösi, Ferenc Papp: *Architectural and Structural Design of Free-form Structures – Case Study*, Acta Technica Jaruinensis, 11 (2) (2018) 44-60.
- [o] Papp Ferenc, Károlyfi Kitti: *A számítógépes tervezési módszer hatása a hidak építészeti kialakítására*, Hidak esztétikája, 1. kötet, Széchenyi István Egyetem (2018) 21-27.
- [p] Károlyfi Kitti, Papp Ferenc: *A híd, mint mérnöki alkotás – a szerkezet és a forma egymásra hatása*, Hidak esztétikája, 1. kötet, Széchenyi István Egyetem (2018) 29-38.

- [q] Ajtayné Károlyfi Kitti, Szalai Dóra, Szép János, Horváth Tamás: *Gyakorlatorientált BIM oktatás az építő- és építészmérnöki képzésben*, XXV. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia – ÉPKO (2021) Elérhetőség: <https://ojs.emt.ro/index.php/EPKO/article/view/539/515>
- [r] Kitti Ajtayné Károlyfi, Dóra Szalai, János Szép, Tamás Horváth: *Integration of BIM in architecture and structural engineering education through common projects*, Acta Technica Jaruinensis 14 (2021) 424-439.
- [s] János Szép, Kitti Ajtayné Károlyfi: *BIM data management in AEC disciplines*, Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (2021) 615-620.

NYILATKOZAT

Alulírott **Ajtayné Károlyfi Kitti** kijelentem, hogy ezt a doktori. értekezést saját magam készítettem, és ebben csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Győr, 2022. 01. 03.

Ajtayné Károlyfi Kitti
doktorjelölt