

Samozbijajući lagani beton s dodatkom punila od mljevene opeke

Vranješ, Lidia Karla

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:293391>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Lidia Karla Vranješ

Split, 2015.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Lidia Karla Vranješ

**Samozbijajući lagani beton sa dodatkom punila od
mljevene opeke**

Diplomski rad

Split, 2015.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA

KANDIDAT: Lidia Karla Vranješ

BROJ INDEKSA: 467/2013

KATEDRA: Katedra za građevinske materijale

PREDMET: Građevinski materijali I

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Samozbijajući lagani beton sa dodatkom punila od mljevene opeke

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti postupak projektiranja i metode ispitivanja samozbijajućeg betona. Potrebno je proučiti svojstva betona u kojem se koristi drobljena opeka kao agregat, kao i dosadašnja ispitivanja samozbijajućeg betona s dodatkom gline/opeke.

Za eksperimentalni dio rada potrebno je pripremiti filer od fino mljevene opeke, veličine zrna do 0.04 mm. Potrebno je izraditi mješavine samozbijajućeg betona sa ovim filerom te ih usporediti sa prethodnim ispitivanjima napravljenim u laboratoriju za materijale. Proračun recepture potrebno je napraviti prema CBI metodi te usporediti sa kriterijima EFNARC-a. SCLC (samozbijajući lagani beton) potrebno je ispitati u svježem i očvrsлом stanju. Metode mjerenja obradivosti u svježem stanju su: razastiranje, T500, vrijeme tečenja, J-ring, L-box te vizualna ocjena stabilnosti betona, a u očvrsлом stanju se određuje dinamički modul elastičnosti i tlačna čvrstoća za starosti betona od 7 i 28 dana. Eksperimentalno dobivene rezultate potrebno je prikazati i komentirati.

U Splitu, 10.03.2015.

Voditelj Diplomskog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Prof.dr.sc. Ivica Boko

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Sandri Juradin koja me je tijekom izrade diplomskog rada usmjeravala vrijednim stručnim savjetima i činjenicama. Hvala joj na strpljenju, podršci i trudu. Zahvaljujem i svim dragim i bliskim ljudima koji su mi pružali podršku tijekom školovanja, osobito mojoj obitelji.

Samozbijajući lagani beton sa dodatkom punila od mljevene opeke

Sažetak:

U radu su prikazana svojstva samozbijajućih laganih betona (SLC) sa dodatkom punila od mljevene opeke dobivenog mljevenjem opeke, a zatim prosijanog na situ od 0,04 mm. Izrađeno je ukupno šest mješavina samozbijajućeg betona te je uspoređeno sa rezultatima prethodnih ispitivanja napravljenim u laboratoriju za građevinske materijale. Proračun recepture je napravljen prema CBI metodi te uspoređen sa kriterijima EFNARC-a (Europskog udruženja). Samozbijajući lagani beton je ispitan u svježem i očvrsлом stanju. Svi rezultati su analizirani i uspoređeni sa prethodnim ispitivanjima.

Ključne riječi:

Samozbijajući lagani beton, mljevena opeka, silikatna prašina, CBI metoda, EFNARC kriteriji

Self-compacting lightweight concrete with the addition of ground brick fillers

Abstract:

The study examined the properties of self-compacting lightweight concrete (SLC) with the addition of ground brick filler. The brick was previously sieved to the fraction of less than 0,04mm. Six self-compacting concrete mixtures, which contained additives such as ground brick and silicate dust in its composition, were prepared and compared to the previous studies made in the laboratory for building materials. The composition of each mixture was determined according to the CBI method and compared with EFNARC (European Association) criteria. Self-compacting lightweight concrete has been tested in a fresh and hardened state. All results were analyzed and compared with previous studies.

Keywords:

Self-compacting lightweight concrete, ground brick, silica fume, CBI methods, EFNARC criteria

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
1.1. Općenito o samozbijajućem betonu	1
1.2. Razvoj samozbijajućeg betona.....	3
2. PROJEKTIRANJE SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA.....	5
2.1. Svojstva samozbijajućeg betona	5
2.2. Projektiranje sastava samozbijajućeg betona	6
2.3. CBI metoda	8
2.3.1. Određivanje minimalnog volumena paste.....	8
3. METODE ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA.....	12
3.1. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju	12
3.1.1. Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem	13
3.1.2. Ispitivanje V-lijevkom.....	15
3.1.3. Ispitivanje J-prstenom	17
3.1.4. Ispitivanje L kutijom	20
3.1.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu.....	21
3.1.6. Ostale metode.....	22
3.1.6.1. Određivanje segregacije sijanjem	22
3.1.6.2. Ispitivanje U posudom	23
3.1.6.3. Fill posuda (Kajima uređaj)	23
3.2. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju	24
3.2.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona.....	24
3.2.2. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa.....	25
3.2.3. Ostale metode.....	25
3.2.3.1. Ispitivanje savojne čvrstoće betona	25
3.2.3.2. Ispitivanje kapilarnog upijanja.....	26
4. DROBLJENA OPEKA KAO AGREGAT ZA BETON.....	27
4.1. Svojstva reciklirane glinene opeke kao agregata za novi beton	28
4.1.1. Poroznost i apsorpcija reciklirane glinene opeke	28
4.1.2. Štetni sastojci u agregatu	29
4.1.3. Projektiranje sastava betona	30
4.2. Svojstva betona s recikliranom opekom kao agregatom	31
4.2.1. Tlačna čvrstoća.....	31

4.2.2.	Čvrstoća na savijanje.....	32
4.2.3.	Modul elastičnosti	32
4.2.4.	Skupljanje.....	33
4.2.5.	Apsorpcija vode	33
4.2.6.	Otpornost na habanje.....	34
4.2.7.	Toplinska provodljivost.....	34
4.2.8.	Otpornost na požar	34
4.2.9.	Otpornost na mraz	35
5.	DOSADAŠNJA ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG I LAKOG BETONA.....	36
5.1.	Utjecaj fine gline na ponašanje samozbijajućeg betona	36
5.1.1.	Uvod.....	36
5.1.2.	Eksperimentalni dio istraživanja	36
5.2.	Proučavanje svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom praha opeke i praha mramora	39
5.2.1.	Uvod.....	39
5.2.2.	Eksperimentalni dio.....	40
5.3.	Utjecaj polipropilenskih vlakana na razvoj svježih i očvrsljih svojstava recikliranog samozbijajućeg betona.....	40
5.3.1.	Uvod.....	40
5.3.2.	Eksperimentalni dio.....	41
5.3.3.	Zaključak.....	42
5.4.	Ocjenjivanje svojstava svježeg samozbijajućeg betona koristeći reciklirane agregate	43
5.4.1.	Uvod.....	43
5.4.2.	Eksperimentalni dio.....	43
5.5.	Utjecaj pripreme mješavina na čvrstoću i obradivost samozbijajućeg laganog betona visokih čvrstoća.....	44
5.5.1.	Uvod.....	44
5.5.2.	Materijal i sastav mješavina	45
5.5.3.	Priprema mješavina	46
5.5.4.	Analiza eksperimentalnog dijela	47
5.5.4.1.	Mješavina 1: Sposobnost tečenja i jedinična težina.....	47
5.5.4.2.	Mješavina 1: Mehanička svojstva.....	48
5.5.4.3.	Mješavina 2: Sposobnost tečenja i jedinična težina.....	49
5.5.4.4.	Mješavina 2: Mehanička svojstva.....	50
5.5.5.	Zaključak.....	51
5.6.	Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrsllog samozbijajućeg laganog betona (SCLC).....	52
5.6.1.	Uvod.....	52
5.6.2.	Materijal i sastav SCLC mješavina	52

5.6.3.	Analiza eksperimentalnog dijela	53
5.6.3.1.	Svježi beton-obradivost betona	53
5.6.3.2.	Očvršli beton- tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti	55
5.6.4.	Zaključak	56
6.	EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SVOJSTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA	57
6.1.	Uvod u eksperimentalni dio rada	57
6.2.	Upotrijebljeni materijali	58
6.2.1.	Cement	58
6.2.2.	Agregat	60
6.2.2.1.	Lagani agregat Liapor	60
6.2.2.2.	Drobljeni agregat	63
6.2.3.	Mljevena opeka	64
6.2.4.	Silikatna prašina	64
6.2.5.	Superplastifikator	65
6.3.	Sastav betonskih mješavina	66
7.	REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA U SVJEŽEM STANJU	71
7.1.	Rasprostiranje slijeganjem	71
7.2.	Ispitivanje V-lijevkom	77
7.3.	Ispitivanje J-prstenom	79
7.4.	Ispitivanje L kutijom	83
7.5.	Mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona	86
8.	REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA U OČVRSLOM STANJU	89
8.1.	Ispitivanje tlačne čvrstoće	89
8.2.	Dinamički modul elastičnosti	92
9.	ZAKLJUČAK	94
10.	LITERATURA	96

1. UVOD

1.1. Općenito o samozbijajućem betonu

Beton je kompozitni građevinski materijal koji je praktično postao osnovnim tek u prošlom stoljeću te u Europskoj Uniji pokrio 75% ukupne potrošnje građevinskih materijala.

Počeci u dobivanju betona sežu još od starih Azijata, Hebreja i Egipćana, a preko njih i Grka i Rimljana koji su poznavali hidraulička svojstva mješavine pucolana, pečene gline i vapna. Hidraulička su veziva miješali još sa pijeskom i drobljenom opekom te na taj način izrađivali mort. Neke građevine izrađene tim mortom su se i do danas održale jer je cementni mort jak i čvrst. Daljnjim znanstvenim iskustvima, otkrivaju se hidraulična svojstva nekih drugih vrsta veziva pa je tako graditelj Joseph Aspdin, 1824.g, proizveo prvi Portland cement koji nije bio dovoljno pečen. Tek je 1845.g Isaac Johnson, pečenjem mješavine gline i vapnenca sve do nastajanja klinkera, dobio portland cement sa svojstvima po kojima je i danas poznat.[1]

Beton je gotovo dva stoljeća pokrивao oko 70% potreba u građenju i postao infrastrukturna i urbana osnova suvremenog života.

Ubrzan razvoj života ljudi u svim područjima prati i razvoj u građevinarstvu pa se nameću i sve veći zahtjevi u pogledu veće trajnosti betona, većih čvrstoća, lakše i brže ugradnje, veće ekonomičnosti građevinskih konstrukcija. Prioritet u građevinarstvu je postalo povećanje produktivnosti, odnosno smanjenje troškova i povećanje brzine rada te poboljšani uvjeti rada uz zadovoljavanje propisanih svojstava betona. Kako bi se, primjerice, povećala trajnost konstrukcija, potrebno je dobro zbijanje betona koje se može osigurati tek dovoljnim brojem kvalificiranih radnika. Pošto se broj kvalificiranih radnika postupno smanjivao, a zahtjevi za kvalitetom su rasli, došlo se do zamisli da se proizvede beton koji može ispuniti cijelu oplatu i prijeći sve prepreke pod djelovanjem vlastite težine i bez potrebe za vibriranjem. Takav beton se nazivao samozbijajući beton.[2]

Samozbijajući beton je beton visokih svojstava koji ima dobru sposobnost tečenja i popunjavanja teško dostupnih kutova oplata, prolaza kroz gusto složene armaturne šipke pritom zadržavajući homogenost bez pojave segregacije za vrijeme i nakon ugradnje.[3] Osim poboljšane fluidnosti, otpornosti prema segregaciji i lakše ugradnje, ovakav beton ostvaruje i veće čvrstoće u očvrslom stanju i veću trajnost betona.

Dosadašnja ispitivanja su utvrdila da samozbijajući beton ima bolja svojstva od običnog uz istu količinu veziva i isti vodocementni omjer. Isto tako, analizom mikrostruktura se ustanovilo da samozbijajući beton posjeduje manje oštećenja u strukturi od običnog betona.

Osnovne komponente samozbijajućeg betona su cement, agregat, voda i aditivi kao i kod običnog betona, uz dodatak koloidnih silikata, pucolanskih materijala, portlandskog letećeg pepela, mikrosilike, metakaolina, kemijskih dodataka koji doprinose raznim zahtjevima po pitanju tečenja, čvrstoće, obradljivosti, otpornost segregaciji, otpornost na kemijske i mehaničke utjecaje, smanjenju popuštanja i sl.

U odnosu na obični, koristi se manji udio krupnog agregata, manji vodovezivni omjer, veći udio paste i superplastifikatora. Najčešće se upotrebljava i dodatak za promjenu viskoznosti. Na fluidnost i viskoznost bitno utječe odabir cementa i dodataka, uz ograničavanje omjera vode i sitnih čestica i dodavanje superplastifikatora i dodataka za promjenu viskoznosti. Preporučuje se uporaba maksimalnog zrna od 12 do 20 mm. Razni dodaci utječu na različita svojstva i u skladu sa zahtjevima se upotrebljavaju. Primjerice, leteći pepeo je učinkovit za povećanje kohezivnosti i smanjuje osjetljivost na promjenu količine vode. Silicijska prašina je učinkovita za postizanje visoke sposobnosti tečenja i istodobno stabilnosti betona, poboljšanu otpornost prema segregaciji i eliminiranju izdvajanja vode. Dodaci za promjenu viskoznosti se koriste za smanjivanje utjecaja varijacije vlažnosti ili raspodjele zrna u ukupnom sastavu agregata te je tada beton manje osjetljiv na varijacije u omjeru sastojaka. Vlakna za mikroarmiranje mogu smanjiti sposobnost tečenja dok polimerna vlakna sprječavaju slijeganje i pukotine od plastičnog skupljanja.[4]

Važno je da samozbijajući beton ima u svježem stanju efekt samozbijanja, da je u fazi očvršćivanja bez inicijalnih oštećenja i da je u očvrslom stanju otporan na vanjske utjecaje.

Prednosti ovakvog betona su višestruki: lako se ugrađuje i ekonomičan je, pogodan za sve primjene koji su potrebni za ugradnju, izravnavanje i završnu obradu te teške konstrukcije i složene oplate, smanjuje se vrijeme ugradnje, nije potrebno zbijanje, povećana izvedivost, odlična rana čvrstoća, smanjena buka na gradilištu, izgradnja se može izvesti noću bez uznemiravanja, minimalna završna obrada, jednolika kvaliteta betona...

Samozbijajući beton se primjenjuje u izradi temelja, podova, zidova, složenim strukturama po mjerama, specijalnim primjenama koje predstavljaju izazov, složenim armiranim kalupima.

Česta je primjena i u tzv. sendvič-konstrukcijama, kada se dodaje novi sloj betona na postojeću konstrukciju zbog povećanja nosivosti ili zamjene dotrajalog sloja.[2]

Betonare i pogoni za proizvodnju samozbijajućeg betona trebaju imati iste zahtjeve kao i tradicionalna proizvodnja betona. Transport na veće udaljenosti moguć je samo automikserima. Potrebno je redovito kontrolirati sastavne materijale, a samim time i količinu doziranja tih materijala u proizvodnji. Prilikom preuzimanja betona na gradilištu, dokumentacija o proizvodnji samozbijajućeg betona se mora upotrijebiti s detaljima važnim za krajnjeg korisnika betona. Ugradnja pumpom je efikasna za ovu vrstu betona jer viskoznost morta u betonu i velika fluidnost omogućavaju dobru pumpabilnost mješavine. Zbog toga beton mora ispuniti i sve zahtjeve za pumpani beton.[5]

1.2. Razvoj samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton se prvo put razvio 1988.g kako bi se poboljšala trajnost betonske konstrukcije. Od tada su se vršila mnogobrojna istraživanja i praktično primjenjivala većinom na konstrukcijama u Japanu.

Motiv razvoja samozbijajućeg betona je započeo 1983.g kada je problem trajnosti betonskih konstrukcija bio glavna tema interesa u Japanu. Da bi se ostvarila trajnost betonskih konstrukcija, potreban je bio dovoljan broj kvalificiranih radnika u poslovima zbijanja betona koji je jako važan po pitanju trajnosti betona. Međutim, postupno smanjenje broja radnika u japanskom građevinarstvu je dovelo do smanjenja kvalitete građevinskih radova. Rješenje je bila izvedba upravo samozbijajućeg betona. Nužnost ove vrste betona je predložio Okamura 1986. godine dok su studije za razvoj samozbijajućeg betona, uključujući i temeljne studije o obradivosti betona, proveli Ozawa i Maekawa na sveučilištu u Tokiju.

Prototip samozbijajućeg betona je dovršen 1988. godine pomoću materijala na tržištu. Prototip je izveden zadovoljavajuće u odnosu na sušenje i skupljanje, toplinu hidratacije, gustoću nakon stvrdnjavanja, i druga svojstva. Ovakav beton se nazivao beton visokih svojstava. [6]

U Švedskoj je za isto vrijeme upotrebljen naziv beton visoke trajnosti postignutim zbog niskog vodocementnog faktora i koji je također bio samozbijajući.

Samozbijajući beton se prvi put primijenio na zgradi u lipnju 1990. Kasnije je korišten u konstrukciji tornjeva prednapetog betonskog mosta Shin-kiba Ohashi u Japanu 1991. g.

Tipičan primjer primjene samozbijajućeg betona su temelji za Akashi Kaikyo most otvoren u travnju 1998. godine, viseći most s najdužim rasponom na svijetu (1.991 metara).[6] Upravo zbog dubine na kojoj se nalazi tlo i brzine morskih struja nije bilo moguće primijeniti uobičajen postupak betoniranja temelja pod vodom. Zbog masivnosti temelja mosta i nemogućnosti vibriranja u čeličnim prstenovima graditelji su se odlučili na samozbijajući beton. Volumen lijevanog betona dva temelja su iznosila 530.000 m³. Ovim je uveden novi sustav gradnje, koji je u potpunosti koristio izvedbu samozbijajućeg betona. Beton se miješao u betonari pokraj gradilišta te se dalje ispumpavao cijevima dugim 100 m do mjesta ugradnje. Beton se izbacivao kroz vrata ventila koji su se nalazili na razmacima od 5 metara duž cijevi. Ovi ventili su automatski kontrolirali i održavali razinu površine lijevanog betona. U konačnoj analizi, uporaba samozbijajućeg betona je skratilo razdoblje izgradnje temelja za 20%.[6]



Slika 1.1: Most Akashi Kaikyo [7]

Samozbijajući beton se počeo primjenjivati i u Europi krajem 90-ih godina. Jedan od prvih značajnih europskih projekata izveden ovom vrstom betona bila je izgradnja cestovnog tunela u Švedskoj.

Donošenjem Europskih smjernica koje su definirale zahtjeve, metode ispitivanja te preporuke za proizvodnju i ugradnju, samozbijajući beton je ostvario napredak i široku primjenu u svim europskim zemljama.

2. PROJEKTIRANJE SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

2.1. Svojstva samozbijajućeg betona

Prilikom projektiranja sastava samozbijajućeg betona potrebno je prvenstveno prepoznati kakve zahtjeve rezultirajući beton mora ispuniti.

Pri tom se prate zahtjevi u skladu s Europskim smjernicama poput:

- Razred tlačne čvrstoće
- Maksimalna veličina zrna agregata $D_{\max}$
- Razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava :
 - Maksimalni vodocementni faktor
 - Minimalna količina cementa
- Dodatni zahtjevi za samozbijajući beton:
 - Vrijednost T_{500} (rasprostiranje slijeganjem) ili V-lijevak
 - Ispitivanje L kutijom
 - Otpornost segregaciji
 - Temperatura svježeg betona
 - Drugi tehnički zahtjevi [4]

Karakteristike samozbijajućeg betona u svježem stanju su:

- TEČENJE – rast deformacija materijala bez povećanja naprezanja
Procjenjuje se metodom rasprostiranja slijeganjem (Slump flow).
- VISKOZNOST – otpor materijala tečenju
Procjenjuje se mjerenjem u reometru, empirijskim postupcima kao što je ispitivanje pomoću V-lijevka, a mogu se primijeniti i druge metode (određivanje parametara T_{500} , O-lijevak, Orimet).
- SPOSOBNOST ZA OBILAŽENJA PREPREKA - sposobnost svježeg samozbijajućeg betona da teče i zaobilazi gustu armaturu te popunjava oplatu, a da pritom ne dođe do segregacije.

- OTPORNOST SEGREGACIJI - izražava se kao postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu.[4]

Osnovne karakteristike sposobnosti popunjavanja oplata samozbijajućim betonom su tečenje i viskoznost kojoj uvelike pridonosi udio superplastifikatora u mješavini.

2.2. Projektiranje sastava samozbijajućeg betona

Postoje različiti pristupi projektiranju sastava samozbijajućeg betona, te se općenito zasnivaju na:

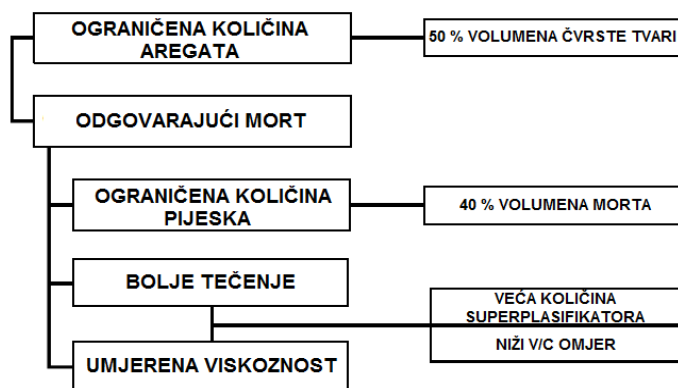
- određivanju količine vode i optimiziranju tečenja i stabilnosti paste
- određivanje udjela pijeska i dodataka betonu
- određivanje potrebne količine krupnog agregata
- ispitivanje osjetljivosti na male varijacije u količinama sastojaka
- proizvodnja betona u laboratoriju i ispitivanje istog u svježem stanju
- ispitivanje svojstava betona u očvrslom stanju
- proizvodnja probnih mješavina u betonari

Jedna od prvih metoda projektiranja samozbijajućeg betona koju su razvili Okamura i Ozawa na Sveučilištu u Tokiju je bila ograničena na uporabu japanskih materijala za izradu betona s cementom male topline hidratacije i velikim sadržajem dikalcijeva silikata (C_2S). [4]

Osnovni principi ove metode su:

- Volumen krupnog agregata je fiksni i u betonu iznosi 50 %
- Sitne čestice agregata su fiksne i čine 40 % volumena morta
- Sve čestice agregata veće od 0,09 mm smatraju se agregatom, a manje od 0,09 mm vezivom
- Vodocementni omjer izražen u volumenu iznosi od 0,9 do 1,0 ovisno o svojstvima cementa
- Količina superplastifikatora i konačni vodocementni omjer su određeni tako da osiguraju samozbijanje
- Vodocementni omjer i količina superplastifikatora određuju se ispitivanjem morta pomoću V-lijevka

- Preporučuje se vrijednost rasprostiranja slijeganjem 650mm te se prema tome prilagođava udio superplastifikatora



Slika 2.1: Način dobivanja svojstava samozbijanja kod betona [8]

Kasnije su nastajale mnogobrojne druge modificirane metode kao nastavak na ovu koje se mogu primijeniti za širi raspon materijala. [4]

Edamatsu, Nishida i Ouchi su razvili metodu kojom se određivao udio sitnog agregata u mortu za sitni agregat različitog oblika zrna i granulometrijskog sastava. Potom je Ouchi predložio metodu kojom se određuju povoljne kombinacije vodovezivnog omjera i udjela superplastifikatora. Na Sveučilištu u Delftu su se nadovezivala istraživanja zasnovana na modelu Ozawe i Okamure ali s nizozemskim materijalima. Na University College London su se provodila istraživanja koja su se odnosila na povećani udio pijeska u mortu i mogućnosti variranja većeg raspona udjela agregata. [4]

Razvile su se i daljnje metode poput CBI, JSCE metode i LCPC pristupa. Pošto se eksperimentalni rad temeljio na CBI metodi, u nastavku slijedi detaljniji opis ove metode.

Osim poštivanja zahtjeva za projektiranje samozbijajućeg betona po CBI metodi, također se poštivaju zahtjevi za svojstva samozbijajućeg betona prema Europskim smjernicama.

2.3. CBI metoda

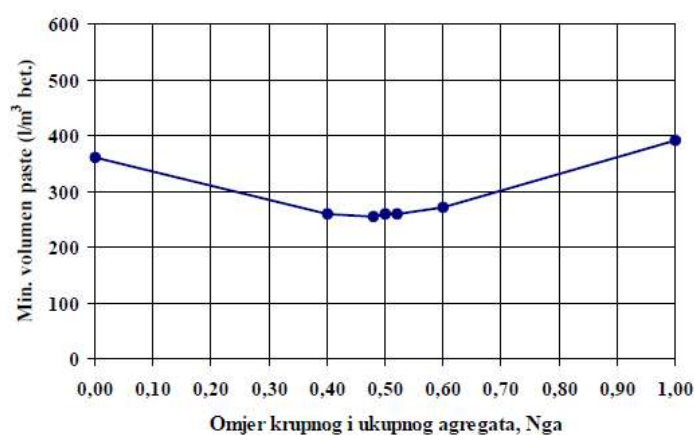
CBI metoda je razvijena u Švedskom institutu za istraživanje cementa i betona.[4] Razlika ove metode i ostalih je u određivanju sadržaja agregata i paste. Uzima u obzir granulometriju kombiniranog agregata (drobljenog i riječnog), primjenjuje za bilo koju specificiranu veličinu krupnog i sitnog agregata i uzima u obzir uvjete ugradnje.

Cijela metoda se zasniva na određivanju volumena paste, koji mora biti veći od preporučene minimalne vrijednosti za određene omjere agregata. Samozbijajući beton se promatra kroz tri faze: tekuću fazu, fazu paste i krutu fazu-agregata.

2.3.1. Određivanje minimalnog volumena paste

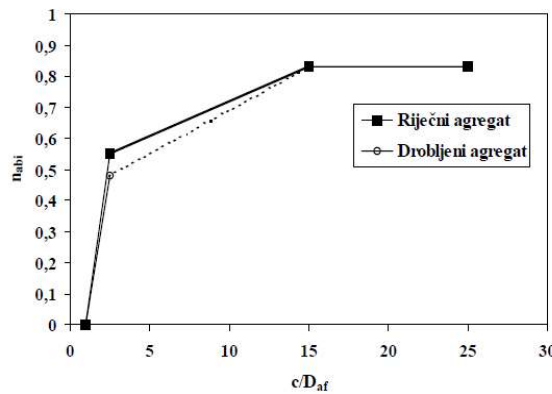
Pri projektiranju je potrebno uzeti u obzir nekoliko kriterija:

- **Projektni zahtjevi** se odnose na minimalnu tlačnu i vlačnu čvrstoću. Obično su ovim kriterijem uvjetovani vodocementni omjer i parametri trajnosti.
- **Kriterij detalja** se odnosi na razmještaj armature i oblik presjeka koji uvjetuju minimalni potrebni volumen paste kontroliranjem razmaka krupnih zrna agregata.
- **Kriterij sadržaja šupljina** se odnosi na određivanju minimalnog udjela paste prema omjeru količine krupnog i ukupnog agregata (Nga). Pošto je potreban veći volumen paste za potrebe tečenja betona, ovaj kriterij se primjenjuje za određivanje optimalnog volumnog omjera krupnog i ukupnog agregata.



Slika 2.2: Određivanje minimalnog volumena paste prema kriteriju sadržaja šupljina[4]

- **Kriterij blokiranja** se temelji na geometriji presjeka te se proračunom dobiva minimalni potrebni volumen paste kako bi se izbjeglo blokiranje zrna agregata među armaturnim šipkama. Većim udjelom paste se povećava i razmak između zrna agregata.



Slika 2.3: Ovisnost između volumena zaglavljenog agregata (n_{abi}) i omjera slobodnog prostora i promjera zrna agregata (c/D_{af}) [4]

Dvije krivulje predstavljaju ovisnost između omjera blokiranja volumena agregata (n_{abi}) i slobodnog prostora i promjera zrna agregata (c/D_{af}) za riječni i drobljeni agregat.

$$n_{abi} = V_{abi} / V_t$$

V_{abi} – volumen zaglavljenog agregata

V_t – ukupni volumen betona

c – slobodni prostor između armaturnih šipki ili drugih prepreka

$$D_{af} = M_{i-1} + 0.75(M_i - M_{i-1})$$

M_i, M_{i-1} – najveća i najmanja veličina zrna agregata

Prema ovom modelu moguće je izračunati najveću količinu agregata (ili najmanji volumen paste) za izbjegavanje blokiranja agregata.

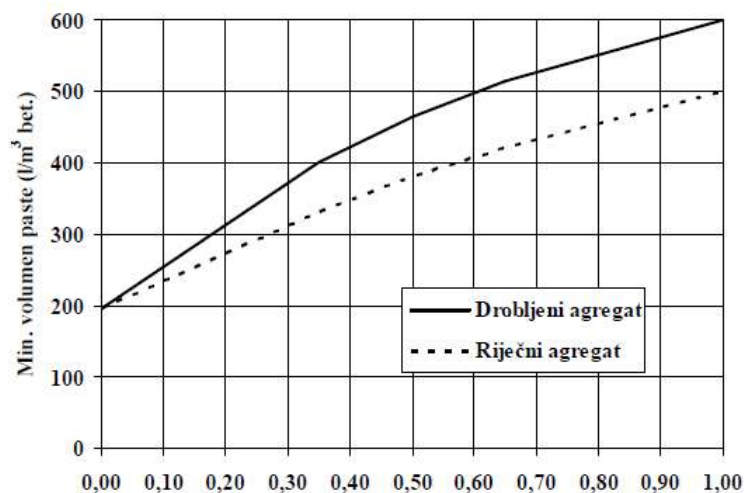
$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\eta_{ai}}{\eta_{abi}} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{ai}}{V_{bi}} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ai}}{V_{abi}} = 1$$

Rizik blokiranja:

V_{ai} – volumen agregata

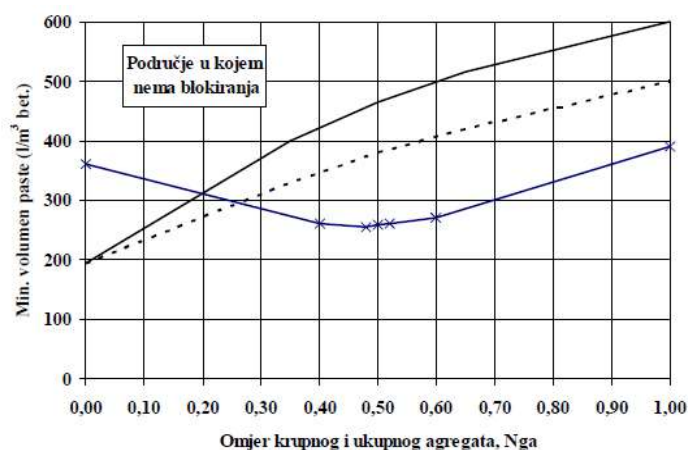
V_{abi} – volumen zaglavljenog agregata

Varijacijom količine krupnih zrna u odnosu na ukupnu količinu agregata (N_{ga}) i upotrebom stvarne granulometrije agregata dobiva se dijagram kojim se može odrediti minimalni potreban volumen paste.



Slika 2.4: *Određivanje minimalnog volumena paste prema kriteriju blokiranja zrna agregata[4]*

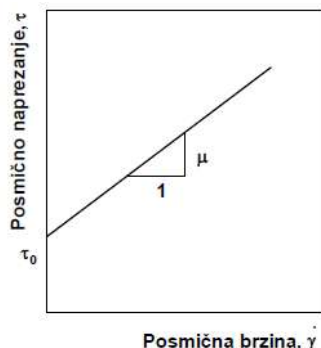
Na sumarnom dijagramu je vidljivo da je minimalna količina paste potrebna za vrijednost $N_{ga}=0,4-0,55$. Za udio krupnog agregata do 20% je mjerodavan kriterij sadržaja šupljina, a kod većeg kriterij blokiranja.



Slika 2.5: *Minimalni volumen paste[4]*

Prethodnim koracima je određen minimalni volumen paste, maksimalni dopušteni vodocementni omjer, vrsta cementa i sadržaj zraka.

U ovoj fazi projektiranja se mjere reološka svojstva morta i bira najpovoljniji sastav, upravo zbog toga što je potrebno proračunati dodatni volumen paste koju čine punila i drugi mineralni dodaci.



Slika 2.6: Binghamov reološki model[4]

Svojstvo samozbijajućeg betona u svježem stanju se mogu dobro opisati Binghamovim modelom. Materijal se do granice tečenja (τ_0) ponaša kao kruto tijelo, a potom dolazi do posmičnog popuštanja i materijal počinje teći. Povećanje brzine tečenja uzrokuje povećanje otpora, pa tako nagib μ koji predstavlja plastičnu viskoznost označuje mjeru otpora povećanju brzine tečenja. Granica tečenja je najniža kod samozbijajućeg betona, pa je potrebna velika viskoznost morta kako ne bi došlo do segregacije, ali isto tako betonskog kompozita manje viskoznosti za postizanje stabilnosti. Dakle, kod male viskoznosti paste dolazi do problema segregacije, a kod velike do smanjenja obradivosti prilikom čega beton teče presporo, dolazi do skrućivanja betona (tikotropija) i brzog prestanka tečenja.[4]

3. METODE ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

3.1. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju [9]

U razmatranju ovih metoda, potrebno je uzeti u obzir nekoliko smjernica:

- jedna od glavnih poteškoća u osmišljavanju ovakvih testova je da moraju procijeniti tri različita, ali povezana, svojstva svježeg samozbijajućeg betona: njegovu sposobnost popunjavanja (tečenje), sposobnost zaobilaženja prepreka (bez blokiranja na armaturi) te otpornost na segregaciju (stabilnost). Ni jedan test do sada osmišljen ne može mjeriti sva tri svojstva istovremeno.
- ne postoji jasna veza između rezultata ispitivanja i izvedbe na gradilištu.
- nema jasnih smjernica o granicama usklađenosti.
- preporučuju se dupla ispitivanja.
- metode ispitivanja i rezultati iskazuju se za maksimalnu veličinu agregata do 20 mm; različiti rezultati ispitivanja i/ili različite dimenzije oprema mogu biti prikladne za ostale veličine agregata.
- različiti rezultati ispitivanja mogu biti prikladni za beton koji se stavlja u vertikalnim i horizontalnim elementima.
- različite vrijednosti ispitivanja mogu biti prikladne za različite gustoće armatura.
- u obavljanju ispitivanja, beton treba uzorkovati, u skladu s HRN EN 12350-1 .
- ispitivanja se provode prema nizu europskih normi HRN EN 12350 8-12.

3.1.1. Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-8 koja određuje sposobnost punjenja i viskoznost samozbijajućeg betona, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće za maksimalnu veličina zrna agregata od 40mm.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- kalup u obliku krnjeg stošca s promjerom od 200 mm, unutarnje dimenzije na bazi, promjera 100 mm na vrhu i visine od 300 mm.
- osnovna ploča debljine minimalno 2cm, dimenzija 90x90cm, obilježena krugom u središnjem dijelu ploče za naližganje stošca, i koncentričnim krugom promjera 500 mm.
- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ravnalo, ručnik

Postupak ispitivanja:

Ploču je potrebno postaviti na ravnu i stabilnu površinu, potom ju navlažiti spužvom ili krpom bez procjeđivanja vode na površini. Također je potrebno navlažiti i unutrašnju stranu stošca te ga postaviti na označeni središnji dio ploče.

Lopaticom se ispuni sav stožac s mješavinom. Beton se ne nabija već se ručnikom ili lopaticom poravna razina na vrhu stošca i odmakne višak.

Potom se vertikalno podigne stožac i pusti da beton slobodno isteče. Istovremeno se pokrene štoperica i zabilježi vrijeme potrebno da beton dosegne krug promjera 500mm. To vrijeme zabilježeno je vrijeme T_{500} koji je bitan parametar svojstava samozbijajućeg betona.

Mjeri se i konačni promjer betona u dva okomita smjera. Prosjek zabilježena dva promjera je vrijednost rasprostiranja slijeganjem mjeren u mm.

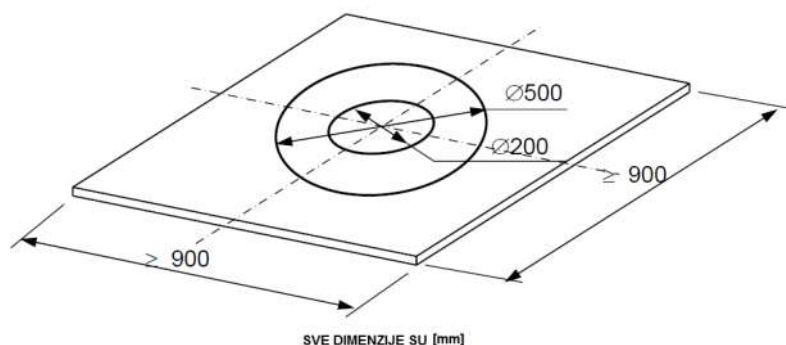
Potrebno je i zapaziti svojstva vizualno, poput odvajanja vode, morta ili cementne paste na rubovima, isto tako i nakupine krupnog agregata na određenom mjestu (segregacija).

Rezultati ispitivanja:

Što je veća vrijednost rasprostiranja slijeganjem (SF), to je veća sposobnost da ispuni oplatu pod vlastitom težinom. Za samozbijajuće betone ta vrijednost mora biti najmanje 650mm. Nema općeprihvaćenih savjeta o tome koje su razumne granice tolerancije tih vrijednosti, no ± 50 mm se smatra optimalnim.

Vrijeme T_{500} je sekundarni pokazatelj protoka. Niže vrijednosti označavaju veću protočnost. Prema istraživanju BriteEuRam vrijeme prihvatljivo za primjenu u građevinarstvu je 3-7 sekundi, dok se za stambene primjene preporuča vrijeme tečenja od 2-5 sekundi.[9]

Kod veće segregacije najviše će krupnog agregata ostati u središnjem dijelu ploče dok će mort i cementna pasta isteći na rubovima. Kod manje segregacije mort se odlijeva na rubovima betona.



Slika 3.1: Osnovna ploča[9]

Vrijednost SF je srednja vrijednost promjera d_1 i d_2 zaokružena na 10mm:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

gdje je:

SF - razred rasprostiranja-slijeganjem [mm]

d_1 - najveći promjer rasprostrtog betona [mm]

d_2 - promjer rasprostrtog betona za 90° u odnosu na d_1 [mm]

Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja su prikazani u tablici 3.1.

Tablica 3.1: *Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja[7]*

RAZRED	Tečenje betona (mm)	Primjena
SF1	550-650	-nearmirani ili slabo armirani betonski elementi -ugradnja pumpama (npr. tunelska obloga) -elementi malih dimenzija koji ne zahtijevaju veliko horizontalno tečenje betona
SF2	660-750	-prikladno za većinu radova (zidovi, stupovi)
SF3	760-850	-za elemente s gusto složenom armaturom, složenog oblika

Vrijednost T_{500} se zaokružuje na desetinku sekundi i ona karakterizira viskoznost betona.

Pri tome se svrstavaju u razrede viskoznosti prikazani u tablici 3.2.

Tablica 3.2: *Razredi viskoznosti[7]*

RAZRED	T_{500} (s)	Primjena
VS1	$< 2,0$	- elementi s gusto postavljenom armaturom, horizontalni elementi, elementi složeno poprečnog presjeka i oblika (velikih širina i dužina)
VS2	$\geq 2,0$	- prikladan za većinu radova (zidovi, stupovi)

3.1.2. Ispitivanje V-lijevkom

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-9 i koristi se za određivanje viskoznosti i sposobnosti popunjavanja (sipkosti) betona maksimalne veličine agregata od 20mm. Iako je ispitivanje osmišljeno da mjeri protočnost, rezultat je pod utjecajem drugih svojstava betona. Oblik obrnutog stošca je odgovoran za blokiranje betona ukoliko isti sadrži previše krupnog agregata. Duže vrijeme protoka može biti povezano s niskom deformabilnosti zbog visoke viskoznosti paste te s velikim trenjem među česticama.

Iako je uređaj jednostavan, učinak suženja lijevka na protok betona nije potpuno poznat.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- V-lijevak
- kanta za prihvrat betona
- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ručnik

Postupak ispitivanja:

Postavi se V- lijevak na čvrstu i ravnu površinu te se navlaži unutrašnja površina lijevka.

Vrata na dnu kalupa se drže otvorena kako bi višak vode mogao oteći. Vrata se zatvore i postavi se kanta ispod lijevka.

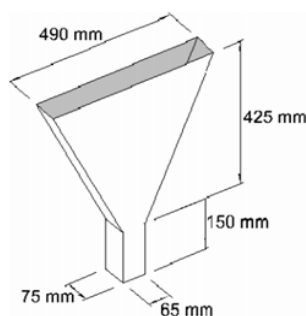
Lijevak se u potpunosti ispuni s betonom bez zbijanja ili nabijanja, a lopaticom se poravna i očisti višak betona.

U prvih desetak sekundi se otvore vrata na dnu posude nakon punjenja i dopusti betonu da proteče pod vlastitom težinom. Pokrene se štoperica onog trena kad se vrata otvore i zapiše vrijeme potrebno da se izvrši pražnjenje lijevka (vrijeme protoka). Trenutak koji se uzima da se ispraznio lijevak je onaj trenutak kad se nadzire svjetlost kroz lijevak odozgo gledano.

Cijelo ispitivanje se mora obaviti u roku od 5 minuta.

Rezultati ispitivanja:

Ovo ispitivanje mjeri sposobnost protoka betona odnosno kraće vrijeme protoka pokazuje veću protočnost. Optimalno vrijeme protoka samozbijajućeg betona je oko 10 sekundi. Ograničeni protok kroz V-lijevak i produženo vrijeme protoka mogu dati naznake o osjetljivosti mješavine na blokiranje. Vrijeme protoka se značajno povećava što je beton skloniji segregaciji.



Slika 3.2: Dimenzije V-lijevka[7]

Tablica 3.3: Razrediviskoznosti (V-lijevak)[7]

RAZRED	Vrijeme tečenja (s)
VF1	< 9,0
VF2	9,0 – 25,0

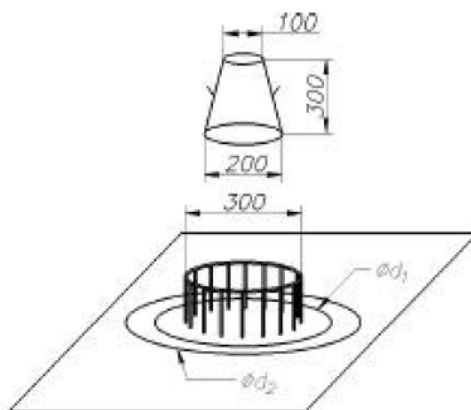
3.1.3. Ispitivanje J-prstenom

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-12 kojom se definira svojstvo popunjivosti i prolaznosti samozbijajućih betona te se koristi i za ispitivanje otpornosti prema segregaciji.

Prilikom ovog ispitivanja mjeri se razastiranje, vrijeme razastiranja T_{500} i stopa blokiranja.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- kalup u obliku krnjeg stošca s promjerom od 200 mm, unutarnje dimenzije na bazi, promjera 100 mm na vrhu i visine od 300 mm
- osnovna ploča debljine minimalno 2cm, dimenzija 90x90cm, obilježena krugom u središnjem dijelu ploče za nalijeganje stošca, i koncentričnim krugom promjera 500 mm
- J prsten - čelični prsten koji je izbušen kako bi se vertikalno mogle postaviti šipke armature različitih promjera i na različitim razmacima (optimalno da je tri puta veći razmak od vrijednosti veličine maksimalnog zrna agregata). Promjer prstena je 300mm, a visina 100 mm.
- ravna šipka duljine 400mm
- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ravnalo, ručnik



Slika 3.3: Dimenzije opreme za ispitivanje J prstenom[9]

Postupak ispitivanja:

Prvenstveno je potrebno navlažiti ploču i unutrašnju površinu stošca. Na ravnu podlogu se postavlja ploča na koju se centrično namješta kalup oblika krnjeg stošca, a oko kalupa J-prsten tako da bude smješten koncentrično kalupu i čvrsto pritisnut. Beton se ulijeva u stožac i pripremi se za vertikalno podizanje stošca istovremeno mjereći vrijeme razastiranja (vrijeme potrebno da beton dosegne promjer od 500mm). Izmjereno vrijeme označava se s T_{500j} .

Mjeri se konačni promjer betona u dva međusobno okomita smjera. Izračuna se prosjek dvaju izmjerenih promjera u milimetrima.

Zatim se postavlja ravna šipka na J-prsten te se mjeri relativna visinska razlika između donjeg dijela šipke i površine betona u središtu Δh_0 i četiri visinske razlike van prstena u okomitim smjerovima Δh_{x1} , Δh_{x2} , Δh_{y3} , Δh_{y4} . Provjerava se segregacija rasprostrtog betona i odvajanja paste na rubovima betona.

Razastiranje J-prstena SF_j srednja je vrijednost promjera d_1 i d_2 .

$$SF_j = \frac{d_1 + d_2}{2},$$

gdje je:

SF_j - rasprostiranje [mm]

d_1 - najveći promjer rasprostiranja [mm]

d_2 - promjer rasprostiranja okomit na d_1 [mm]

T_{500j} izražava se u sekundama s točnošću od desetinke sekunde.

Stopa blokiranja dobije se iz izraza:

$$PJ = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0$$

gdje su Δh izmjerene visine.

Vrijednosti SFj i PJ treba dovesti u ovisnost kako bi beton zadovoljio sposobnost popunjavanja, tečenja i sposobnost zaobilaženja prepreka.

Tablica 3.4: Razredi ispitivanja J-prstenom[5]

RAZRED	Uvjet
PJ1	$PJ \leq 10$ 12 šipki
PJ2	$PJ \leq 10$ 16 šipki

Rezultati ispitivanja:

Kod ovog ispitivanja mjerenje protoka i sposobnosti zaobilaženja prepreka daju međusobno ovisne rezultate. Izmjereni protok je zasigurno uvjetovan stopom blokiranja kroz šipke armature. Količina blokiranja je manje uvjetovana obilježjima protoka, a jasnije je da za veću razliku u visini je manja sposobnost prolaza betona kroz prepreke. Blokiranje i/ili segregacija često se pouzdanije definira vizualno nego proračunom.

3.1.4. Ispitivanje L kutijom

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-10 kojim se određuje sposobnost prolaznosti samozbijajućeg betona kroz uske otvore između dvije ili tri armaturne šipke bez segregacije i blokiranja. Isto tako se vizualnim putem može utvrditi i ozbiljan nedostatak stabilnosti mješavine (segregacija).

Potrebna oprema za ispitivanje:

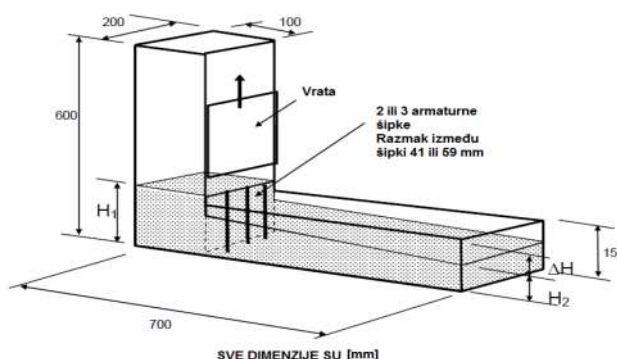
- L kutija - kalup oblika L koji se sastoji od vertikalnog i horizontalnog dijela s kojim je odijeljen pomičnom pregradom i šipkama armature (3 glatke šipke na razmaku od 41mm ili 2 glatke šipke promjera 12mm na razmaku od 59mm)
- dodatna oprema: lopatica, štoperica i ručnik

Postupak ispitivanja:

Potrebno je postaviti kutiju na ravnu i čvrstu podlogu, osigurati da se klizna vrata mogu otvoriti slobodno i zatim ga zatvoriti. Namoči se unutarnja površina uređaja, ukloni višak vode i ispunj vertikalni presjek aparata s betonskim uzorkom. Ostavi se tako ispunjena kutija da odstoji 1 minutu. Vizualno se provjeri i zabilježi da li je došlo do segregacije. Podignu se klizna vrata i dopusti betonu da isteče van u horizontalni dio.

Kad gibanje betona prestane, mjeri se visinska razlika na kraju uređaja između površine betona i gornjeg dijela posude te između površine betona i donjeg dijela posude. Mjerenja se vrše na tri mjesta, dva na krajevima i jedno u sredini i iz tih vrijednosti se izračunaju srednje vrijednosti ΔH_1 i ΔH_2 . Razlika visina posuda i tih vrijednosti daju vrijednosti H_1 i H_2 potrebne za proračun omjera blokiranja koji najbolje definira sposobnost prolaza betona.

Cijelo ispitivanje mora se obaviti unutar 5 minuta.



Slika 3.4: Dimenzije L-kutije[5]

Sposobnost prolaza betona računa se po formuli:

$$p_A = \frac{H_2}{H_1},$$

gdje je:

p_A - omjer sposobnosti prolaska

H_1 - srednja dubina betona u vertikalnom dijelu kutije [mm]

H_2 - srednja dubina betona na kraju horizontalnog dijela kutije [mm]

Tablica 3.5: Razredi ispitivanja L kutijom[7]

RAZRED	Uvjet	Primjena
PA1	$H_2/H_1 \geq 0,80$ 2 šipke	Razmak 80- 100 mm
PA2	$H_2/H_1 \geq 0,80$ 3 šipke	Razmak 60- 80 mm

Rezultati ispitivanja:

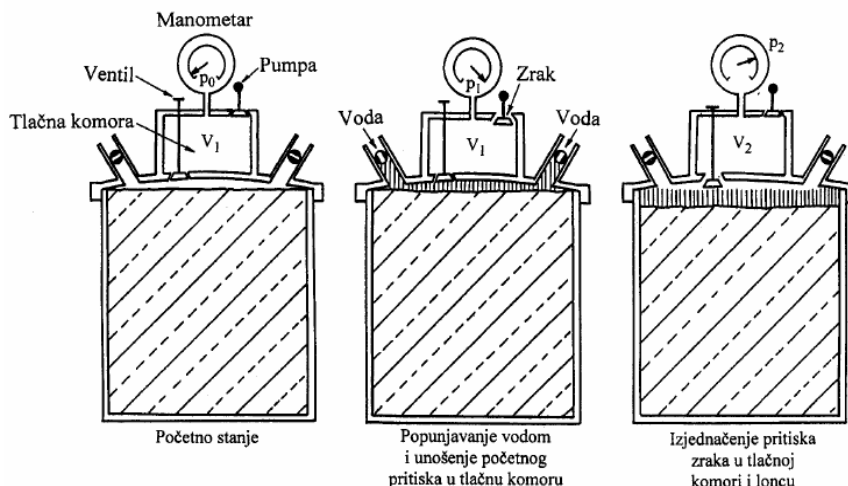
Ako beton teče slobodno, u mirovanju će biti horizontalan, tako da je $H_2/H_1=1$. Stoga, što je omjer bliži vrijednosti 1, tj. što su vrijednosti H_1 i H_2 bliži, bolji je protok betona. Europsko udruženje je predložilo minimalnu prihvatljivu vrijednost od 0,8. Vizualno se može ustanoviti blokiranje agregata iza šipki armaturi bez obzira na računsku vrijednost sposobnosti zaobilazanja prepreka.

3.1.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

Ispituje se prema normi HRN EN 12350-7 koja specificira metodu određivanja sadržaja zraka u svježem betonu, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće te maksimalne veličine zrna agregata od 63 mm.

Poroznost svježeg betona se ispituje porometrom. U posudu poznatog volumena stavi se uzorak i zatim poklopi te se prostor između uzorka i poklopca popuni vodom. U poklopcu je tlačna komora poznatog volumena u kojoj se napumpa zrak do pritiska oko 1 bar, što se točno

očita na manometru kao pritisak p_0 . Otvaranjem ventila pritisak se raspodijeli u posudi i tlačnoj komori pa se na manometru aparata za mjerenje sadržaja zraka (porometra) očita sadržaj zraka „z“ u % volumena posude za beton, bez računanja.



Slika 3.5: Uređaj za ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu[8]

3.1.6. Ostale metode

3.1.6.1. Određivanje segregacije sijanjem

Ispituje se stabilnost pomoću sita prema normi HRN EN 12350-11 kojom se određuje otpornost prema segregaciji mjereći pritom prolaznosti uzorka betona kroz sito veličine 5 mm. Ako samozbijajući beton ima slabu otpornost prema segregaciji, njegova pasta ili mort lako prolazi kroz sito.

Oprema koja se koristi kod ove metode je perforirano sito kvadratnih otvora veličine 5 mm s okvirom promjera 300 ili 315 mm, visine 40 ili 75 mm.

Koristi se i vaga digitalnog tipa s preciznošću od 20 grama i kapacitetom oko 10 g te kanta kapaciteta 10 – 12 litara s maksimalnim promjerom 300 ± 10 mm.

Nakon uzorkovanja, svježi beton se ostavi stajati 15 minuta i zabilježi se bilo kakvo izdvajanje vode. Gornji dio uzorka se zatim izlije u sito s otvorima 5 mm kvadratnih. Nakon dvije minute težina materijala koja je prošla kroz sito je zabilježena. Omjer segregacije se tada izračunava kao omjer uzorka koji je prošao kroz sito.

3.1.6.2. Ispitivanje U posudom

Ovo ispitivanje pruža izravnu procjenu sposobnosti tečenja koji ujedinjuje i zahtjev sposobnosti zaobilaženja prepreka.

Otvor s kliznim vratima je postavljen između dva dijela. Šipke promjera 13 mm (3 šipke) su postavljene na vratima s razmacima od 50 mm. To stvara svijetli otvor od 35 mm između rešetaka. Postoji i varijanta rešetke promjera 10 mm (5 šipki) koja se odabire ovisno o stvarnom stanju u konstrukciji. U lijevom odjeljku se napuni samozbijajući beton do visine 680 mm. Zatim se podignu vrata i pusti beton da isteče prema drugom odjeljku. Mjeri se visina betona u svakom odjeljku.

Ako beton slobodno teče poput vode, u mirovanju će biti horizontalna razina betona pošto će visina u lijevom (h_1) i visina u desnom (h_2) odjeljku biti iste. Što je ta razlika bliže nuli beton se smatra tečniji i ima veću sposobnost zaobilaženja prepreka.

Samozbijajućim se smatra onaj beton koji se izdigne iznad razine minimalno 300 mm.

3.1.6.3. Fill posuda (Kajima uređaj)

Ispitivanje se koristi za mjerenje sposobnosti punjenja samozbijajućeg betona s maksimalnim zrnom agregata veličine 20 mm. Uređaj se sastoji od spremnika s ravnom i glatkom podlogom. U spremniku se nalazi 35 prepreka izrađenih od PVC-a promjera 20 mm i međusobne udaljenosti 50 mm.

Na gornjoj strani je postavljena cijev za punjenje promjera 100 mm i visine 500 mm sa lijevkom na vrhu visine 100 mm. Spremnik se napuni s betonom, a razlika u visini između dviju strana spremnika je mjera sposobnosti popunjavanja betona.

Ovo ispitivanje je vrlo teško izvesti na gradilištu zbog složenosti uređaja i velike težine betona, no daje dobre smjernice o samozbijajućim karakteristikama betona.

Čak i beton s visokom sposobnošću punjenja se može pokazati lošim ako prilikom ispitivanja pokaže slabu sposobnost zaobilaženja prepreka i slabu otpornost prema segregaciji.

3.2. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

Nakon projektom zahtjevanog vremena i starosti betona, potrebno je odrediti karakteristike betona u očvrslom stanju. Ispituje se tlačna čvrstoća betona, dinamički modul elastičnosti i ostala svojstva koja su zahtjevana projektom.

3.2.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Ispituje se tlačna čvrstoća betona prema normi HRN EN 12390-3.

Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 123390-2. Oblika su kocke ili cilindra, a dimenzije su određene normom HRN EN 123390-1. Prije ispitivanja s uzorka se briše površinska vlažnost.

Za ispitivanje je potrebna preša podešena u skladu s normom HRN EN 123390-4.

Postupak

Uzorak je potrebno površinski očistiti prije nego se postavi u prešu. Uzorci oblika kocke se u prešu postavljaju okomito na smjer ugradnje i moraju se postaviti u sredinu preše kako bi opterećenje koje se nanosi bilo ujednačeno. Opterećenje se mora nanositi jednoliko, bez udara i mora biti između 0,2 MPa/s i 1,0 MPa/s. Maksimalno opterećenje (F) pri kojem je došlo do sloma se zabilježi kao rezultat pokusa.

Tlačna čvrstoća betona se računa prema izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} [N/mm^2]$$

gdje je:

f_c – tlačna čvrstoća betona [N/mm²]

F – maksimalno opterećenje pri slomu [N]

A_c – površina uzorka [mm²]

3.2.2. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12504-4 kojom se određuje brzina širenja impulsa ultrazvučnih longitudinalnih valova u betonu.

Uređaj za ispitivanje se sastoji od generatora električnih impulsa, para pretvarača, pojačala i elektroničkog uređaja za mjerenje vremenskog intervala utrošenog između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka dolaska na prijemni pretvarač. Mjerenje brzine omogućuje kalibracijska šipka.

Na glatku i čistu površinu betona se postavi lice pretvarača. Prethodno je potrebno premazati glatki dio betona sa medijem za spajanje kao što je mast, mazivo, mekani sapun ili kaolinska/glicerolska pasta kako bi se osigurao dobar akustični spoj između betona i pretvarača. Uz lagano pritiskanje licem pretvarača, očitaju se brzine valova na tri mjesta na površini betona, dva krajnja i jedno u sredini.

Tablica 3.6: Ocjena kvalitete betona s obzirom na brzinu ultrazvučnog vala[7]

Brzina ultrazvučnog vala [m/s]	Kvaliteta betona
<1600	Vrlo slab
1600-2000	Slab
2000-2800	Zadovoljavajući
2800-3600	Dobar
3600-4400	Vrlo kvalitetan

3.2.3. Ostale metode

3.2.3.1. Ispitivanje savojne čvrstoće betona

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12390-5 koja određuje savojnu čvrstoću očvrslog betona.

Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 12390-2. Oblika su prizme, a dimenzije su određene normom HRN EN 12390-5. Prije ispitivanja s uzorka se briše površinska vlažnost.

Za ispitivanje je potrebna preša podešena u skladu s normom HRN EN 12390-5.

Ležajevi se prvotno postave na propisane udaljenosti. Potom se uzorci prizme postave u prešu tako da su centrirane na ležajevima okomito na smjer opterećenja kako bi se nanosilo jednoliko opterećenje, bez udara i između 0,04 i 0,06 MPa/s.

3.2.3.2. Ispitivanje kapilarnog upijanja

Provodi se prema normi DIN-U.M8.300 i određuje mjeru kapilarnog upijanja vode homogenih građevinskih materijala. Nakon njegovanja uzorka u trajanju od 28 dana u vlažnoj komori, uzorci se osuše u sušioniku na $105 \pm 5^\circ\text{C}$ do stalne mase. Nakon sušenja uzorka do stalne mase, drže se 24 h na relativnoj vlažnosti iznad 90 %.

Oprema za ispitivanje: posuda za vodu s rešetkastim podešavajućim nosačem, spužva, sredstvo za brtvljenje, vaga točnosti $d=0.01$ g i štoperica.

Uzorak se brtvi sa strana na minimalnoj visini od 10 mm te se vodoupojna površina uranja u posudu s vodom na dubini od 2 do 5 mm. Uranjaju se koso u odnosu na vodeno lice kako ne bi došlo do stvaranja mjehurića zraka. Mjerenja se određuju u određenim vremenskim intervalima i prekida se kada se mjerne točke mogu povezati s dovoljnom točnošću ravnom crtom, u protivnom se mjerenja nastavljaju i preko 24 sata.

Koeficijent upijanja se računa prema formuli:

$$A = \frac{\Delta m_v}{\Delta \sqrt{t}} \left[\frac{kg}{m^2 h^{0.5}} \right]$$

gdje je:

A - koeficijent upijanja

m_v - kapilarno upijanje vode

t - vrijeme

4. DROBLJENA OPEKA KAO AGREGAT ZA BETON

Opeka ili cigla je zidni građevinski materijal koji se dobiva oblikovanjem, sušenjem i pečenjem plastične smjese glinenog materijala, pijeska i vode. Opeka je najmasovniji proizvod keramičke industrije.[10]

Neprestanom urbanizacijom i industrijalizacijom, sve veće razmjere poprima problem nagomilavanja i zbrinjavanja građevinskog otpada. Gospodarenje otpadom je jedan od prioriteta svake zajednice i postalo je očito da dobro upravljanje otpadom može poboljšati kvalitetu života. Glavno načelo kvalitetnog gospodarenja otpadom je u smanjivanju masovne proizvodnje novog, pronalaženju načina za recikliranjem i ponovnu uporabu postojećeg te sigurnim i ekološki prihvatljivim odlaganjem neiskorištenog otpada.

Recikliranje je ponovna obrada starih materijala u nove proizvode, sprječavanje rasipanja potencijalno korisnih materijala, smanjenje potrošnje sirovih materijala.

Recikliranje glinene opeke ekološki je prihvatljiv način njezina odlaganja. Takva opeka, dobivena iz srušenih zidanih konstrukcija, može biti primijenjena kao agregat u proizvodnji novih betonskih mješavina. Očuvanje prirodnih materijala značajno je za ekološki odgovorno i održivo građenje koje bi bilo ujedno i financijski prihvatljivo. Takav način gradnje implicira upotrebu jeftinih materijala koji mogu biti upotrijebljeni bez negativnog utjecaja na okoliš.

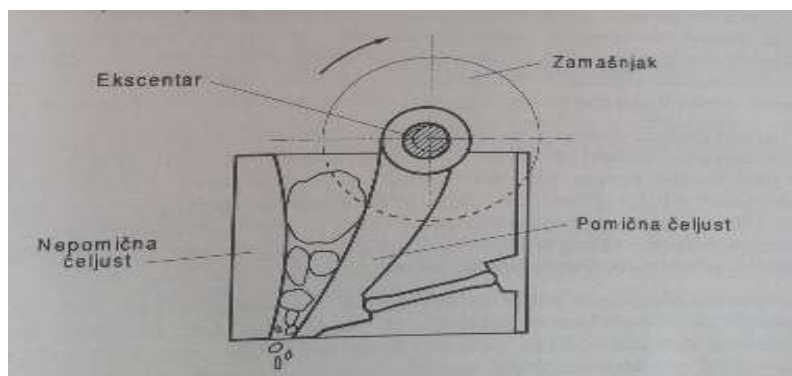
Ekološki odgovoran i održiv način građenja podrazumijeva postizanje potpuno zatvorenog ciklusa upotrebe materijala. Zatvoreni ciklus u ovom slučaju obuhvaća recikliranje materijala i dobivanje nove sirovine za novi proizvod (npr. beton s recikliranim agregatom) ili ponovno dobivanje izvornih proizvoda (npr. glinene opeke i crijepa) njihovim čišćenjem i toplinskom obradom.[11]



Slika 4.1: Zatvoreni ciklus recikliranja i ponovne upotrebe građevinskog otpada[11]

Postrojenja za proizvodnju recikliranog agregata u sebi sadrže različite tipove drobilica, opreme za transport, separaciju i odstranjivanje štetnih materijala.

Najbolji granulometrijski sastav recikliranog agregata dobije se primjenom čeljusnih drobilica.



Slika 4.2: Shema čeljusne drobilice[12]

Postrojenje za recikliranje može biti mobilno i smješteno u blizini konstrukcije koja se ruši, odnosno u blizini nove konstrukcije za koju će se upotrijebiti reciklirani agregat ili se može formirati centralno postrojenje koje ne mora biti blizu konstrukcije. Poželjno je da ovakva postrojenja budu smještena u industrijskoj zoni zbog velike količine buke i prašine koju proizvode tijekom rada.

Kako bi se osiguralo održivo gospodarenje građevinskim otpadom, u ovom slučaju recikliranje glinene opeke, nužno je predvidjeti njegova svojstva i odrediti njegovu primjenu.

4.1. Svojstva reciklirane glinene opeke kao agregata za novi beton

Proizvodnjom betona glavna namjera je da se koristi što više agregata jer je ovaj materijal jeftiniji od cementa. Agregat zauzima 70 do 80 posto ukupnog volumena betona, i zbog toga čvrstoća agregata poprilično utječe na konačnu čvrstoću betona.

4.1.1. Poroznost i apsorpcija reciklirane glinene opeke

Poroznost prikazuje količinu šupljina u materijalu, dok apsorpcija prikazuje količinu vode u površinski suhom vodom zasićenom materijalu.

Ova dva svojstva agregata su iznimno važni fizikalni parametri zbog svog utjecaja na vezu između cementne paste na otpornost betona izloženog ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja,

kao i na otpornost betona na kemijske i erozijske utjecaje. Poroznost agregata utječe i na volumnu masu betona.

Apsorpcija vode i udio pora u drobljenoj opeci kao agregatu nekoliko su puta veći nego kod drobljenoga kamenog agregata što može utjecati na obradivost betona u svježem stanju. Procijenjeno je da se apsorpcija reciklirane opeke kreće između 22 % i 25 % u odnosu prema masi materijala u njegovu suhom stanju. Što se tiče poroznosti drobljene opeke kao agregata, dosad je vrlo malo poznatih podataka osim što je utvrđeno da je ona relativno velika. Rezultati ispitivanja pokazali su da se drobljena opeka zasiti vodom ako se drži potopljena 30 minuta.

Ako ostane potopljena pod vodom sljedeća 24 sata, apsorpcija će se povećati za samo 2 %. Prethodno vlaženje vodom ili potapanje reciklirane opeke u vodi može se izbjeći projektiranjem sastava betonske mješavine s velikim stupnjem obradivosti svježeg betona ili dodavanjem superplastifikatora u mješavinu, no poboljšana obradivost pod djelovanjem superplastifikatora traje oko 15 minuta. Nakon tog vremena beton postaje slabo obradiv i teško se ugrađuje u oplatu. Prema tome, za porozne agregate kao što je reciklirana opeka preporučuje se prethodno vlaženje ili potapanje agregata minimalno 30 min potom dodavajući potrebnu vodu za postizanje betona određene konzistencije.

Za pripremu betona na bazi drobljene opeke potrebna količina vode iznosi 20-35 % mase agregata za razliku od betona sa prirodnim agregatom gdje se ta količina kreće od 6-14 %.

4.1.2. Štetni sastojci u agregatu

Svojstva betona u kojem je reciklirana opeka upotrijebljena kao agregat nisu predvidljiva i mogu izazvati nepredviđen štetan učinak na čvrstoću i trajnost betona.

Ponovna upotreba cijelih opeka u izgradnji novih zidanih građevina je moguća ako su opeke bile međusobno vezane vapnenim mortom, no ako su bile vezane cementnim mortom, s površine opeke je teško ukloniti pa se preporučuje drobljenje takvih opeka i njezina upotreba kao recikliranog agregata.

Prisutnost asfalta u recikliranom agregatu utječe na čvrstoću betona pripravljenog s takvim agregatom. Ona se smanjuje za postotak koji je jednak udjelu asfalta u ukupnom volumenu recikliranog agregata.

Pri proizvodnji betona kod kojeg postoji mogućnost onečišćenja gipsom preporučuje se upotreba sulfatno otpornog cementa upravo zbog negativnog utjecaja primjesa gipsane žbuke na beton s recikliranom opekom.

Organske tvari, kao što su papir, drvo, tekstil i polimerni materijali, nestabilne su u betonu pri izlaganju betona ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja te ciklusima vlaženja i sušenja. Ostali tipovi organskih tvari, kao što je npr. boja, mogu uvući veliku količinu zraka u beton.

Udio klorida, sulfata i ostalih soli u armiranom betonu s recikliranim agregatom treba uzeti u obzir zbog toga što mogu izazvati koroziju čelične armature.

Istraživanjima je zaključeno da reciklirani ostatci zidanih građevina upotrijebljeni kao agregat imaju manji udio klorida i sulfata od recikliranog betona kao agregata.

4.1.3. Projektiranje sastava betona

Pri upotrebi reciklirane opeke kao agregata za proizvodnju betona, sastav betona je moguće projektirati na jednak način kao i sastav betona s prirodnim agregatom uobičajenim u praksi.

U betonu s recikliranom opekom se, pravilnim projektiranjem sastava mješavine betona, može postići bilo koji od zahtijevanih razreda konzistencije. Pri tome je potrebno uzeti u obzir apsorpciju agregata.

Udio prašinastih čestica je potrebno uzeti u obzir pri upotrebi reciklirane opeke jer može uzrokovati smanjenje obradivosti svježe betonske mješavine. Većim udjelom prašinastih čestica u recikliranoj opeci potrebna je dodatna količina vode kako bi se poboljšala obradivost, što rezultira manjom konačnom čvrstoćom betona. Ako je dopušteno smanjenje čvrstoće ograničeno na oko 5 %, udio prašinastih čestica također treba biti ograničeno: 5 % na ukupnu količinu agregata za malu obradivost betonske mješavine s krupnozrnim agregatom (> 4 mm), 10 % za malu obradivost betonske mješavine sa sitnim agregatom (0-4 mm) i na 20 % za veliku obradivost ako su upotrebljena samo sitna zrna agregata.

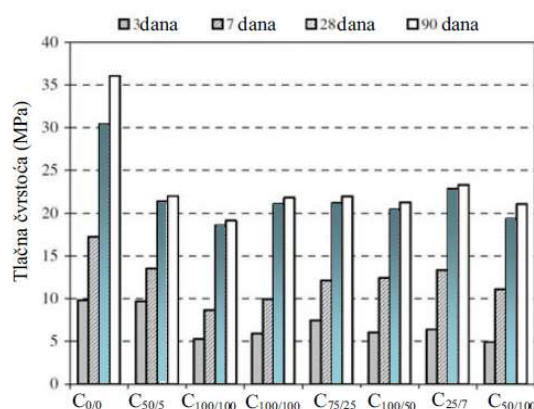
Na osnovu ispitivanja dobiveno je da je optimalni odnos krupnog i sitnog agregata približno isti kao i kod običnog betona. Drobljena opeka se prema standardu DIN 4163 dijeli u sljedeće frakcije: 0/3, 3/7, 7/15, 15/30 i preko 30 mm.

Gustoća betona s recikliranom opekom jest 8-17 % niža od gustoće betona s prirodnim agregatom. Povećanjem postotka zamjene prirodnog agregata s recikliranom opekom povećava se i udio zraka uvučenog u beton.

4.2. Svojstva betona s recikliranom opekom kao agregatom

4.2.1. Tlačna čvrstoća

Beton s recikliranom opekom ima relativno manju tlačnu čvrstoću od betona s prirodnim agregatom većinom zbog veće apsorpcije reciklirane opeke. Što je veći postotak zamjene prirodnog agregata s recikliranim, to je veće i smanjenje čvrstoće betona. Pri starosti od 28 dana, to je smanjenje 10 do 35% s krupnom opekom i 30 do 40% sa sitnom recikliranom opekom.



Slika 4.3: Tlačne čvrstoće betona [11]

Tablica 4.1: Tlačna čvrstoća betona s prirodnim agregatom i recikliranom opekom [11]

Oznaka	Tip agregata	v/c	PK* (%)	RK* (%)	PS* (%)	RS* (%)	Tlačna čvrstoća (N/mm ²)-slika 4.4.
C _{0/0}	vapnenac	0,61	100	0	100	0	
C _{0/25}	reciklirana opeka i vapnenac	0,69	100	0	75	25	
C _{0/50}		0,77	100	0	50	50	
C _{0/75}		0,85	100	0	25	75	
C _{0/100}		0,93	100	0	0	100	
C _{50/50}		0,75	50	50	50	50	
C _{100/100}	reciklirana opeka	0,89	0	100	0	100	
C _{100/100} *	reciklirana opeka	0,86	0	100	0	100	
C _{75/25}	rec. opeka i vapnenac	0,66	25	75	75	25	
C _{100/50}	rec. opeka i vapnenac	0,72	0	100	50	50	
C _{25/75}	rec. opeka i vapnenac	0,85	75	25	25	75	
C _{50/100}	rec. opeka i vapnenac	1,08	0	100	50	50	

*Postotak: udjela krupnog (K) i sitnog (S) agregata; PK-prirodni agregat-krupna frakcija; PS-prirodni agregat-sitna frakcija; RK-opeka-krupna frakcija; RS-opeka-sitna frakcija; *dodatak plastifikatora

Tlačna čvrstoća betona pri starosti od 28 dana kreće se unutar granica 20 do 40 N/mm².

Tlačna čvrstoća betona s recikliranom opekom će ovisiti o čvrstoći opeke upotrebjene za recikliranje pa tako opeke s većom početnom čvrstoćom mogu postići tlačne čvrstoće jednake onoj koju postiže beton s granitnim agregatom.

Također se recikliranom opekom može proizvesti i aerirani beton. Upotrebom čvršće opeke moguće je postići tlačnu čvrstoću jednaku tlačnoj čvrstoći aeriranog betona s granitnim agregatom.

Tablica 4.2: Rezultati ispitivanja betona s drobljenom opekom i s dodatkom aeranta[11]

Tip agregata		Gustoća betona (kg/m ³)	Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	Koeficijent varijacije (%)	Slijeganje (mm)	Vebe (s)	Udio zraka (%)
Drobljena puna opeka i granit*		2,125	52,5	2,5	10	9	5,8
Drobljena šuplja opeka i granit*		2,214	58,4	5,3	15	8	5,8
Drobljena šuplja opeka i granit*		2,225	61,3	1,1	15	8	5,6
Granit		2,482	60,0	4,1	12	11	5,1
*granit se dodaje kao zamjena za sitnu frakciju opeke							

4.2.2. Čvrstoća na savijanje

Savojna čvrstoća je opterećenje pri kojem materijal puca ili se trajno deformira. Oštri oblik drobljene opeke i njene hrapave površine su uglavnom povoljni za dobru vezu između agregata i cementne paste što doprinosi povećanju vlačne čvrstoće na savijanje. Unatoč tome, oko 8 do 15% je manja čvrstoća na savijanje kod betona s recikliranom opekom nego s prirodnim agregatom. Istraživanjem je uočeno da su tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje proporcionalne.

4.2.3. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti betona je funkcija modula elastičnosti agregata, cementne matrice i njihovih relativnih odnosa. Modul elastičnosti betona s drobljenom opekom je oko 30 do 40% manji nego kod klasičnog betona. Povećanjem postotka zamjene prirodnog agregata s recikliranom opekom modul elastičnosti se smanjuje. Do 50% je manji modul elastičnosti betona pripremljenog sa sitnim zrnima reciklirane opeke kao agregata te sa sitnim i krupnim zrnima, u odnosu na beton sa prirodnim agregatom.

Pošto upotrebom reciklirane opeke kao agregata dolazi do povećanja deformacija očvrslog betona (otprilike 30% stopostotnom zamjenom prirodnog agregata recikliranom opekam), u konstrukcijama gdje deformacije imaju važnu ulogu, manji modul elastičnosti treba uzeti u obzir kao bitan parametar pri njihovom projektiranju.

Tablica 4.3: Moduli elastičnosti betona s različitim udjelima reciklirane opeke i prirodnog agregata[11]

Oznaka mješavine (PA-RA-RO)	Udio agregata po frakcijama (%)									Modul elastičnosti (N/mm ²)
	Prirodni agregat (PA)			Reciklirani beton (RA)			Reciklirana opeka (RO)			
	0/4	4/8	8/16	0/4	4/8	8/16	0/4	4/8	8/16	
100-00-00	100	100	100	0	0	0	0	0	0	27700
75-25-00	100	75	75	0	25	25	0	0	0	29400
50-50-00	100	50	50	0	50	50	0	0	0	26100
25-75-00	100	25	25	0	75	75	0	0	0	26600
00-100-00	100	0	0	0	100	100	0	0	0	24400
75-00-25	100	75	75	0	0	0	0	25	25	26700
50-00-50	100	50	50	0	0	0	0	50	50	23900
25-00-75	100	25	25	0	0	0	0	75	75	21800
00-00-100	100	0	0	0	0	0	0	100	100	18000
00-75-25	100	0	0	0	75	75	0	25	25	23500
00-50-50	100	0	0	0	50	50	0	50	50	23300
00-25-75	100	0	0	0	25	25	0	75	75	21800

4.2.4. Skupljanje

Skupljanje je volumenska promjena kao rezultat sušenja materijala. Skupljanje betona s recikliranom opekam zbog sušenja je veće nego kod betona s prirodnim agregatom. To ovisi i o veličini zrna agregata s kojima se proizvodi beton. Primjerice, ako se koriste samo sitna zrna reciklirane opeke u pripremi betonske mješavine, skupljanje je u ranoj starosti skoro šest puta veće nego kod betona s prirodnim agregatom i jednakom se brzinom povećava sve do devedesetog dana. Korištenjem i sitnih i krupnih zrna reciklirane opeke, skupljanje se stabilizira u ranoj starosti i približno postaje jednako skupljanju običnog betona dok je pri kasnoj starosti veći nego kod običnog betona.

4.2.5. Apsorpcija vode

Prisutnost vode u betonu može uzrokovati oštećenja u betonu pri izlaganju betona ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja, isto tako i pojavi korozije armature i protok klorida i sulfata kroz beton. Kao što je već spomenuto, porastom udjela reciklirane opeke u ukupnom volumenu betonske mješavine znatno raste apsorpcija vode, a time i smanjena trajnost betona.

Pozitivan učinak na smanjenje apsorpcije ima upotreba plastifikatora ali i metode prethodnog vlaženja reciklirane opeke prije njezine upotrebe u betonu.

4.2.6. Otpornost na habanje

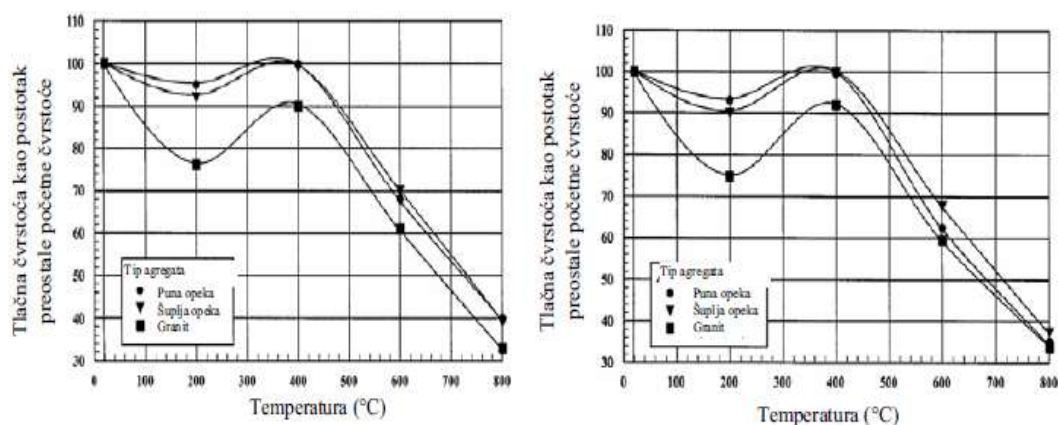
Habanje je jedan od načina mehaničkog trošenja betona i vrlo je važna pri procjeni trajnosti betona posebice na prometnim površinama, pješačkim stazama, aerodromskim pistama. Beton s recikliranom opekom pokazuje dobru otpornost na habanje zbog dobre prionjivosti cementne paste i reciklirane opeke uzrokovane njezinom većom poroznošću u usporedbi s vapnenačkim agregatom.

4.2.7. Toplinska provodljivost

Beton s recikliranom opekom ima manju toplinsku provodljivost od betona s prirodnim agregatom. Istraživanjem se pokazalo da iznosi od 0,5 W/mK do 0,75 W/mK. Udio cementa i polimera ima znatan utjecaj na njegovu toplinsku provodljivost. Smanjenjem udjela tih komponenata u ukupnom volumenu betona dolazi do smanjenja toplinske provodljivosti.

4.2.8. Otpornost na požar

Agregat nastao drobljenjem opeke toplinski je stabilan pa je i to razlog dobrog ponašanja kao agregata u betonu izloženom visokim temperaturama. Beton s takvom opekom se pokazao znatno otpornijim od betona s granitnim agregatom.



Slika 4.4: Redukcija tlačne čvrstoće betona pri izlaganju visokim temperaturama:

a) beton uobičajene početne čvrstoće (lijevo); b) beton velike početne čvrstoće (desno) [11]

Kako bi se osigurala dobra požarna otpornost betona s recikliranom opekom, preporučuje se njegovo zadržavanje u suhom stanju tijekom požara. Ukoliko je beton vlažan, dolazi do ljuštenja gornjih slojeva i raspadanja betona zbog unutarnjih tlakova tijekom požara.

Mala toplinska provodljivost takvog betona upućuje na njegovu požarnu otpornost. Tako je i armirani beton bolje zaštićen od ranog zagrijavanja u usporedbi s betonom s prirodnim agregatom. Beton s recikliranom opekom zadržava svoju konstrukcijsku cjelovitost pod djelovanjem požara nego klasičan beton.

4.2.9. Otpornost na mraz

Beton na bazi recikliranog agregata pokazuje slabiju otpornost prema djelovanju mraza. Poslije 25 ciklusa smrzavanja i otapanja beton na bazi reciklirane opeke upija dva puta više vode nego običan beton. Ako se ovakav beton koristi za vanjske zidove, mora biti zaštićen od natapanja. [5]

5. DOSADAŠNJA ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG I LAKOG BETONA

5.1. Utjecaj fine gline na ponašanje samozbijajućeg betona

(Zine Eddine Abib, Haifa Gather-Abib, Fattoum Kharchi) [13]

5.1.1. Uvod

Istraživanje stručnjaka s alžirskog sveučilišta bavi se pitanjem djelovanja fine gline na ponašanje samozbijajućeg betona. Cilj ovog istraživanja je, na osnovu eksperimentalnih provjera, analizirati utjecaj pečene gline na reološka i mehanička svojstva morta. Iz tog razloga potrebno je jasno definirati prirodne i fizičko-kemijske karakteristike finih minerala da bi se odredila njihova pucolanska aktivnost i proučiti utjecaj aditiva na reološke karakteristike morta.

Materijali korišteni u pokusima su: cement proizveden u Alžiru, tri frakcije agregata, otpadna drobljena opeka proizvedena u Alžiru, silicijska prašina, smrvljeno i prosijano vapno, te superplastifikator PNS. Kemijska analiza WCB-a (otpadne drobljene opeke) pokazuje da sadrži značajan postotak silicija i aluminija, što ga klasificira kao alumnosilikat (tablica 5.1).

Tablica 5.1: Kemijska analiza drobljene opeke (WCB) i silicijske prašine (SF)[13]

Chemical composition (%)	WCB	SF
SiO ₂	53.78	92.1
Al ₂ O ₃	16.61	0.25
Fe ₂ O ₃	6.22	0.79
CaO	12.88	-
MgO	2.20	-
K ₂ O	2.13	0.96
Na ₂ O	0.87	0.17
SO ₃	0.65	0.36
LOI	3.13	-

5.1.2. Eksperimentalni dio istraživanja

Za potrebe ispitivanja drobljena opeka reducirana je na veličinu od 80 µm, prah opeke dodan je u iznosu 5% - 15% težine cementa a v/c iznosi 0.4. Mort je stavljen u prizmatične kalupe dimenzija 40 x 40 x 160 i čuvan u standardnim uvjetima.

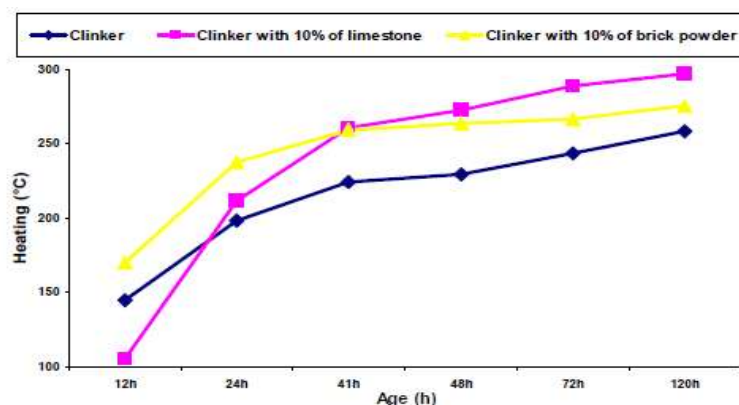
Kharat i Yuguri drže sadržaj krupnog agregata najvažnijim parametrom u optimizaciji SCC. Oni su otkrili da kapacitet ispune opada s povećanjem sadržaja krupnog agregata. Kako bi se odredio optimalan granulometrijski sastav agregata koji poboljšava svojstva SCC, znanstvenici su proučavali utjecaj odnosa pijesak (S)/pasta (P) i veličine zrna agregata (tablica 5.2).

Tablica 5.2: Komponente SCC-a[13]

Weight (kg)	Series A			Series B			Series C		
	(S/P = 0.8)			(S/P = 0.75)			(S/P = 0.67)		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Sand 0/3	794	794	794	794	794	794	794	794	794
G 3/8	483	363	242	483	363	242	483	363	242
G 8/16	242	362.5	483	242	363	483	242	363	283
Cement	500	500	500	500	500	500	550	550	550
Water	200	200	200	210	210	210	238	238	238
SP	15	15	15	15	15	15	15	15	15
WCB	/	/	/	25	25	25	44	44	44

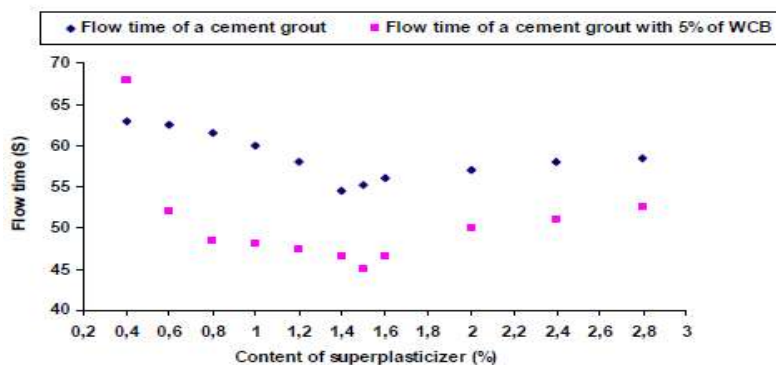
Pokazalo se da uzorci morta s 5 % WCB-a imaju bolju tlačnu i savojnu čvrstoću u odnosu na druge uzorke.

Sa slike 5.1 može se zaključiti da je dodatak praha opeke reducirao toplinu hidratacije u betonu u odnosu na dodatak vapnenca. Smanjenje od 7,2 % zabilježeno je nakon 120 sati.



Slika 5.1: Utjecaj WCB na razvoj topline hidratacije[13]

Vrijeme tečenja cementne paste opada s povećanjem udjela superplastifikatora do određene vrijednosti od koje vrijeme tečenja paste ostaje konstantno ili se neznatno povećava (slika 5.2). Ova točka međudjelovanja 2 linearna dijela zakrivljenosti naziva se točka zasićenja.



Slika 5.2: Vrijeme tečenja cementne paste s dodatkom 5 % WCB[13]

Prema tablici 5.3 kombinacija 1 (2/3 frakcije G 3/8 i 1/3 frakcije G 8/15) utječe na razvoj najboljih reoloških svojstava betona, u odnosu na ostale kombinacije krupnog agregata i S/P. Uočeno je da redukcija volumena krupnog agregata, značajno pridonosi poboljšanju obradivosti betona.

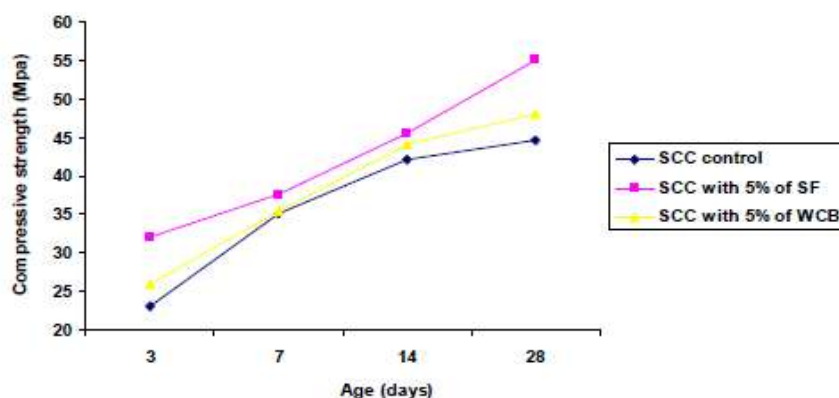
Tablica 5.3: Utjecaj sadržaja krupnog agregata i S/P na reološke karakteristike betona[13]

	Series A			Series B			Series C		
	(S/P = 0.8)			(S/P = 0.75)			(S/P = 0.67)		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Flow (mm)	720	700	680	725	715	710	780	775	725
f_{ct} (MPa)	34	31	27	36	29	38	22	36	37
Segregation ration (%) (Stability on sieve)	23	22	24	7.3	7	9.2	2.5	3	3.5

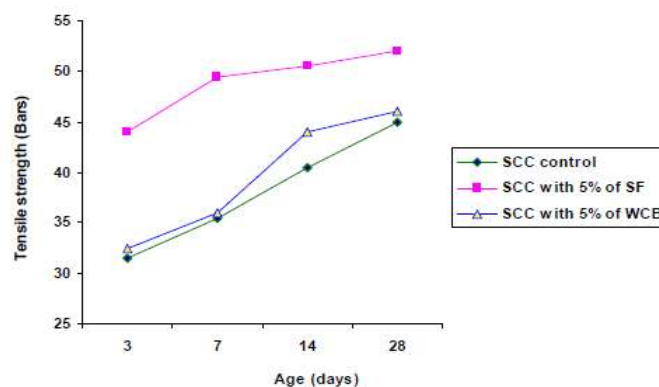
Promjena vrijednosti S/P s 0,75 na 0,67 poboljšava tečenje SCC. Smanjenje sadržaja krupnog agregata popraćeno je povećanjem volumena morta i paste te samim time povećanjem cementa. Povećanje količine cementa dovodi do rasta temperature betona. Kako bi se izbjegao rast temperature betona, potrebno je mješavini dodati određenu količinu drobljene opeke i tako smanjiti količinu cementa u betonu.

Samozbijajući beton kod kojeg je S/P=0,67, stabilniji je i otporniji prema segregaciji (tablica 5.3). SCC kod kojeg je S/P=0,8 razvio je kritičnu stabilnost te je vidljiva velika segregacija krupnog agregata. Uzrok ovakve segregacije je smanjen volumen paste u odnosu na volumen pijeska.

Rezultati mehaničkih ispitivanja (tlačna i vlačna čvrstoća) na SCC prikazani su na slici 5.3 i 5.4. Ispitivanje je pokazalo da je su vlačna i tlačna čvrstoća SCC s dodatkom WCB približno jednake čvrstoći kontrolnog SCC (bez dodatka). Ali SCC s dodatkom silicijske prašine ima bolja svojstva nego ostala dva uzorka SCC.



Slika 5.3: Razvoj tlačne čvrstoće SCC[13]



Slika 5.4: Razvoj vlačne čvrstoće SCC[13]

5.2. Proučavanje svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom praha opeke i praha mramora

(Er. Singh, Er. Rohin Kaushik, Er. Gurniwaz Singh) [14]

5.2.1. Uvod

Upotreba materijala kao što su prah opeke, mramorni prah i VMA utjecala je na znatno poboljšanje svojstava samozbijajućeg betona (prvenstveno na fluidnost). U ovom eksperimentalnom istraživanju znanstvenici su zamijenili fini agregat s prahom opeke i mramornim prahom.

Cement korišten u eksperimentu specifične je težine s početnim i konačnim vremenom ugradnje 125 min i 215 min.

5.2.2. Eksperimentalni dio

Svrha istraživanja je proučiti ponašanje SCC u čiju mješavinu su dodani prah opeke i mramorni prah.

Provedena su sljedeća ispitivanja:

- Ispitivanje tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana na uzorcima s dodatkom praha opeke i mramornog praha
- Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa nakon 7 i 28 dana

Sve mješavine betona s dodatkom praha opeke i mramornog praha zadovoljile su kriterije svježeg i očvrslog SCC. Dobra čvrstoća postignuta je dodatkom 25 % mramornog praha (ova mjera uzima se kao optimalna za razvoj visoke tlačne čvrstoće betona). Prah opeke i mramorni prah koriste se i kako bi se postiglo zadovoljavajuće vrijeme ugradnje samozbijajućeg betona. Istraživanje je pokazalo da su otpadni materijali, kao što su prah opeke i mramorni prah, korisni dodaci u proizvodnji isplativog samozbijajućeg betona.

5.3. Utjecaj polipropilenskih vlakana na razvoj svježih i očvrslih svojstava recikliranog samozbijajućeg betona

(Mounir M. Kamal, Mohamed A. Safan, Zeinab A. Etman,

Mahmoud A. Abd-elbaki) [15]

5.3.1. Uvod

Da bi se postigao cilj istraživanja pripremljena je 31 mješavina. Korištene su drobljena crvena opeka i keramika kao krupni agregat. Različiti postotci recikliranog materijala upotrijebljeni su kao zamjena za krupni agregat. Čelik i polipropilenska vlakna su korištena za poboljšanje svojstava recikliranog samozbijajućeg betona (RSCC). Testirane su ukupno 234 kocke kako bi se utvrdila tlačna čvrstoća i gustoća mješavina nakon 7 i 28 dana. Vlačna čvrstoća je testirana na uzorcima oblika valjka, a savojna čvrstoća na prizmama.

Materijali:

- Silikatna prašina
- Krupni agregat od drobljenog dolomita
- Drobljena crvena opeka
- voda/prah
- Lokalno proizveden Portland cement
- Uvozna klasa letećeg pepela

5.3.2. Eksperimentalni dio

Krupni agregat, sitni agregat, cement i vlakna miješaju se najmanje 1 minutu suhim postupkom, zatim se dodaje voda i ostali aditivi.

RSCC je napravljen od recikliranog agregata s maksimalnom veličinom zrna 10 mm (crvena cigla i keramika). Čelik i polipropilenska vlakna se koriste za poboljšanje svojstava RSCC. Svojstva RSCC određena su različitim postupcima koja su uključivala ispitivanje slijeganjem, test V-lijevka i test J-prstena. Tablica 5.4 prikazuje količinu materijala RSCC.

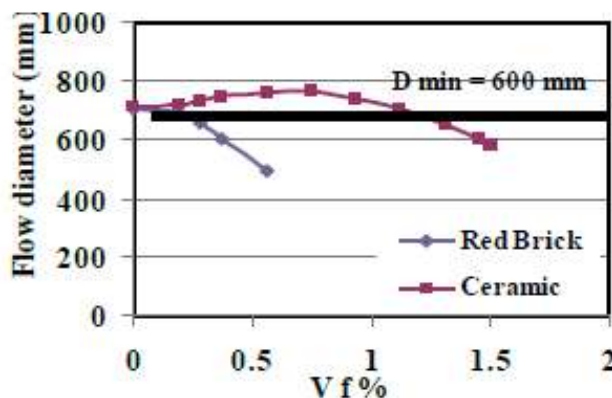
Tablica 5.4: Količina materijala RSCC[15]

Mix code	Cement	W/C	Sand	Dolomite	Recycled aggregate	Fly ash	BVF1
Control mix (L)				649	0		
C25 %				487	162		
C50 %		0,55	974	324,5	324,5		
C75 %				162	487		
C100 %	400			0	649	40	11
R25 %				503	167		
R50 %				335	335		
R75 %				167	503		
R100 %				0	670		

Nakon testiranja u svježem stanju uzorci betona se drže u kalupima 24 sata. Nakon 24 sata uklanjaju se iz kalupa i potapaju u vodu na 20°C do testiranja betona u očvrslom stanju.

Da bi se poboljšala svojstva samozbijajućeg betona s recikliranim agregatom, u mješavinu su dodana i polipropilenska vlakna. Za potrebe testiranja napravljeno je 14 mješavina s 25 % recikliranog agregata.

Na slici 5.5 vidljivo je smanjenje rasprostiranja mješavine kako se povećava volumen polipropilenskih vlakana. Kod mješavina s dodatkom drobljene opeke također dolazi do smanjenja rasprostiranja uslijed povećanja polipropilenskih vlakana.



Slika 5.5: Utjecaj polipropilenskih vlakana (%) na rasprostiranje[15]

Mješavine s 0,19% polipropilenskih vlakana pokazale su najoptimalnije rezultate (rasprostiranje iznosi 490 - 695 mm). Kod samozbijajućeg betona s dodatkom drobljene keramike i polipropilenskih vlakana zabilježeno je veće rasprostiranje nego kod samozbijajućeg betona s drobljenom opekam i polipropilenskim vlaknima.

5.3.3. Zaključak

Mješavine betona s dodatkom drobljene keramike i više od 1,46 % polipropilenskih vlakana nemaju sposobnost tečenja i zaobilazanja prepreka, dok se mješavine s manjim postotkom vlakana ponašaju kao samozbijajući beton (optimalan sadržaj vlakana 0,75%).

Mješavine betona s dodatkom drobljene crvene opeke i više od 0,37 % polipropilenskih vlakana nemaju sposobnost tečenja i zaobilazanja prepreka, dok se mješavine s manjim postotkom vlakana ponašaju kao samozbijajući beton (optimalan sadržaj vlakana 0,19%). Ako se uspoređi beton s dodatkom drobljene crvene opeke i drobljene keramike, bolja svojstva pokazuje beton s dodatkom drobljene keramike.

5.4. Ocjenjivanje svojstava svježeg samozbijajućeg betona koristeći reciklirane agregate

(Kamal M. M., Safan M. A., Etman Z. A., Eldaboly E. A.) [16]

5.4.1. Uvod

Cilj ovog rada je tijekom vremena ispitati svojstva svježeg samozbijajućeg betona koji sadrži reciklirane agregate (RSCC). Reciklirani agregati su smrvljena crvena opeka i smrvljena keramika. Reciklirani materijali su korišteni kao zamjena krupnom agregatu dolomitu. Testirano je 9 mješavina.

Korišteni materijali su:

- Silikatni pijesak specifične težine , apsorpcije i finoće modula
- Dolomit kao krupni agregat
- Drobljena crvena opeka kao krupni agregat
- Drobljena keramika kao krupni agregat
- Leteći pepeo specifične težine
- lokalno proizvedeni Portland cementa
- Vodocementni faktor vrijednosti 0,5 – 0,55

5.4.2. Eksperimentalni dio

Postupak miješanja sastojao se od 60 sekundi miješanja cementa, krupnog agregata i sitnog agregata. Zatim je dodana voda, leteći pepeo, HRWR. Nakon završetka miješanja, odredila su se svojstva tečenja te su uzorci stavljeni na 24 sata u čelične kalupe. Nakon 24 sata izvađeni su iz kalupa i uronjeni u vodu na 20 °C gdje su čuvani do dana ispitivanja.

Mješavine betona s dodatkom drobljene keramike pokazale su bolja dugoročna svojstva u svježem stanju nego mješavine s dodatkom drobljene opeke. Kako je vrijeme prolazilo, mješavine s dodatkom keramike ispunile su zahtjeve samozbijajućeg betona za razliku od mješavina s dodatkom opeke koje su pokazale nešto slabija svojstva kako je vrijeme prolazilo.

Tlačna čvrstoća uzoraka pripremljenih nakon stajanja betona u svježem stanju neznatno je veća nego kod uzoraka pripremljenih odmah nakon miješanja. Koeficijent varijacije svih mješavina iznosio je manje od 10 %.

5.5. Utjecaj pripreme mješavina na čvrstoću i obradivost samozbijajućeg laganog betona visokih čvrstoća

(Sharef Farrag, Sherif Yehia) [17]

5.5.1. Uvod

Lagani beton je postao zamjena za beton normalne težine, poboljšanjem trajnosti betona kao i smanjenjem mrtvog tereta. Mnoga su istraživanja dokazala superiornost laganog betona u odnosu na cikluse zamrzavanje i odmrzavanje nad betonima normalne težine, također i malim smanjenjem čvrstoće betona i većim otporima deformacijama.

Povećava i otpornost prodora klorida kroz beton zbog svoje strukture koja zaustavlja ione klorida u svojim porama.

Lagani agregati (LWA) se uglavnom svrstavaju u prirodne agregate kao što su plavac i troska, i umjetno dobivene agregate kao što su leteći pepeo i lagana ekspandirana glina.

Fizikalna svojstva laganog agregata igraju važnu ulogu u proizvodnji laganih betona. Takva svojstva uključuju specifičnu težinu, poroznost, i oblik agregata. Ovi faktori zahtijevaju posebnu pripremu agregata kao što je prosijavanje i vlaženje, koji mogu nepovoljno utjecati na konačni proizvod.

Štoviše, visoka apsorpcija laganog agregata može izazvati promjenu efektivne vode za miješanje, stoga i promjenu u vodovezivnom omjeru (w/b). Mnoga istraživanja su usmjerena na procjenu svojstava laganog agregata za potrebe poboljšanja mehaničkih svojstava i trajnosti laganog betona.

Istraživanja su se provodila kako bi se ispitao utjecaj miješanja betona na mjestu ugradnje i miješanja betona u laboratoriju na svojstva konačnog laganog betona. Pokazalo se da razlike u procesu miješanja i rukovanja agregatom su imale mali utjecaj na mehanička svojstva i jediničnu težinu općenito. Čak je došlo do značajnog povećanja prodora kloridnih iona.

Zahtjevima da beton bude lagan, stabilan i što tečniji se posvećuje posebna pozornost u fazi pripreme, počevši od procjene potrebne količine i izbora agregata te sastava mješavina.

Stoga su se ovim radom uspoređivala svojstva mješavina pripremljenih u laboratoriju i mješavina pripremljenih na mjestu ugradnje, služeći se iskustvom prethodno ispitanih mješavina laganog betona i opaženim utjecajima na čvrstoću, trajnosti i prodor klorida.

U betonari se miješalo 2 m³ laganog betona i dostavilo na mjesto ugradnje. Cilj je bio proizvesti samozbijajuću laganu betonsku mješavinu visokih čvrstoća.

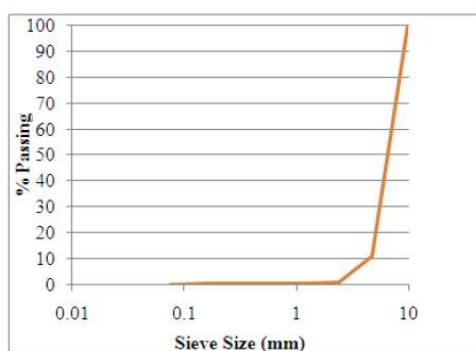
Eksperimentalno istraživanje je provedeno u dvije faze:

- 1) laboratorijsko miješanje (mješavina 1)
- 2) primjena na terenu (mješavina 2)

5.5.2. Materijal i sastav mješavina

Materijal korišten za potrebe ispitivanja:

- krupni lagani agregat LYTAG od letećeg pepela specifične težine 1.35 i gustoće 790 kg/m³; apsorpcije od 15.7% u 30 minuta i 30.1% u 24 sata. Prolaz agregata veličine zrna 4-8mm je prikazan na slici 5.6.



Slika 5.6: a) granulometrijski sastav završnog agregata (lijevo); b) prikaz laganog agregata od letećeg pepela (desno) [17]

- Sitni lagani agregat je isključen iz svih mješavina
- Cement tipa I specifične težine 3.15 korišten i u laboratoriju i na terenu
- Silika specifične težine 2.2
- Dodatak GLENUM SKY 504 kako bi se popravila obradivost

Tablica 5.5: *Sastavi mješavina[17]*

Ingredients (kg/m ³)	Mix#1 (Stage I)	Mix#2 (Stage II)
w/b	0.45	0.49
LWA (LYTAG)	515 (0.36)*	450 (0.34)
Dune Sand	316 (0.12)	440 (0.17)
Washed Sand	0	300 (0.12)
Crushed Sand	353 (0.13)	0
Cement	405 (0.12)	450 (0.14)
Silica Fume	105 (0.05)	0
Water	230 (0.22)	220 (0.22)
Admixture	5 (0.005)	12 (0.012)
Bulk Density	1929	1872

5.5.3. Priprema mješavina

Radile su se četiri ploče dimenzija 1.2m x 1.2m x 0.2m, s tim da su dvije bile jednostruko armirane, s druge dvije dvostruko armirane. Mješavine su se pripremle kako bi se ispitala mehanička svojstva betona (tlačnu, vlačnu, savojnu čvrstoću i modul elastičnosti) i brzina prodora klorida.

1. faza (u laboratoriju): mješavina laganog betona je bazirana na samozbijajuću betonsku mješavinu normalne težine koja je tijekom godina pokazala odgovarajuću konzistenciju i mogućnost ponavljanja. Sitni agregat normalne težine koji se koristio u ovoj fazi je drobljeni sitni agregat (specifične težine 2.58, maksimalne veličine zrna 4.75mm) i pijesak (specifične težine 2.56, maksimalne veličine zrna 0.6mm).

Rezultati prosijavanja kombinacije krupnog laganog agregata sa sitnim agregatom normalne težine prema ASTM C 330M-2009 su prikazani u tablici 5.6.

Tablica 5.6: *Rezultati prosijavanja krupnog laganog i sitnog prirodnog agregata[17]*

Grading requirement	ASTM C 330M-2009 Limits (Combined coarse and fine aggregate, 9.5-0 mm)								
	Combined with fine 100% (%Passing)								
	-	100	100-90	90-65	65-35	-	25-10	15-5	10-0
LYTAG	100	100 (Y)*	100 (Y)	59.7 (N)	56.1 (N)	47.9	33.1 (N)	12.5 (Y)	1.4 (Y)

*() Meets requirement (Y), does not meet requirement (N)

Lagani beton ne bi postigao željena svojstva kad ne bi bio prethodno mokar ili prethodno namočen za prevladavanje količine apsorpcije. Agregat se prethodno moči dodavanjem vode koja je jednaka 15% težine laganog agregata.

2. faza (na terenu): Došlo je do promjene u sadržaju sitnog agregata zbog nedostupnosti zahtjevano količine na betonari. Sitni agregat normalne težine koji se koristio u ovoj

fazi je isprani morski pijesak kao što je prikazano u tablici 5.5. Ima specifičnu težinu 2.58, dok pijesak 1.faze ima specifičnu težinu 2,56. Smatralo se da lagani beton nije bio prethodno namočen tijekom skladištenja jer postrojenje nije bilo opremljeno posebnim prskalicama. Stoga je voda, potrebna za prethodno vlaženje dodana tijekom miješanja. Količina dodane vode je bila jednaka 5% težine laganog agregata, kako bi osigurala dovoljna količina vode za apsorpciju agregata izbjegavajući veću promjenu količine vode za miješanje. Osim toga, 61 kg leda je dodano mješavini od 2 m³ kako bi se smanjila temperatura betona na radnoj temperaturi od 35 °C. Kamion je stigao do vanjskog postrojenja 1 sat nakon miješanja.

Tablica 5.7 prikazuje promjene koje su nastupile od proizvodnje u laboratoriju do izvedbe na terenu.

Tablica 5.7: Sažetak promjena u fazama projekta[17]

Parameter	Stage I	Stage II
Fine Aggregates Used	Crushed sand + Dune Sand	Washed Beach Sand + Dune Sand
Ice Addition	No Addition	30.5 kg/m ³
Pre-wetting Method	15% of aggregate weight added as water to the aggregates 30 minutes prior to mixing	5% of aggregate weight was added as water to the mixer

5.5.4. Analiza eksperimentalnog dijela

5.5.4.1. Mješavina 1: Sposobnost tečenja i jedinična težina

Mješavina je postigla razastiranje od 500mm u manje od 40 sekundi, u skladu sa zahtjevima samozbijajućeg betona, kako je prikazano na slici 5.7. Nije vidljiva segregacija mješavine.

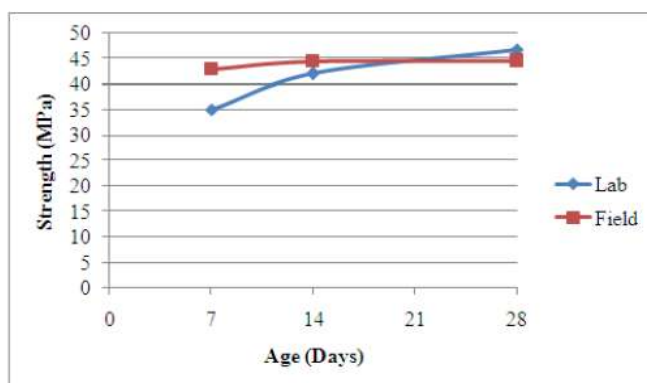
Jedinična težina je bila u rasponu od 1900-1920 kg/m³, u skladu s ASTM 567 / 2011. 567M-2011.



Slika 5.7: Mješavina 1; rasprostiranje slijeganjem[17]

5.5.4.2. Mješavina 1: Mehanička svojstva

Slika 5.8 prikazuje razvoj čvrstoće mješavine. Tlačna čvrstoća je dosegla 46.1 MPa u 28 dana i time zadovoljila zahtjeve laganog betona visokih čvrstoća.



Slika 5.8: Razvoj čvrstoća mješavina 1 i 2[17]

Uočen je nepravilan lom betonskog uzorka koji je prikazan na slici 5.9.



Slika 5.9: Mješavina 1; vertikalni lom[17]

Pojava vertikalnih pukotina prikazuje dobru povezanost agregata i cementne paste. Modul elastičnosti je 23,6 GPa, a savojna čvrstoća je 2,1 MPa ispitivana pomoću tri točke opterećenja. Smatra se niskom savojnom čvrstoćom kada se uspoređuje s dovoljno niskim granicama ACI-318 jednadžbe nosivosti za pješčani lagani beton ($0.62\lambda\sqrt{f_c'}$) koji je 3,6 MPa. Općenito, nosivost betona normalnih težina mora biti u skladu s ACI jednadžbom.

5.5.4.3. Mješavina2: Sposobnost tečenja i jedinična težina

Mješavina koja se ugradila na terenu je prikazana na slici 5.10.



Slika 5.10: a) izlivanje betona na mjestu ugradnje (lijevo); b) rasprostiranje slijeganjem-ispitivanje na terenu (desno)[17]

Iako je mješavina ostvarila veliko razastiranje (700mm u 30 sekundi), kao što je prikazano na slici 5.10, vidljiva je segregacija upravo nakupinom agregata na površini. Glavni razlog segregacije je mala viskoznost mješavine koja se može pripisati zamjenom usitnjenog sa ispranim morskim pijeskom. Usitnjeni pijesak može biti korišten kao punilo te održava viskoznost mješavine koja je od ključnog značenja za samozbijajuće betonske mješavine. Dok isprani morski pijesak, koji je finiji od usitnjenog, ima manje trenje pa dovodi do povećane protočnosti mješavine zbog smanjenja viskoznosti. Isto tako, zamjena prethodnog močenja dodavanjem vode u mješavinu može imati utjecaj na efektivnu količinu vode za miješanje. Jedinična težina je približno 1800 kg/m^3 .

5.5.4.4. Mješavina 2: Mehanička svojstva

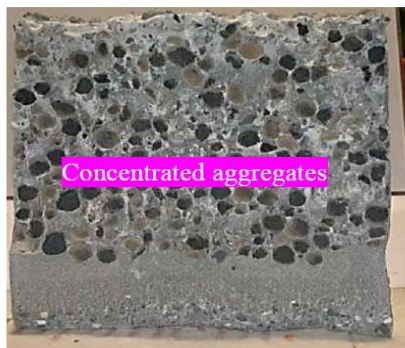
Razvoj čvrstoće je prikazan na slici 5.8. Vidljivo je da je sličan razvoj čvrstoća kao i kod mješavine 1 osim što je veća početna čvrstoća na kojem je mješavina 2 izložena strmijem rastu čvrstoća. Iako se pojavila segregacija, nije utjecala na čvrstoću s obzirom da su slične 28-dnevne čvrstoće: 46.8 MPa mješavine 1 i 44.6 Mpa mješavine 2.

Prema slici 5.11, došlo je do posmika uzorka mješavine 2. To je uzrokovano smanjenom povezanosti agregata i paste upravo zbog segregacije.



Slika 5.11: Mješavina 2; vertikalni lom i smicanje[17]

Modul elastičnosti je 17.2 GPa. Očekuje se da može podnijeti veće deformacije nego mješavina 1, koja dovodi u pitanje slične pojave kao što su puzanje i toplinsko širenje u konstruktivnim elementima. Ipak, vrijednosti elastičnosti obaju mješavina su u dozvoljenom rasponu modula elastičnosti za lagani beton. Mješavina 2 je postigla otpornost na savijanje od 1,6 MPa što ukazuje na malu otpornost na vlak. Takva otpornost se pripisuje slaboj vlačnoj čvrstoći na vlak agregata u obje mješavine, s naglašenim učinkom segregacije na savojnu čvrstoću mješavine 2 kao što je prikazano na slici 5.12.



Slika 5.12: primjer segregacije po betonskom presjeku[17]

5.5.5. Zaključak

U ovom radu je ispitano područje primjene laganih samozbijajućih betona te utjecaj pripreme mješavina na čvrstoću i trajnost. Cilj istraživanja je bio povezati razlike između laboratorijske pripreme i one na terenu te pružiti procjenu za masovnu proizvodnju laganog betona.

Uspoređivali su se rezultati i došlo se do slijedećih zaključaka:

- Obje su mješavine (laboratorijske i terenske) imale sličnu tlačnu čvrstoću (46,8 MPa i 44,6 MPa). Rezultati su pokazali da mješavina na terenu je visokog stupnja propusnosti prema ASTM C- 1202, što ukazuje na mogućnost propadanja betona.
- Razlike u načinu miješanja i postupcima pripreme mogu utjecati uvelike na svojstva svježeg i očvrslog betona. To može iskriviti laboratorijske optimizirane rezultate i odvratiti od primjene laganog betona.
- Iako su konstrukcijski elementi projektirani sličnom tlačnom čvrstoćom i sličnim konstruktivnim detaljima (armaturom, razmacima...), ono može različito rezultirati zbog razlike u trajnosti izvedbe i mikrostrukturnim svojstvima.
- Količina vode za miješanje mora biti pažljivo kontrolirana. Sadržaj vode se treba korigirati (w/b omjer) kako se ne bi pretjerano povećao ili uzrokovao segregaciju.

5.6. Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrslog samozbijajućeg laganog betona (SCLC)

(Sandra Juradin, Katarina Grbeša) [18]

5.6.1. Uvod

Samozbijajući lagani beton (SCLC) je kombinacija samozbijajućeg betona(SCC) i laganog betona. SCLC je pogodan za izgradnju građevina koje ne zahtijevaju visoke tlačne čvrstoće betona, ali zahtijevaju male težine. Korištenjem ekspandirajućeg glinenog agregata moguće je postići zadovoljavajuće čvrstoće. U posljednje vrijeme je sve veća pozornost usmjerena na okoliš i održiv razvoj pa se beton počeo izrađivati od različitih recikliranih materijala.

Cilj eksperimentalnog istraživanja je bio utvrditi utjecaj mljevene opeke kao filera ili kao agregata na obradivost i tlačnu čvrstoću samozbijajućeg laganog betona.

5.6.2. Materijal i sastav SCLC mješavina

U pripravljanju pokusnih mješavina upotrebljeni su sljedeći materijali:

- Cement CEM I 42,5 R
- Liapor lagani agregat frakcija 0-2 mm i 4-8 mm
- Superplastifikator FTF
- Silikatna prašina
- Metakaolin
- Mljevena opeka
- Filer od recikliranog betona
- Filer od kamenog brašna

Za potrebe istraživanja utjecaja mljevene opeke na SCLC, izradilo se 5 različitih mješavina SCLC-a.

Cement (3.14 kg/dm^3) i superplastifikator (1.06 kg/dm^3) su korišteni u svim mješavinama. Betonske mješavine su sadržavale dvije frakcije ekspandiranog glinenog agregata: sitni lagani agregat 0-2mm i krupni lagani agregat 4-8mm. Mljevena opeka je podijeljena u dvije frakcije: kao filer ($<0.125 \text{ mm}$) i kao agregat ($0.125 - 0.5\text{mm}$).

Omjeri i oznake mješavina pripremljenih u ovom radu su dane u tablici 5.8.

Tablica 5.8: Sastav i oznake mješavina[18]

Mješavina	cement	voda	Mljevena opeka		Filer2	Filer3	silica	PCE	agregat	
			<0.125mm	>0.125mm					0-2	4-8
	kg	kg	Kg	kg	kg		kg		kg	kg
SCLC1	400	200	65	-	-	-		4,8	498,2	513,3
SCLC2	400	200	32	-	-	43,5		4,8	498,6	513,7
SCLC3	400	200	32	-	-	-	37	4,8	498,6	513,7
SCLC4	400	200	-	173,3	-	156		4,8	334,2	491,9
SCLC5	400	200	-	173,6	142	-		4,8	334,2	491,7

Karakteristike dodataka su dane u tablici 5.9:

Tablica 5.9: Vrsta i oznake dodataka[18]

Dodatak	Type of admixture	Specifična površina po Blaine-u (cm^2/g)	Specifična težina (g/cm^3)
Filer1	Mljevena opeka	4992	2.4
Filer2	Reciklirani beton	7891	2.45
Filer3	Kameno brašno	-	2.7
Silica	Silica fume	> 15000	2.3

Sastav svake mješavine je određen u skladu s CBI metodom. Minimalni potrebni volumen paste za sve mješavine je određen u skladu s kriterijima sadržaja šupljina i blokiranja korištenjem krivulje za agregat.

5.6.3. Analiza eksperimentalnog dijela

5.6.3.1. Svježi beton-obradivost betona

Obradivost SCLC je ispitana na svježem betonu metodom rasprostiranja-slijeganjem, vizualnom provjerom stabilnosti, T_{500} vrijeme te V- lijevak, L kutija i J - prsten metodom. Na temelju rezultata ispitivanja, betonske mješavine mogu postići različite oznake konzistencije po klasama Europskog udruženja EFNARC (tablica 5.10).

Tablica 5.10: Rezultati ispitivanja i klasifikacije prema EFNARC klasama[18]

Mješavina	Rasprostiranje slijeganjem (mm)		T500 (s)		V-lijevak (s)		PL		PJ	
	rezultati	razred	rezultati	razred	rezultati	razred	rezultati	razred	rezultati	razred
SCLC1	762.5	SF3	1.16	VS1	6.96	VF1	0.95	PL2	15	-
SCLC2	757.5	SF3	1.87	VS1	8.97	VF2	0.96	PL2	23.75	-
SCLC3	655	SF2	2.47	VS2	7.31	VF1	0.83	PL2	31.75	-
SCLC4	572.5	SF1	2.17	VS2	10.31	VF2	0.46	-	46.75	-
SCLC5	700	SF2	1.00	VS1	7.00	VF1	0.73	-	36.25	-



Slika 5.13: Rasprostiranje slijeganjem: a) Mješavina SCLC2- segregacija i odvajanje vode (slika lijevo); b) Mješavina SCLC3- stabilna mješavina ali ljepljiva (slika desno)[18]

Prema tablici 5.10, samo su SCLC1 i SCLC2 (slika 5.13.a) postigle klasu SF3 ali vizualnom provjerom su se uočile segregacija i odvajanje vode na rubovima na tim mješavinama. Ostale mješavine su stabilne, ali ljepljive (slika 5.13.b). Mješavina SCLC5 je imala zadovoljavajuće T_{500} vrijeme, ali nakon dobrog početnog toka došlo je do naglog zaustavljanja. Postoji mogućnost da se pojavila tiksotropija.



Slika 5.14: J-prsten: a) Mješavina SCLC1- odvajanje vode na rubovima (slika lijevo); b) Mješavina SCLC5- ljepljiva mješavina (slika desno)[18]

Prema tablici 5.10, samo 3 mješavine zadovoljavaju kriterije L-kutije, a niti jedna mješavina nije zadovoljila norme EFNARC klasifikacije za J-prsten.

SCLC1 (slika 5.14.a) i SCLC2, mješavine su rezultirale odvajanjem vode na rubovima u ovim ispitivanjima isto kao i kod metode rasprostiranja-slijeganjem.



Fig. 5 L-box: SCLC1 - bleeding



Fig. 6 L-box: SCLC 4 - sticky mixture

Slika 5.15: L-kutija: a) Mješavina SCLC1- odvajanje vode (slika lijevo); b) Mješavina SCLC4- ljepljiva mješavina (slika desno)[18]

Mješavine SCLC3, SCLC4 (slika 5.15.b) i SCLC5 (slika 5.15.a) nisu imale sposobnost da ispune kalup i zaobiđu prepreke pod utjecajem vlastite težine. Korištenjem aditiva poput HRWR (superplastifikator) i tekućeg modifikatora viskoznosti (VMA), trebalo bi doći do značajnog smanjenja granice tečenja i povećanja protoka.

Analizom sastava mješavina samozbijajućeg laganog betona pokazalo se da je volumen paste izvan preporučenih EFNARC raspona. U promatranim mješavinama, volumen paste je preko 42%, što je znatno veći od preporučenog raspona od 30 do 38. Odabrani minimalni zahtjevani volumen paste je bio previsok za samozbijajući lagani beton. Smanjena količina paste bi se trebala dobiti po CBI metodi ali s obzirom na prirodnu krivulju agregata.

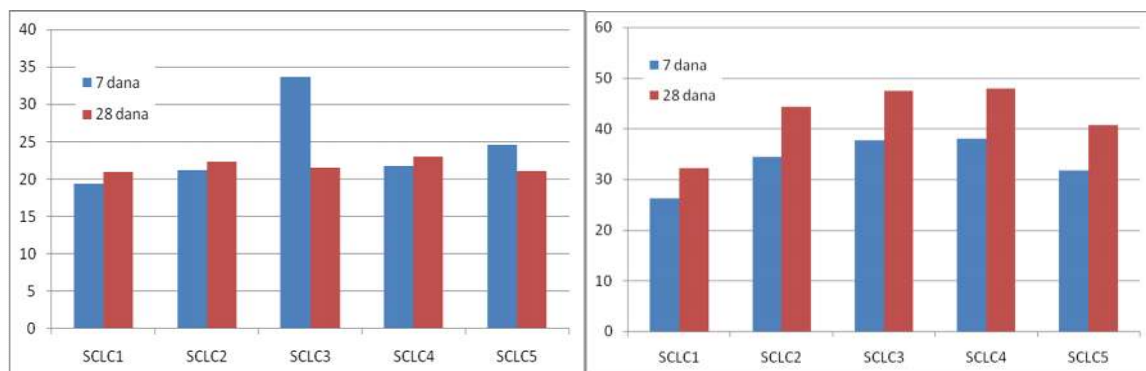
5.6.3.2. Očvršli beton- tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti

Rezultati dinamičkog modula elastičnosti su prikazani na slici 5.16 (lijevo). Prema slici 5.16 najveće su razlike u rezultatima SCLC3 nakon 7 i 28 dana starosti uzoraka. To se može objasniti pogreškom mjerenja. Vrijednosti modula elastičnosti u razdoblju od 28 dana se izjednačio: 21-23 GPa.

Tlačna čvrstoća je određena nakon 7 i 28 dana. Dobiveni rezultati su prikazani na slici 5.16 (desno). Najveća tlačna čvrstoća je postignuta mješavinama SCLC4 i SCLC3. Kod SCLC4 mljevena opeka je zamijenila dio sitnog agregata, a kod mješavine SCLC3 mljevena opeka je bila filer. Mješavina SCLC1 je također imala mljevenu opeka kao punilo, ali znatno manju čvrstoću.

SCLC1 je imala najveću količinu ovog punila dok su druge dvije mješavine (SCLC2 i SCLC3) imale manje.

Prema slici 5.16, uzorci s kombinacijom dvaju punila su rezultirale većim čvrstoćama.



Slika 5.16: Dinamički modul elastičnosti (slika lijevo) i tlačne čvrstoće (slika desno) uzoraka različitih starosti[18]

5.6.4. Zaključak

Iz ovih rezultata se može zaključiti sljedeće:

- Mješavine imaju znatno veći volumen paste od preporučenog EFNARC raspona. Minimalni volumen potrebne paste za mješavine s laganim agregatom se treba odrediti prema kriteriju sadržaja šupljina i kriteriju blokiranja, ali koristeći krivulju za prirodni agregat.
- Mješavina s dodatkom mljevene opeke i silike su pokazala najbolja svojstva; nema segregacije i nema odvajanja vode, ali je mješavina spora. Trebali bi se dodati VMA (modifikator viskoznosti) i HRWR (reduktor vode-superplastifikator) radi smanjenja granice tečenja i povećanja protoka.
- Korištenje mljevene opeke kao punila, u kombinaciji s drugim punilima, rezultiraju većim tlačnim čvrstoćama.
- Mljevena opeka kao punilo bi trebala imati sitnije čestice, manje od 0,04 mm.

6. EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SVOJSTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

6.1. Uvod u eksperimentalni dio rada

Glavna uloga samozbijajućeg betona je da ima visoku sposobnost tečenja, dobru sposobnost zaobilaženja prepreka, dobru sposobnost punjenja te visoku segregacijsku stabilnost.

Zbog kombinacije detaljnih zahtjeva, složenijeg projektiranja sastava betonske mješavine te niske granice tečenja i viskoznosti, samozbijajući beton je osjetljiviji na promjene negoli obični beton. Upotrebom superplastifikatora na bazi polikarboksilnih etera i povećanjem udjela sitnih čestica, postižu se svojstva samozbijanja.

U prethodnim ispitivanjima u Laboratoriju za građevinske materijale ispitivan je utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrsllog samozbijajućeg laganog betona, a dobiveni rezultati prikazani su u prethodnom poglavlju 5.6. Kako je jedan od zaključaka tog ispitivanja bio da bi mljevena opeka kao punilo trebala imati manje čestice, manje od 0,04 mm – zadatak ovog rada je ispitati utjecaj ovakvog punila na svojstva SCLC u svježem i očvrslom stanju, te dobivene rezultate usporediti sa prethodno dobivenim rezultatima: mješavinama SCC1, SCC2 i SCC3.

Za potrebu ovog ekperimentalnog dijela rada, u laboratoriju se izradilo šest mješavina slijedećih oznaka i karakteristika:

L1 - samozbijajući lagani beton s dodatkom mljevene opeke

L2 - samozbijajući lagani beton s dodatkom mljevene opeke i silike (u volumnom omjeru 50:50)

L3 - samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke/silike (u volumnom omjeru 50:50) i kombinacijom laganog i drobljenog agregata

L4 - samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke/silike (u volumnom omjeru 50:50) i drobljenim agregatom raznih frakcija

L5 - samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke/silike (u volumnom omjeru 25:75) i drobljenim agregatom raznih frakcija

L6- samozbijajući lagani beton s dodatkom mljevene opeke/silike (u volumnom omjeru 25:75)

Nakon izrade mješavina, beton se ispituje u svježem stanju, potom se ugrađuje u kalupe oblika kocke, dimenzija 150x150x150 mm. Nakon 24h se uzorci vade iz kalupa i prebacuju u vlažnu komoru, u vodu na temperaturi $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. U vlažnoj komori se njeguju do dana ispitivanja u očvrslom stanju. Mjeri se tlačna čvrstoća očvrsllog betonskog uzorka i brzina ultrazvučnog vala betona za potrebe određivanja dinamičkog modula elastičnosti. Ispitivanja se vrše nakon 7 i 28 dana. Rezultati se analiziraju i donose se zaključci o svojstvima dobivenog samozbijajućeg betona.

6.2. Upotrijebljeni materijali

Materijali upotrijebljeni za pokusne mješavine su:

- Cement CEM I 42,5 R
- Liapor lagani agregat frakcija 0-2 mm i 4-8 mm
- Drobljeni agregat frakcija 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm
- Mljevena opeka
- Silikatna prašina
- Superplastifikator FTF

6.2.1. Cement [19]

Za potrebe izrade samozbijajućeg betona koristio se portland cement s udjelom 95-100 posto klinkera CEM I 42,5 R. Cement je certificiran prema zahtjevima HRN EN 197-1, HRN EN 197-2, BAS EN 197-1, BAS EN 197-2 te Pravilniku o kvaliteti cementa.

Osnovne karakteristike cementa:

- Vrlo visoka rana i konačna čvrstoća
- Kratak period početka vezivanja
- Optimalna obradljivost
- Znatan razvoj topline hidratacije

Preporučuje se za primjenu:

- Svih betona s visokim zahtjevima za početnom mehaničkom otpornošću
- Izgradnje zahtjevnih inženjerskih konstrukcija i infrastrukturnih objekata od betona visokih marki
- Izgradnju javnih i poslovnih objekata
- Predgotovljenih i montažnih elemenata
- Prednapregnutih konstrukcija
- Mlaznih betona i injektiranja

Osobito je prikladan za betonske radove pri niskim temperaturama, izgradnju objekata gdje se traži brzo skidanje oplata, manipulacija elementima ili opterećenje konstrukcije u ranoj dobi, izradu vodonepropusnih betona te onih otpornih na mraz i soli za odmrzavanje.

Tablica 6.1: Svojstva cementa CEM I 42,5 R[19]

TIPIČNA SVOJSTVA		ZAHTJEV NORME
Gubitak žarenjem	$2,5 \pm 0,5\%$	$\leq 5,0$
Netopivi ostatak	$0,25 \pm 0,10\%$	$\leq 5,0$
% SO ₃	$3,0 \pm 0,2\%$	$\leq 4,0$
Kloridi	0,01%	$\leq 0,1$
Vrijeme vezivanja* (početak)	175 ± 25 min	≥ 60
Rana čvrstoća (2 dana)	30 ± 2 MPa	≥ 20
Normirana čvrstoća (28 dana)	55 ± 2 MPa	$\geq 42,5; \leq 62,5;$
TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) + gips (G)	96-100%	95-100
Ostalo	0-4%	0-5

*pri temperaturi od 20°C

Objavljeno svojstvo:

Bitna značajka	Svojstvo	Harmonizirana tehnička specifikacija
Oznaka i sastav	CEM I	EN 197-1:2011
Tlačna čvrstoća (rana i normirana)	42.5 R	
Vrijeme vezivanja	zadovoljava	
Postojanost volumena: - Le Chatelier - udjel SO ₃	zadovoljava zadovoljava	
Udjel klorida	zadovoljava	
Netopljivi ostatak	zadovoljava	
Gubitak žarenjem	zadovoljava	

Cement se transportira u sredstvima koja ga štite od utjecaja vlage i koja su prethodno očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa. Skladišti se u betonskim ili čeličnim silosima koja štiti cement od vanjskih utjecaja i koja moraju osigurati da ne dolazi do miješanja cementa s drugim proizvodima. Cement je potrebno upotrijebiti najkasnije 6 mjeseci nakon isporuke.

Proizvođač cementa je CEMEX Hrvatska.

6.2.2. Agregat

Za potrebe izrade laganog samozbijajućeg betona koristio se Liapor lagani agregat. Također se koristio i obični drobljeni agregat kako bi se usporedila svojstva tečenja i obradljivost samozbijajućih betona različitih vrsta agregata.

6.2.2.1. Lagani agregat Liapor

Agregat je liapor frakcija 0-2 mm i 4-8 mm.

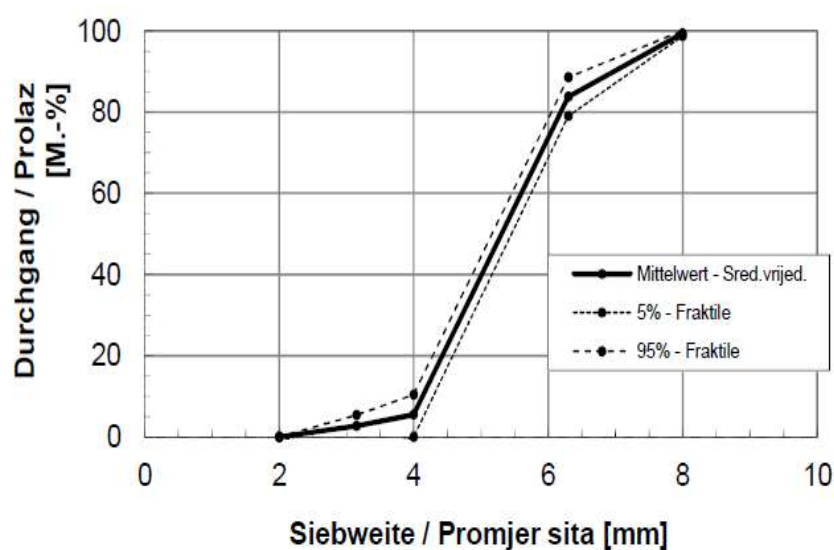
Prirodno čista i oko 180 mil. godina stara Lias-glina je kvalitetna sirovina za Liapor proizvode. U Liapor proizvodnom procesu prirodna sirovina gline se melje, miješa i oblikuje u kuglice koje su nakon toga podvrgnute tehnološkom procesu pečenja na temperaturi od 1100 – 1200°C. Pri tome sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju.[20] U tehnički usavršenom procesu vrlo točno se kontroliraju specifična težina, veličina i tvrdoća kuglice. Tako nastaju kuglice sa zatvorenom strukturom pora, porozne na zrak, potrebne čvrstoće, s visokim svojstvima kao toplinski izolator i istovremeno kao akumulator topline. Liapor proizvodi su nezapaljiv i negoriv građevni materijal, koji se prema standardu DIN 4102 svrstava u najviši požarni razred A1, s neograničenim vijekom trajanja.

Zbog kemijsko – mineraloškog sastava Liapor sirove gline i zadanih uvjeta u proizvodnji, liapor kuglice imaju laganu kamenu jezgru. Liapor kuglice su također otporne na vatru, smrzavanje, upijanje vode, lužine i kiseline te na pritisak. Liapor lagani agregati upotrebljavaju se izradu nearmiranih i armiranih laganih betona, kao i za izradu prednapetih laganih betona. Liapor lagani betoni otvaraju arhitektima i projektantima iznenađujuće konstruktivne mogućnosti kod projektiranja i izvedbe vitkih, ekonomično dimenzioniranih, a ipak čvrsto nosivih građevinskih elemenata.[5]

Pokusne mješavine sadrže:

- Liapor F9 – 5 4 – 8,
- Liapor K 0 – 2.

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm prikazana su na slici 6.1, odnosno u tablici 6.2.

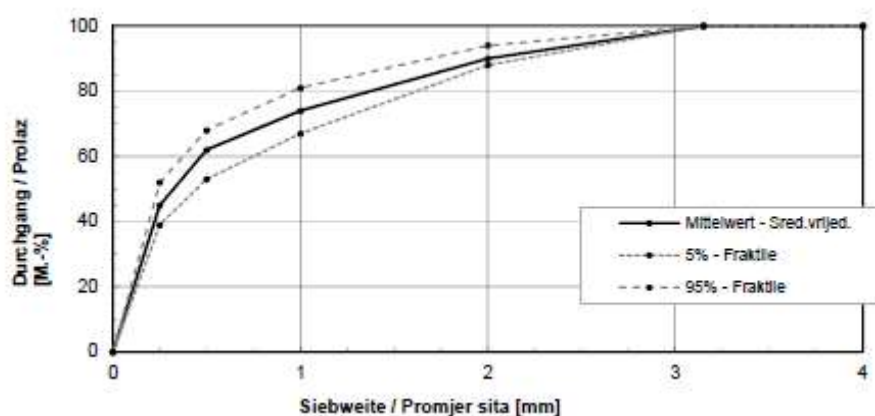


Slika 6.1: Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4 – 8 mm[5]

Tablica 6.2: Svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm[5]

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Okruglo	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	4 - 8	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	950 ± 25	kg/m ³
	Specifična gustoća	1700 ± 50	kg/m ³
	Upijanje vode w ₃₀ (30 min)	8 ± 4	M.-%
	Upijanje vode w ₆₀ (60 min)	9 ± 4	M.-%
	Tvrdoća zrna (rasuto)	> 17,0	MPa
	Postojanost na smrzavanje	< 4,0	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,07	M.-%
	Sumporni spojevi SO ₃	< 0,4	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO ₂	53 ± 5	%
	Al ₂ O ₃	18 ± 5	%
	Fe ₂ O ₃	15 ± 5	%
	CaO	6 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm prikazana su na slici 6.2, odnosno u tablici 6.3.

**Slika 6.2:** Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 0 – 2 mm [5]

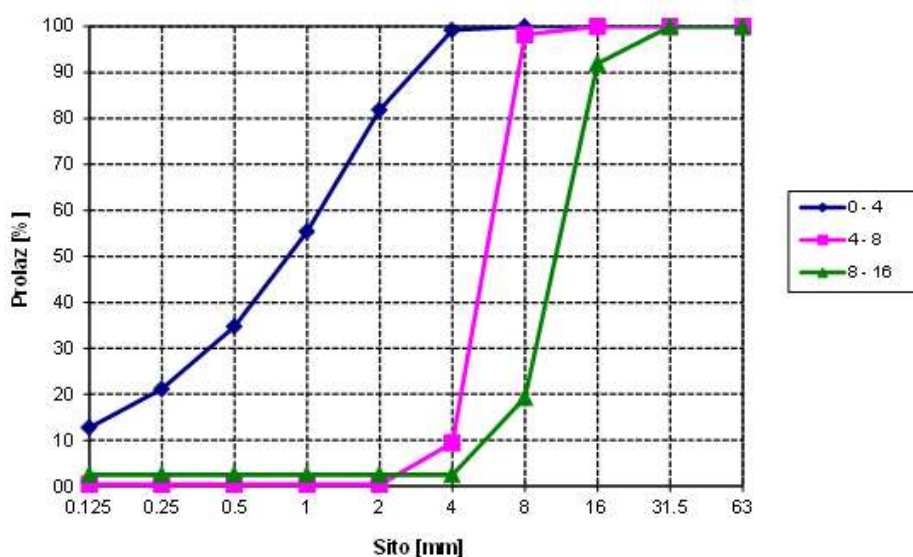
Tablica 6.3: Svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm[5]

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Lomljeno	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	0 - 2	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 30	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	800 ± 15	kg/m ³
	Specifična gustoća	1770 ± 10	kg/m ³
	Upijanje vode w _{BVK}	25 - 35	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,02	M.-%
	Sumporni spojevi SO ₃	< 0,8	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO ₂	55 ± 5	%
	Al ₂ O ₃	24 ± 5	%
	Fe ₂ O ₃	14 ± 5	%
	CaO	5 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

6.2.2.2. Drobljeni agregat

Za potrebe ovog istraživanja korišten je drobljeni vapnenac frakcija 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm. Frakcionirani agregat je dostavljen iz kamenoloma Klis-Kosa.

Na slici 6.3 su prikazane granulometrijske krivulje pojedinih frakcija.

**Slika 6.3:** Granulometrijske krivulje frakcijadrobljenog agregata

6.2.3. Mljevena opeka

Mljevena opeka je nastala mljevenjem opeke u mlinu sa kuglama. Nakon toga se prosijavala na situ otvora 0.04 mm. Koristila se kao punilo frakcije ≤ 0.04 mm. Gustoća joj je $2,40 \text{ g/cm}^3$. Svojstva mljevene opeke su detaljnije opisana u poglavlju 4.

6.2.4. Silikatna prašina[5]

Silikatna prašina je mineralni dodatak betonu koji aktivno sudjeluje u hidrataciji cementa te predstavlja jedan od najkvalitetnijih pucolana. Na svojstva betona djeluje preko pucolanskih reakcija kojima se povećava količina C-S-H, te pomoću sitnih čestica koje doprinose poboljšanju obradljivosti i povećanju kohezivnosti, zapunjuju unutrašnju strukturu jer su znatno sitnije od čestica cementa.

U izradi pokusnih mješavina upotrijebljena je Meyco MS 610, posebna visoko kvalitetna mikrosilika, koja je kao dodatak izrazito kvalitetnim betonima odobrena prema ASTM propisu. Ona u potpunosti mijenja poroznu strukturu betona te čini strukturu gušćom i otpornijom na bilo kakve vanjske utjecaje. Mikrosilika Meyco MS 610 koristi se za proizvodnju dugotrajnih, izdržljivih betona, odnosno betona visoke čvrstoće, pumpanih betona, lijevanih betona, podvodnih betona, betona s malim sadržajem cementa itd.

Meyco MS 610 mora se upotrijebiti u kombinaciji s plastifikatorom ili superplastifikatorom. Dodaje se betonu tijekom doziranja i to u količini 5 – 15% od mase cementa, a minimalno vrijeme miješanja je 90 sekundi.

Meyco MS 610 ima razna djelovanja, a to su:

- povećava čvrstoću
- poboljšava otpornost na kemijske i mehaničke štetne utjecaje
- sprječava segregaciju svježeg betona
- smanjuje količinu ubrzivača

Osnovni tehnički podaci o silikatnoj prašini Meyco MS 610 prikazani su u tablici 6.4.

Tablica 6.4: Osnovna svojstva Meyco MS 610 mikrosilike[5]

Tehnički podaci	
Oblik	Prah
Boja	Siva
Gustoća	0,55 - 0,70 kg/l
Udio klorida	< 0,1 %

6.2.5. Superplastifikator [5]

Za poboljšanje obradivosti betonske mješavine, dodao se superplastifikator Readyplast FTF1.

Readyplast je superplastifikator koji se sastoji od miješanog cementa, pijeska i aditiva te služi za poboljšanje konzistencije i obradljivosti. Neke od karakteristika Readyplast-a FTF1:

- optimalna obradljivost s jako malim vodovezivnim omjerom,
- veliko početno tečenje s malim doziranjem,
- velika početna čvrstoća,
- homogenost svježeg betona.

FTF1 je superplastifikator u tekućem stanju, narančaste boje, s gustoćom $1,07 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ pri temperaturi od 20°C. Sadržaj kloride je manji od 0,1 %, a pH vrijednost iznosi 3,0 – 5,0.

Maksimalna količina Readyplasta-a FTF1 koja se može dodati mješavini je 1,2 % mase veziva.

Superplastifikator treba skladištiti na suhom mjestu, pri temperaturi od 5°C do 45°C najmanje 6 mjeseci.

6.3. Sastav betonskih mješavina

Komponente betonskih mješavina koje su se pripravljalje za potrebe laboratorijskog istraživanja određene su prema CBI metodi koja je opisana u poglavlju 2.3., istodobno poštivajući Europske smjernice za samozbijajući beton. Sve su komponente sastava dostupne na hrvatskom tržištu.

Sastav betonskih mješavina za 1 m³ betona je prikazan u tablici 6.5, dok je za jedno laboratorijsko miješanje prikazano u tablici 6.6. Za svaku mješavinu se izradivalo 25 l betona iz koje je proizašlo 6 ispitnih uzoraka potrebnih za ispitivanja u očvrsлом stanju.

Tablica 6.5: Sastav betonskih mješavina za 1m³ betona

Sastavne komponente (kg)	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Cement	400,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00
Voda	200,00	175,00	175,00	175,00	214,40	175,00
Voda (korigirana)	178,80	162,80	154,40	190,00	217,20	221,60
Filer (mljevena opeka)	65,20	29,60	28,40	13,20	36,40	14,80
Silika	0,00	28,40	27,20	12,80	105,20	42,40
Superplastifikator FTF	4,80	4,54	4,53	4,35	5,46	4,71
Agregat	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lagani LIAPOR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0-2	498,40	538,80	539,60	0,00	0,00	538,80
4-8	513,20	555,20	0,00	0,00	0,00	555,20
Drobljeni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0-4	0,00	0,00	0,00	950,80	822,00	0,00
4-8	0,00	0,00	264,00	269,20	232,40	0,00
8-16	0,00	0,00	615,60	574,00	496,40	0,00
w/c računski	0,50	0,50	0,50	0,50	0,61	0,50
w/c stvarni	0,45	0,47	0,44	0,54	0,62	0,63

Tablica 6.6: *Sastav betonskih mješavina za jedno laboratorijsko miješanje*

Sastavne komponente (kg)	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Cement	10,00	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75
Voda	5,00	4,38	4,38	4,38	5,36	4,38
Voda (korigirana)	4,47	4,07	3,86	4,75	5,43	5,54
Filer (mljevena opeka)	1,63	0,74	0,71	0,33	0,91	0,37
Silika	0,00	0,71	0,68	0,32	2,63	1,06
Superplastifikator FTF	0,12	0,11	0,11	0,11	0,14	0,12
Agregat						
Lagani LIAPOR						
0-2	12,46	13,47	13,49	0,00	0,00	13,47
4-8	12,83	13,88	0,00	0,00	0,00	13,88
Drobljeni						
0-4	0,00	0,00	0,00	23,77	20,55	0,00
4-8	0,00	0,00	6,60	6,73	5,81	0,00
8-16	0,00	0,00	15,39	14,35	12,41	0,00
w/c računski	0,50	0,50	0,50	0,50	0,61	0,50
w/c stvarni	0,45	0,47	0,44	0,54	0,62	0,63

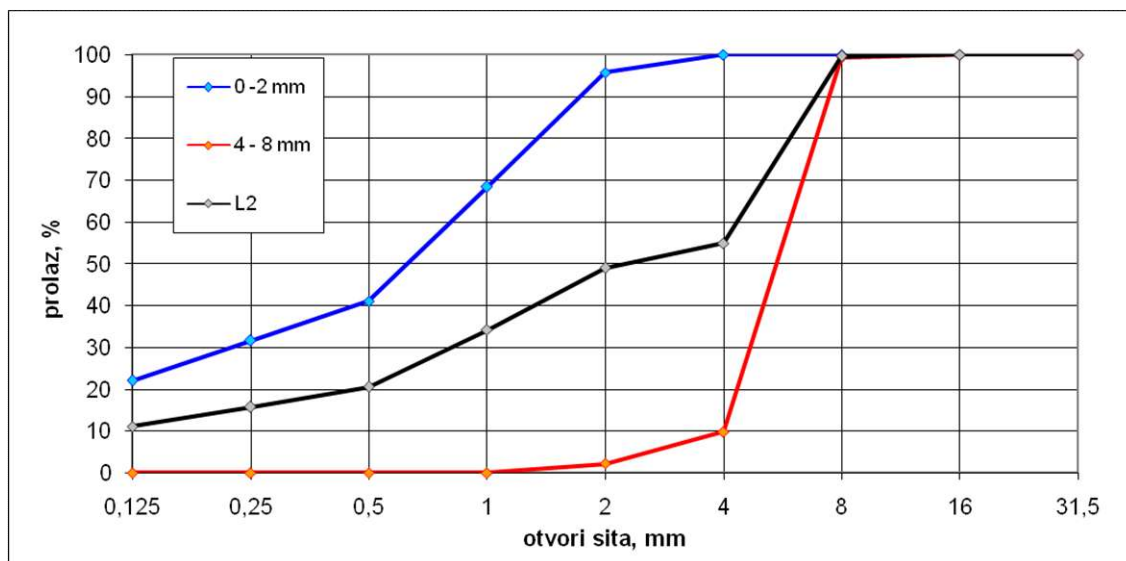
Prilikom laboratorijskog miješanja, postupnim dodavanjem vode u miješalicu i vizualnom procjenom se korigirala količina vode. Iz tablice 6.5 je vidljiva promjena u računskim i stvarnim iznosima vodocementnog faktora.

Stvarni iznos vodocementnog faktora se odredio tako što se uzimala u obzir količina vode koja je dodana prilikom miješanja betona.

Za potrebe budućeg projektiranja samozbijajućih betona prema CBI metodi, u nastavku je prikazan postupak određivanja sastava mješavina.

Mješavina L2 sa laganim Liapor agregatom

Početni sastav mješavine se uzima bez dodatka filera, odnosno punila, koji je u ovom slučaju fina mljevena opeka i silikatna prašina. Granulometrijski sastav frakcija agregata i betona su prikazani na slici 6.4.



Slika 6.4: Granulometrijska krivulja za L2 mješavinu

Tablica 6.7: Sastav početne mješavine L2

BETON	Udio (%)	Gustoća (kg/dm ³)	Volumen (dm ³)	Masa (kg)
Cement		3,1	112,9	350
Voda		1	175	175
Zrak	0,03		30	
Dodatak	0,012	1,05	4	4,2
Filer				
0-2 mm	50	1,65	339,05	559,3
4-8 mm	50	1,7	339,05	576,2
UKUPNO			1000	1088,5

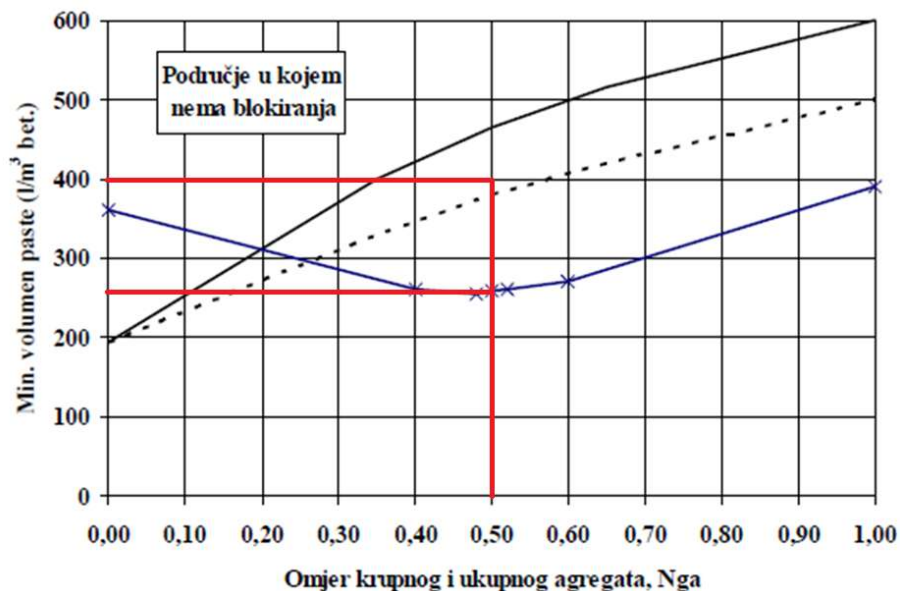
U sljedećem koraku se proračunava udio praškastih tvari, bez filera. Volumenom paste određujemo količinu filera i aditiva kako bi ista bila stabilna, a kako bi se postigla i potrebna obradljivost. Volumeni svih komponenata paste (cement, voda, pijesak, aditiv, voda i zrak) su prikazani u tablici 6.8. Za volumen pijeska se uzimaju čestice manje od 25mm iz granulometrijske krivulje agregata, slika 6.4 i tablica 6.7.

Tablica 6.8: Količina praškastih komponenata u sastavu L2 bez filera

	pijesak <0,25mm	cement	voda	dodatak	zrak	mort	praškaste komponent	pasta
masa	88,4	350,00	175,00	4,20		1088,60	438,39	617,59
gustoća	1,65	3,10	1,00	1,05		1,65	2,63	1,64
volumen	53,6	112,90	175,00	4,00	30,00	660,93	166,47	375,47

Omjerom krupnog (>4 mm) i ukupnog agregata, N_{ga} , moguće je odrediti minimalni potrebni volumen paste prema kriteriju sadržaja šupljina i kriteriju blokiranja.

$$N_{ga} = \text{krupni agregat} / \text{ukupni agregat} = 339,05 / 678,1 = 0,5$$



Slika 6.5: Minimalni volumen paste mješavine L2

Kao što je prikazano na slici 6.5, za minimalni volumen paste uzima se vrijednost bliža iscrtkanoj krivulji, odnosno krivulji riječnog agregata. Krivulja pune linije predstavlja krivulju drobljenog agregata. Obje predstavljaju ovisnost između omjera blokiranja volumena agregata (n_{abi}) i slobodnog prostora i promjera zrna agregata (c/D_{af}) za riječni i drobljeni agregat.

Plava krivulja prati minimalni volumen paste prema kriteriju sadržaja šupljina.

Prema kriteriju šupljina minimalni volumen paste = 260 l/m^3

Prema kriteriju blokiranja minimalni volumen paste = 400 l/m^3

Pretpostavljena količina paste prema tablici 6.5 iznosi $375,47 \text{ l/m}^3$. Razlika između preporučenog i pretpostavljenog volumena paste se nadomješta dodavanjem filera.

Razlika iznosi $24,53 \text{ l/m}^3$ ($400 - 375,47 \text{ l/m}^3$)

Pošto se za filer betonske mješavine koristi i mljevena opeka i silika, razlika u volumenima paste se ravnomjerno dijeli svakoj komponenti. Gustoća mljevene opeke je 2,4, a silike 2,3, stoga je potrebno 29,4, odnosno 28,2 kg filera za 1 m^3 betona.

Tablica 6.9: Konačan sastav mješavine L2

BETON		Gustoća [kg/m ³]	Volumen za 1m ³ [m ³]	Masa za 1 m ³ [kg]
Cement		3,1	112,9	350
Voda	0,5		175	175
Zrak	3%		30	
Silika		2,3	12,3	28,2
Opeka		2,4	12,3	29,4
Dodatak	0,012	1,05	4,3	4,539
Agregat		1,65	326,6	538,9
		1,7	326,6	555,3
UKUPNO			1000	1653,2

Količina komponenata za 1 m³ je prikazana na tablici 6.9.

Usporedba parametara sastava samozbijajućeg betona s mljevenom opekom s preporučenim vrijednostima prema EFNARC-u.[21]

Tablica 6.10: Raspon sastava samozbijajućih mješavina prema EFNARC-u

PARAMETAR SASTAVA	Preporuka	Oznaka samozbijajućeg betona					
		L1	L2	L3	L4	L5	L6
Volumen krupnog agregata / m ³ (%)	27-36	30,2	32,66	32,7	31,35	27,09	32,65
Masa sitnog/ukupnog agregata (%)	48-55	49	50	38	53	53	50
Volumen paste (%)	30-38	39,71	37,06	37,1	37,39	44,84	37,69
Masa praškaste komponente	380-600	520,3	467,22	466,69	500,54	599,59	466,59
Voda	150-210	200	175	175	175	214	175
v/p volumno	0,85-1,1	0,81	1,09	1,08	1,06	1,08	1,05
v/p masa	0,28-0,37	0,38	0,37	0,37	0,35	0,36	0,38

Iz tablice 6.10. je vidljivo da se nisu svi parametri sastava vodili po rasponima preporučenim od Europskog udruženja EFNARC za samozbijajući beton.

U nastavku će se opažati koliko će ta odstupanja utjecati na konačna svojstva samozbijajućeg betona.

7. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA U SVJEŽEM STANJU

Ispitivana svojstva samozbijajućeg betona provedena su prema nizu europskih normi HRN EN 12350 8-12. Sva ispitivanja provedena su u laboratorijskim uvjetima s opremom prema pravilima koja propisuju norme. Metode ispitivanja su opisane u poglavlju 3. Za potrebe analize rezultata, u tablici 7.1. su dane granične vrijednosti ispitivanja samozbijajućih betona u svježem stanju.

Tablica 7.1: Granične vrijednosti metoda ispitivanja samozbijajućih betona u svježem stanju[21]

METODA ISPITIVANJA	Granične vrijednosti	Razred
Rasprostiranje (mm)	550-650	SF1
	660-750	SF2
	760-850	SF3
Viskoznost t_{500} (s)	<2	VS1
	≥2	VS2
V-lijevak (s)	<9	VF1
	9,0-25,0	VF2
L-kutija	≥0,80	PL1 (2 rebra)
		PL2 (3 rebra)
J-prsten	≤10	PJ1 (12 šipki)
		PJ2 (16 šipki)

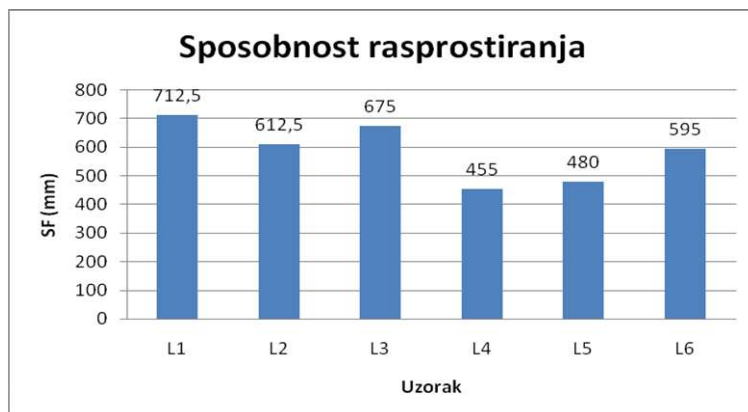
Za sve metode ispitivanja, u nastavku su prikazane ispitane vrijednosti svojstava svježeg betona ovog istraživanja.

7.1. Rasprostiranje slijeganjem

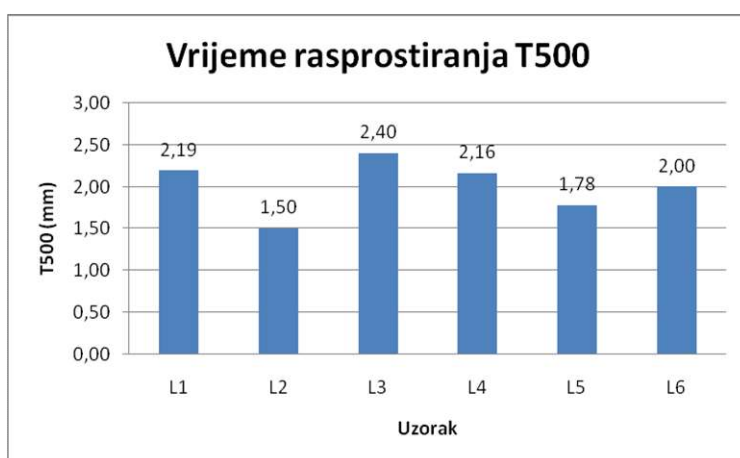
Rezultati ispitivanja određuju sposobnost tečenja betona i samozbijanja tj. popunjavanja betona, koji su vrlo bitni kriteriji za samozbijajuće betone.

Tablica 7.2: Rezultati ispitivanja rasprostiranja slijeganjem

Oznaka uzorka	d_1 (mm)	d_2 (mm)	SF(mm)	T_{500} (s)	Razred SF	Razred VS
L1	720	705	712,5	2,19	SF2	VS2
L2	610	615	612,5	1,50	SF1	VS1
L3	680	670	675	2,40	SF2	VS2
L4	450	460	455	2,16	-	VS2
L5	490	470	480	1,78	-	VS1
L6	600	590	595	2,00	SF1	VS2



Slika 7.1: Grafički prikaz promjera rasprostiranja mješavina



Slika 7.2: Grafički prikaz vremena rasprostiranja mješavina

Rezultati svih probnih mješavina su prikazani u tablici 7.2. i grafički na slikama 7.1. i 7.2.

Vidljivo je da najveći promjer rasprostiranja ima mješavina L1 uz vrijeme rasprostiranja u okviru pravila koje je pripisalo Europsko udruženje.

Mješavine L4 i L5 nisu zadovoljile s rezultatima rasprostiranja što upućuje na smanjenu sposobnost deformiranja betona, odnosno popunjavanja betona bez potrebe za vibriranjem.

Sve su mješavine zadovoljile s rezultatima ispitivanja vremena rasprostiranja samozbijajućeg betona. Najkraće vrijeme T_{500} ima mješavina L2, a zatim L5 iako ima malo rasprostiranje. Mješavina L5 brzo poteče ali se onda zaustavi. Moguće je da se aktivira tiksotropija.

Mješavine sa većom količinom cementa i mljevene opeke u kombinaciji sa liaporom imaju veće promjere razastiranja, ali duže vrijeme T_{500} , pa mješavina djeluje ljepljivo.



Slika 7.3: Rasprostiranje slijeganjem mješavine L1

Mješavina na slici 7.3. ima najveći promjer rasprostiranja, ali isto tako i duže vrijeme rasprostiranja T_{500} . Zbog veće količine mljevene opeke, mješavina djeluje ljepljivo. Vidljiva je blaga segregacija na sredini mješavine, uz odvajanje vode na rubovima.



Slika 7.4: Rasprostiranje slijeganjem mješavine L2

Mješavina na slici 7.4. ima najkraće vrijeme rasprostiranja, samim time i manju viskoznost. Došlo je do brzog početnog tečenja, nakon čega se zaustavilo vrlo brzo nakon dohvata promjera 500 mm. Također, mješavina djeluje ljepljivo. Uslijed ispitivanja je došlo do obrušavanja stošca što je vidljivo nakupinom liapora na jednom dijelu te izdvajanja vode na rubovima.



Slika 7.5: Rasprostiranje slijeganjem mješavine L3

Mješavina na slici 7.5. ima najduže vrijeme rasprostiranja u usporedbi s drugim mješavinama. Komponente agregata u ovoj mješavini čini kombinacija liapora sa običnim agregatom. Vidljivo je odvajanje krupnog agregata po sredini. Nema naročitog odvajanja vode na rubovima.



Slika 7.6: Rasprostiranje slijeganjem mješavine L4

Mješavina na slici 7.6. nije zadovoljila sposobnost samozbijanja betona. Razastiranju je više pridonijela težina krupnog agregata nego sama viskoznost betona. Vidljiv je manjak paste koja je utjecala na smanjenu sposobnost rasprostiranja betona.



Slika 7.7: Rasprostiranje slijeganjem mješavine L5

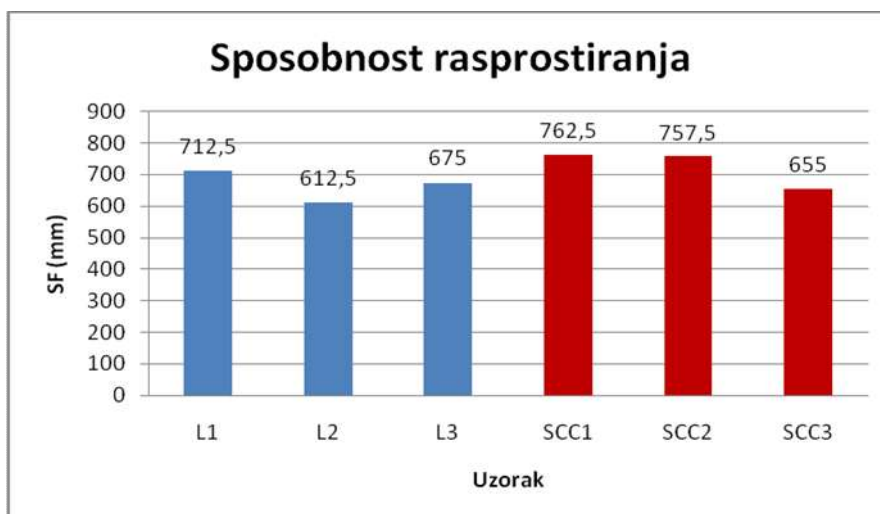
Kod mješavine na slici 7.7, u odnosu na mješavinu L4, se povećala količina cementa, silike, opeke i vode, a smanjila količina agregata što je rezultiralo manjem povećanju promjera rasprostiranja i bržem vremenu rasprostiranja betona. No, i dalje nije zadovoljena sposobnost samozbijanja betona. Beton je stabilan i nema izrazitu segregaciju ali je i dalje primjetan manjak paste.



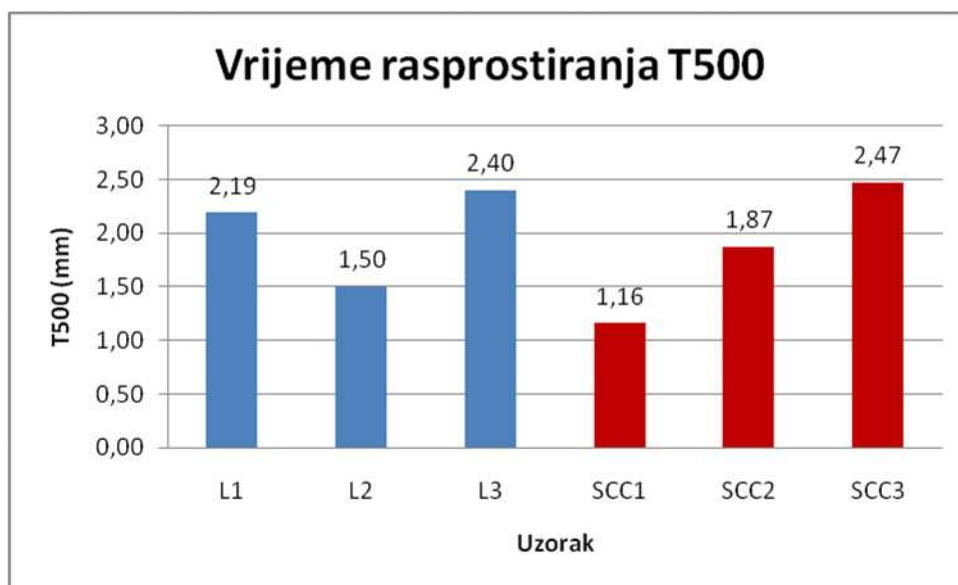
Slika 7.8: Rasprostiranje slijeganjem mješavine L6

Mješavina na slici 7.8. je vrlo slična mješavini L2 uz manju količinu opeke i sa više silike. U odnosu na tu mješavinu, manji je promjer razastiranja i duže vrijeme rasprostiranja T_{500} , ali je otpornija prema segregaciji i nema velikog odvajanja vode na rubovima. Beton je stabilan.

U dijagramima 7.9. i 7.10. su prikazane usporedbe prve tri mješavine ovog istraživanja sa prve tri mješavine iz članka 5.6 [18]. Mješavine SCC1-SCC3 odabrane su zato što sadrže mljevenu opeku kao filer u betonu. L1 i SCC1 imaju istu količinu cementa i mljevene opeke.



Slika 7.9: Grafički prikaz promjera rasprostiranja L i SCC mješavina



Slika 7.10: Grafički prikaz vremena rasprostiranja L i SCC mješavina

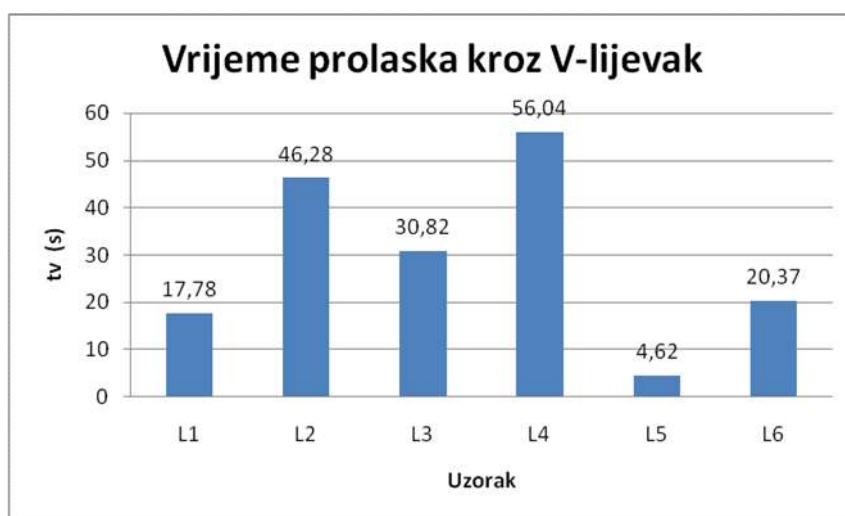
Mješavina L1 ima manji promjer rasprostiranja i duže vrijeme rasprostiranja T_{500} od mješavine SCC1 koja sadrži veću količinu vode ali i veću količinu liapora u odnosu na L1. Isto tako, mješavina SCC2, koja sadrži filer od kamenog brašna u kombinaciji sa mljevenom opekom, je pokazala bolja svojstva rasprostiranja od mješavine L2 koja se sastoji od silike i mljevene opeke. Mješavine L3 i SCC3 su pokazala slična svojstva rasprostiranja. Razlika u sastavu je što je mješavina L3 izrađena od kombiniranog agregata i nešto manjim udjelima svih komponenata.

7.2. Ispitivanje V-lijevkom

U tablici 7.3 i na slici 7.11 prikazani su rezultati ispitivanja u V-lijevku.

Tablica 7.3: Rezultati ispitivanja V-lijevkom

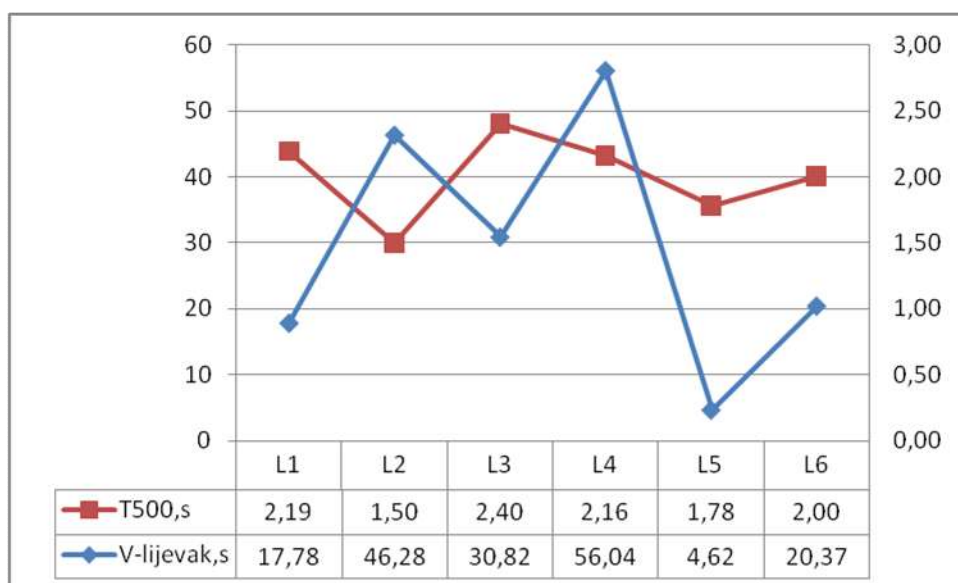
Oznaka uzorka	Vrijeme prolaska kroz V-lijevak, t_v (s)	Razred
L1	17,78	VF2
L2	46,28	-
L3	30,82	-
L4	56,04	-
L5	4,62	VF1
L6	20,37	VF2



Slika 7.11: Grafički prikaz vremena prolaska kroz V-lijevak

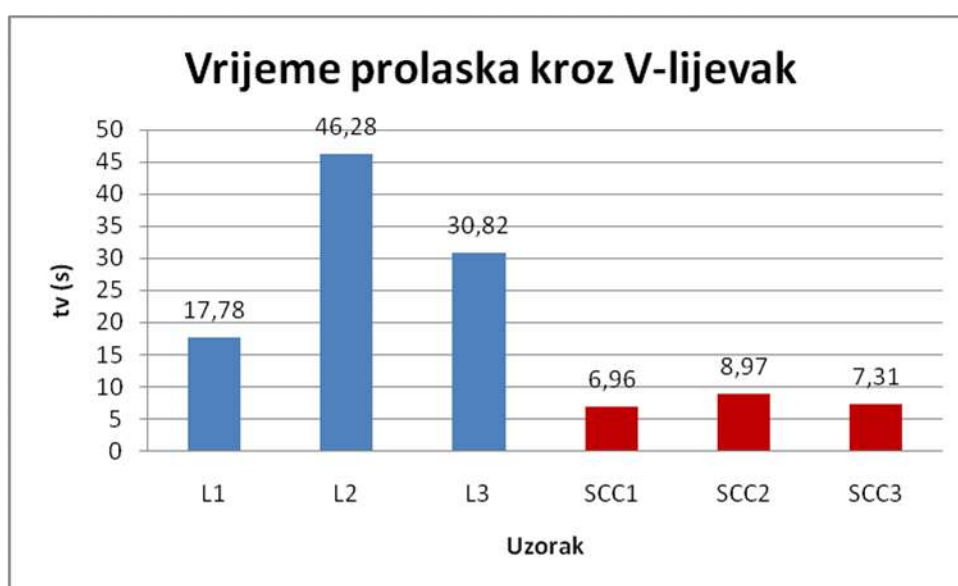
Samo su mješavine L1, L5 i L6 pokazale rezultate istjecanja koji se mogu svrstati u odgovarajući razred. Kod mješavina L2, L3, L4 i L6 je došlo do značajnog zastoja u uskom dijelu V-lijevka na dnu. Iako mješavine L1 i L6 odgovaraju razredu VF2 i dalje je jako sporo tečenje za potrebe dobrog samozbijajućeg betona.

Najbolje rezultate ima mješavina L5, koja je stabilna – ne pokazuje znakove segregacije ali prema slici 7.1 nema dobro rasprostiranje. Količina paste je pri projektiranju sastava mješavine prešla vrijednosti za samozbijajuće betone preporučene od Europskog udruženja.



Slika 7.12: Grafički prikaz rezultata ispitivanja V-lijevkom i vremena t_{500}

Na slici 7.12. su prikazana vremena tečenja iz V-lijevka i vremena razastiranja T500. Mješavina L5 pokazuje dovoljno brza vremena razastiranja kao i tečenja iz V-lijevka. Neke mješavine, kao L1 i L6 imaju sporije vrijeme razastiranja, a brže vrijeme tečenja kroz V-lijevak. Kod preostalih mješavina vremena tečenja kroz V-lijevak su jako spora upravo zbog blokiranja agregata na donjem dijelu V-lijevka. Kod svih tih mješavina je uočljiva segregacija kod metode rasprostiranja betona.



Slika 7.13: Grafički prikaz vremena prolaska kroz V-lijevak L i SCC mješavina

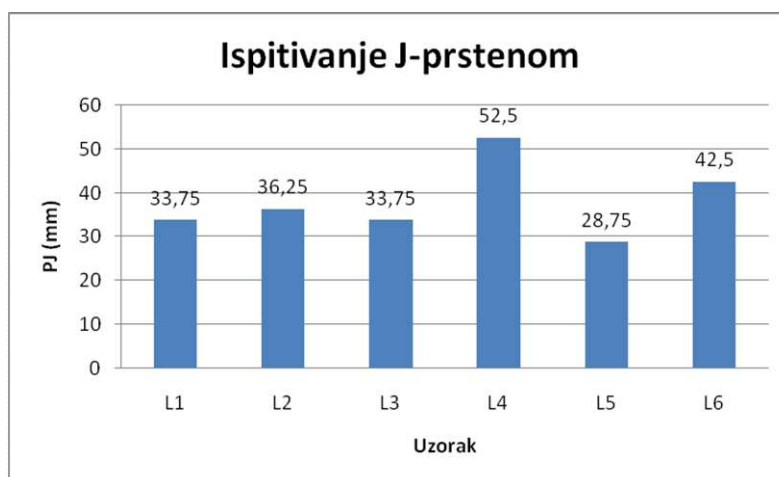
Sve mješavine članka 5.6. daju brža vremena tečenja upravo zbog manje segregacije na dnu V-lijevka. Zanimljiva je razlika u rezultatima tečenja mješavina L1 i SCC1 zbog toga što imaju jednak sastav (dodatak mljevene opeke, bez silike) osim što mješavina SCC1 ima veću količinu agregata pa i veću količinu vode. Isto tako, razlika je u polaznoj krivulji za odabir minimalnog volumena paste. Krivulja za prirodni agregat dala je lošije rezultate od krivulje za drobljeni agregat. Dodavanjem finije frakcije mljevene opeke povećala se ljepljivost mješavina.

7.3. Ispitivanje J-prstenom

U tablici 7.4 i na slici 7.14 prikazani su rezultati ispitivanja J-prstenom.

Tablica 7.4: Rezultati ispitivanja J-prstenom

Oznaka uzorka	d_1 [mm]	d_2 [mm]	SF [mm]	T_{500} [s]	Δh_0 [mm]	Δh_{x1} [mm]	Δh_{x2} [mm]	Δh_{y1} [mm]	Δh_{y2} [mm]	PJ	Razred
L1	665	600	632,5	3,80	95	130	130	125	130	33,75	-
L2	550	540	545	5,93	90	125	125	125	130	36,25	-
L3	595	590	592,5	2,6	90	125	125	120	125	33,75	-
L4	410	390	400	∞	65	110	120	115	125	52,5	-
L5	470	460	465	2	85	100	125	120	110	28,75	-
L6	445	510	477,5	14,46	80	120	125	125	120	42,5	-



Slika 7.14: Grafički prikaz rezultata ispitivanja J-prstenom

Nijedna mješavina nije zadovoljila kriterije ispitivanja J-prstenom.

Najveće promjere razastiranja su imale mješavine L1 i L3, a najbolja vremena T_{500} mješavine L3 i L5.

Najveće blokiranje agregata na J-prstenu (najveća razlika unutar i van prstena) ima mješavina L4 koja nije imala sposobnost tečenja, slika 7.14.



Slika 7.15: Ispitivanje J-prstenom - mješavina L1

Na slici 7.15. je vidljiva slaba sposobnost zaobilaženja prepreka.

Ova mješavina ima najveći promjer razastiranja od ostalih. Vidljivo je odvajanje vode na rubovima.



Slika 7.16: Ispitivanje J-prstenom - mješavina L2

Mješavina na slici 7.16. ima najduže vrijeme rasprostiranja u odnosu na druge, osim mješavine L4. Vidljivo blokiranje agregata i odvajanje vode na rubovima.



Slika 7.17: Ispitivanje J-prstenom - mješavina L3

Na slici 7.17. je vidljiva slaba otpornost prema segregaciji. Nije vidljivo odvajanje vode na rubovima.



Slika 7.18: Ispitivanje J-prstenom - mješavina L4

Mješavina na slici 7.18. ima najveću stopu blokiranja. Krupni agregat se većim dijelom zadržao unutar šipki J-prstena. Beton nema sposobnost tečenja te ima najlošija svojstva u pogledu sposobnosti prolaza kroz prepreke. Vrijeme razastiranja nije zabilježeno jer mješavina nije dosegla krug od 500 mm.



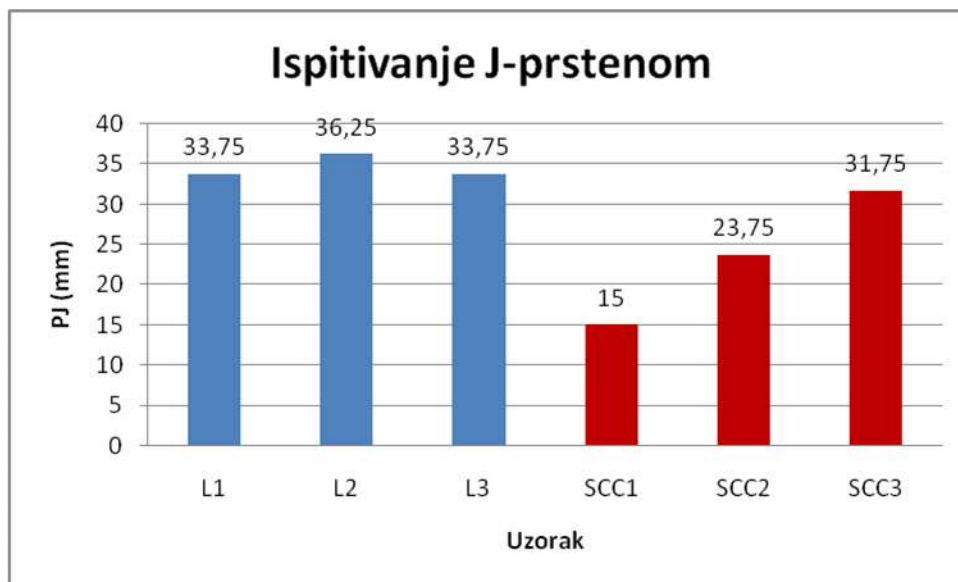
Slika 7.19: Ispitivanje J-prstenom - mješavina L5

Beton na slici 7.19. ima najmanju stopu blokiranja u odnosu na druge mješavine. Nema odvajanja vode na rubovima niti izražene segregacije. Problem je u nedostatku paste.



Slika 7.20: Ispitivanje J-prstenom - mješavina L6

Promjer razastiranja betona na slici 7.20. i vrijeme razastiranja, odnosno brzina deformiranja betona, ne zadovoljavaju kriterije. Stopa blokiranja je velika. Vidljivo je odvajanje vode na rubovima.



Slika 7.21: Grafički prikaz rezultata ispitivanja J-prstenom L i SCC mješavina

Prema slici 7.21., mješavine članka 5.6 daju manju stopu blokiranja.

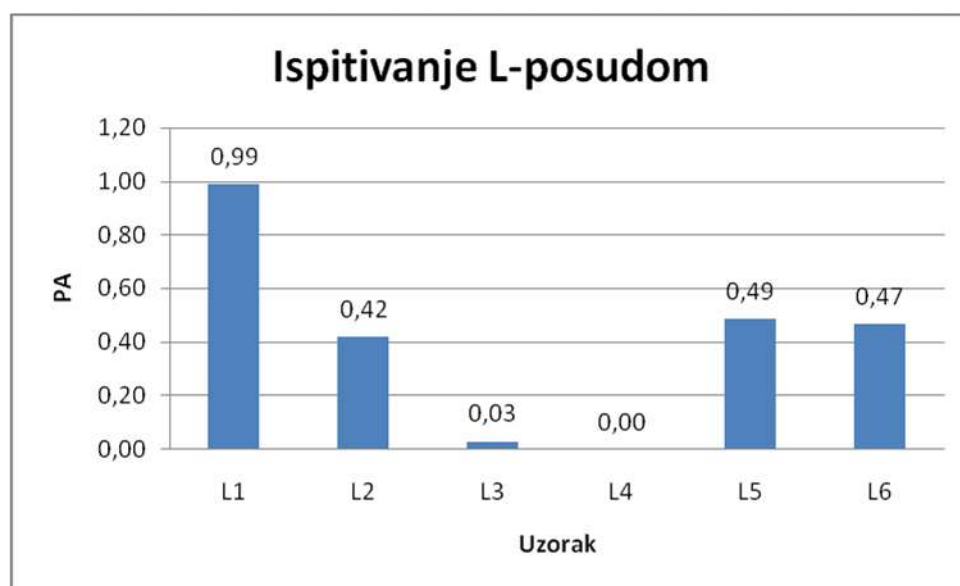
S obzirom da nijedna mješavina nije zadovoljila kriterije jedino mješavina SCC1 pokazuje dobro svojstvo zaobilaženja prepreka, bez obzira na dobivenu vrijednost stope blokiranja. Razlika visine betona unutar i van prstena kod SCC1 je najmanja u odnosu na ostale mješavine. Mješavina ima najveće rasprostiranje SF i najmanje vrijeme rasprostiranja T_{500} .

7.4. Ispitivanje L kutijom

U tablici 7.5 i na slici 7.22 prikazani su rezultati ispitivanja u L kutijom.

Tablica 7.5: Rezultati ispitivanja L-kutijom

Oznaka uzorka	ΔH_{11} [mm]	ΔH_{12} [mm]	ΔH_{13} [mm]	ΔH_{1sr} [mm]	ΔH_{21} [mm]	ΔH_{22} [mm]	ΔH_{23} [mm]	ΔH_{2sr} [mm]	$H_1=600-\Delta H_{1sr}$ [mm]	$H_2=150-\Delta H_{2sr}$ [mm]	$PA=H_2/H_1$	Razred
L1	518	518	520	518,7	70	68	70	69,3	81,3	80,7	0,99	PA2
L2	475	470	475	473,3	100	90	100	96,7	126,7	53,3	0,42	-
L3	220	210	220	216,7	140	135	140	138,3	383,3	11,7	0,03	-
L4	265	265	265	265,0	150	150	150	150,0	335,0	0,0	0,00	-
L5	460	470	460	463,3	80	85	85	83,3	136,7	66,7	0,49	-
L6	465	470	480	471,7	90	80	100	90,0	128,3	60,0	0,47	-



Slika 7.22: Grafički prikaz rezultata ispitivanja L-posudom

Samo je mješavina L1 zadovoljila sposobnost zaobilazanja prepreka. U slučaju ostalih mješavina, dolazi do znatnog blokiranja agregata na šipkama armature.



Slika 7.23: Ispitivanje L-posudom – mješavina L1

Iako je i ovdje vidljivo malo blokiranje agregata na šipkama, mješavina L1 na slici 7.23 je pokazala dobra svojstva zaobilaženja prepreka, i sposobnost popunjavanja horizontalnog dijela L-kutije.



Slika 7.24: Ispitivanje L-posudom – mješavina L2

Na slici 7.24. je prikazano znatnije blokiranje agregata u odnosu na mješavinu L1 ali je preostali dio mješavine popunio horizontalni dio L-kutije.



Slika 7.25: Ispitivanje L-posudom – mješavina L3

Na slici 7.25. se uočava da se krupni drobljeni agregat skoro pa čitav zadržao na šipkama. Vidljiva je izlučena voda na horizontalnom dijelu L-kutije. Krupni agregat se nakupio na donjem vertikalnom dijelu L-kutije, tako da je prilikom otpuštanja pregrade cijeli agregat kao cjelina pao na dno s nemogućnošću prolaza kroz šipke armature. Ovo upućuje također na važnost određivanja maksimalnog zrna agregata u mješavini. Važno je da sva zrna nesmetano prođu kroz prepreke i popune razne složene oblike betona zahtijevane projektom.



Slika 7.26: Ispitivanje L-posudom – mješavina L4

Na slici 7.26. je vidljivo izrazito blokiranje agregata s nemogućnošću popunjavanja horizontalnog dijela L-kutije.



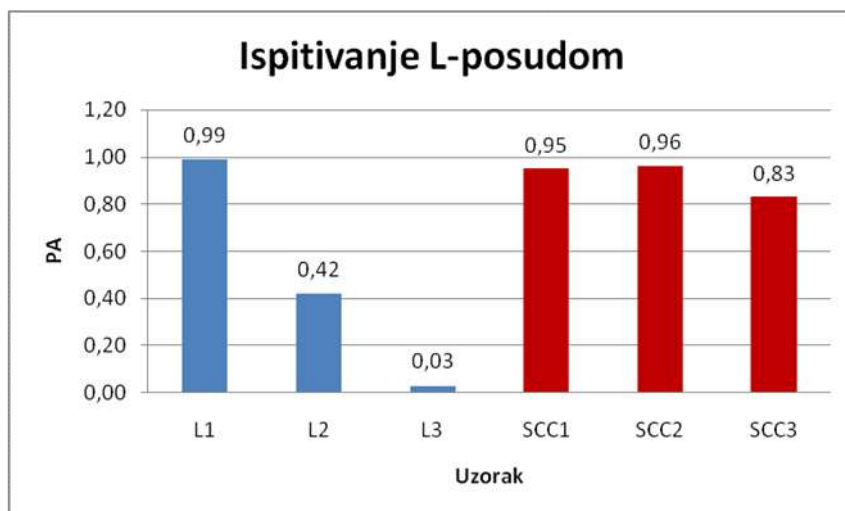
Slika 7.27: Ispitivanje L-posudom – mješavina L5

Prilikom odvajanja pregrade, beton sa slike 7.27. je popunio horizontalni dio bez blokiranja agregata. Problem je što se veći dio betona zadržao u vertikalnom dijelu L-kutije. Takvim sporim popunjavanjem, uspio se samo pokriti horizontalni dio, odnosno dio bez prepreka.



Slika 7.28: Ispitivanje L-posudom – mješavina L6

Na slici 7.28. je prikazana mješavina L6 sa jako sporim tečenjem mješavine oko šipki armature i blokiranjem armature oko istih.



Slika 7.29: Grafički prikaz rezultata ispitivanja L-posudom L i SCC mješavina

Na slici 7.29. je prikazana sposobnost prolaza betona koja je povoljnija kod mješavina članka 5.6. izuzev mješavini L1 koja, istog sastava kao i SCC1, daje bolje rezultate. Tome je pridonijela mljevena opeka finije frakcije.

7.5. Mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona

Tablica 7.6: Mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona[9]

Ispitivanje:	Rezultat manji od:	Mogući uzrok	Rezultat veći od:	Mogući uzrok
Rasprostiranje slijeganjem	650 mm	prevelika viskoznost	750 mm	premala viskoznost
		visoka granica tečenja		segregacija
T500 vrijeme rasprostiranja	2 s	premala viskoznost	5 s	prevelika viskoznost
V-ljevjak	8 s	premala viskoznost	12 s	visoka granica tečenja
				prevelika viskoznost
				visoka granica tečenja
J-prsten	10 mm	prevelika viskoznost		prevelika viskoznost
		visoka granica tečenja		visoka granica tečenja
		segregacija		segregacija
		blokiranje		blokiranje
L kutija	0,8	prevelika viskoznost	1	pogreška u rezultatu
		visoka granica tečenja		
		blokiranje		

U tablici 7.6. su prikazane korektivne mjere na neke od nepravilnosti, i njihov utjecaj na svojstva samozbijajućeg betona.

Tablica 7.7: Korektivne mjere lošim svojstvima samozbijajućeg betona[9]

Moguća poboljšanja:	Utjecaj na:			
	Sposobnost popunjavanja	Sposobnost zaobilaženja prepreka	Otpornost segregaciji	čvrstoća
prevelika viskoznost				
povećati količinu vode	+	+	-	-
povećati volumen paste	+	+	+	+
povećati količinu superplastifikatora	+	+	-	+
premala viskoznost				
smanjiti količinu vode	-	-	+	+
smanjiti volumen paste	-	-	-	-
povećati količinu modifikatora viskoznosti	-	-	+	-
smanjeniti količina superplastifikatora	-	-	+	0
koristiti sitnije praškaste komponente	+	+	+	0
koristiti sitniji pijesak	+	+	+	0
previsoka granica tečenja				
povećati količinu superplastifikatora	+	+	-	+
povećati volumen paste	+	+	+	+
povećati volumen morta	+	+	+	+
segregacija				
povećati volumen paste	+	+	+	+
povećati volumen morta	+	+	+	+
smanjiti količinu vode	-	-	+	+
koristiti sitnije praškaste komponente	+	+	+	0
ubrzano smanjenje obradljivosti				
koristiti sporije vezujući tip cement	0	0	-	-
povećati količinu usporivača	0	0	-	-
koristiti drugačiju vrstu superplastifikatora	?	?	?	?
izmijeniti količinu filera i cementa	?	?	?	?
blokiranje				
smanjiti maksimalno zrno agregata	+	+	+	-
povećati volumen paste	+	+	+	+
povećati volumen morta	+	+	+	+

+ upućuje na bolje rezultate u odnosu na svojstva betona.

- upućuje na lošije rezultate u odnosu na svojstva betona.

0 prikazuje da nema utjecaj na određeno svojstvo betona.

? prikazuje da se ne može previdjeti utjecaj na svojstvo betona.

Prema tablici 6.10, parametri sastava mješavina se nisu vodili po rasponima preporučenim od Europskog udruženja EFNARC za samozbijajući beton. Primjerice, mješavina L1 sadrži veći volumen paste od preporučenog. Pošto je takva mješavina pokazala svojstva poput blage segregacije i blokiranja agregata na šipkama J prstena, preporučuje se promjena udjela komponenti.

Mješavina L5 sadrži velik volumen paste i veću količinu vode. Pokazala je svojstva poput slabog rasprostiranja, ali bržeg vremena istjecanja i manje stope blokiranja od ostalih mješavina. Preporučuje se povećanje količine superplastifikatora i smanjenje maksimalnog zrna agregata prema EFNARC preporukama. Iako bi, ne slijedeći te preporuke, povoljno utjecalo povećanje volumena paste kako bi se poboljšala sposobnost rasprostiranja.

8. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA U OČVRSLOM STANJU

8.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća se mjerila 7 i 28 dana nakon pripreme mješavine. Prije postavljanja betona u prešu, s uzoraka se briše površinska vlažnost. Uzorci su oblika kocke dimenzija 150 x 150 x 150 mm. Opterećenje se nanosi jednoliko, pa je uzorke potrebno postaviti na sredinu preše.

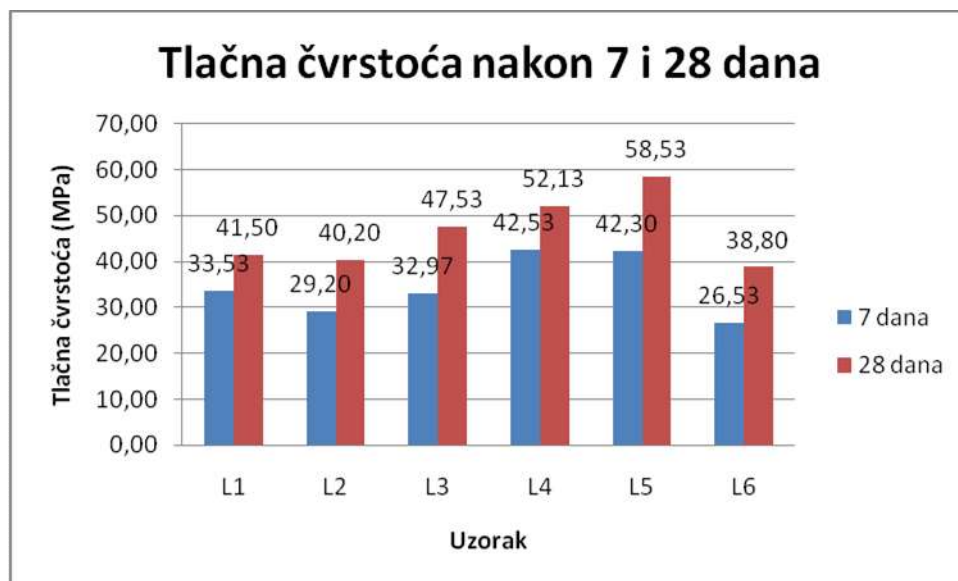


Slika 8.1: Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Rezultati su prikazani u tablici 8.1.

Tablica 8.1: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona nakon 7 i 28 dana

Oznaka uzorka	Starost od 7 dana		Starost od 28 dana	
	Masa [g]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Masa [g]	Tlačna čvrstoća [MPa]
L1	6062,17	33,53	6064,57	41,50
L2	5893,10	29,20	5948,13	40,20
L3	7128,67	32,97	7171,23	47,53
L4	7954,47	42,53	7961,83	52,13
L5	7783,33	42,30	7779,63	58,53
L6	5660,37	26,53	5718,33	38,80

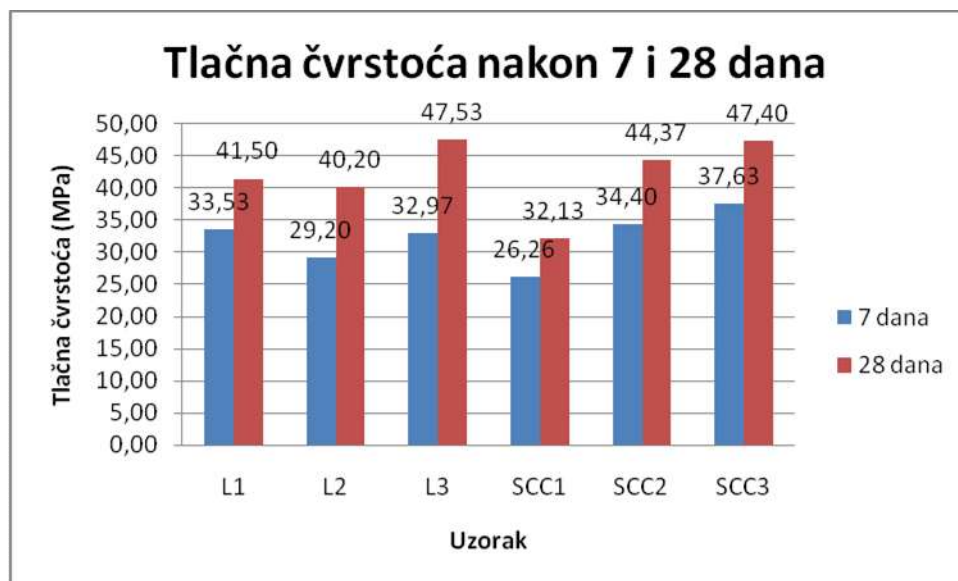


Slika 8.2: Grafički prikaz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće betona nakon 7 i 28 dana

Analizom tlačne čvrstoće betona pojedinih betonskih uzoraka na slici 8.2., vidljivo je da beton L5 ima ujedno i najveću tlačnu čvrstoću nakon 7 i 28 dana i najveći prirast tlačne čvrstoće u istim vremenskim razmacima. Za očekivati je da će betoni L4 i L5 imati veće čvrstoće od ostalih uzoraka zbog toga što su izrađeni od običnog drobljenog agregata.

Najslabiju čvrstoću nakon 28 dana ima beton L6 kojeg prati i L2 uzorak. Oba su betona istih sastava osim što se beton L6 radio s manjom količinom mljevene opeke i većom količinom silike. Usporedbom se da zaključiti, da mljevena opeka ipak djeluje pozitivno na konačne tlačne čvrstoće, za razliku od rezultata koji su dobiveni u člancima 5.1 [13] i 5.2 [14].

Najmanji prirast čvrstoće je ostvario beton L1. Izrađen je s dodatkom mljevene opeke, bez dodatka silikatne prašine. Međutim, to je mješavina i sa najvećom količinom cementa, pa se očekivala i veća čvrstoća.



Slika 8.3: Grafički prikaz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće L i SCC betona nakon 7 i 28 dana

Na slici 8.3. su prikazane tlačne čvrstoće L i SCC betona. Zanimljiva je razlika u čvrstoćama mješavina L1 i SCC1 koje su sličnog sastava, s razlikom u količini agregata i količini vode. Beton L1 je sadržavao manju količinu vode i agregata, te je rezultirao većom tlačnom čvrstoćom ali i većim prirastom čvrstoće u odnosu na beton SCC1.

Beton SCC2 sa dodatkom kamenog brašna je rezultirao boljim tlačnim čvrstoćama nego beton L2 sa dodatkom silikatne prašine na što je utjecala i veća količina cementa SCC1 betona.

Slične tlačne čvrstoće imaju betoni L3 i SCC3, s time da je veći prirast čvrstoće prisutan kod L3 betona zbog udjela drobljenog agregata u mješavini, a manje količine cementa.

8.2. Dinamički modul elastičnosti

Na temelju dobivenih srednjih vrijednosti brzina ultrazvučnih valova odredio se dinamički modul elastičnosti mješavina prema sljedećoj formuli:

$$E_{din} = \frac{v^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} [GPa]$$

gdje je: v - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

ρ – gustoća betona [kg/m^3]

μ – poissonov koeficijent [$\mu = 0.2$]

Tablica 8.2: Rezultati brzina ultrazvučnog vala očvrslom betona

Brzina ultrazvučnog vala (m/s)		L1	L2	L3	L4	L5	L6
	nakon 7 dana	3544,2	3456,2	4310,3	4859,6	4577,8	3402,2
	nakon 28 dana	3641,8	3593,3	4284,4	4590,3	4303,5	3469,5

Analizom rezultata brzine ultrazvučnog vala nakon 28 dana betoni L2 i L6 se mogu svrstati u dobre betone, a betone L1, L3, L4 i L5 u vrlo kvalitetne betone.

Najveću brzinu nakon 28 dana je postigao beton L4.

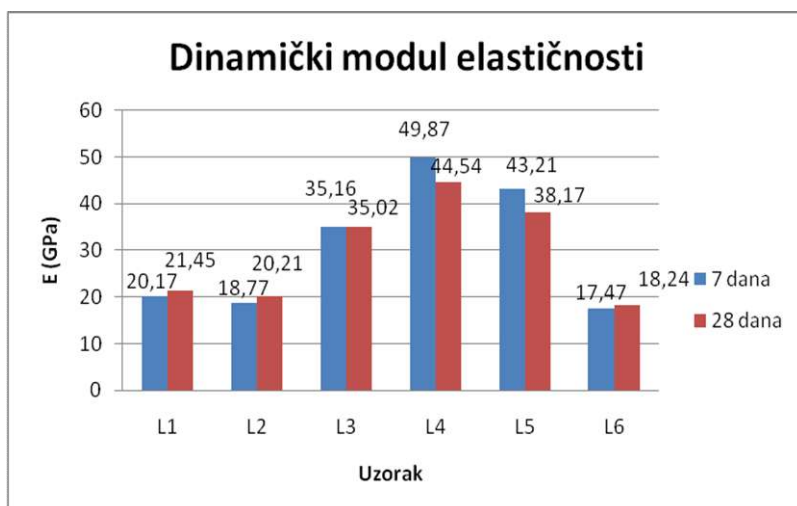
Tablica 8.3: Rezultati gustoća očvrslom betona

Gustoća betona u očvrslom stanju (kg/m^3)		L1	L2	L3	L4	L5	L6
	nakon 7 dana	1784,3	1746,1	2102,9	2346,5	2290,9	1677,1
	nakon 28 dana	1796,9	1739,3	2120,1	2348,6	2289,9	1683,2

U tablicama 8.2. i 8.3. su prikazane vrijednosti brzina ultrazvučnog impulsa i gustoća betona koje su potrebne pri proračunu dinamičkog modula elastičnosti betona.

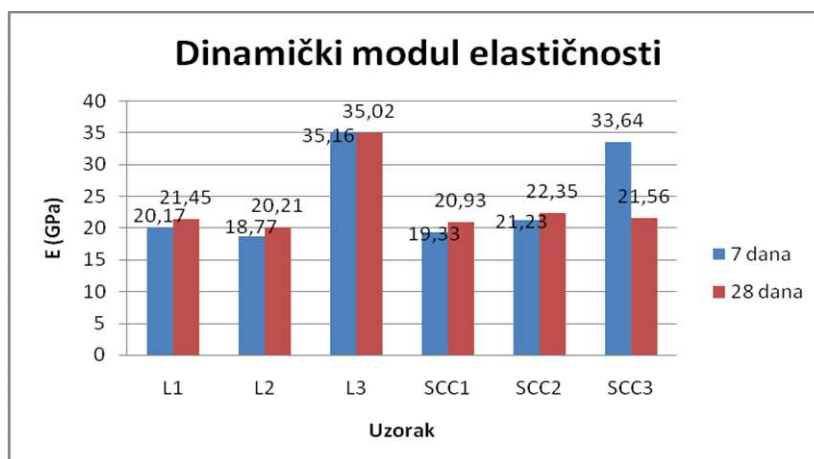
Tablica 8.4: Rezultati dinamičkog modula elastičnosti očvrslom betona

Dinamički modul elastičnosti (Gpa)		L1	L2	L3	L4	L5	L6
	nakon 7 dana	20,17	18,77	35,16	49,87	43,21	17,47
	nakon 28 dana	21,45	20,21	35,02	44,54	38,17	18,24



Slika 8.4: Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti nakon 7 i 28 dana

Izračunom je dobiven najveći dinamički modul elastičnosti kod mješavine L4 iako je najveću tlačnu čvrstoću imao beton L5.



Slika 8.5: Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti L i SCC betona nakon 7 i 28 dana

Dinamički modul elastičnosti mješavine SCC3 nakon 7 dana je previsok, pa je moguće da je došlo do pogreške prilikom mjerenja. Ostale mješavine imaju slične priraste rezultata. Najveću vrijednost dinamičkog modula elastičnosti ima mješavina L3 zbog udjela drobljenog agregata i većeg maksimalnog zrna u odnosu na ostale mješavine ($D = 16 \text{ mm}$).

9. ZAKLJUČAK

Jedno od najvećih izazova s kojim se suočava građevinska djelatnost je izvršiti projekte u skladu s prirodom. Posljednjih godina potražnja za građevinskim materijalima je strahovito narasla, a time i količina građevinskog otpada. Glavno načelo kvalitetnog gospodarenja otpadom je u smanjivanju masovne proizvodnje novog, pronalaženju načina za recikliranjem i ponovnu uporabu postojećeg te sigurnim i ekološki prihvatljivim odlaganjem neiskorištenog otpada.

U ovom istraživanju se kao filer samozbijajućem laganom betonu koristila mljevena opeka frakcije ≤ 0.04 mm. Pratila su se svojstva takvog betona sa različitim omjerima agregata, vode, silikatne prašine. Uspoređivala su se svojstva betona ovog istraživanja sa betonima iz članka 5.6. u kojem se također koristila mljevena opeka ali dvaju frakcija: jedna kao punilo, druga kao dio agregata. Cilj je poboljšati svojstva samozbijajućeg betona s dodatkom mljevene opeke, pa se traže optimalni načini njene primjene za tu svrhu.

Provedena su laboratorijska ispitivanja na 6 različitih sastava betona, s razlikom u vrsti agregata i prisutnosti silikatne prašine, uz variranje međusobnih omjera.

Iz rezultata ispitivanja se može zaključiti sljedeće:

- Najbolja svojstva kod analize rezultata rasprostiranja slijeganjem je pokazala mješavina s najvećom količinom mljevene opeke, bez silikatne prašine i najmanjom količinom agregata u odnosu na druge mješavine.
- Najbolje rezultate tečenja je pokazala mješavina sa drobljenim agregatom koja je, isto tako, pokazala loša svojstva rasprostiranja i sposobnosti prolaza betona kroz prepreke.
- Rezultati ispitivanja L-kutijom su zadovoljavajući samo kod mješavine s najvećom količinom mljevene opeke, bez silikatne prašine. Najlošija svojstva je pokazala mješavina sa drobljenim agregatom. Mješavina nije popunila L kutiju i nije pokazala sposobnost ni popunjavanja ni zaobilaženja prepreka.
- Nijedna mješavina nije zadovoljila kriterij ispitivanja J-prstenom. I kod ovog ispitivanja najveće blokiranje je imala mješavina s dodatkom drobljenog agregata i manjom količinom punila.

- Ispitivanjem tlačne čvrstoće vidljivo je da betoni s drobljenim agregatom imaju i veće čvrstoće. Kod betona sa liapor agregatom se najbolje pokazao beton sa najvećom količinom mljevene opeke.
- Odabir krivulje za prirodni agregat u CBI metodi, pri proračunu potrebnog volumena paste, nije dao očekivane rezultate. Trebalo bi razmisliti o uvođenju dodatne krivulje za lagani agregat.

Kod samozbijajućih betona sa isključivo laganim agregatom, najbolja se pri svim ispitivanjima pokazala mješavina koja sadrži najveću količinu mljevene opeke, najmanju količinu agregata i koja ne sadrži silikatnu prašinu. Pokazala je dobra svojstva rasprostiranja, popunjavanja i zaobilaženja prepreka. Takvoj mješavini se jedino mora poboljšati tečenje dodavanjem modifikatora viskoznosti.

Samozbijajući betoni s drobljenim agregatom su dobili najbolje rezultate tlačnih čvrstoća. Mješavina s drobljenim agregatom i većom količinom punila ima i bolja svojstva tečenja. Iako su se dobile stabilne mješavine, ipak nisu zadovoljile kriterije za samozbijajuće betone. Za poboljšanje svojstava samozbijavanja ovakvoga betona trebalo bi promijeniti granulometrijski sastav krivulje kao i međusobne odnose komponenti. Iako su dvije mješavine (jedna s laganim agregatom, druga s drobljenim) pratile preporuke Europskog udruženja EFNARC parametara sastava, pokazalo se da preporuke ne osiguravaju svojstva samozbijajućeg betona.

Mljevena opeka frakcije $\leq 0,04$ mm je pokazala bolje rezultate po pitanju čvrstoća betona u odnosu na rezultate iz prethodnih ispitivanja u laboratoriju. No, u svježem stanju takva mješavina je znatno ljepljivija u odnosu na mješavine prethodnih ispitivanja i stoga je rezultirala većom stopom blokiranja, ali i smanjenom obradljivosti zbog velike viskoznosti. U svrhu poboljšanja tih svojstava potrebno je dodati modifikator viskoznosti mješavini ili povećati volumen paste bez obzira na preporučene vrijednosti parametara sastava mješavine Europskog udruženja EFNARC.

10. LITERATURA

- [1] Igor Gukov: Betonske konstrukcije I (predavanja)
- [2] Juradin S., Krstulović P.: Samozbijajući beton, Građevinski materijali II
- [3] Parviz Ghoddousi, Amir Masoud Salehi: Utjecaj sastava mješavine samozbijajućeg betona na robusnost, Građevinar 67 (2015) 1, 1-9
- [4] Nina Štirmer, Ivana Banjad Pečur: Projektiranje sastava samozbijajućeg betona, Građevinar 61 (2009) 4, 321-329
- [5] Katarina Grbeša: Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrsllog SCLC-a; Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2014.
- [6] Masahiro Ouchi, Makoto Hibino: Development, applications and investigations of Self-Compacting Concrete
- [7] Mario Vujica: Samozbijajući ekološki održivi betoni; Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [8] Marina Algušić, Filip Lavriv: Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [9] EFNARC: Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2002.
- [10] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Opeka>
- [11] Ivana Kesegić, Dubravka Bjegović, Ivanka Netinger: Upotreba reciklirane opeke kao agregata za beton, Građevinar 61 (2009) 1, 15-22
- [12] Krstulović P.: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [13] Zine Eddine Abib, Haifa Gaher-Abib, Fattoum Kharchi: Effect of Clay Fines on the Behavior of Self-Compacting Concrete
- [14] Er. Ranjodh Singh, Er. Rohin Kaushik, Er. Gurniwaz Singh: Study of Self Compacting Concrete Using Brick Dust and Marble Powder
- [15] Mounir M. Kamal, Mohamed A. Safan, Zeinab A. Etman, Mahmoud A. Abd-elbaki: Effect of Polypropylene Fibers on Development of Fresh and Hardened Properties of Recycled Self-compacting Concrete

- [16] Kamal M. M., Safan M. A., Etman Z. A. and Eldaboly E. A.: Evaluating the Prolonged Properties of Fresh Self-Compacting Concrete Incorporating Recycled Aggregates
- [17] Sharef Farrag, Sherif Yehia: Impact of Mix Preparation on Strength and Workability of High Strength Self-Consolidated Lightweight Concrete
- [18] Sandra Juradin and Katarina Grbeša: Influence of ground clay brick on the properties of fresh and hardened Self Compacting Lightweight Concrete (SCLC)
- [19] <http://www.cemex.hr/>
- [20] <http://korak.com.hr/korak-046-lipanj-2014-liapor-lagane-ispune-i-nasipi-u-strobnim-i-podnim-konstrukcijama/>
- [21] BIBM,CEMBUREAU,ERMCO,EFCA,EFNARC: The European Guidelines for Self Compacting Concrete, SCC 028
- [22] Jovo Beslać, Josip Brajdić, Karla Štemberga: Beton jučer, danas i sutra; Hrvatski savez građevinskih inženjera, Sabor hrvatskih graditelja 2008, Cavtat, 6.-8. studenog 2008.