

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Miketič, A., 2013. Samozgoščevalni betoni z agregatom iz ekspandirane gline. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V.): 74 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Miketič, A., 2013. Samozgoščevalni betoni z agregatom iz ekspandirane gline. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V.): 74 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

ALEŠ MIKETIČ

**SAMUZGOŠČEVALNI BETONI Z AGREGATOM IZ
EKSPANDIRANE GLINE**

Diplomska naloga št.: 493/SOG

**SELF - COMPACTING CONCRETES WITH EXPANDED
CLAY AGGREGATE**

Graduation thesis No.: 493/SOG

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Član komisije:

izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

Ljubljana, 25. 10. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Aleš Miketič izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom: »Samozgoščevalni betoni z agregatom iz ekspandirane gline«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 11. 10. 2013

Aleš Miketič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 620.173:691.3(043.2)

Avtor: Aleš Miketič

Mentor: izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Naslov: Samozgoščevalni betoni z agregatom iz ekspandirane gline

Tip dokumenta: Dipl. nal. – VSŠ

Opis in oprema: 74 str., 21 sl., 46 pregl., 23 graf.

Ključne besede: samozgoščevalni lahko agregatni beton, razlez s posedom, plastična viskoznost, napetost na meji tečenja, prostorninska masa, tlačna trdnost

Izvleček:

V sklopu diplomske naloge sem opravljal preiskave na svežih samozgoščevalnih lahko agregatnih betonskih mešanicah. Najprej sem pregledal standarde in priporočila glede sestave in tehnologije njihove izdelave. Na podlagi priporočil sestave in mešanja sem zasnoval samozgoščevalne (»v nadaljevanju SCC«) mešanice z lahkim agregatom, in sicer z »low density« in »high density« ekspandirano glino s tržnim imenom Liapor. Osredotočil sem se le na lastnosti svežih lahkih SCC betonov. Po končanih preiskavah in analizi rezultatov preiskav sem primerjal mešanice lahkega SCC betona, izdelane z »low density« in »high density« lahkim agregatom.

Reološke preiskave svežih betonov so vsebovale preiskavo razleza s posedom (slump flow test) in preiskavo z reometrom Con Tec Viscometer 5. Ciljna konsistenca za SCC mešanice je bila okrog 300 mm pri mini razlezu s posedom in 660 do 750 mm (SF2) pri standardnem razlezu s posedom. Na vseh mešanicah sem z reometrom izmeril še plastično viskoznost in strižno napetost na meji tečenja. Preiskave sem izvajal takoj po zamešanju ter v izbranih časovnih intervalih do ene ure po zamešanju. S preiskavami sem želel ugotoviti, kako sprememba sestavin betonske mešanice vpliva na reološke lastnosti betona in kakšni so reološki parametri, ki zagotavljajo stabilnost lahko agregatne SCC mešanice. Ker je lastna teža materiala eden ključnih lastnosti lahko agregatnih betonov, sem meril tudi prostorninsko maso sveže betonske mešanice. Na strjenih betonih pa sem določal le tlačno trdnost.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 620.173:691.3(043.2)

Author: Aleš Miketič

Supervisor: Asocc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D.

Title: Self compacting concrete with expanded clay aggregate

Document Type: Graduation Thesis-Higher professional studies

Notes: 74 p., 21 fig., 46 tab., 23 graph.

Keywords: self compacting lightweight concrete, slump flow, plastic viscosity, yield stress, fresh concrete density, compressive strength

ABSTRACT

As part of my diploma thesis I carried out tests on fresh self-compacting lightweight concrete mixtures. First, I reviewed standards and recommendations regarding the concrete composition and production technology. Based on the recommendations for the composition and mixing I designed self-compacting mixtures (SCC) with lightweight aggregate, i.e. with low-density and high-density expanded clay grains carrying a brand name Liapor. I focused only on properties of fresh SCC mixtures. After tests and analyses of the obtained results, I compared the mixtures of low-density SCC lightweight concrete and high-density SCC lightweight concrete.

Rheological research included slump flow test and a tests carried out with a rheometer Con Tec Viscometer 5. The target consistency of the SCC mixtures was about 300 mm when using mini slump-flow test and between 660 and 750 mm (SF2) when using standard slump-flow test. On the SCC mixtures I also measured plastic viscosity and yield stress. The measurements were carried out in set time intervals up to one hour after the mixing. With the tests I wanted to find out the influence of change in SCC mixture composition on the rheological properties of the mixture and the range of rheological parameters that assure stable light SCC mixture. Since the density is one of keys parameters of lightweight SCC mixtures I also measured the density of the concrete in fresh state. As far as hardened concrete is concerned, I only determined its compressive strength.

ZAHVALA

Posebej se zahvaljujem mentorici, izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov, za vse strokovne nasvete pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvalil bi se tudi svojim staršem, ker so me podpirali v vseh letih študija, tudi ko je bilo najtežje. Posebna zahvala gre moji ženi Tadeji za potrpežljivost in spodbudne besede, ko sem jih najbolj potreboval.

KAZALO

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD.....	1
2 OSNOVNO O LAHKEM AGREGATNEM BETONU	2
2.1 Primerjava lahkega agregatnega betona z normalno težkim betonom	3
2.2 Samozgoščevalni lahki agregatni beton (SCLC)	4
2.3 Osnovni uporabljeni materiali za SCLC.....	6
2.3.1 Splošno o lahkem agregatu	6
2.3.1.1 Pridobivanje lahkega agregata iz ekspandirane gline s tržnim imenom Liapor	7
2.3.1.2 Kakovost in lastnosti lahkega agregata iz ekspandirane gline	8
2.3.2 Voda	10
2.3.3 Cement.....	10
2.3.4 Dodatki	11
2.3.4.1 Kemijski dodatki	11
2.3.4.2 Mineralni dodatki	13
3 REOLOGIJA SVEŽIH SCLC MEŠANIC.....	14
3.1 Uvod v reologijo	14
3.2 Vpliv posameznih sestavin betona na reološke lastnosti sveže mešanice	15
4 PROJEKTIRANJE MEŠANICE SAMOZGOŠČEVALNEGA LAHKO AGREGATNEGA BETONA.....	16
4.1 Navodila za pripravo in mešanje SCLC mešanic.....	16
4.2 Sestava SCLC mešanic in postopek mešanja	19
4.2.1 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8	21
4.2.2 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek kamena moka.....	22
4.2.3 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek elektrofiltrski pepel.....	24
4.2.4 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, ki je namočen.....	24
4.2.5 Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8	25
4.2.6 Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8, ki je namočen	25

5 LASTNE PREISKAVE NA SVEŽIH LAHKO AGREGATNIH SAMOZGOŠČEVALNIH BETONIH	28
5.1 Uvod in cilji preiskav	28
5.2 Metode preiskav.....	28
5.2.1 Določanje konsistence z razlezom s posedom (Slump flow)	29
5.2.2 Preizkus z reometrom	31
5.2.3 Določanje vpijanja vode s piknometrom in določanje površinske vode.....	33
5.2.4 Sejalna analiza.....	38
5.2.5 Določanje prostorninske mase sveže betonske mešanice	43
5.2.6 Tlačna trdnost betonskih vzorcev.....	44
6 ANALIZA REZULTATOV	47
6.1 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8	47
6.1.1 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek kamena moka.....	51
6.1.2 Mešanica z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek elektrofiltrski pepel	56
6.1.3 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, ki je namočen	56
6.2 Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8	59
6.2.1 Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8, ki je namočen	60
6.3 Tlačna trdnost	64
7 ZAKLJUČEK	70
VIRI	72

KAZALO SLIK

Slika 1: Uporaba samozgoščevalnega lahkega agregatnega betona v montažni industriji. [10].....	4
Slika 2: Uporabljeni material pri raziskavah - Liapor frakcija 1/8. [7].....	8
Slika 3: Glinena kroglica lahkega agregata Liapor. [7]	8
Slika 4: Dve vrsti namakanja lahkega agregata pred mešanjem. Postopek za oblikovanje mešanice SCLC, ki temelji na mokri packing metodi. [10].....	17
Slika 5: Stopnja vlage v agregatu: 1. Osušen v peči (ang. Oven dry), 2. Zračno suh (ang. Air dry), 3. zasičen z vlago (ang. Saturated, surface dry), 4. vlažen ali moker (ang. Damp or wet). [19]	18
Slika 6: Mali planetarni mešalec v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na FGG.....	19
Slika 7: Velik protitočni mešalec v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na FGG kapacitete 50 l...19	19
Slika 8: Lahki agregat Liapor je splaval na vrh mešanice L2.....	22
Slika 9: Pri mešanici W3 se je na površini penilo.	26
Slika 10: Mini razlez s posedom (mini slump flow) preizkus mešanice iz malega mešalca (mali stožec).....	30
Slika 11: Potek preizkusa razleza s posedom (slump flow) mešanic iz velikega mešalca (veliki stožec). Merjenje razleza v dveh ortogonalnih (pravokotnih) smereh.	31
Slika 12: Reometer Con Tec Viscometer 5, s katerim smo preizkušali betonske mešanice v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na FGG.	33
Slika 13: Sestavni deli piknometra. [33]	34
Slika 14: Potek metode s piknometrom.	35
Slika 15: Potek metode za določitev površinske vlažnosti lahkega agregata Liapora.	36
Slika 16: Sistem sit z različnimi velikostmi in naprava za sejanje.	41
Slika 17: Določanje sveže prostorninske mase betona na tehtnici.....	44
Slika 18: Preša za določanje tlačne trdnosti betona v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na FGG.	46
Slika 19: Primer zdrobljenega porušenega preizkušanca po tlačni obremenitvi.	46
Slika 20: Primer segregacije lahkega agregata Liapor pri mešanici V2.....	53
Slika 21: Vzorec mešanice W1.....	67

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Specifikacija samozgoščevalnega betona po JSCE standardu. [15].....	5
Preglednica 2: Zahteve za nasuto prostorninsko maso lahkih agregatov iz ameriških standardov ASTM C330 in C 331. [5]	9
Preglednica 3: Zveza med v/c razmerjem in tlačno trdnostjo betona. [19]	10
Preglednica 4: Posebne zahteve za SP (pri enaki konsistenci). [24]	12
Preglednica 5: Posebne zahteve za SP (pri enakem v/c razmerju). [24]	13
Preglednica 6: Receptura mešanic z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8.....	21
Preglednica 7: Receptura mešanic z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek kamena moka.....	23
Preglednica 8: Receptura mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek elektrofiltrski pepel.....	24
Preglednica 9: Receptura mešanic z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, ki je namočen.	24
Preglednica 10: Receptura mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8.....	25
Preglednica 11: Receptura mešanic z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8, ki je namočen.	26
Preglednica 12: Razredi preskusnih metod svežega betona (Tattersall, 1991). [27]	28
Preglednica 13: Razredi preizkusov svežega betona (National Institute of Standards and Technology - NIST). [27]	29
Preglednica 14: Vpijanje vode pri preiskavi s piknometrom 92.....	36
Preglednica 15: Vpijanje vode pri preiskavi s piknometrom 86.....	37
Preglednica 16: Velikosti sit za določitev zrnivosti agregata. [18]	39
Preglednica 17: Delež frakcije za V Liapor 1/8.....	41
Preglednica 18: Delež frakcije za W Liapor 1/4.....	42
Preglednica 19: Delež frakcije za pesek 0/4.....	42
Preglednica 20: Klasifikacija lahkih betonov. [17].....	43
Preglednica 21: Zahteve za konstrukcijski lahki beton. [8].....	45
Preglednica 22: Razredi tlačne trdnosti za lahki beton. [17]	45
Preglednica 23: Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8.	48
Preglednica 24: Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek kamena moka.	52
Preglednica 25: Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek elektrofiltrski pepel.	56
Preglednica 26: Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, ki je namočen.....	57
Preglednica 27: Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8.	59
Preglednica 28: Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8, ki je namočen.....	61
Preglednica 29: Mešanica V10, zamešana 13. 3. 2013, datum tlačnega preskusa: 20. 3. 2013. Tlačna trdnost po 7 dneh.....	64
Preglednica 30: Mešanica V10, zamešana 13. 3. 2013. Datum preskusa: 10. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.	65
Preglednica 31: Mešanica V12, zamešana 14. 3. 2013. Datum preskusa: 21. 3. 2013. Tlačna trdnost po 7 dneh.....	65
Preglednica 32: Mešanica V12, zamešana 14. 3. 2013. Datum preskusa: 11. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.	65

Preglednica 33: Mešanica V7, zamešana 15. 3. 2013. Datum preskusa: 22. 3. 2013. Tlačna trdnost po 7 dneh.....	65
Preglednica 34: Mešanica V7, zamešana 15. 3. 2013. Datum preskusa: 12. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.	66
Preglednica 35: Mešanica V72, zamešana 18. 3. 2013. Datum preskusa: 27. 3. 2013. Tlačna trdnost 7 dneh.	66
Preglednica 36: Mešanica V72, zamešana 18. 3. 2013. Datum preskusa: 15. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.	66
Preglednica 37: Mešanica V73, zamešana 18. 3. 2013. Datum preskusa: 27. 3. 2013. Tlačna trdnost po 7 dneh.	66
Preglednica 38: Mešanica V73, zamešana 18. 3. 2013. Datum preskusa 15. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.	67
Preglednica 39: Mešanica W1, zamešana 30. 4. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 20 dneh.	67
Preglednica 40: Mešanica W5, zamešana 14. 5. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 6 dneh.	68
Preglednica 41: Mešanica W4, zamešana 13. 5. 2013. Datum preskusa 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 7 dneh.	68
Preglednica 42: Mešanica W2, zamešana 7. 5. 2013. Datum preskusa 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 13 dneh.	68
Preglednica 43: Mešanica SC, zamešana 8. 5. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 12 dneh.	68
Preglednica 44: Mešanica SC ponovitev, zamešana 8. 5. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 12 dneh.	69
Preglednica 45: Mešanica B1, zamešana 15. 5. 2013. Datum preskusa 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 5 dneh.	69
Preglednica 46: Mešanica B2, zamešana 20. 5. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih.	69

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primer diagrama navor-hitrost vrtenja.....	15
Grafikon 2: Krivulja zrnivosti za V Liapor 1/8.....	42
Grafikon 3: Krivulja zrnivosti za W Liapor 1/4.....	42
Grafikon 4: Krivulja zrnivosti za pesek 0/4.....	43
Grafikon 5: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanic osnovno in osnovno2.....	49
Grafikon 6: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice L1 in mešanice V7.....	49
Grafikon 7: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice V71.....	50
Grafikon 8: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice V72.....	50
Grafikon 9: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice V73.....	51
Grafikon 10: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanic V2, V4 in V6.....	54
Grafikon 11: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice V8.....	54
Grafikon 12: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice V10.....	55
Grafikon 13: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice V12.....	55
Grafikon 14: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice V3.....	56
Grafikon 15: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanic V11 in V5.....	58
Grafikon 16: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice SC (mešanico smo v roku 5 minut preizkusili 3- krat).....	58
Grafikon 17: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice B1 (mešanico smo v roku 5 min preizkusili 3- krat).....	59
Grafikon 18: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W1.....	60
Grafikon 19: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W2 (pri času "0" takoj trikratna meritev v roku 5 min).....	62
Grafikon 20: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W2 (pri času 30 min trikratna meritev v roku 5 min).....	62
Grafikon 21: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W3 (pri času "0" trikratna meritev v roku 5 min).....	63
Grafikon 22: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W3 (pri času 30 minut trikratna meritev v roku 5 minut).....	63
Grafikon 23: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W5 (trikratna meritev v roku 5 min).....	64

OKRAJŠAVE:

Oznaka	Razlaga
SCC.....	Samozgoščevalni beton (self-compacted concrete)
SCLC.....	Samozgoščevalni lahko agregatni beton (self-compacted lightweight concrete)
SP.....	Superplastifikator
V/C.....	Vodo-cementno razmerje

1 UVOD

Cilj diplomske naloge je bil pridobiti celovito znanje o projektiranju samozgoščevalnega lahkega betona (»v nadaljevanju SCLC«) z določenimi lastnostmi v svežem in strjenem stanju. Osredotočili smo se na lahki agregat v obliki ekspanzirane gline s tržnim imenom Liapor. [1]

Povpraševanje po lahkem betonu se stalno povečuje zaradi ekonomskih in praktičnih razlogov. Uporaba lahkega agregata za izdelavo lahkega betona izboljša energetska učinkovitost stavb, zmanjša stroške življenjskega cikla obratovanja in zmanjša okoljske vplive transporta materiala in gradnje. Prednosti, ki jih prinaša uporaba lahkega agregata, so znane že skoraj 100 let. Tovrstni agregati omogočijo take karakteristike betonskega materiala, da ga danes uvrščamo med »trajnostne« materiale. Lahki agregat je dal prispevek k trajnostnosti konstrukcij in gradbenih projektov že veliko prej, preden je zeleno gibanje prišlo v ospredje. [2, 3]

V zadnjih letih je glavni namen uporabe umetno proizvedenih lahkih agregatov, še posebej agregatov, ki so stranski produkt določene proizvodnje, da z njimi zamenjamo naravni agregat v betonu in tako zmanjšamo potrebo oziroma povpraševanje po naravnem agregatu. Če sta lahki agregat in samozgoščevalni beton (»v nadaljevanju SCC«) kombinirana, lahko tak beton okrajšano imenujemo SCLC – uporaba SCLC lahko pripomore k reševanju problema pomanjkanja naravnega agregata ali varovanja naravnih virov. [4]

V diplomski nalogi smo uporabili lahki agregat iz ekspanzirane gline (glinopor), ki ima, kot gradbeni proizvod, tržno ime Liapor. Pri projektiranju svežih betonskih mešanic smo preverili različne načine zasnov in mešanja in iskali pravilno recepturo sestavin, pri kateri je bila mešanica stabilna ter imela dobro obdelovalnost. Prav tako smo opozorili na problematiko zasnov mešanic z lahkim agregatom Liapor, ki ima zelo visoko zmožnost absorpcije vode.

V sklopu preiskav preverjanja lastnosti sveže mešanice smo opravili preizkus merjenja razleza s posedom (slump flow), s piknometrom smo določili vpijanje vode lahkega agregata ter z reometrom merili plastično viskoznost ter strižno napetost na meji tečenja. Na koncu preiskav smo izmerili še tlačno trdnost preizkušancev po 7-ih in 28-ih dneh.

2 OSNOVNO O LAHKEM AGREGATNEM BETONU

Konstruktivski lahki agregatni beton, narejen s konstrukcijskim lahkim agregatom, kot je opredeljeno v ASTM C 330: beton ima minimalno 28-dnevno tlačno trdnost 17 MPa, njegova prostorninska masa se giblje med 1120 in 1920 kg/m³ in je sestavljen ali izključno iz lahkih agregatov ali pa v kombinaciji lahki in normalno težki agregat. [5]

Lahki beton je določen s SIST EN 206-1:2003 kot beton, katerega suha gostota ni manjša od 800 kg/m³ in ne večja od 2100 kg/m³. Proizvaja se z uporabo lahkega agregata v celotni ali le delni količini. Glavna prednost uporabe lahkega betona je zato zmanjšanje lastne teže konstrukcije za 15 % ali več. [6]

Lahki beton je sestavljen iz cementa, agregata, vode in kemijskih ter mineralnih dodatkov. Na splošno je uporabljen za zmanjšanje lastne teže, ki pogosto izboljša funkcionalnost, arhitekturno izražanje in/ali gradnjo konstrukcije. Lahki agregat optimizira konstrukcijsko učinkovitost z izboljšanjem trdnosti glede na masno razmerje. [2]

Praktično se lahko vsak gradbeni projekt realizira z uporabo mešanice lahkega betona. Ta sodoben gradbeni material je idealen za monolitno gradnjo. V preteklosti so se ob izdelovanju lahkega betona pojavljale težave med procesom črpanja. [7]

Takojšnja prednost uporabe lahkega agregatnega betona je zmanjšanje lastne teže, ki lahko posledično vodi do prihrankov (varčevanja) pri armaturi ali kablilih za prednapenjanje, transportu, zmanjšanju opaževanja. Za konstrukcijsko uporabo je najbolj običajno, da zamenjamo samo grobi agregat z lahkim agregatom, z novo generacijo kemijskih dodatkov ter skrbnim upravljanjem z materiali pa obstajajo nadalje možnosti za zmanjšanje teže z uporabo obeh – grobega in finega lahkega agregata. [6]

Konstruktivski lahki beton si kot konstrukcijski beton vsekakor zasluži več pozornosti, razen glede stroškov celotnega industrijskega dela. Beton je narejen iz lahkih celičnih agregatov, tako da je njegova lastna teža približno 2/3 lastne teže betona, ki je narejen s tipičnimi naravnimi agregati. Zato, ker lahko visoko porozni agregati bistveno znižajo trdnost betona, določene specifikacije za lahko agregatni beton priporočajo preizkus minimalne 28-dnevne tlačne trdnosti, da se zagotovi, da je beton ustrezne kakovosti. Tako ACI 213R-79, priročnik za konstrukcijski lahko agregatni beton, določa, da mora beton imeti 28-dnevno tlačno trdnost, ki presega 17 MPa in da prostorninska masa ne sme presežati 1850 kg/m³. Z vidika obdelovalnosti in drugih lastnosti je normalna praksa, da uporabimo normalno težek pesek kot fini agregat, in da omejimo nazivne velikosti lahkih grobih agregatov na največ 3/4 palca ali 19 mm. Specifikacije ASTM prav tako vsebujejo zahteve v zvezi z razvrstitvijo škodljivih snovi in izdelavo betona, odvisno od lastnosti agregata, kot so trdnost, teža na enoto, krčenje zaradi sušenja in trajnost betona zaradi vsebnosti lahkega agregata. [8]

Treba je vedeti, da je prednost uporabe lahkega betona po svetu izkoriščena predvsem v proizvodnji montažnih betonskih elementov in prefabriciranih panelov. Zaradi manjših stroškov izdelave, prevoznih in konstrukcijskih stroškov, je tak betonski proizvod idealen za tipe konstrukcijskih elementov, kot so betonski stenski paneli. [8]

2.1 Primerjava lahkega agregatnega betona z normalno težkim betonom

V skladu z ACI 213R-79 običajno temelji uporaba lahkega agregatnega betona v konstrukciji na nižjih skupnih stroških konstrukcije. Medtem ko bo lahki beton stal več kot normalno težki beton na m³, bo konstrukcija stala manj kot rezultat zmanjšanja lastne teže in nižjih osnovnih stroškov. [8]

Manjša prostorninska masa in višje izolacijske sposobnosti so najbolj očitne značilnosti lahkih agregatnih betonov, po katerih se razlikujejo od običajnega normalno težkega betona. [9]

Pomembna razlika med lahkim betonom v primerjavi z običajnim betonom, je visoka sposobnost vpijanja vode lahkega agregata, ki ima pomemben vpliv na obnašanje lahkega betona med mešanjem, črpanjem in vgrajevanjem. [1]

Lastnosti sveže mešanice, narejene z lahkim agregatom, in dejavniki, ki vplivajo nanje, so v bistvu enaki kot pri normalno težkem betonu. Posledica nizke prostorninske mase in značilnosti grobe teksture poroznega agregata, zlasti v zdrobljenem stanju, je ta, da potrebuje obdelovalnost betona posebno pozornost. Izpostavimo naj dva, najbolj pomembna vidika ali problema tovrstnih betonov. Prvi je nevarnost segregacije in splavanje lahkih agregatnih zrn na površino betonske mešanice. Drugi je velika sposobnost absorbiranja vode med mešanjem, lahko pa tudi med transportom in vgrajevanjem, zaradi česar se konsistenca betona s časom spreminja. Ta problem lahko zmanjšamo s predhodnim namakanjem agregata ali njegovim vlaženjem. [8]

Lahki beton je daleč bolj učinkovit kot običajni normalni beton. Kot splošno velja pravilo, da izpolnjuje tako zahteve za nosilnost, varnost, toplotno izolativnost in zaščito pred vlago, kot tudi za požarno odpornost in zvočno zaščito bistveno bolje kot običajni normalni beton. Te prednosti izhajajo tako iz lastnosti lahkih agregatov, kot so na primer kroglice ekspandirane gline Liapora, kot iz sestave mešanice, ki se lahko prilagodi kateremu koli gradbenemu projektu. [7]

Zaradi z zrakom napolnjenih por lahkega agregata ima lahki beton nizko svežo prostorninsko maso mešanice, praviloma pod 2000 kg/m³. Tako je ta gradbeni material ne samo lažji od običajnega normalnega betona, temveč tudi razpolaga s fizikalnimi lastnostmi stavbe, ki jih običajni beton ne omogoča: ustrezna trdnost, nižja prostorninska masa in večja odpornost proti vodi in zmrzali. Dodatna prednost materiala je boljše toplotno izolativnost. Kar se tiče toplotne prevodnosti, lahki beton iz Liapora dosega najvišje vrednosti do $\lambda = 0,12 \text{ W/(m K)}$. Tudi vrednosti $\lambda = 0,8 \text{ W/(m K)}$, ki je določena kot zgornja vrednost za lahke betone, je še vedno bistveno boljše od vrednosti za običajni

beton, ki se giblje okrog $\lambda = 2,1 \text{ W/(m K)}$. Poleg tega lahki beton iz Liapora dosega trdnosti med 1 in 85 MPa. Idealen je za konstrukcijske elemente stavb. [7]

Uporaba SCLC je tipična predvsem pri proizvodnji določenih predhodno izdelanih elementov za montažne konstrukcije. Pojavljajo se mnogi izzivi [10]:

- projektiranje mešanice SCLC je bolj kompleksno kot pri normalno težkem betonu;
- zmanjšanje stroškov in
- večje zavedanje trga. Trenutno primanjkuje njegove široke uporabe.



Slika 1: Uporaba samozgoščevalnega lahko agregatnega betona v montažni industriji. [10]

Vseeno pa lahki beton zahteva posebno metodo za sestavo mešanice, ki se precej razlikuje od običajnega betona. Če bi uporabili metodo za običajen beton, bi taka betonska mešanica segregirala, poleg tega pa bi imel beton bistveno nižjo trdnost zaradi uporabe visoko poroznega agregata nizke trdnosti. Lahki beton je lahko zasnovan na primer po metodi za sestavo SCC mešanice z visoko zmogljivostjo, s povečanjem plastične viskoznosti v svežem stanju, s čimer se izognemo segregaciji betonske mešanice in stabiliziramo njeno kakovost, istočasno pa omogočimo izdelavo betona z več kot 35 MPa tlačne trdnosti. Ker je odličen glede odpornosti proti segregaciji in glede visoke sposobnosti tečenja v svežem stanju, je SCC znan kot beton, ki lahko zapolni opaž poljubne oblike samo zaradi delovanja lastne teže in brez dodatnega zgoščevanja. [11]

2.2 Samozgoščevalni lahki agregatni beton (SCLC)

Glavna ideja za razvoj SCC je bila, da se razvije robusten beton, ki je manj občutljiv na to, kako kompetentna delovna sila je na razpolago na gradbišču. Druga ideja je bila, da se izboljšajo delovni pogoji na gradbišču in v obratih za proizvodnjo predizdelanih betonskih elementov (hrup, prah, vibracije). Skozi zadnja leta je SCC na področju industrije montažnih betonskih proizvodov naredil revolucionaren korak naprej, uporaba SCC na gradbišču za monolitne konstrukcije pa je še vedno obravnavana z zadržkom. To je predvsem posledica variabilnih pogojev na gradbišču, bolj kompleksne kontrole sestave mešanice ter nestrinjanja glede preskusnih metod za merjenje lastnosti betona v svežem stanju na gradbišču. Danes je poglavitna naloga razvoj takšne mešanice SCC, ki bo manj občutljiva na odstopanja v lastnostih sestavin ter na zunanje vplive. [12]

SCLC je neke vrste visoko zmogljiv beton, ki se je razvil iz SCC. SCLC združuje dobre lastnosti lahkega agregatnega betona in SCC. Ne potrebuje zunanjega vibriranja, da zapolni opaže in obviije armaturo brez izcejanja ali segregacije. Obdelovalnost je ključni dejavnik, ki vpliva na uporabo in fizikalno-mehanske lastnosti SCLC, saj je pri SCLC zaradi praktične uporabe potrebno imeti visoko pretočnost, sposobnost deformiranja, dobro sposobnost polnjenja in zmerno odpornost proti segregaciji. Različne metode preskušanja in vrednotenja, ki se uporabljajo za SCLC, so podobne tistim, ki se uporabljajo za SCC. [13]

»Bolj tekoče«. To je eden velikih trendov v zadnjih 20 letih na področju sodobnih betonov. Inženirji so hitro ugotovili, da ima zelo velika pretočnost betona dve glavni pomanjkljivosti: Pritisk na opaž je skoraj hidrostatičen in stabilnost betona je precej težko zagotoviti. Beton je namreč večfaznen material. Prostorninske mase številnih sestavin, ki sestavljajo tradicionalno mešanico betona, se gibljejo med 1000 kg/m^3 (voda) in 3200 kg/m^3 (cement). V primeru lahkega betona pa so lahko prisotni celo lažji materiali. S takšno mešanico postane lastna teža betona oziroma gravitacija hitro sovražnik homogenosti. [14]

Projektiranje mešanice SCC v svežem stanju mora zagotoviti zadovoljivo pretočnost, ustrezno sposobnost proti segregaciji, sposobnost zapolnjevanja in tako dalje. Specifikacija SCC betona po standardu JSCE je prikazana v preglednici 1. [15]

Preglednica 1: Specifikacija samozgoščevalnega betona po JSCE standardu. [15]

Razred	1	2	3
Pogoji za konstrukcijo: minimalna svetla razdalja med armaturnimi palicami (mm)	35–60	60–200	≥ 200
Pogoji za konstrukcijo: količina armature (kg/m^3)	≥ 350	100–350	≥ 100
Odpornost proti segregaciji: absoluten volumen grobega agregata na enoto volumna SCC (m^3/m^3)	0,28–0,30	0,30–0,33	0,32–0,35

Kot smo že navedli, lahko SCC beton samo zaradi delovanja lastne teže in njegove sposobnosti tečenja, popolnoma zapolni opaž poljubne oblike, pri tem tesno obviije nameščeno armaturo, se odzrača in znivelira, ne da bi pri tem prišlo do segregacije. Takšne lastnosti svežega SCC omogoča uporaba ustreznih materialov, povečan delež praškastih delcev in dodatek superplastifikatorjev (»v nadaljevanju SP«) v mešanici. Odstranitev zgoščevanja betona z vibriranjem poveča hitrost betoniranja, zmanjša ceno in s tem se poveča tudi produktivnost. [16]

SCC lastnosti bi povečale privlačnost lahko agregatnega betona. Glede na običajno tehnologijo proizvodnje SCC betona pa se pri lahko agregatnem betonu pojavi velik problem. Lahki agregatni delci so porozni in zato vplivajo na sestavo in lastnosti mešanice z vpijanem vode iz mešanice v svežem stanju. Ker je SCC občutljiv na spremembe v sestavi veliko bolj kot običajni, vibriran beton, to povzroči veliko težavo. [12]

2.3 Osnovni uporabljeni materiali za SCLC

"Osnovni materiali ne smejo vsebovati škodljivih primesi v količinah, ki bi lahko poslabšale trajnost betona ali povzročile korozijo armature. Če velja osnovni material za splošno primerne, to ne pomeni, da je primeren v vseh okoliščinah in za vsako sestavo betona (SIST EN 206-1:2003, str. 20)." [17]

"Če ni evropskega standarda za nek določen osnovni material, ki posebej obravnava uporabo tega osnovnega materiala v betonu, ki je skladen z EN 206-1, ali če obstoječi evropski standard ne obravnava določenega proizvoda, ali če osnovni material znatno odstopa od evropskega standarda, se lahko dokaže primernost na podlagi:

- evropskega tehničnega soglasja ter
- ustreznih nacionalnih standardov ali predpisov, veljavnih v kraju uporabe betona (SIST EN 206-1:2003, str. 20)." [17]

2.3.1 Splošno o lahkem agregatu

V evropskem standardu EN 13055-1 so določeni lahki agregati za betone. Ta evropski standard specificira lastnosti lahkih agregatov in lahkih polnilnih agregatov, ki se jih pridobiva s predelovanjem naravnih, industrijskih in recikliranih materialov in mešanic teh agregatov za uporabo v betonu, malti in injekcijski malti za stavbe, ceste in druga gradbena dela. [18]

Evropski standard EN 13055-1 pokriva lahke agregate mineralnega izvora z delci prostorninske mase, ki ne presega 2000 kg/m^3 ali prostorninsko maso, ki ne presega 1200 kg/m^3 . Vključeni so [18]:

- naravni agregati;
- agregati, narejeni iz naravnih materialov in (ali) kot produkt industrijskega procesa;
- agregati kot produkt industrijskega procesa in
- reciklirani agregati.

Specificirane zahteve v standardu mogoče ne bodo ustrezale vsem tipom lahkih agregatov. [18]

V primeru ASTM standardov mora lahki agregat za konstrukcijski beton izpolnjevati zahteve ASTM C 330 standarda, in sicer mora biti prostorninska masa agregata manj kot 1120 kg/m^3 za fini agregat in manj kot 880 kg/m^3 za grobi agregat. Zaradi razlike v trdnosti delcev se bo vsebnost cementa, potrebna

za izdelavo zahtevane trdnosti betona, spreminjala z agregati iz različnih virov. Normalno težki agregati, uporabljeni v lahkem betonu, morajo biti v skladu z ASTM C 33. [5]

Kakovosten lahki agregat vsebuje enakomerno porazdeljen sistem por, ki ima razpon velikosti približno 5 do 300 μm . Pore blizu površine so prepustne in se napolnijo z vodo v prvih nekaj urah do nekaj dni, če so izpostavljene vlagi. Notranje pore pa se napolnijo zelo počasi, potrebnih je več mesecev potopitve, da se približamo nasičenosti. Notranje pore v bistvu niso povezane in majhen delež ostaja nenapolnjen tudi po letih potopitve (ACI 213R - 03). Začetni stroški lahkega agregata na enoto volumna so običajno večji kot pri normalno težkem agregatu. Vendar, ko analiziramo stroške celotne konstrukcije, se večji začetni stroški skoraj vedno vsaj izravnajo, v večini primerov pa pripeljejo do znatnih neto prihrankov. Ti prihranki izhajajo iz zmanjšanja lastne teže betona, kar rezultira v zmanjšanju količine vseh materialov, ki so uporabljeni v konstrukciji, in učinkovitosti dela. [2]

"Agregat je zrnat mineralni material, ki je primeren za uporabo v betonu. Agregati so lahko po nastanku izvora naravni, umetni ali reciklirani iz že uporabljenega materiala za gradnjo.

Lahek agregat je agregat mineralnega izvora, katerega suha gostota zrn, določena po EN 1097-6 je $\leq 2000\text{kg/m}^3$, ali katerega nasipna gostota, določena po EN 1097-3, je $\leq 1200\text{ kg/m}^3$ (SIST EN 206-1:2003, str. 12)."

Industrijsko obdelan agregat je agregat mineralnega izvora, ki je posledica industrijskega procesa, kateri zajema termično ter druge obdelave agregata. Kadar se zahteva, mora biti absorpcija vode lahkih agregatov določena v skladu z EN 1097-6:2000. [17, 18]

2.3.1.1 Pridobivanje lahkega agregata iz ekspandirane gline s tržnim imenom Liapor

Lahki agregat iz ekspandirane gline s tržnim imenom Liapor smo, kot brezplačni vzorec za raziskovalno delo, dobili v podjetju Liapor GmbH & Co. KG, D-91352 Hallerndorf, Avstrija.

Le naravna glina, ki je visoko kakovostna, je primerna za izdelavo tovrstnega agregata. Glina ostaja v naravni surovi obliki pri svojem nadaljnjem preoblikovanju v glinene kroglice. Ogenj je odločilen element v procesu izdelave. Po temeljiti pripravi se da surovo glino v rotacijsko peč s temperaturo 1200 °C. V tem procesu organske sestavine, ki so v glini, zgorijo. Nastanejo keramične kroglice ekspandirane gline z zelo finimi drobnimi porami. Čeprav je ekspandirana glina pridobljena iz naravnega mineralnega materiala, se lahko pri izdelavi teža, velikost in trdnost proizvodov natančno nadzorujejo. [7]

Zaradi naravnih lastnosti ekspandiranega surovega materiala in optimizirane proizvodnje lahko proizvedemo iz samo 1 m^3 gline do 5 m^3 glinenih krogel. Ta učinkovita izraba surovine predstavlja pomemben ekološki vidik. [7]



Slika 2: Uporabljeni material pri raziskavah - Liapor frakcija 1/8. [7]

2.3.1.2 Kakovost in lastnosti lahkega agregata iz ekspandirane gline

Agregat iz ekspandirane gline ima idealno obliko delcev: površina je rahlo hrapava in zaprta. Notranjost zrn ima običajno pravilno fino strukturo por. Kljub temu, da ima agregat majhno težo, vseeno ponuja optimalno trdnost delcev in posledično najboljše pogoje, da je lahko odličen gradbeni material. Liapor je skladen z evropskimi standardi za lahki agregat EN 13055 - 1 in EN 13055 - 2 in z njihovimi nacionalnimi različicami. [7]



Slika 3: Glinena kroglica lahkega agregata Liapor. [7]

Agregat iz ekspandirane gline je učinkovit gradbeni material, ki se ponaša z izjemnimi fizikalnimi gradbenimi lastnostmi. Poleg tega so fine drobne pore lahkih glinenih kroglic neobčutljive na zunanje vplive. Zaradi svoje strukture por in poroznosti so visoko kakovostne glinene kroglice zelo toplotno izolativne in hkrati akumulirajo toploto. Poleg tega notranjost kroglice z zelo finimi drobnimi porami absorbira zvok. [7]

Oblika delcev in struktura površine finega in grobega agregata vplivajo na projektiranje mešanice, predvsem na lastnosti kot je razmerje finega in grobega agregata, vsebnost veziva, potreba po vodi, obdelovalnost in črpnost. [5]

Prostorninska masa nasutega lahkega agregata je zaradi celične strukture delcev nižja za 1/3 do 2/3 kot pri normalno težkem agregatu. Agregati z isto prostorninsko maso delcev imajo lahko zaradi različnega odstotka votlin v nasutem stanju agregatov zelo različne prostorninske mase v nasutem stanju. [5]

Prostorninska masa različnih velikosti frakcij lahkega agregata je običajno odvisna od velikosti delcev, po navadi se poveča, ko se velikost delcev zmanjša. Nekateri delci grobega agregata lahko plavajo na vodi, medtem pa ima lahko material, ki gre skozi sito 0,15 mm, prostorninsko maso, ki se približuje prostorninski masi normalno težkega peska. Lahki agregati potrebujejo večji odstotek bolj finega materiala kot pa normalno težki agregati, da se zagotovi enaka porazdelitev velikosti zrn po prostornini. [19]

Izjave o kakovosti za lahki agregat Liapor, ki je bil uporabljen pri raziskavah [20]:

- V Liapor 1/8 ima prostorninsko maso od 0,60 do 0,70 g/cm³. Teža 1 m³ materiala znaša 400 ± 50 kg.
- W Liapor 1/4 ima prostorninsko maso od 1,25 do 1,35 g/cm³. Teža 1 m³ materiala znaša 750 ± 50 kg.
- W Liapor 4/8 ima prostorninsko maso od 1,15 do 1,25 g/cm³. Teža 1 m³ materiala znaša 625 ± 50 kg.

Preglednica 2: Zahteve za nasuto suho prostorninsko maso lahkih agregatov iz ameriških standardov ASTM C330 in C 331. [5]

Aggregate size and group	Maximum density, lb/ft ³ (kg/m ³)
ASTM C 330 and C 331	
-fine aggregate	70 (1120)
-coarse aggregate	55 (880)
-combined fine and coarse aggregate	65 (1040)

Trdnost lahkih agregatnih delcev se spreminja glede na vrsto in izvor in jo je mogoče izmeriti samo kvalitativno. Nekateri delci so lahko trdni in čvrsti, medtem ko so drugi delci šibki in krhki. [5]

Na podlagi standarda ASTM C127 je absorpcijski test opravljen v 24 urah in lahki agregat običajno absorbira od 5 do 25 % vode glede na suho maso agregata, odvisno od sistema por v agregatu. Normalno težki agregati pa praviloma absorbirajo manj kot 2 % vode. Pomembna razlika je tudi v tem, da je absorbirana voda pri lahkih agregatih tako v notranjosti delcev kot tudi blizu površine, medtem ko je pri normalno težkih agregatih absorbirana voda večinoma blizu površine zrn. Te razlike v absorbiranju vode postanejo pomembne pri mešanju, betoniranju in nadzoru. Voda, ki je absorbirana v notranjost lahkega agregata, ni takoj na razpolago cementu za hidratacijo in zato ne sme biti štet kot del zamesne vode. Po drugi strani pa je skoraj vsa vlaga v naravnem pesku lahko samo vlaga na površini zrn in zato del zamesne vode. [5]

Izdelki iz Liapora se lahko uporabljajo [7]:

- kot ekspandirana glina za urejanje strehe;

- Liapor se lahko uporablja za lahke betonske bloke, ki se napolnijo z izolacijskim materialom, kar še dodatno izboljša izolacijske sposobnosti. Lahko se ga dobi v različnih dimenzijah in oblikah;
- montažne stene iz enega kosa, narejene iz Liapora, omogočajo hiter napredek pri gradnji: v skladu z DIN EN 1520 se ga lahko uporabi kot predelni zid;
- lahko se ga uporabi za lahke malte;
- lahko se ga uporabi za omete.

2.3.2 Voda

Pri projektiranju mešanic je bila uporabljena voda iz Ljubljanskega vodovodnega omrežja.

Vodo za pripravo betona pokriva slovenski standard SIST EN 1008, januar 2003. "Pitna voda velja za primerno za uporabo v betonu. Te vode ni treba preskušati. Ta evropski standard predpisuje zahteve za vodo, ki je primerna za pripravo betona, skladnega z EN 206-1 in opisuje metode za oceno njene primernosti (SIST EN 1008, str. 3, 4)." [21]

Pomembna je izbira približnega vodo-cementnega razmerja (»v nadaljevanju v/c«) – zahtevano v/c je določeno ne samo z zahtevano trdnostjo, temveč tudi z dejavniki, kot so trajnost in ostale zahtevane lastnosti betona. To pa zato, ker različni agregati in cementi na splošno dosežejo različne trdnosti pri enakem v/c – zato je zelo zaželeno poznati, imeti, oziroma določiti zvezo med trdnostjo in v/c za materiale, ki se dejansko uporabljajo. Kot primer je v Preglednici 3 prikazana zveza med v/c razmerjem in tlačno trdnostjo pri starosti 28 dni, ki velja za tipične materiale običajnih betonov. [19]

Preglednica 3: Zveza med v/c razmerjem in tlačno trdnostjo betona. [19]

Compressive strength at 28 days, psi (MPa)	Approximate water-cement ratio, by weight	
	Nonair-entrained concrete	Air-entrained concrete
6000 (41.4)	0.41	—
5000 (34.5)	0.48	0.40
4000 (27.6)	0.57	0.48
3000 (20.7)	0.68	0.59
2000 (13.8)	0.82	0.74

*Vrednosti so ocenjene za povprečne vrednosti trdnosti betona, ki vsebuje ne več kot 2 % zraka za ne aeriran beton in 6 % vsebnosti zraka za aeriran beton. Za konstantno v/c je trdnost betona zmanjšana, ko vsebnost zraka naraste. [19]

2.3.3 Cement

Pri oblikovanju mešanic sta bili uporabljeni dve vrsti cementa: cement za najzahtevnejše gradnje s standardno oznako po SIST EN 197-1:2011 CEM I 42,5 R in cement CEM II/A-S 42,5N. "Za splošno primerne velja cement, ki je skladen z EN 197-1 (SIST EN 206-1:2003, str. 20)." [17, 22]

"Cement, skladen z EN 197-1, imenovan cement CEM, mora dati, če je pravilno odmerjen in zmešan z agregatom in vodo, beton ali malto, ki ostane dovolj dolgo primerno obdelovalen. Po določenem času mora doseči predpisano trdnost in mora biti dolgo prostorninsko stabilen (SIST EN 197-1:2002, str. 6)." [23]

"Cement je hidravlično vezivo, to je fino zmlet neorganski material, ki zmešan z vodo tvori pasto; ta pa na podlagi reakcij in procesov hidratacije veže in strjuje ter po strditvi ohrani trdnost in stabilnost tudi v vodi (SIST EN 197-1:2002, str. 6)." [23]

Cementi so razdeljeni na pet glavnih vrst cementov [23]:

- CEM I – portlandski cement;
- CEM II – mešani portlandski cement;
- CEM III – žlindrin cement;
- CEM IV – pucolanski cement;
- CEM V – mešani cement.

"Cement je treba izbrati med tistimi, ki veljajo za primerne in upoštevati [17]:

- način izvajanja del;
- končno rabo betona;
- pogoje negovanja (npr. toplotna obdelava);
- dimenzije konstrukcije (razvoj hidratacijske toplote);
- pogoje okolja, katerim bo konstrukcija izpostavljena;
- potencialno reaktivnost agregata z alkalijami iz osnovnih materialov (SIST EN 206-1:2003, str. 21)."

2.3.4 Dodatki

Dodatki so dodani za vnos zraka v beton, da zmanjšajo potrebo po vodi, spremenijo čas vezanja, da sveža mešanica dlje časa ohrani svoje lastnosti zaradi transporta ali druge lastnosti betona. Biti morajo v skladu z ustreznimi specifikacijami. [5]

2.3.4.1 Kemijski dodatki

Kemijski dodatki morajo biti v skladu s standardom SIST EN 934-2:2001. Dodajo se med mešanjem mešanice v majhni količini glede na maso cementa, da se spremenijo lastnosti sveže mešanice ali strjenega betona. [17, 24]

"Kemijski dodatek za beton je material, ki se dodaja med mešanjem betona v količini, ki ni večja od 5 % mase cementa v betonu, zato da se spremenijo lastnosti sveže in/ali strjene mešanice. Plastifikator je kemijski dodatek, ki omogoča znižanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco

ali zveča posed/razlez brez vpliva na delež vode ali istočasno učinkuje na oba načina. Superplastifikator (SP) je kemijski dodatek, ki omogoča visoko znižanje deleža vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco, znatno zveča posed/razlez brez vpliva na delež vode ali istočasno učinkuje na oboje (EN 934-2:2001, str. 5)." [24]

Preglednica 4: Posebne zahteve za SP (pri enaki konsistenci). [24]

Lastnost	Referenčni beton	Metoda preskušanja	Zahteve
Zmanjšanje vode	Referenčni beton I po EN 480-1	Razlez po EN 12350-5	V preskusni mešanici \geq 12 % od vode v primerjalni mešanici
Tlačna trdnost	Referenčni beton I po EN 480-1	EN 12390-3	Po 1 dnevu: Preskusna mešanica \geq 140 % trdnosti primerjalne mešanice Po 28 dneh: Preskusna mešanica \geq 115 % trdnosti primerjalne mešanice
Vsebnost zraka v svežem betonu	Referenčni beton I po EN 480-1	EN 12350-7	Preskusna mešanica \leq 2 vol. % več kot primerjalna mešanica, razen če proizvajalec ne navaja drugače

Preglednica 5: Posebne zahteve za SP (pri enakem v/c razmerju). [24]

Lastnost	Referenčni beton	Metoda preskušanja	Zahteve
Povečanje konsistence	Referenčni beton IV Po EN 480-1	Razlez po EN 12350-5	Povečanje razleza za \geq 160 mm od začetne vrednosti (350 ± 20) mm
Stalnost konsistence	Referenčni beton IV Po EN 480-1	Razlez po EN 12350-5	30 minut po dodajanju konsistenca preskusne mešanice ne sme biti nižja od začetne vrednosti konsistence primerjalne mešanice
Tlačna trdnost	Referenčni beton IV Po EN 480-1	EN 12390-3	Po 28 dneh: preskusna mešanica \leq 90 % trdnosti primerjalne mešanice
Vsebnost zraka v svežem betonu	Referenčni beton IV Po EN 480-1	EN 12350-7	Preskusna mešanica \leq 2 vol. % več kot primerjalna mešanica, razen če proizvajalec navaja drugače

2.3.4.2 Mineralni dodatki

"Mineralni dodatek je fino presejan material, ki se uporablja v betonu za izboljšanje določenih lastnosti ali za doseganje posebnih lastnosti. Standard SIST EN 206-1:2003 obravnava dve vrsti neorganskih dodatkov:

- skoraj inertne mineralne dodatke (tip I) ter
 - pucolanske ali latentno hidravlične mineralne dodatke (tip II) (SIST EN 206-1:2003, str. 13)."
- [17]

"Za splošno primerne veljajo naslednji mineralni dodatki tipa I [17]:

- mineralna polnila, ki so skladna z EN 12620 in
- pigmenti, ki so skladni z EN 12878.

Za splošno primerne veljajo naslednji mineralni dodatki tipa II:

- elektrofilitrski pepel, ki je skladen z EN 450 in
- mikrosilika, ki je skladna z EN 13263 (SIST EN 206-1:2003, str. 20)."

3 REOLOGIJA SVEŽIH SCLC MEŠANIC

3.1 Uvod v reologijo

"Reologija je veda, ki preučuje deformiranje in tečenje snovi in s tem raziskuje povezavo med silo, deformacijo in časom. Podskupina reologije je viskometrija, ki preiskuje povezave med napetostjo in hitrostjo deformiranja (silo in deformacijo). Definirana je kot upor proti tečenju oziroma upor tekočine proti deformaciji. Če je ta upor velik, bo viskoznost materiala velika (Hočevar A., 2010, str. 56)." [25]

Reološke lastnosti svežega betona vplivajo na vgradljivost in sposobnost zgoščevanja ter s tem na izgled betonskih elementov. [26]

Beton je Binghamova tekočina. Tekočine lahko razdelimo v več skupin [27]:

- newtonska tekočina;
- ne-newtonska časovno neodvisna tekočina;
- ne-newtonska časovno odvisna tekočina;
- viskoelastična tekočina.

Opisal bom samo ne-newtonsko časovno neodvisno tekočino, ker je za nas pomembna. "Viskoznost ne-newtonske časovno neodvisne tekočine je odvisna od strižne hitrosti. Obstajajo tri glavne vrste omenjenega obnašanja. Material lahko s povečanjem strižne hitrosti pridobiva na viskoznosti – strižno zgoščevanje (ang. shear thickening), lahko pa izgublja na viskoznosti – strižno redčenje (ang. shear thinning). Lahko pa je to material, ki ima neko trdnost na meji tečenja, ki pa se med tečenjem lahko obnašajo newtonsko ali pa je zanj značilno strižno zgoščanje ali strižno redčenje. Tak material je tudi beton, pri katerem po navadi opazimo newtonsko obnašanje s strižno trdnostjo na meji tečenja (Binghamov model), včasih pa tudi strižno zgoščanje (Hočevar, 2010, str. 207–216)." [27]

Za beton se predpostavi, da je Binghamova (ne-newtonska) tekočina. Pri betonu po navadi opazimo newtonsko obnašanje z opazno strižno trdnostjo na meji tečenja. Tak model se uporablja tudi pri vseh reometrih, ki so trenutno dostopni na trgu. Binghamov model upošteva napetost na meji tečenja (τ_0) ter ohranja linearno odvisnost med strižno napetostjo svežega betona (τ) in strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$), ki sta povezani s koeficientom viskoznosti η . Model se opiše z enačbo [25]:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

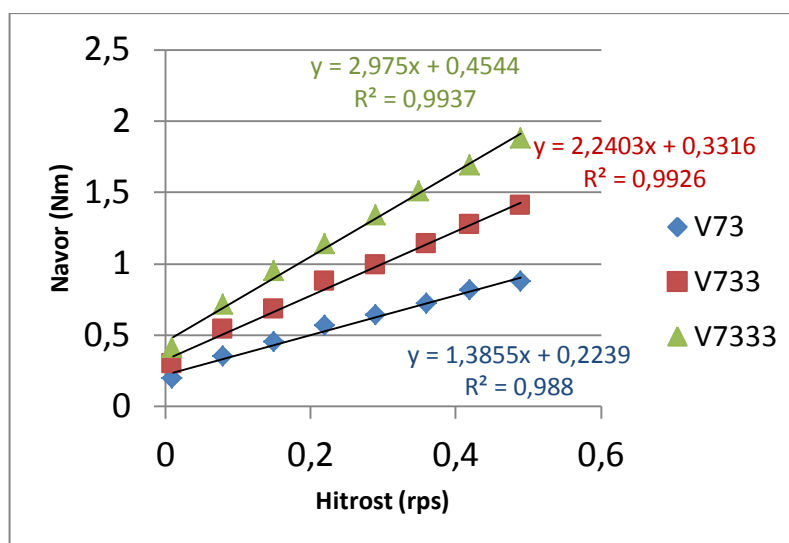
Obnašanje materiala opišeta dve konstanti, τ_0 in η , katerih pa se ne da neposredno določiti. Lahko pa se s pomočjo teh konstant izpelje enačbe s parametri, ki se jih da meriti. Izpeljemo lahko enačbe za obnašanje tekočine med vrtečimi se valji in obnašanje tekočine med gibanjem po cevi. Rezultat preiskave reoloških parametrov svežega betona z reometrom se tako največkrat poda v obliki [25, 27]:

$$T = Y + V \cdot N$$

V enačbi T predstavlja navor (upor proti striženju), hitrost vrtenja je N, V je mera za odpornost betona proti naraščajoči hitrosti gibanja (koeficient viskoznosti) in Y predstavlja mero za silo, ki je potrebna za začetek gibanja betona (navor na meji tečenja). [27]

Pri betonih gre za kompleksno suspenzijo delcev, kjer so delci grobega agregata razpršeni v malti, malta ima delce drobnega agregata razpršene v pasti, pasta pa cementne in ostale praškaste delce, razpršene v vodi. [27]

3.2 Vpliv posameznih sestavin betona na reološke lastnosti sveže mešanice



Grafikon 1: Primer diagrama navor-hitrost vrtenja.

Vpliv posameznih sestavin [25, 27]:

- z dodajanjem vode se zmanjšata tako strižna napetost na meji tečenja, kot viskoznost;
- s SP polikraboksilatnega tipa spreminjamo samo vrednost napetosti na meji tečenja, viskoznost pa ostane približno enaka;
- beton, ki vsebuje prodnat oziroma zaobljen agregat, bo imel precej manjšo viskoznost kot beton z drobljenim, ostrorobim agregatom, manjša pa bo razlika v napetosti na meji tečenja, vendar to velja v primerih, ko je vsebnost cementne paste majhna;
- dodajanje aeranta sprva zmanjša viskoznost betona, napetost na meji tečenja pa se ne bistveno spremeni do večjih dodajanj aeranta.

4 PROJEKTIRANJE MEŠANICE SAMOZGOŠČEVALNEGA LAHKO AGREGATNEGA BETONA

4.1 Navodila za pripravo in mešanje SCLC mešanic

Pri izbiri sestavin in projektiranju SCLC mešanic ter izbiri načina mešanja SCLC smo izhajali iz določil ACI 211.2 - 98 in ACI 213R - 03.

Sestavljanje mešanic lahkega betona poteka s kombiniranjem sestavin, ki običajno vsebujejo portland cement, agregat, vodo, kemijske dodatke in mineralne dodatke, na način, da se razvije optimalna kombinacija lastnosti tako svežega kot strjenega betona. V/C betona je lahko določeno za lahki beton, tako kot je opisano v ACI 211.2 v metodi 1: Lahki agregati so ustrezno namočeni, da bo med mešanjem in vgrajevanjem absorbirana minimalna količina vode. [5]

Specifikacije za lahki beton po navadi zahtevajo minimalne zahtevane vrednosti za tlačno in natezno trdnost, maksimalne vrednosti za razlez, in obe – minimalno in maksimalno vrednost – za vsebnost zraka. Za lahki beton se omejitev vedno postavi tudi za najvišjo dovoljeno vrednost za svežo prostorninsko maso. Z gradbenega vidika je potrebno prav tako upoštevati obdelovalnost svežega betona. Nekatere lastnosti so odvisne – izboljšanje v eni lastnosti, kot je obdelovalnost, lahko vpliva na druge lastnosti, kot so prostorninska masa in trdnost. [5]

Zmanjšana prostorninska masa lahkega betona lahko vodi k bolj ekonomični konstrukciji, kljub povečanju osnovnih stroškov na enoto betona. Zato je prostorninska masa zelo pomemben dejavnik pri oblikovanju mešanice lahkega betona. V okviru zahtevanih meja se lahko prostorninska masa betona ohrani s prilagajanjem razmerja lahkega in normalno težkega agregata. Na primer, če se poveča vsebnost cementa za zagotavljanje dodatne tlačne trdnosti, se bo lastna teža betona povečala. Na drugi strani pa popolna zamenjava lahkega finega agregata z normalno težkim peskom lahko poveča prostorninsko maso betona za približno 160 kg/m^3 ali več pri enakem razredu trdnosti. [5]

Smernice za prilagoditve mešanic običajnega lahkega agregatnega betona [19]:

- ko je zaželeno, da spremenimo vsebnost cementa, volumen zraka ali odstotek finega agregata v mešanici, ali ko je zaželeno, da spremenimo razlez svežega betona, je potrebno, da nadomestimo takšne spremembe s prilagoditvami enega ali več drugih dejavnikov, če napetost na meji tečenja in ostale lastnosti betona ostanejo nespremenjene;
- delež finega agregata: Povečanje odstotka finega agregata glede na celoten agregat – zaradi tega je na splošno potrebno povečati vsebnost vode. Za vsak odstotek povečanja deleža finega agregata povečamo količino vode za približno $1,8 \text{ kg/m}^3$. Povečanje vsebnosti vode bo potrebovalo povečanje vsebnosti cementa, da ohranimo določeno trdnost. Za vsako $1,8 \text{ kg/m}^3$ povečanje vsebnosti vode, povečamo vsebnost cementa za približno 1 %;

- vsebnost zraka: Povečanje vsebnosti zraka bo spremljalo povečanje razleza, razen če se voda zniža za kompenzacijo. Za vsak odstotek povečanja vsebnosti zraka je treba vodo zmanjšati za približno $3,0 \text{ kg/m}^3$. Povečanje vsebnosti zraka lahko spremlja znižanje trdnosti, razen, če se nadomesti z dodatnim cementom;
- posed: Povečanje poseda se lahko doseže s povečanjem vsebnosti vode. Za vsakih želenih 25 mm povečanja poseda, mora biti količina vode povečana približno za $5,9 \text{ kg/m}^3$, ko je začetni razlez približno 75 mm ; pri začetnem razlezu, ki je višji, je povečanje vode nekoliko manjše. Povečanje vsebnosti vode bo spremljal padec trdnosti, razen če se nadomesti s povečanjem vsebnosti cementa. Za vsako $3,9 \text{ kg/m}^3$ povečanje vode, se poveča vsebnost cementa za približno 3% . Prilagoditve bo potrebno narediti pri skupni masi finega agregata, kar je potrebno za ohranjanje potrebnega skupnega efektivnega odstranjenega volumna.

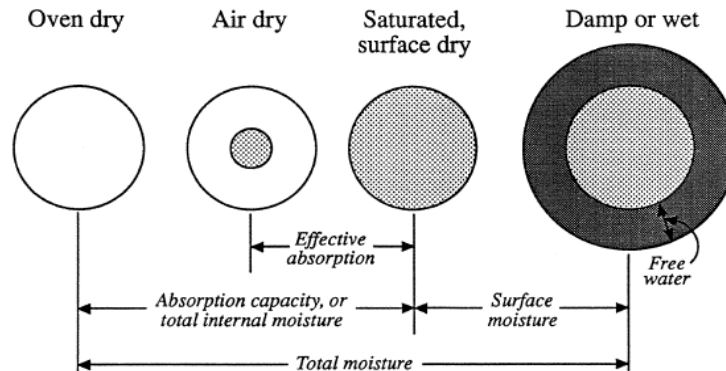
Vlažni oz. mokri lahki agregati so bolj zaželeni kot suhi agregati v času mešanja, ker absorbirajo manj vode v času mešanja in se tako zmanjša možnost izgube poseda, ko je beton zmešan, transportiran in dostavljen na mesto. Mokri agregati so manj nagnjeni k segregaciji. [19]

Ko je beton narejen z lahkim agregatom, ki ima nizko začetno vsebnost vlage (po navadi manj kot 8 do 10 %) in relativno visoko stopnjo absorpcije, je zaželeno, da se pomešajo agregati z $1/2$ oziroma $2/3$ vode za kratek čas, preden se doda cement in dodatki. [19]



Slika 4: Dve vrsti namakanja lahkega agregata pred mešanjem. Postopek za oblikovanje mešanice SCLC, ki temelji na mokri packing metodi. [10]

V konstrukcijskem lahkem betonu je glavni problem izračun količin za absorbirano in adsorbirano vodo. Tradicionalno je za vsebnost vlage pri agregatih značilno, da so agregati v času uporabe v enem izmed štirih stanj [19]:



Slika 5: Stopnja vlage v agregatu: 1. Osušen v peči (ang. Oven dry), 2. Zračno suh (ang. Air dry), 3. zasičen z vlago (ang. Saturated, surface dry), 4. vlažen ali moker (ang. Damp or wet). [19]

Oblikovanje in prilagajanje razmerja deleža sestavin mešanice za beton je treba izbrati čim bolj gospodarno iz razpoložljivih materialov za proizvodnjo betona z zahtevanimi fizikalnimi lastnostmi. Končni delež razmerja sestavin pa bi moral biti dokazan z laboratorijskimi preskusnimi mešanicami, ki se nato prilagodijo, da se pripravijo preskusne serije na terenu v skladu z ACI 211.2. [5]

Razmerje med trdnostjo in V/C ni mogoče učinkovito uporabiti, ker je težko določiti, koliko mešane vode v betonu bo absorbiral agregat. Težava je v tem, da porozni agregati ne samo, da absorbirajo velike količine (10 do 20 %) vode, ampak tudi dejstvo, da nekateri agregati absorbirajo vodo tudi več tednov. Tudi v nasprotju z normalno težkimi agregati se prostorninska masa lahkih agregatov lahko razlikuje za različne frakcije. Pazljivost pri projektiranju svežega lahkega agregatnega betona zahteva posebno pozornost pri tekočih betonskih mešanicah, kjer agregat lahko segregira in plava na površini. Da premagamo nagnjenost k segregaciji, moramo pri običajnih lahkih agregatnih betonih omejiti največji posed in vnesti zrak. Približno 5 do 7 % zraka je potrebno, da zmanjšamo potrebno količino vode za mešanje, medtem ko vzdržujemo želen posed in zmanjšamo težnjo po izcejanju in segregaciji. Za namen projektiranja mešanice je tlačna trdnost lahkega agregatnega betona običajno prej povezana z vsebnostjo cementa pri danem posedu, kot pa z V/C razmerjem. Z nekaterimi lahki agregati je mogoče uporabiti ACI 211.1 volumetrično metodo za projektiranje lahke agregatne mešanice in prilagoditi delež razmerja s poskusi (»trial&error« metoda), dokler zahteve glede obdelovalnosti svežega betona in fizikalne lastnosti strjenega betona niso zadovoljivo izpolnjene. [8]

Sveža prostorninska masa lahkega betona je funkcija deležev sestavin mešanice, vsebnosti zraka, potrebe po vodi, relativne prostorninske mase delcev in absorbirane vsebnosti vode v lahkem agregatu. Zmanjšanje prostorninske mase izpostavljenega betona je posledica izgube vlage, ta pa je odvisna od okoljskih pogojev in razmerja med površino in prostornino betonskega elementa. [5]

Pri mešanju lahko agregatnih betonov smo uporabljali dva tipa mešalcev:



Slika 6: Mali planetarni mešalec v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na FGG.



Slika 7: Velik protitočni mešalec v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na FGG kapacitete 50 l.

4.2 Sestava SCLC mešanic in postopek mešanja

"Sestavo betona in osnovne materiale za projektirani ali predpisani beton je treba izbrati tako, da se zadovoljijo predpisane zahteve za svež in strjen beton; te vključujejo konsistenco, gostoto, trdnost, trajnost in zaščito vgrajenega jekla pred korozijo. Pri tem je treba upoštevati proizvodni postopek in predvideni način izvajanja betonarskih del (SIST EN 206-1:2003, str. 21)." [17]

"Osnovne sestavine betona se morajo pazljivo zmešati v homogeno celoto. Pri tem je odločilnega pomena zaporedje dodajanja posameznih sestavin. Pomembno je, kdaj se doda voda v suho mešanico agregata in cementa ter kolikšna je hitrost obračanja bobna mešalca (Žarnić, 2003, str. 111)." [28]

Preden smo začeli s sestavljanjem svežih mešanic, smo poiskali navodila, kako mešati SCLC. Pri običajnem betonu je protokol mešanja sledeč: pesek + grobi agregat + cement (+ mineralni dodatek) zamešamo na suho, potem dodamo vodo in kemijske dodatke. Pri SCLC pa se pojavi sledeč problem: če dodamo grobi agregat že na začetku mešanja suhih sestavin, ga lopatice mešalca zdrobijo. Zato je bolje dodajati lahki grobi agregat proti koncu mešanja. Drugi problem, ki se pojavi pri mešanju SCLC mešanice je, da lahki agregat – ekspandirana glina –, zaradi svoje velike absorpcijske sposobnosti med mešanjem vpija vodo. Problem prevelikega vpivanja vode ekspandirane gline lahko rešimo na dva načina:

1. način – predpostavimo, da do vgraditve v opaže agregat vpije 7,5 % vode, zato to vodo dodamo vodi, ki jo potrebujemo za zahtevano konsistenco (zamesni vodi);
2. način – z 10 % dodatne vode, za katero predpostavimo, da jo ekspandirana glina vpije, poškropimo agregat iz ekspandirane gline in ga pustimo, da tako odležava 30 minut, ko ga lahko uporabimo za izdelavo betona.

Mešanice smo na začetku, ko smo iskali pravo mešanico, ki bo stabilna in bo imela dobre lastnosti v svežem stanju, mešali v malem planetarnem mešalcu RILEM-CEN kapacitete 4 l. Ko smo na ta način dobili mešanice z dobrimi lastnostmi v svežem stanju, smo jih zamešali še v velikem protitočnem mešalcu kapacitete 50 l. Pri izdelavi mešanic smo preverili štiri načine dodajanja sestavin v mešanico oziroma protokole mešanja:

1.) Na začetku mešanja v mešalec natočimo $2/3$ zamesne vode in takoj dodamo cement. V pasto nato dodamo še $2/3$ SP. V času prvih 30 s nato dodajamo W Liapor $4/8$ in v času naslednjih 30 s W Liapor $1/4$. V mešanico nato nalijemo še $1/3$ SP. Potem v času 30 s dodajamo pesek $0/4$ in na koncu dodamo še $1/3$ vode. Mešanico smo na koncu mešali še 3 minute, da je uporabljen SP dosegel optimalno učinkovitost.

2.) Na začetku mešanja dodamo $1/2$ vode in 30 s dodajamo cement ter nato še 30 s dodajamo apnenčevo moko. Kasneje dodamo celoten SP. Nato v času 30 s dodajamo V Liapor frakcije $1/8$. Dodamo še $1/4$ vode. Potem v času 30 s dodamo pesek $0/4$. Na koncu dodamo še $1/4$ vode. Mešanico mešamo še 3 minute, da SP doseže optimalno učinkovitost.

3.) Na začetku mešanja v mešalec natočimo $1/2$ vode in takoj dodamo cement. V pasto nato dodamo $2/3$ SP. V času 30 s dodajamo kremenčev pesek $0/4$. Potem v mešanico natočimo še $1/3$ SP. Nato smo dodali še $1/2$ vode. Nato v času prvih 30 s dodajamo W Liapor $4/8$ in v času drugih 30 s W Liapor $1/4$. Na koncu mešanico še 3 minute mešamo, da SP doseže optimalno učinkovitost.

4.) Na začetku mešanja dodamo cement ter pesek $0/4$ in 30 s suho mešamo. Nato v času 30 s dodamo $2/3$ vode, potem pa še cel SP. Kasneje dodamo še $1/3$ vode. Potem v času prvih 30 s dodamo W Liapor

4/8 in v naslednjih 30 s še W Liapor 1/4. Nato mešanico 3 minute mešamo, da SP doseže optimalno učinkovitost.

Pri vseh mešanicah je potrebno pred začetkom mešanja navlažiti mešalec. Prvi in drugi protokol mešanja oziroma dodajanja sestavin v mešanico se ni pokazal kot ustrezen, ker se je lahki agregat Liapor zdrobil, kar je poslabšalo zrnavost materiala in trdnost lahkega betona. Tretji in četrti protokol mešanja sta dobra. Pri tretjem protokolu naredimo pasto in dodamo naravni pesek pred Liaporom, da nastala malta zaščiti ekspanzirana glinena zrna pred zdrobitvijo. Pri četrtem protokolu imamo suho mešanje cementa in naravnega peska, tako da je pesek spet dan v mešanico pred Liaporom.

4.2.1 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8

Za sestavo mešanic z V Liaporom smo uporabili lahki agregat V Liapor frakcije 1/8, uporabljen cement pri nekaterih mešanicah je bil CEM II/A-S 42,5N, pri nekaterih mešanicah pa cement CEM I 42,5 R, fini normalno težki pesek frakcije 0/4, uporabljena voda je bila pitna voda, kot kemijski dodatek pa smo uporabili SP.

Preglednica 6: Receptura mešanic z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8.

Mešanice	Uporabljeni materiali kg (%)				
	V Liapor 1/8	Cement	Pesek 0/4	Voda	SP
Osnovno (8. 3. 2013)	1,2 kg (15,39 %)	2,25 kg (28,85 %)	3,5 kg (44,88 %)	0,835 kg (10,71 %)	0,014625 kg (0,188 %)
Osnovno2 (8. 3. 2013)	1,2 kg (15,39 %)	2,25 kg (28,86 %)	3,5 kg (44,9 %)	0,835 kg (10,71 %)	0,010 kg (0,128 %)
L1 (13. 3. 2013)	1 kg (15,54 %)	2,17 kg (33,72 %)	2,4 kg (37,3 %)	0,832 kg (12,93 %)	0,033 kg (0,513 %)
V7 (13. 3. 2013)	1 kg (15,62 %)	2,17 kg (33,91 %)	2,4 kg (37,5 %)	0,812 kg (12,69 %)	0,018 kg (0,28 %)
V71 (15. 3. 2013)	7,5 kg (15,39 %)	16,28 kg (33,42 %)	18 kg (36,95 %)	6,78 kg (13,93 %)	0,144 kg (0,296 %)
V72 (18. 3. 2013)	7,5 kg (15,51 %)	16,28 kg (33,66 %)	18 kg (37,22 %)	6,44 kg (13,31 %)	0,145 kg (0,3 %)
V73 (18. 3. 2013)	7,5 kg (15,46 %)	16,28 kg (33,56 %)	18 kg (37,11 %)	6,59 kg (13,58 %)	0,140 kg (0,289 %)
L2 (19. 3. 2013)	12,5 kg (15,46 %)	27,13 kg (33,56 %)	30 kg (37,11 %)	10,98 kg (13,58 %)	0,234 kg (0,289 %)

Opomba: Pri mešanicah Osnovno in Osnovno2 je bil uporabljen cement CEM II/A-S 42,5N, pri ostalih mešanicah pa je bil uporabljen cement CEM I 42,5 R.

Protokol mešanja je potekal takole:

- cement;
- 1/2 vode;

- 2/3 SP;
- V Liapor;
- 1/2 vode;
- 0/4 pesek;
- 1/3 SP;
- na koncu smo mešanico mešali še 3 minute.



a) Segregacija

b) Segregacija in rahlo izcejanje vode

Slika 8: Lahki agregat Liapor je splaval na vrh mešanice L2.

4.2.2 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek kamena moka

Pri tej mešanici smo uporabili iste sestavine kot pri mešanicah z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8 s to razliko, da smo kot dodatni praškasti material dodatno uporabili še kameno moko in z njo zamenjali del cementa.

Preglednica 7: Receptura mešanic z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek kamena moka.

Mešanice	Uporabljeni materiali kg (%)					
	V Liapor 1/8	Cement	Moka	Pesek 0/4	Voda	SP
V2 (11. 3. 2013)	1 kg (15,98 %)	1,6 kg (25,57 %)	0,52 kg (8,31 %)	2,4 kg (38,35 %)	0,72 kg (11,51 %)	0,018 kg (0,288 %)
VS1 (11. 3. 2013)	1,2 kg (13,49 %)	1,6 kg (17,99 %)	1,28 kg (14,39 %)	3,92 kg (44,08 %)	0,87 kg (9,78 %)	0,022 kg (0,247 %)
V4 (11. 3. 2013)	1 kg (16,14 %)	1,6 kg (25,82 %)	0,52 kg (8,39 %)	2,4 kg (38,73 %)	0,66 kg (10,65 %)	0,016 kg (0,258 %)
V6 (12. 3. 2013)	1 kg (15,93 %)	1,6 kg (25,48 %)	0,52 kg (8,28 %)	2,4 kg (38,22 %)	0,74 kg (11,82 %)	0,018 kg (0,287 %)
V8 (12. 3. 2013)	1 kg (15,75 %)	1,6 kg (25,2 %)	0,52 kg (8,19 %)	2,4 kg (37,8 %)	0,812 kg (12,79 %)	0,018 kg (0,283 %)
V10 (13. 3. 2013)	7,5 kg (15,93 %)	12 kg (25,49 %)	3,9 kg (8,28 %)	18 kg (38,23 %)	5,55 kg (11,79 %)	0,135 kg (0,287 %)
V12 (14. 3. 2013)	7,5 kg (15,83 %)	12 kg (25,32 %)	3,9 kg (8,23 %)	18 kg (37,99 %)	5,85 kg (12,35 %)	0,135 kg (0,285 %)
V14 (15. 3. 2013)	12,5 kg (15,83 %)	20 kg (25,32 %)	6,5 kg (8,23 %)	30,01 kg (37,99 %)	9,75 kg (12,34 %)	0,225 kg (0,285 %)

Opomba: Pri mešanicah V2, VS1, V4, V6, V8 je bil uporabljen cement CEM II/A-S 42,5N, pri ostalih mešanicah pa je bil uporabljen cement CEM I 42,5 R.

Protokol mešanja je potekal takole:

- 1/2 vode;
- cement;
- moka;
- celoten SP;
- V Liapor 1/8;
- 1/4 vode;
- pesek 0/4;
- 1/4 vode;
- na koncu smo mešanico mešali še 3 minute.

4.2.3 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek elektrofiltrski pepel

Tudi ta mešanica ima uporabljene enake sestavine kot mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8 s to razliko, da smo dodatno še dodali elektrofiltrski pepel ter z njim zamenjali del cementa.

Preglednica 8: Receptura mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek elektrofiltrski pepel.

Mešanica	Uporabljeni materiali kg (%)					
	V Liapor 1/8	Cement	Elektrofiltrski pepel	Pesek 0/4	Voda	SP
V3 (11. 3. 2013)	1 kg (16,1 %)	1,6 kg (25,76 %)	2,4 kg (38,64 %)	0,52 kg (8,37 %)	0,675 kg (10,87 %)	0,016 kg (0,258 %)

Opomba: Uporabljen je bil cement CEM II/A-S 42,5N.

4.2.4 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, ki je namočen

Ta skupina mešanic ima enake sestavine kot mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8 s to razliko, da smo tukaj lahki agregat V Liapor frakcije 1/8 za 24 ur namočili v vodo, zato da ne bo vpilal vode, ki je določena za mešanje. Ker pri mešanju suhi lahki agregat vpije veliko vode, smo se odločili, da vpijanje vode med mešanjem betona preprečimo s tem, da lahki agregat predhodno namočimo v vodo.

Preglednica 9: Receptura mešanic z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, ki je namočen.

Mešanice	Uporabljeni materiali kg (%)				
	V Liapor 1/8	Cement	Pesek 0/4	Voda	SP
V11 (11. 3. 2013)	1,2 kg (15,38 %)	2,25 kg (28,83 %)	3,5 kg (44,85 %)	0,835 kg (10,7 %)	0,019 kg (0,243 %)
V5 (11. 3. 2013)	1 kg (16,01 %)	2,17 kg (34,74 %)	2,4 kg (38,42 %)	0,66 kg (10,57 %)	0,016 kg (0,256 %)
SC (8. 5. 2013)	1 kg (15,27 %)	2,17 kg (33,13 %)	2,4 kg (36,64 %)	0,954 kg (14,57 %)	0,025 kg (0,382 %)
B1 (15. 5. 2013)	12,5 kg (15,52 %)	27,12 kg (33,66 %)	30 kg (37,24 %)	10,63 kg (13,19 %)	0,313 kg (0,389 %)
B2 (20. 5. 2013)	12,5 kg (16,05 %)	27,12 kg (34,82 %)	30 kg (38,52 %)	8 kg (10,27 %)	0,26042 kg (0,334 %)

Opomba: Pri mešanicah V11 in V5 je bil uporabljen cement CEM II/A-S 42,5N, pri ostalih mešanicah pa je bil uporabljen cement CEM I 42,5 R.

Protokol mešanja je potekal takole:

- pesek 0/4;
- cement;

- 2/3 vode;
- 2/3 SP;
- 1/6 vode;
- 1/3 SP;
- V Liapor;
- 1/6 vode;
- na koncu smo mešanico mešali še 3 minute.

4.2.5 Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8

Druga skupina mešanic vsebuje lahki agregat W Liapor 1/4 in W Liapor 4/8, uporabljen cement je bil CEM I 42,5 R, fini pesek frakcije 0/4, uporabljena voda je bila pitna voda in kemijski dodatek SP.

Preglednica 10: Receptura mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8.

Mešanica	Uporabljeni materiali kg (%)					
	W Liapor 1/4	W Liapor 4/8	Cement	Pesek 0/4	Voda	SP
W1 (30. 4. 2013)	1 kg (13,23 %)	1 kg (13,23 %)	2,17 kg (28,7 %)	2,4 kg (31,75 %)	0,95 kg (12,63 %)	0,035 kg (0,463 %)

Opomba: uporabljen je bil cement CEM I 42,5 R.

Protokol mešanja je potekal takole:

- 2/3 vode;
- W Liapor 4/8;
- W Liapor 1/4;
- cement;
- SP 20 g;
- pesek 0/4;
- SP 15 g;
- voda;
- na koncu smo mešanico mešali še 3 minute.

4.2.6 Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8, ki je namočen

Ta podskupina mešanic je imela enake sestavine kot mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8 s to razliko, da smo tukaj lahki agregat pred mešanjem namočili. Pred začetkom mešanja smo lahki agregat W Liapor v posodi za mešanje namočili z vodo za 30 minut – dodali smo količino vode, ki ustreza 10 % vpijanja vode s strani lahkega agregata. Namen ukrepa je bil zmanjšati vpliv vpijanja vode s strani lahkega agregata med mešanjem in transportom betona.

Preglednica 11: Receptura mešanic z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8, ki je namočen.

Mešanice	Uporabljeni materiali kg (%)					
	W Liapor 1/4	W Liapor 4/8	Cement	Pesek 0/4	Voda	SP
W2 (7. 5. 2013)	1 kg (13,18 %)	1 kg (13,18 %)	2,17 kg (28,59 %)	2,4 kg (31,62 %)	1 kg (13,18 %)	0,020 kg (0,263 %)
W3 (7. 5. 2013)	1 kg (13,14 %)	1 kg (13,14 %)	2,17 kg (28,5 %)	2,4 kg (31,53 %)	1,008 kg (13,24 %)	0,035 kg (0,46 %)
W4 (13. 5. 2013)	10 kg (13,17 %)	10 kg (13,17 %)	21,7 kg (28,58 %)	24 kg (31,61 %)	10 kg (13,17 %)	0,220 kg (0,29 %)
W5 (14. 5. 2013)	10 kg (13,17 %)	10 kg (13,17 %)	21,7 kg (28,57 %)	24 kg (31,6 %)	10 kg (13,17 %)	0,250 kg (0,329 %)

Opomba: uporabljen je bil cement CEM I 42,5 R.



Slika 9: Pri mešanici W3 se je na površini penilo.

Pri tej skupini mešanic smo preverili tri protokole mešanja:

1.) Protokol mešanja pri mešanici W2 je potekal takole:

- 2/3 vode;
- cement;
- 2/3 SP;
- W Liapor 4/8;
- W Liapor 1/4;
- 1/3 SP;
- pesek 0/4;
- 1/3 vode;
- na koncu smo mešanico mešali še 3 minute.

2.) Protokol mešanja pri mešanici W4 je potekal takole:

- 1/2 vode;
- cement;
- 2/3 SP;
- kremenčev pesek 0/4;
- 1/3 SP;
- 1/2 vode;
- W Liapor 4/8;
- W Liapor 1/4;
- na koncu smo mešanico mešali še 3 minute.

3.) Protokol mešanja pri mešanici W5 je potekal takole:

- cement;
- pesek 0/4;
- 2/3 vode;
- 4/5 SP;
- 1/5 SP;
- 1/3 vode;
- W Liapor 4/8;
- W Liapor 1/4;
- na koncu smo mešanico mešali še 3 minute.

5 LASTNE PREISKAVE NA SVEŽIH LAHKO AGREGATNIH SAMOZGOŠČEVALNIH BETONIH

5.1 Uvod in cilji preiskav

Za učinkovito ovrednotenje zahtevanih lastnosti betona v svežem stanju je potrebno uporabiti kombinacijo več preskusnih metod. [26]

Pri svežem betonu je obdelovalnost betona lastnost, ki se jo da preiskati po različnih standardiziranih ali nestandardiziranih metodah. Za običajne betone so preskusne metode dobro poznane, za novejše tipe betonov, kot so SCC, pa se preskusne metode v praksi šele uveljavljajo. [27]

V diplomski nalogi sem se osredotočil na predstavitev metod, ki sem jih uporabljal za preskušanje svežega betona, s katerimi ugotavljamo njegovo obdelovalnost. "Obdelovalnost, kot jo opisuje American Concrete Institute, je lastnost svežega betona, ki določa enostavnost mešanja, vgrajevanja, zgoščevanja in površinske obdelave v homogeno stanje. Japanese Association of concrete Engineers opisuje obdelovalnost kot lastnost svežega betona, ki določa enostavnost in homogenost, s katero lahko material mešamo, vgrajujemo in zgoščujemo zaradi njegove konsistence in homogenosti ter stopnjo odpora proti ločevanju materialov. Obdelovalnost pa ni odvisna samo od sestave betona, ampak tudi od namena uporabe betona (Hočevar, 2010)." [27]

Ker proizvodnja, rokovanje, vgradnja in zgoščevanje svežega betona močno vplivajo na lastnosti strjenega betona, bo treba specificirati ustrezne lastnosti sveže betonske mešanice in potem doseganje zahtevanih lastnosti preveriti z ustreznimi preskusnimi metodami. [29]

5.2 Metode preiskav

Množico preskusnih metod se lahko razdeli v kategorije na več načinov. Tattersall, 1991 je razdelil metode v tri razrede [27]:

Preglednica 12: Razredi preskusnih metod svežega betona (Tattersall, 1991). [27]

Razred I Kvalitativno obdelovalnost, tečenje, zgoščevalnost, črpnost	Uporabno za splošen opis brez kvalificiranja.
Razred II Empirično kvantitavno posed, stopnja zgoščenosti, vebe čas, razlez	Uporabno za preprost kvantitaven opis obnašanja pod določenimi pogoji in v določenih okoliščinah.
Razred III temeljno kvantitavno viskoznost, mobilnost, napetost na meji tečenja	Uporabno strogo skladno z definicijami standarda.

National Institute of Standards and Technology – NIST je razdelil obstoječe preskuse, ki opisujejo reologijo svežih betonov, v štiri razrede [27]:

Preglednica 13: Razredi preizkusov svežega betona (National Institute of Standards and Technology - NIST). [27]

Kategorija	Definicija
Omejen tok	Material teče zaradi lastne teže ali pod določenim pritiskom skozi ozko odprtino.
Prosti tok	Material teče zaradi lastne teže ali vanj, zaradi gravitacije, prodira neki predmet.
Preskus z vibracijami	Material teče zaradi vibracij.
Rotacijski reometri	Material je prestrižen med dvema vzporednima površinama od katerih se ena ali obe vrtita.

Izraz obdelovalnost se običajno uporablja kot opis skupine lastnosti, ki določajo, kateri beton se lahko vgradi in zgosti v zahtevano obliko. Kljub temu ni splošno priznane definicije obdelovalnosti. Merjenje obdelovalnosti se izvaja zaradi dveh razlogov [30]:

1. Da bi ocenili praktičnost vgrajevanja in zgoščevanja betona.
2. Redni pregled obdelovalnosti omogoča identifikacijo sprememb sestavin, vsebnost vlage itd. in vse, kar lahko vpliva na lastnosti strjenega betona.

5.2.1 Določanje konsistence z razlezom s posedom (Slump flow)

Metoda razleza s posedom mora biti v skladu s SIST EN 12350 – 8. To je najbolj preprost način določanja ustreznosti SCC betona na gradbišču. Beton zlijemo v stožec v eni plasti brez zgoščevanja. Stožec dvignemo in opazujemo, kako daleč se bo razlezel beton. Rezultat je povprečje med največjim premerom betona in premerom pravokotno na največjega. Razlez izračunamo po formuli [27]:

$$d = ((d_1 + d_2) / 2).$$

Pri preskusu se lahko opsijsko meri tudi čas, ki je potreben, da se beton razleze do premera 500 mm. Večji kot je razlez, večja je sposobnost zapolnjevanja betona in večji kot je čas do premera 500 mm, večja je viskoznost betona. [27]

Razlez s posedom (Slump flow) preizkus v skladu z EN 12350-8 [31]:

- za razred SF1 je slump flow 550 do 650 (mm);
- za razred SF2 je slump flow 660 do 750 (mm);
- za razred SF3 je slump flow 760 do 850 (mm).

Obdelovalnost je pomembna lastnost sveže mešanice lahkega betona. Slump flow preskus je najbolj razširjena metoda za merjenje obdelovalnosti samozgoščevalnih betonov. Vendar omenjena preskusna

metoda ne opiše lastnosti tečenja betona, rezultat preskusa je le vrednost za oceno obdelovalnosti svežega betona. [5, 27]

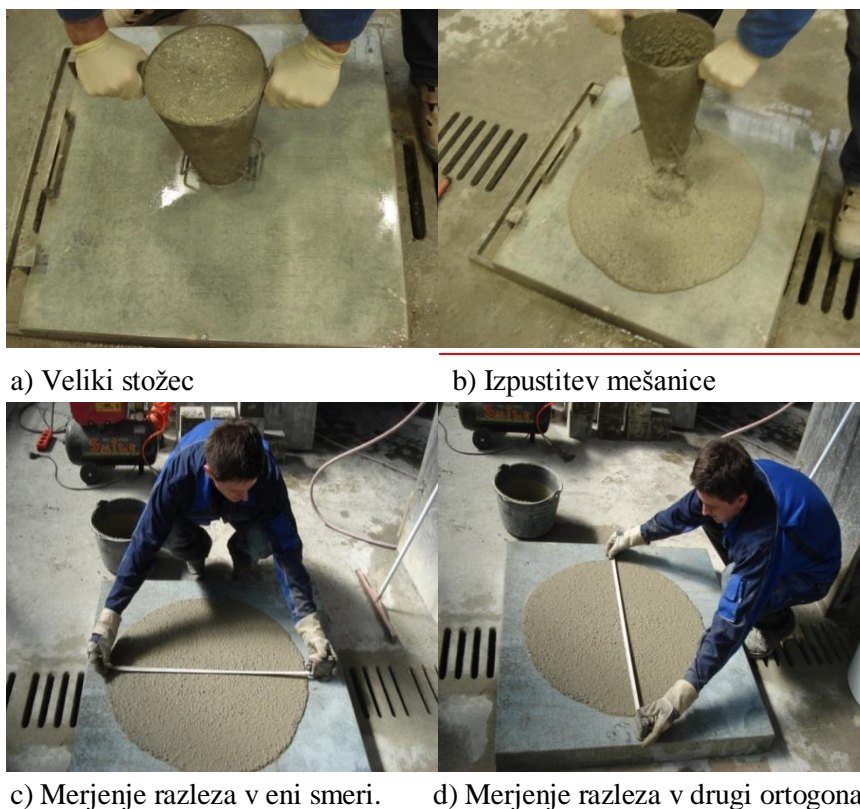
Razlez s posedom se lahko poveča, če se uporabljajo kemični dodatki, pod pogojem, da ima beton z dodatkom enako ali nižje v/c razmerje in ne kaže potencialne segregacije ali prekomernega izcejanja vode. [19] Za maltne mešanice se uporablja mini razlez s posedom, pri katerem je uporabljen prisekan stožec, katerega dimenzije so 2-krat manjše od dimenzij standardnega stožca za beton (Abramsov stožec). Mini razlez s posedom smo uporabili pri preverjanju samozgoščevalnih lastnosti mešanic, ki smo jih zamešali v malem mešalcu.



a) Mali stožec

b) Merjenje razleza v dveh pravokotnih smereh.

Slika 10: Mini razlez s posedom (mini slump flow) preizkus mešanice iz malega mešalca (mali stožec).



**Slika 11: Potek preizkusa razleza s posedom (slump flow) mešanic iz velikega mešalca (veliki stožec).
Merjenje razleza v dveh ortogonalnih (pravokotnih) smereh.**

5.2.2 Preizkus z reometrom

"Reometer je naprava, ki meri strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala. Ker so komercialno dostopni reometri razviti pretežno za izvajanje meritev na polimerih in enakomernih tekočinah, običajno niso primerni za merjenje na betonih, ker beton vsebuje velike in trdne delce agregata, zato so raziskovalci razvili veliko različnih tipov reometrov za preiskave svežih betonov (Hočevar, 2010)". Mi smo uporabljali koaksialni valjasti reometer ConTec Viscometer 5, ki deluje na principu vrtenja zunanega valja, medtem ko notranji valj miruje. Površini obeh valjev sta narebreni, da preprečujeta zdrs materiala. [29]

Vsi reometri, ki so na trgu, za določitev reoloških parametrov betona predpostavljajo, da je beton newtonska tekočina in upoštevajo Binghamov model tekočine, ki dovolj dobro opiše tečenje svežega betona. [29]

V reometru lahko svež beton mešamo s posebej zasnovanimi lopaticami, s spremenljivimi, a znanimi hitrostmi. Pri tem merimo upor, ki ga gibajočim se lopaticam nudi sveža betonska mešanica. Merimo lahko [27]:

- statično strižno napetost na meji tečenja svežega betona, ki si jo lahko predstavljamo kot minimalno potrebno napetost, da sprožimo tečenje mirujočega betona;

- dinamično strižno napetost na meji tečenja svežega betona si lahko predstavljamo kot napetost, ki je potrebna, da beton teče. Dinamična strižna napetost na meji tečenja je manjša od statične strižne napetosti na meji tečenja svežega betona;
- plastično viskoznost betona, ki predstavlja upor spremembi hitrosti striženja. Iz meritev upora, ki ga nudi svež beton pri različnih hitrostih vrtenja lopatic dobimo premico, katere naklon je plastična viskoznost betona.

Preiskava svežega betona s pomočjo nestandardizirane metode s pomočjo reometra je več parametrska metoda, ki nam omogoča določiti reološke karakteristike. Trenutno kaže, da je v primeru ovrednotenja lastnosti svežega betona najbolj učinkovita metoda merjenja reoloških lastnosti svežih betonov. Rezultat preskusa nam poda dva parametra: napetost na meji tečenja in plastično viskoznost. [27]

Metoda razleza s posedom ne opiše tako dobro lastnosti tečenja betona, saj je rezultat preskusa le vrednost za oceno obdelovalnosti svežega betona. Tečenje betona bo zelo dobro opisal izkušen delavec, ki vsak dan dela z betoni. Beton lahko oceni po občutku, kar je dobro, vendar pa take ocene ne moremo vrednotiti, saj je odvisna od osebe in trenutka. [25]

Ena najbolj priznanih »two points« preskusnih metod je metoda s koaksialnim cilindričnim viskozimetrom. Ti testi imajo vrtečo cilindrično posodo z rebri in notranji valj z rebri, ki se spusti v mešanico. Med vrtenjem zunanjšega valja (posode) meri notranji valj navor pri različnih hitrostih vrtenja posode, kar omogoča določitev strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti svežega betona. Ti parametri so po navadi navedeni kot Bingham parametri. Ta vrsta metode je bila uspešno uporabljena v laboratorijskih raziskavah SCLC mešanic. Metoda je primerna za obravnavo vpliva različnih dodatkov v mešanici itd. na njeno obdelovalnost. Primerna je za kompleksen razvoj mešanic. [30]

Reometer torej meri navor (upor) mešanice pri različnih hitrostih. Naklon premice predstavlja viskoznost. Viskoznost bi radi spravili čim višje (naklon premice), vendar ne previsoko, ker potem mešanica slabo teče. Če je pa viskoznost (naklon premice) prenizko, pa lahko mešanica segregira. Voda znižuje viskoznost, pesek 0/4, ki ga dodamo, pa jo izboljšuje. Če dodamo več SP, znižamo strižno napetost na meji tečenja. Radi bi jo spravili čim nižje, vendar do neke mere. Ko merimo z reometrom, je pomembna višina betona v posodi, da vemo, kolikšen je bil plašč materiala, ko se računa strižna napetost na meji tečenja.



a) Naprava Reometer.

b) Posoda in notranji valj reometra.

Slika 12: Reometer Con Tec Viscometer 5, s katerim smo preizkušali betonske mešanice v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na FGG.

5.2.3 Določanje vpijanja vode s piknometrom in določanje površinske vode

Stopnjo zasičenosti (frakcijski del pore napolnjen z vodo) je mogoče oceniti z meritvami s piknometrom, ki določa relativno prostorninsko maso pri različnih ravneh absorpcije. Običajno so pore opredeljene kot zračni prostor znotraj posameznega agregatnega delca in praznine/votline so opredeljene kot vmesni prostor med agregatnimi delci. Skupna poroznost (znotraj delca in med delci) je lahko določena iz izmerjenih vrednosti relativne prostorninske mase in prostorninske mase delcev. [5]

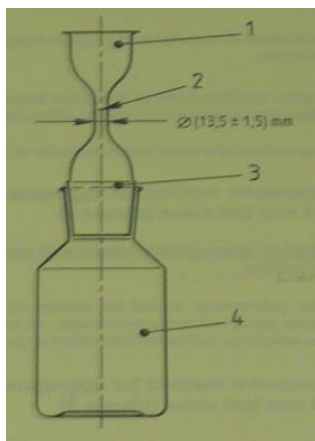
Določanje vpijanja vode s piknometrom. Prostorninska masa zrn agregata je razmerje med njihovo maso in prostornino. Maso določimo s tehtanjem preskusnega vzorca v z vodo zasičenem stanju in v suhem stanju. Prostornino določimo s pomočjo piknometra.

Splošna oprema za metodo s piknometrom [32, 33]:

- tehtnica z natančnostjo merjenja 0,1 % glede na maso preskusnega vzorca;
- vodna kopel, ki omogoča vzdrževanje temperature (22 ± 3) °C;
- termometer z natančnostjo merjenja 0,1 °C;
- sita z odprtini 0,063 mm, 4 mm, 8 mm;
- suhe krpe z visoko sposobnostjo absorbiranja vode in
- štoparica.

Preiskava z metodo s piknometrom za zrna med 4 mm in 8 mm. Najmanjša masa vzorca je odvisna od največjega zrna agregata D in je 1 kg za $D = 8$ mm pri naravnih kamenih agregatih. Pri agregatu iz ekspandirane gline smo uporabili enako prostornino zrn kot jo dobimo pri 1 kg naravnega kamnitega agregata. Na začetku stehamo prazen piknometer. Nato natočimo vodo v piknometer in stehamo. Zmerimo temperaturo vode v piknometru, ki mora biti (22 ± 3) °C. Pripravljen preskusni vzorec

vsujemo v piknometar z vodo in odstranimo zajet zrak s stresanjem in obračanjem piknometra. Potem tehtamo piknometar + voda + lahki agregat Liapor na vsakih 5, 10, 15, 30, 60, 120 minut in $(24 \pm 0,5)$ ur, potem ko dodamo vodo do oznake kalibracije na piknometru, ker Liapor vpije veliko vode. Iz tako dobljenih mas izračunamo prostorninske mase agregatnih zrn v različnih stanjih zasičenosti, pri čemer upoštevamo, da je gostota vode $\rho_v = 1 \text{ g/cm}^3$. Vpijanje vode je povečanje mase vzorca agregata, sušenega v sušilnici zaradi vstopa vode v odprte pore. [32, 33]



Slika 13: Sestavni deli piknometra. [33]

Sestavni deli piknometra [33]:

- 1: nastavek
- 2: oznaka kalibracije
- 3: brušeni del
- 4: spodnji del piknometra



a) Tehtanje vzorca

b) Uporabljeni piknometri



c) Piknometer napolnjen z agregatom

d) Polnjenje piknometra z vodo

Slika 14: Potek metode s piknometrom.

Vpijanje vode brez piknometra določimo tako, da stehamo suhi vzorec agregata in ga damo za 30 min v vodo. Po 30 min ga vzamemo ven iz vode, previdno obrišemo, da odstranimo površinsko vodo in še enkrat stehamo. Iz dobljenih mas določimo vpijanje vode v 30 minutah. Pri lahkem agregatu Liapor frakcije 4/8 je ta postopek dober. Pri lahkem agregatu Liapor frakcije 1/4 pa se pojavijo problemi. Ko smo s krpo brisali Liapor 1/4, so bili delci lahkega agregata premajhni in so ostali na krpi.



a) Tehtanje agregata

b) Brisanje agregata

Slika 15: Potek metode za določitev površinske vlažnosti lahkega agregata Liapora.**1. Rezultati preiskave metode s piknometrom:****I.) Piknometar 92 (6. 5. 2013)**

- lahki agregat W Liapor frakcija 4/8;
- 20,7 °C, izmerjena temperatura vode;
- $m_p = 754,91$ g, masa piknometra;
- $m_p + m_v = 2010,02$ g, masa piknometra in vode;
- $\rho_1 = 1,2$ g/cm³ (dano), prostorninska masa W Liapor 4/8;
- $\rho_2 = 2,7$ kg/dm³, 1 kg agregata s povprečno prostorninsko maso;
- $V = m / \rho_2 = (1 \text{ kg} / 2,7 \text{ kg}) \text{ dm}^3 = 0,37 \text{ dm}^3$, volumen lahkega agregata;
- $m = V \times \rho_1 = 0,37 \text{ dm}^3 \times 1,2 \text{ kg/dm}^3 = 0,45 \text{ kg}$, masa W Liapor 4/8.

Preglednica 14: Vpijanje vode pri preiskavi s piknometrom 92.

t (min)	$m_p + m_v + m_l$ 4/8 (g)
0	2106,60
5	2113,47
10	2114,28
15	2116,79
30	2117,93
60	2119,19
120	2120,59

Opomba: Vpijanje vode do časa "0" lahko zanemarimo!

Vpijanje vode pri času 30 min:

- $2117,93 \text{ g} - 2106,60 \text{ g} = 11,33 \text{ g}$
- $m = 450$ g, masa Liapora 4/8
- $U = ((m_{30} - m_0) / m) \times 100 (\%) = ((11,33 / 450) \times 100 (\%)) = 2,5 \%$

Vpijanje lahkega agregata W Liapor 4/8 pri času 30 min je 2,5 %.

II.) Piknometer 86 (6.5.2013)

- lahki agregat W Liapor frakcija 1/4;
- voda 21,1 °C, izmerjena temperatura vode;
- $m_p = 750,78$ g, masa praznega piknometra;
- $m_p + m_v = 2010,02$ g, masa piknometra in vode;
- $\rho_1 = 1,3$ g/cm³ (dano), Prostorninska masa W Liapora 1/4;
- $\rho_2 = 2,7$ kg/dm³, 1 kg agregata s povprečno prostorninsko maso;
- $V = m / \rho_2 = (1 \text{ kg} / 2,7 \text{ kg}) \text{ dm}^3 = 0,37 \text{ dm}^3$;
- $m = V \times \rho_1 = 0,37 \text{ dm}^3 \times 1,3 \text{ kg/dm}^3 = 0,48 \text{ kg}$, masa W Liapora 1/4.

Preglednica 15: Vpijanje vode pri preiskavi s piknometrom 86.

t (min)	mp + mv + ml 1/4 (g)
0	2095
5	2100,66
10	2101,91
15	2103,02
30	2104,12
60	2105,18
120	2105,95

Opomba: Vpijanje vode do časa "0" lahko zanemarimo.

Vpijanje vode pri času 30 min:

- $2104,12 \text{ g} - 2095 \text{ g} = 9,12 \text{ g}$
- $m = 480 \text{ g}$, masa W Liapora 1/4
- $U = ((m_{30} - m_0) / m) \times 100 (\%) = (9,12 / 480) \times 100 (\%) = 2 \%$

Vpijanje vode lahkega agregata W Liapor 1/4 pri času 30 min je 2 %.

2. Rezultati določitve površinske vlažnosti (površinske vode) pri agregatih Liapora:

I.) Lahki agregat W Liapor frakcije 1/4

$m_v = 397,55$ g, masa vlažnega agregata.

$m_{ps} = 369,55$ g, površinsko suh lahki agregat. Odstranimo površinsko vodo z brisanjem (nekaj zrn je ostalo na brisači oziroma se porazgubilo, ker so premajhne frakcije)

$\omega = ((m_v - m_{ps}) / m_{ps}) \times 100 (\%) = ((397,55 - 369,55) / 369,55) \times 100 (\%) = 7,6 \%$, Površinska vlažnost

Zatem je agregat odležal 7 dni v laboratoriju.

$m_s = 322,24$ g, masa suhega lahkega agregata.

$U = ((m_{ps} - m_s) / m_s) \times 100 (\%) = ((369,55 - 322,24) / 322,24) \times 100 (\%) = 15 \%$, vpijanje vode.

Lahki agregat W Liapor 1/4 ima površinsko vlažnost 7,6 % in vpijanje vode po 24 urah 15 %.

II.) Lahki agregat W Liapor frakcije 4/8

$m(\text{vlažen agregat}) = 519,8 \text{ g}$

$m(\text{površinsko suh}) = 506,99 \text{ g}$

$m(\text{suh agregat}) = 451,14 \text{ g}$

$\omega(\text{površinska vlažnost}) = 2,53 \%$

$U(\text{vpijanje vode}) = 12,4 \%$

Lahki agregat W Liapor 4/8 ima površinsko vlažnost 2,53 % in vpijanje vode po 24 urah 12,4 %.

V prvem trenutku (pri času "0" takoj) je srk vode tako velik, medtem ko dodajamo vodo, da ga ne moremo izmeriti niti s piknometrom. Poroznost oziroma vpijanje lahkega agregata Liapora je zelo veliko. Predpostavimo:

- W Liapor 1/4 = 10 % predpostavimo dodatne vode.
- W Liapor 4/8 = 10 % predpostavimo dodatne vode.

Glede na pridobljene rezultate smo se odločili, da v 30 minutah predpostavimo, da lahki agregat Liapor vpije 10 % vode. Tako, da bomo to dodatno vodo dodali lahkemu agregatu Liaporu 30 minut pred začetkom mešanja.

5.2.4 Sejalna analiza

Zahteve za sejanje za lahki agregat odstopajo od tistih za normalno težki agregat z zahtevo po večji masi lahkega agregata, da gre skozi manjša sita finejše velikosti. Ta sprememba pri sejanju (ASTM C 330) ugotavlja, da je povečanje prostorninske mase z manjšanjem velikosti delcev lahkkih ekspandiranih agregatov. Ta sprememba prinaša enako volumsko porazdelitev agregata. Izdelovalci lahkega agregata običajno skladiščijo material v več standardnih velikostih, kot je grobi in fini agregat. S kombinacijo različnih velikosti frakcij ali zamenjavo dela ali vse fine frakcije z normalno težkim peskom lahko dobimo širok razpon betonske prostorninske mase. Zamenjava z normalno težkim peskom bo običajno povečala betonsko prostorninsko maso od 80 do 160 kg/m³. Z uporabo večje količine cementa za izdelavo betona visoke trdnosti se lahko poveča prostorninska masa od 32 do 96 kg/m³. [5]

Velikost delcev mora biti razvrščena v skladu s SIST EN 933-1 s suhim sejanjem in rezultati navedeni. "Če je treba določiti nazivno velikost največjega zrna agregata v svežem betonu, se mora meriti po standardu SIST EN 933-1. Nazivna velikost največjega zrna agregata, opredeljena v predstandardu EN 12620, ne sme biti večja od predpisane (SIST EN 206-1:2003, str. 27)." [17, 18]

Dobro granuliran agregat z večjim največjim zrnom ima manj praznin kot z manjšim največjim zrnom. Iz tega sledi, da beton z večjimi zrni agregata potrebuje manj malte na enoto volumna betona. V nobenem primeru ne sme nominalna velikost največjega zrna presežati 1/5 najvišje dimenzije med robi kalupov, 1/3 debeline plošče, niti 3/4 minimalne razdalje med posameznimi armaturnimi palicami,

svežnjem palic ali prednapetimi vrvmi. Ko je zahtevan beton visoke trdnosti, se lahko boljše rezultate doseže z zmanjšanjem nominalne maksimalne velikosti agregata, ker tako lahko pridobimo večje trdnosti pri danem v/c razmerju. [19]

Velikost agregata naj bo določena s parom sit različnih velikosti, izbranih iz osnovnega stavka sit (basic sit), ali iz basic set plus set 1, ali iz basic set plus set 2, prikazanih v preglednici 16. Kombinacija seta 1 in seta 2 ni dovoljena. [18]

Preglednica 16: Velikosti sit za določitev zrnivosti agregata. [18]

Basic set mm	Basic set plus set 1 mm	Basic set plus set 2 mm
0	0	0
0,25	0,25	0,25
0,5	0,5	0,5
1	1	1
2	2	2
-	2,8 (3)	3,15 (3)
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4 (22)	-
31,5 (32)	31,5(32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63

Opomba: Delež premajhnih zrn agregata ne sme prekoračiti 15 % mase snovi. Delež prevelikih zrn agregata ne sme prekoračiti 10 % mase snovi. Ko je potrebno, mora biti sito, skozi katero gre 100 % materiala, navedeno. [18]

"Sejalne površine so mreže z odprtinami določene velikosti. Delci, ki sestavljajo vzorec, se med sejanjem razvrstijo (ostanejo) na posameznih sitih. Za ustreznost razvrstitev delcev moramo zagotoviti transport delcev po sejalni površini, kar dosežemo z gibanjem sita (vibriranjem), in dovolj dolgim časom sejanja. Izbira sistema sit, v katerem je najvišje sito z največjo odprtino, najnižje pa sito z najmanjšo odprtino, je odvisna od narave vzorca in zahtevane natančnosti pri določitvi zrnivosti sestave agregata. Standardna sita imajo kvadratne odprtine, njihova velikost pa je določena z dolžino stranice odprtine. Preskusni vzorec dobimo iz laboratorijskega vzorca z eno od metod zmanjševanja vzorca. Vzorec agregata, ki se seje, mora biti suh. Preskusni vzorec vsujemo na največje sito sistema sit in začnemo z vibriranjem. Po določenem času odstranimo največje sito in material, ki je ostal na njem, še ročno presejemo. Pri tem uporabimo ustrezen pladenj, v katerem se nabira presejan material.

Material s pladnja vsujemo na naslednje (manjše) sito in postopek ponovimo. Postopek ponovimo za vsako od sit v sistemu sit. Sejanje na posameznem situ je končano, ko se v eni minuti sejanja masa agregata na situ ne zmanjša za več kot 1 % (Žarnić, 2004/2005)." [32]

Minimalna masa oziroma volumen preskusnega vzorca pri sejanju je odvisna od največjega zrna agregata D in je za zrno $D = 8 \text{ mm}$ 0,6 kg oziroma 0,8 l in za $D \leq 4 \text{ mm}$ 0,2 kg oziroma 0,3 l. [34]

Razvrstitev finih in grobih agregatov in uporabljen delež pri sestavi mešanice ima pomemben učinek na beton. Dobro razvrščen agregat bo imel stalno porazdelitev velikosti delcev, minimalne vsebnosti praznin in bo zahteval minimalno količino cementne paste za zapolnitev praznin. To bo povzročilo najbolj ekonomično uporabo cementa in povzročilo maksimalno trdnost z minimalno spremembo volumna zaradi krčenja pri sušenju. Na splošno velja, da se doseže največji skupni volumen agregata v betonu [19]:

- (a) ko je grobi agregat dobro razvrščen od velikega zrna do malega;
- (b) ko so delci zaobljeni ali kvadrataste oblike;
- (c) ko je struktura površine najmanj porozna.

Ti isti faktorji za razvrstitev, obliko delcev in teksturo vplivajo tudi na potreben delež normalno težkega finega agregata, ki je povezan z zaobljeno ali kvadratasto obliko in gladko teksturo površine agregatnih zrn. Običajno velja, da ko je dosežena dobra razvrstitev zrn, je normalno težki pesek uporabljen za zamenjavo lahkega finega agregata, delež grobega agregata pa se lahko poveča. [19]



a) Sistem sit različnih velikosti

b) Odprtine sit



c) Sita napolnjena z agregatom

d) Naprava za sejanje (vibrator)

Slika 16: Sistem sit z različnimi velikostmi in naprava za sejanje.

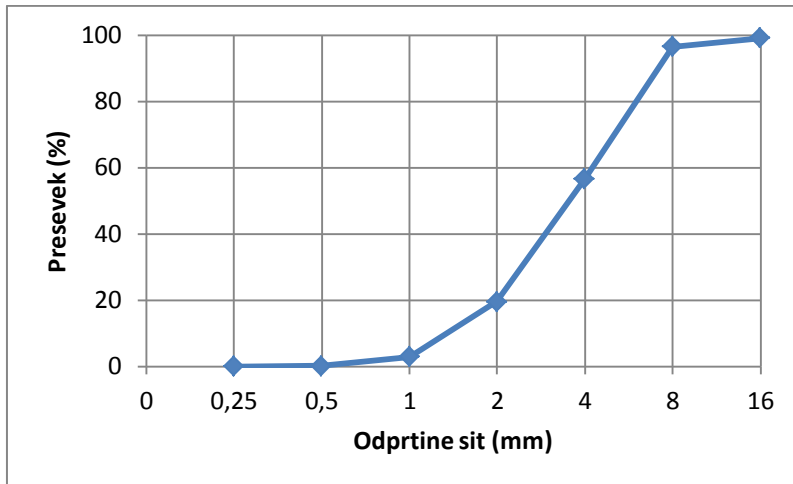
Določevanje zrnivosti agregata s sejanjem:

1.) Material: V Liapor 1/8, datum preizkušanja: 6. 3. 2013

Začetna masa: 1064 g

Preglednica 17: Delež frakcije za V Liapor 1/8.

Delež frakcije (%): V Liapor 1/8					
0,25/0,5	0,5/1	1/2	2/4	4/8	8/16
0,19 %	2,63 %	16,76 %	37,09 %	39,92 %	2,6 %



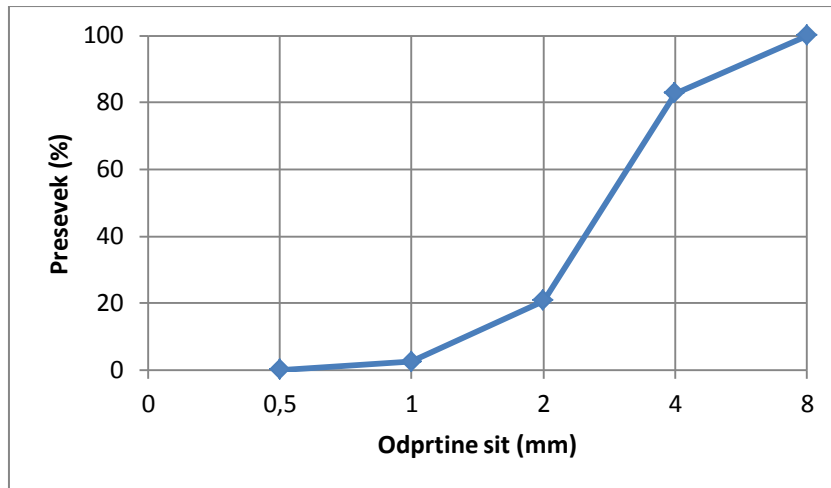
Grafikon 2: Krivulja zrnivosti za V Liapor 1/8.

2.) Material: W Liapor 1/4

Začetna masa: 4346 g

Preglednica 18: Delež frakcije za W Liapor 1/4.

Delež frakcije (%): W Liapor 1/4			
0,5/1	1/2	2/4	4/8
2,46 %	18,23 %	62,11 %	17,21 %



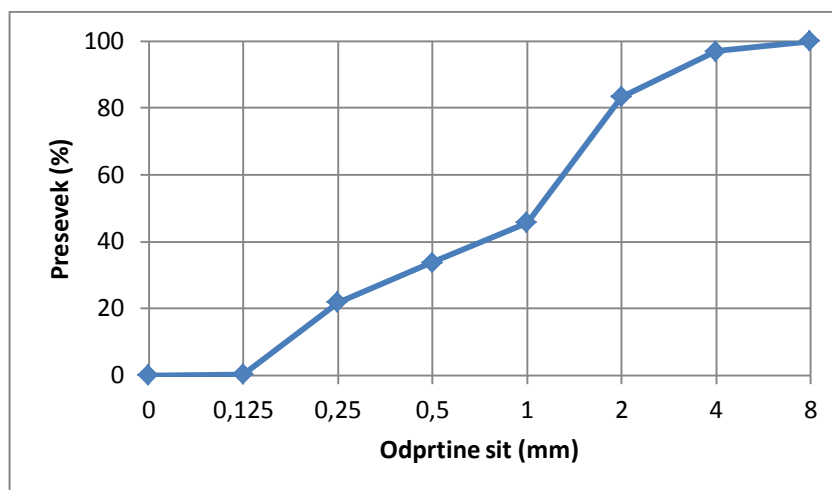
Grafikon 3: Krivulja zrnivosti za W Liapor 1/4.

3.) Material: Pesek 0/4

Masa materiala: 4346 g

Preglednica 19: Delež frakcije za pesek 0/4.

Delež frakcije (%): Pesek 0/4						
0/0,125	0,125/0,25	0,25/0,5	0,5/1	1/2	2/4	4/8
0,37 %	21,44 %	11,99 %	11,92 %	37,63 %	13,72 %	2,92 %



Grafikon 4: Krivulja zrnivosti za pesek 0/4.

5.2.5 Določanje prostorninske mase sveže betonske mešanice

Navodila za določanje prostorninske mase so določena v standardu SIST EN 12350-6. Prostorninska masa svežega betona predstavlja zanesljiv pokazatelj mnogih lastnosti strjenega betona. Določa se takoj po končani izdelavi vzorca tako, da se kalup z vzorcem z zunanje strani dobro očisti in stehta. Poznati moramo maso praznega kalupa z natančnostjo $\pm 0,1$ %. Prostorninsko maso določimo iz izraza [32]:

$D = ((m_2 - m_1) / V)$, kjer je:

m_1 ... masa kalupa (kg)

m_2 ... masa kalupa z vzorcem (kg)

V ... prostornina kalupa (m^3)

Sveža prostorninska masa lahkega betona je funkcija sestave mešanice, vsebnosti zraka, potrebe po vodi, relativne prostorninske mase delcev in absorbirane vsebnosti vlage s strani lahkih agregatov. Za določitev prostorninske mase betona lahko sledimo tudi postopku v ASTM C 567. [5, 18]

Preglednica 20: Klasifikacija lahkih betonov. [17]

Razred gostote	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Območje gostote kg/m^3	≥ 800 in ≤ 1000	> 1000 in ≤ 1200	> 1200 in ≤ 1400	> 1400 in ≤ 1600	> 1600 in ≤ 1800	> 1800 in ≤ 2000

Opomba: gostota lahkega betona se lahko predpiše tudi s ciljno vrednostjo. [17]



Slika 17: Določanje sveže prostorninske mase betona na tehtnici.

5.2.6 Tlačna trdnost betonskih vzorcev

"Beton je časovno spremenljiv kompoziten material, ki sestoji iz zrn agregata in cementnega kamna. Zaradi dolgotrajnega procesa hidratacije cementa se s staranjem betona povečujeta trdnost in elastični modul betona (Beg, 2009, str. 2–7)." [35]

Tlačno trdnost določamo na standardiziranih preizkušancih v obliki valjev ali kock. Pred tlačnim preizkusom natančno ugotovimo dimenzije preizkušanca in njegovo maso. S pomočjo preše določimo porušno silo, tj. največjo silo, ki jo preizkušanec prenese. Na osnovi znanih dimenzij in ugotovljene porušne sile določimo tlačno trdnost preizkušanca. Glede na to, da standardi predpisujejo določanje razreda tlačne trdnosti betona (določamo ga na podlagi tlačne trdnosti betona pri starosti 28 dni), je potrebno poznati vplive velikosti preizkušanca na primerljivo tlačno trdnost betona. Tlačno trdnost izračunamo po formuli [32]:

$f_c = F / A_c^2$ (MPa), kjer je [32]:

F... porušna sila (N)

A_c ... površina vodoravnega prereza preizkušanca (mm^2)

f_c ... tlačna trdnost ($\text{MPa} = \text{N}/\text{mm}^2$)

Preglednica 21: Zahteve za konstrukcijski lahki beton. [8]

Vzorci, sušeni na zraku 28 dni Prostorninska masa max. (kg/m³)	28-dnevna cepilna natezna trdnost, min. (MPa)	28-dnevna tlačna trdnost, min. (MPa)
	Samo lahki agregati	
1760	2.2	28
1680	2.1	21
1600	2.0	17
	Kombinacija normalno težkega peska in lahkega agregata	
1840	2.3	28
1760	2.1	21
1680	2.1	17

Opomba: Tlačna trdnost in prostorninska masa morata biti povprečje treh vzorcev in cepilna natezna trdnost mora biti povprečje 8 vzorcev. [8]

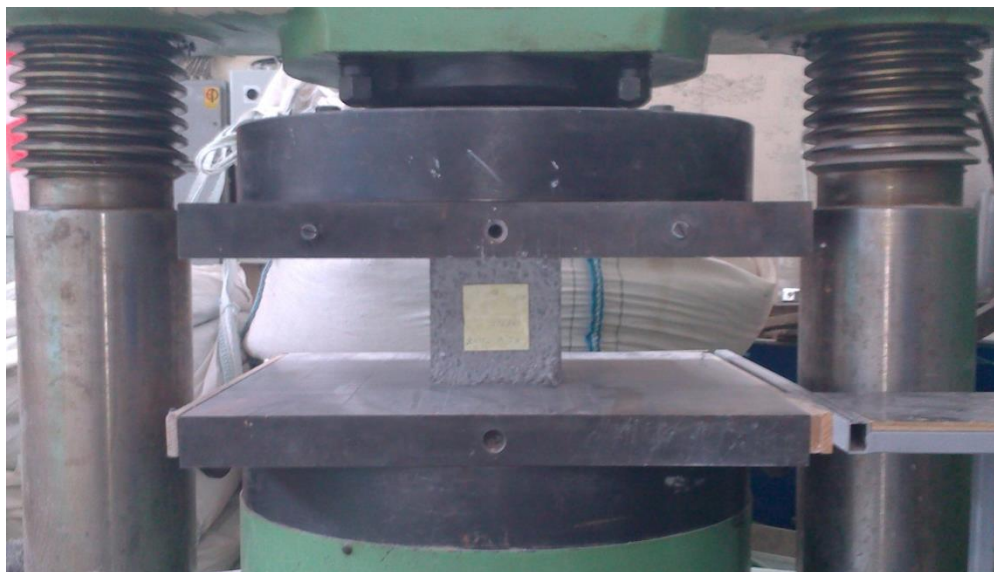
"Za klasifikacijo betona glede na tlačno trdnost velja preglednica 22 za lahki beton. Za klasifikacijo se lahko uporabi tlačna trdnost valjev s premerom 150 mm in višino 300 mm po 28 dneh (f_{c-cyl}), ali pa tlačna trdnost kock s stranico 150 mm po 28 dneh (f_{c-cube}) (SIST EN 206-1:2003, str. 19)." [17]

Preglednica 22: Razredi tlačne trdnosti za lahki beton. [17]

Razred tlačne trdnosti	Minimalna karakteristična trdnost valja ($f_{ck,cyl}$) (N/mm²)	Minimalna karakteristična trdnost kocke a ($f_{ck,cube}$) (N/mm²)
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Druge vrednosti se lahko uporabijo, če je razmerje med njimi in referenčno trdnostjo valja določeno z zadostno natančnostjo in je dokumentirano.

Opomba: V posebnih primerih se lahko uporabijo vmesne vrednosti trdnosti iz preglednice 22, če to dovoljujejo ustrezni standardi za projektiranje konstrukcij. [17]



Slika 18: Preša za določanje tlačne trdnosti betona v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na FGG.



Slika 19: Primer zdrobljenega porušenega preizkušanca po tlačni obremenitvi.

6 ANALIZA REZULTATOV

Preiskave smo razdelili na dve glavni skupini mešanic, ki vsebujeta podskupine. Delali smo z lahkim agregatom Liapor, narejenim iz ekspanzirane gline. Ena skupina mešanic je bila zasnovana z uporabo lahkega agregata V Liapor frakcije 1/8, druga skupina mešanic pa z lahkim agregatom W Liapor frakcij 1/4 in 4/8. Obe skupini mešanic vsebujeta normalno težki pesek frakcije 0/4. Opravili smo 4 vrste preiskav:

- merili smo razlez pri času "0" (takoj), 30 minut in 60 minut;
- z reometrom smo merili plastično viskoznost in strižno napetost na meji tečenja pri času "0" (takoj), 30 minut in 60 minut;
- svežo prostorninsko maso mešanice in
- tlačno trdnost preizkušancev.

V vsaki skupini mešanic so predstavljeni rezultati v obliki preglednic in grafikonov.

6.1 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8

Pri mešanicah smo poskušali s spreminjanjem količine sestavin dobiti mešanico z zadovoljivim razlezom, ki bo stabilna in dovolj viskozna. Razlez, ki ga iščemo, je približno 300 mm z mini razlezom s posedom (mali stožec za merjenje razleza) in okrog 700 mm s standardnim razlezom s posedom (veliki stožec). Odločili smo se, da bomo poskušali doseči prostorninsko maso manjšo od 1800 kg/m^3 . Pri mešanicah z lahkim agregatom V Liapor so se nam na začetku pojavile težave, in sicer je agregat splaval na površje. Ugotovili smo, da so mešanice z lahkim agregatom V Liapor zaradi njegove nizke gostote delcev bolj občutljive na segregacijo kot mešanice z W Liaporom, ki ima višjo gostoto delcev.

Preglednica 23: Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8.

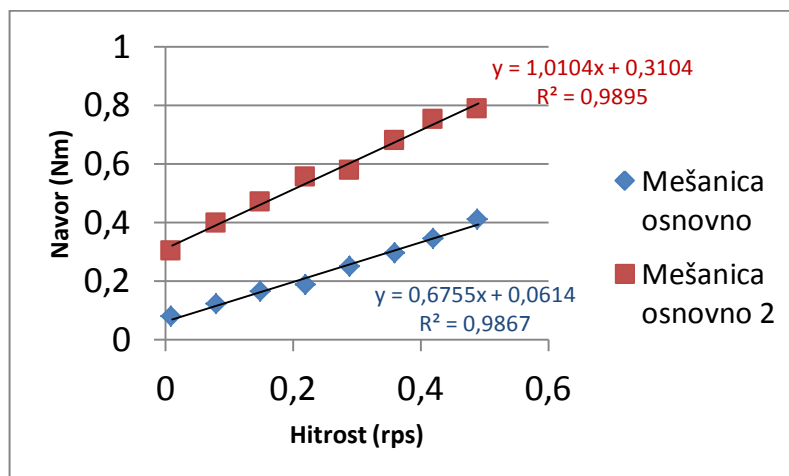
Mešanice	Čas merjenja t (min)	Razlez s posedom (mini slump ali standardni) (mm)	Reometer τ_0 (Pa)	Reometer η (Pas)	Sveža prostorninska masa mešanice (g/dm ³)
Osnovno (8. 3. 2013)	t0	430	/	/	/
	t30	370	12,9	4,1	/
Osnovno2 (8. 3. 2013)	t0	255	/	/	/
	t0 (ponovitev)	270	67,5	6,2	/
L1 (13. 3. 2013)	t0	297,5	59,1	12,1	1130
V7 (13. 3. 2013)	t0	300	69	15	1256
V71 (15. 3. 2013)	t0	465	/	/	/
	t0	567,5	/	/	/
	t0	637,5	55	7	1428
	t30	540	92,8	10,4	1460
	t60	495	136,4	13,2	1438
V72 (18. 3. 2013)	t0	730	37,6	11	1442
	t30	565	87,2	17,5	1460
	t60	495	145,5	24,3	1420
V73 (18.3.2013)	t0	760	37,1	6,5	1490
	t30	625	52,3	10,1	1446
	t60	600	71,6	13,3	1500
L2 (19.3.2013)	t0	775	37,1	6,5	/
	t0 (nova mešanica)	750	52,3	10,1	/
	t0 (nova mešanica)	755	71,6	13,3	/
	t30	612,5	/	/	/

Opomba:

- t0... pri času 0 minut;
- t30... pri času 30 minut od začetka 1. mešanja;
- t60... pri času 60 minut od začetka 1. mešanja;
- z rdečo barvo so označeni razlezi, ki smo jih dobili iz mešanic velikega mešalca. Uporabljen je večji stožec za merjenje razleza.

Mešanici Osnovno in Osnovno2 smo zamešali z različnima količinama SP. Ker je imela mešanica Osnovno prevelik razlez (430 mm pri času "0"), smo mešanico Osnovno 2 zamešali z manjšo količino SP, da bi ta razlez zmanjšali. Mešanica Osnovno2 je z zmanjšano količino SP dosegla premajhen razlez 255 mm, zato smo dodali še 2 g SP in povečali razlez na 270 mm, kar pa je še vedno prenizka vrednost za razlez, katerega iščemo, ta je 300 mm. Prostorninske mase nismo merili, ker z mešanicama nismo bili zadovoljni. Ko smo pri mešanici Osnovno2 zmanjšali vrednost SP v primerjavi z mešanico Osnovno, se je povečala strižna napetost na meji tečenja. Plastična viskoznost je pri obeh

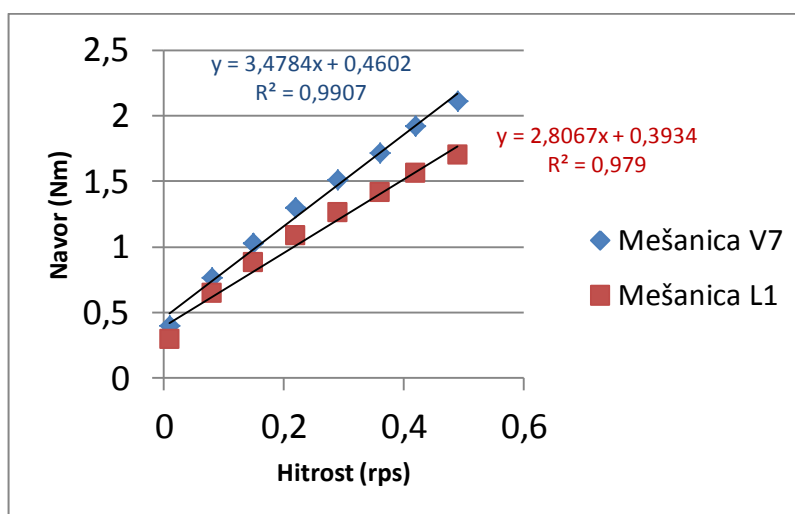
mešanicah približno enaka, saj dodajanje oziroma manjšanje uporabljenega SP spreminja predvsem strižno napetost na meji tečenja.



Grafikon 5: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanic osnovno in osnovno2.

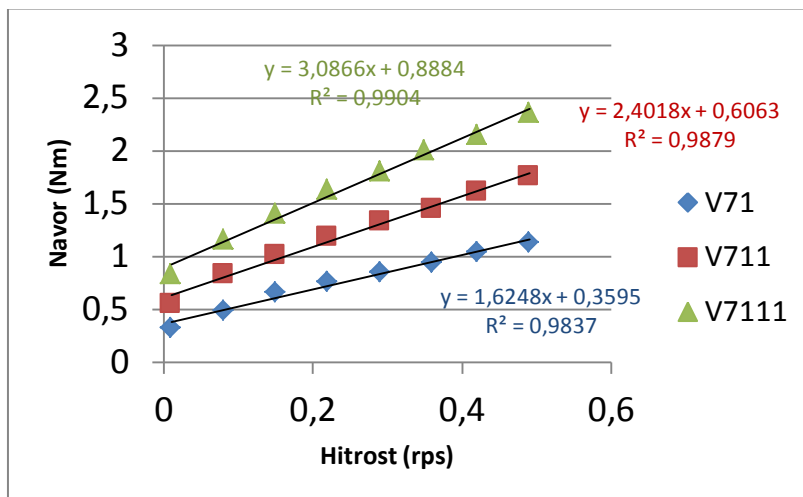
Ker pri mešanicah Osnovno in Osnovno2 nismo dobili stabilne mešanice, smo spremenili količine sestavin mešanice lahkega agregata V Liapora, peska 0/4 in cementa. Pri nadaljnjih mešanicah te skupine smo spreminjali samo količino vode in SP.

Pri mešanici L1 smo dobili razlez 297,5 mm, kar je skoraj idealno. Mešanica L1 ima v primerjavi z mešanico V7 več SP, zato ima malo manjšo strižno napetost na meji tečenja. Na površju mešanice L1 se je penilo, kar je lahko vzrok prevelike vsebnosti SP. Prostorninska masa se je na račun tega pojava tudi zmanjšala in znašala 1130 kg/m³. Mešanica V7, ki je vsebovala manj SP in vode v primerjavi z L1, je dosegla znatno višjo prostorninsko maso 1256 kg/m³. Zmanjšanje vode je povečalo inboljšalo plastično viskoznost mešanice V7. Dobili smo tudi idealen razlez 300 mm na malem mešalcu (mali stožec).



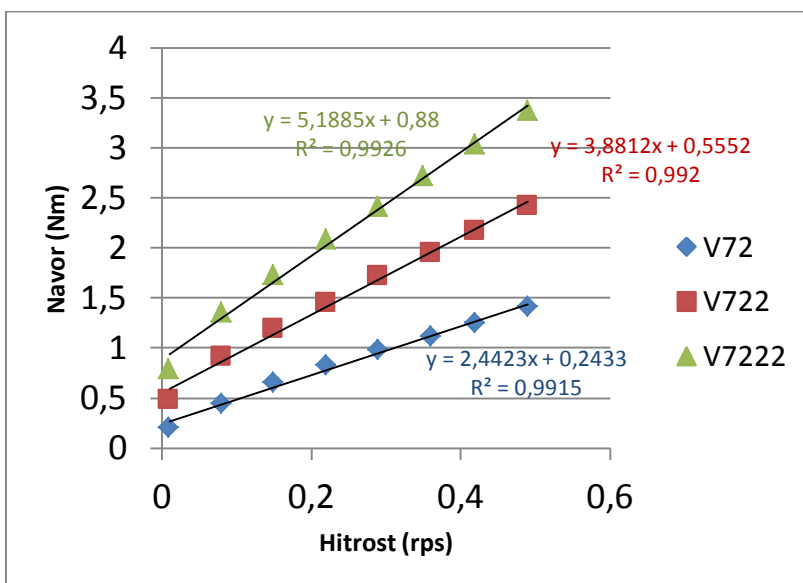
Grafikon 6: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice L1 in mešanice V7.

Mešanico V7 smo preračunali iz 4 L na 30 L za veliki mešalec in jo označili kot mešanico V71. Mešanica V71 je imela premajhen razlez 465 mm, zato smo takoj dodali še 0,698 g vode in premešali, a razlez še vedno ni bil dober. Dodali smo še 10 g SP in takoj premešali. Nato smo dobili razlez 637,5 mm. Strižna napetost na meji tečenja mešanice V71 s časom prehitro narašča (oznake V71 – čas 0; V711 – čas 30 minut; V7111 – čas 60 minut). Plastična viskoznost je dobra.



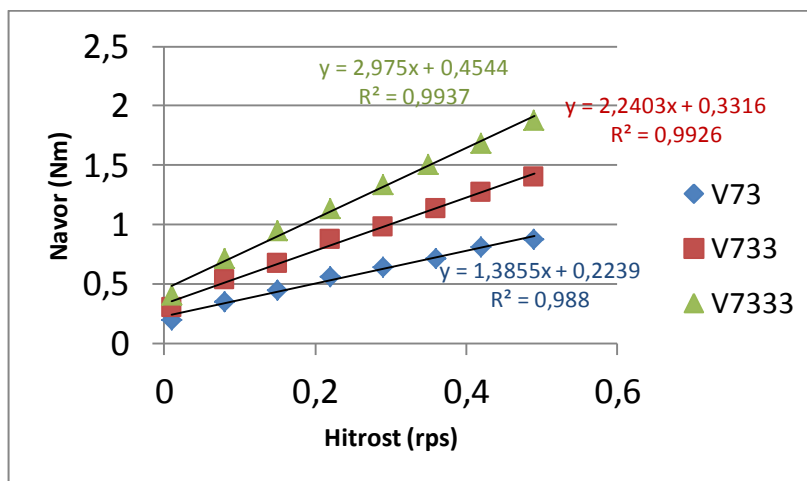
Grafikon 7: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice V71.

Mešanico V72 smo zamešali z malo manjšo količino vode kot pri mešanici V71. Mešanica V72 je dosegla zadovoljiv razlez 730 mm, vendar mešanica ni bila stabilna. Bila je na meji segregacije in zelo tekoča. Časovno je mešanica tudi veliko izgubljala na razlezu. Po 60 minutah je bil razlez že 495 mm, kar pomeni, da mešanica časovno veliko izgublja (235 mm). Pri mešanici V72 smo zaradi povečanja SP v primerjavi z mešanico V71 zmanjšali strižno napetost na meji tečenja, vendar pa je časovno še vedno preveč narasla, kar ni dobro.



Grafikon 8: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice V72.

Pri mešanici V73 smo glede na mešanico V72 nekoliko zmanjšali količino SP (5 g) in dodali več vode (150 g). Mešanica je imela razlez 760 mm, ni bila stabilna, bila je zelo tekoča in na meji segregacije.



Grafikon 9: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice V73.

6.1.1 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek kamena moka

Podskupina mešanic, ki temeljijo na skupini mešanic z lahkim agregatom V Liapor, vendar smo tukaj dodali še mineralni dodatek kameno moko. Kamena moka se dodaja, da se v SCC betonih zmanjša količina cementa, ki je drag. Prostorninska masa cementa je 3 kg/dm^3 , prostorninska masa kamene moke pa je $2,7 \text{ kg/dm}^3$.

Preglednica 24: Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek kamena moka.

Mešanice	Čas merjenja t (min)	Razlez s posedom (mini slump ali standardni) (mm)	Reometer τ_0 (Pa)	Reometer η (Pas)	Sveža prostorninska masa mešanice (g/dm ³)
V2 (11. 3. 2013)	t_0	320	31,5	2,6	1340
VS1 (11. 3. 2013)	t_0	255	/	/	1696
V4 (11. 3. 2013)	t_0	335	24,9	6,2	1360
V6 (12. 3. 2013)	t_0	210	/	/	/
	t_0	210	/	/	/
	t_0	242,5	/	/	/
	t_0	290	54,2	9,6	1190
	t_{30}	245	/	/	1216
V8 (12. 3. 2013)	t_0	345	33,5	13,7	1370
	t_{30}	297,5	77,6	18,4	1354
	t_{60}	242,5	137,7	21,9	1322
V10 (13. 3. 2013)	t_0	660	120,5	21,3	1386
	t_{30}	470	293,9	28,9	1416
	t_{60}	385	521,9	32	1484
V12 (14. 3. 2013)	t_0	740	41,6	10,4	1460
	t_{30}	590	88,8	18,4	1422
	t_{60}	490	209,4	25,5	1412
V14 (15. 3. 2013)	t_0	745	/	/	1410
	t_0 (nova mešanica)	717,5	/	/	1405
	t_0 (nova mešanica)	770	/	/	1368

Opomba:

- t_0 ... pri času 0 minut;
- t_{30} ... pri času 30 minut od začetka 1. mešanja;
- t_{60} ... pri času 60 minut od začetka 1. mešanja;
- z rdečo barvo so označeni razlezi, ki smo jih dobili iz mešanic velikega mešalca (uporabljen je večji stožec za merjenje razleza).



Slika 20: Primer segregacije lahkega agregata Liapor pri mešanici V2.

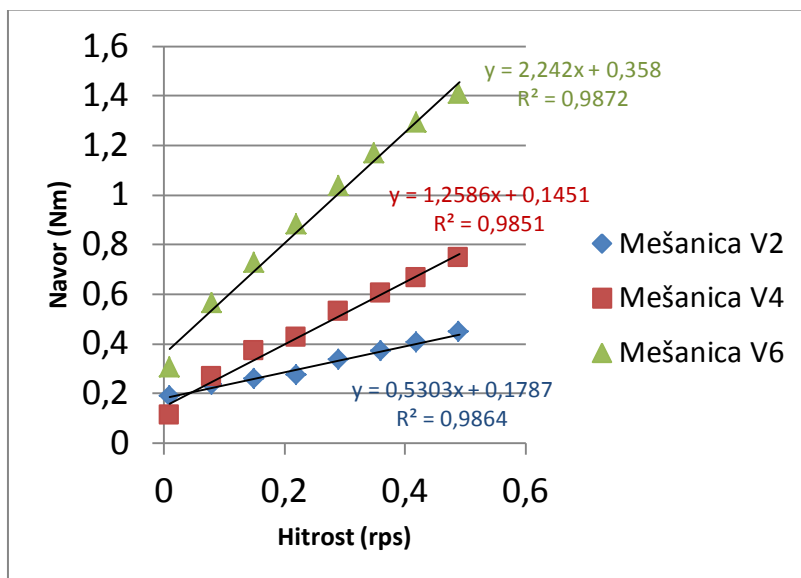
Vse mešanice v tej podskupini imajo enak delež količin V Liapora 1/8, cementa, moke in peska 0/4. Spreminjali smo količino vode in SP, da smo dobili stabilno mešanico in dober razlez.

Mešanica VS1 se ne obnaša kot Binghamova tekočina, zato nismo dobili zadovoljivih rezultatov iz reometra. Rezultate smo zavrgli.

Mešanica V2 je imela nekoliko prevelik razlez, ta je bil 320 mm. Pojavila se je tudi rahla segregacija, zato smo malo zmanjšali količino vode in SP pri mešanici V4. Prostorninska masa je bila ustrezna 1340 kg/m^3 .

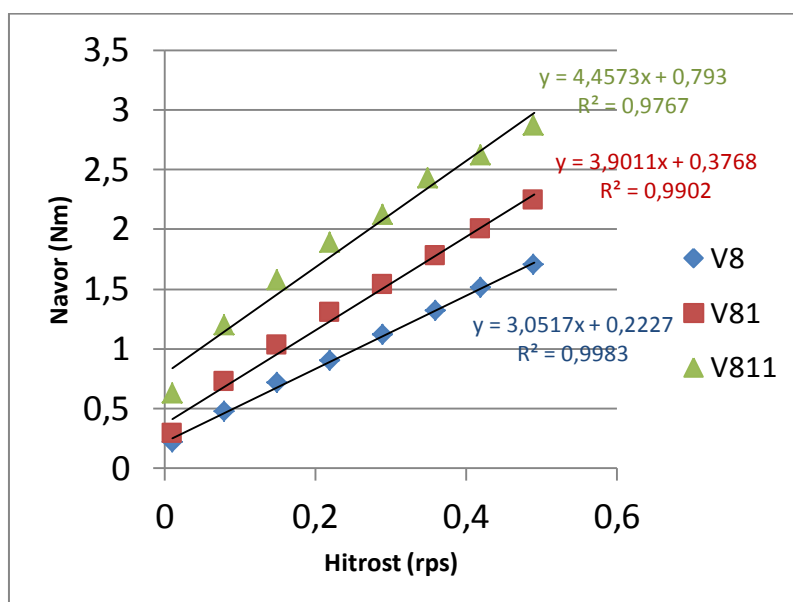
Pri mešanici V4 smo namočili V Liapor za 24 ur v dodatno vodo, zato da med mešanjem ne bo vpiljal zamesne vode. Razlez je bil prevelik – 335 mm. Mešanica V6 je enaka mešanica kot V4, razen da V Liapor ni namočen v vodo za 24 ur. Vendar je bil slab razlez, zato smo takoj dodali 152 g vode in nato še 2 g SP. Izmerili smo razlez 290 mm. Iz tega lahko vidimo, da imata voda in SP, ki se dodajata naknadno, slabši učinek na lastnosti mešanice.

Strižno napetost na meji tečenja imata mešanici V2 in V4 dovolj nizko, kar je posledica dovolj dodanega SP pri mešanici V2, pri mešanici V4 pa je bil agregat namočen, tako da je imela mešanica z 2 g SP manj tudi nizko strižno napetost na meji tečenja, ker med mešanjem V Liapor ni srkal zamesne vode. Pri mešanici V6 smo dobili visoko strižno napetost na meji tečenja, ker nismo dali dovolj vode in SP na začetku mešanja, poleg tega pa je bil V Liapor suh, tako da je vpil veliko zamesne vode. Plastična viskoznost je najnižja pri mešanici V2, ker je imela pri začetnem mešanju največ vode.



Grafikon 10: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanic V2, V4 in V6.

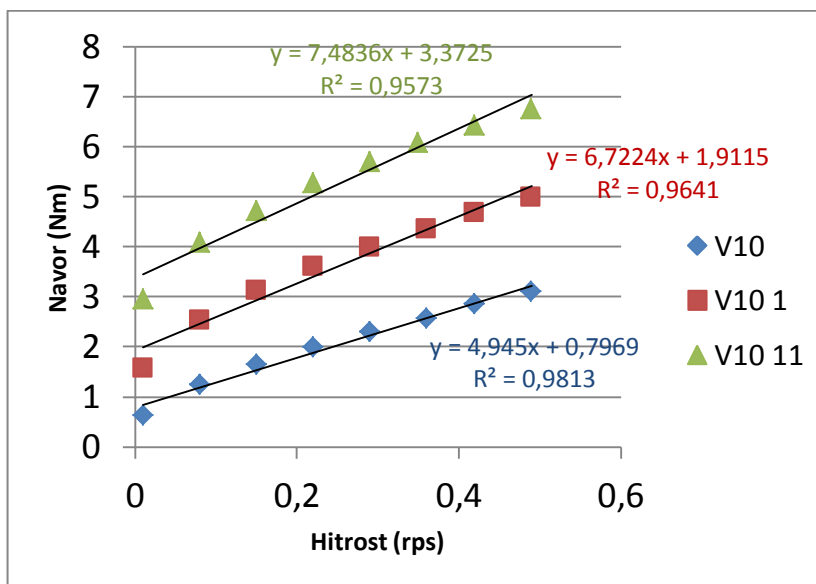
Mešanica V8 je mešanica V6, skupaj z dodano vodo in SP, ki smo jih dodali naknadno pri tej mešanici. Pri mešanici V8 smo dobili prevelik razlez 345 mm. Mešanica ima pri enakih količinah, dodanih v različnem času, izmerjen manjši razlez za 55 mm. Naknadno dodajanje sestavin ima slabši učinek na lastnosti mešanice in tudi suh V Liapor lahko vpije več zamesne vode, ker mešanje traja dlje časa. Strižna napetost na meji tečenja je pri času "0" (takoj) mešanice V8 dovolj nizko, vendar časovno preveč naraste.



Grafikon 11: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice V8.

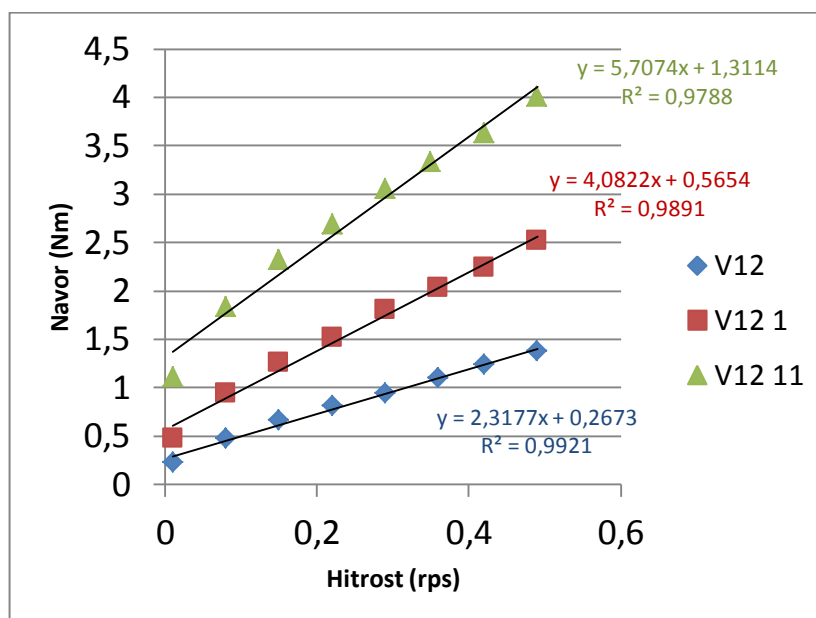
Mešanico V10 smo zamešali na velikem mešalcu in dodali malo manj vode kot pri mešanici V8. Dosežen razlez je bil premajhen 660 mm in je tudi veliko izgubljal s časom. Prostorninska masa je bila

zadovoljiva – 1386 kg/m³. Strižna napetost na meji tečenja mešanice V10 je s časom preveč narasla (521,9), za kar je lahko odgovorna premajhna količina SP ali vode.



Grafikon 12: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice V10.

Mešanico V12 smo zamešali na velikem mešalcu in dodali 300 g več vode kot pri mešanici V10, ker je imela slab razlez. Mešanica je dosegla zadosten razlez 745 mm in je zadovoljila kriterije oziroma pričakovane lastnosti mešanice.



Grafikon 13: Diagram navor-hitrost vrtenja mešanice V12.

6.1.2 Mešanica z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek elektrofiltrski pepel

Mešanici, ki temelji na skupini mešanic z lahkim agregatom V Liaporom, smo dodali še mineralni dodatek elektrofiltrski pepel.

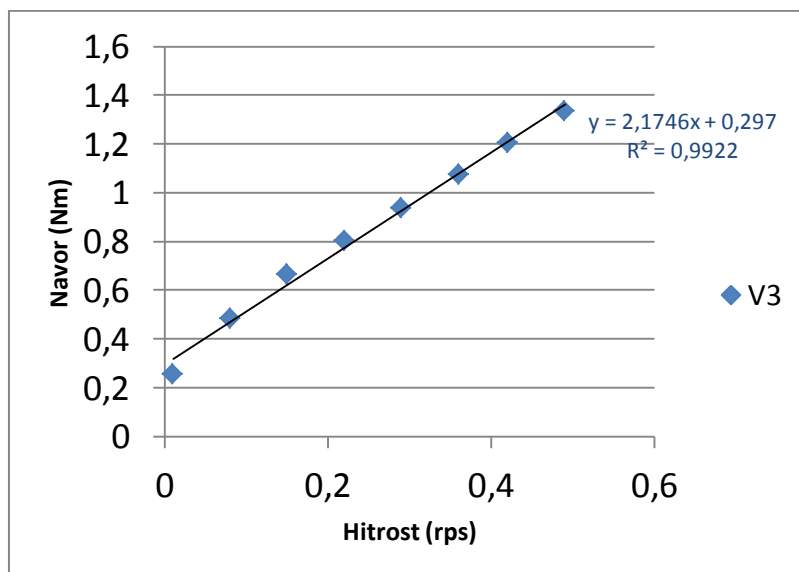
Preglednica 25: Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, uporabljen je tudi mineralni dodatek elektrofiltrski pepel.

Mešanice	Čas merjenja t (min)	Razlez s posedom (mini slump ali standardni) (mm)	Reometer τ_0 (Pa)	Reometer η (Pas)	Sveža prostorninska masa mešanice (g/dm ³)
V3 (11. 3. 2013)	t_0	320	51,1	10,7	1430

Opomba:

- t_0 ... pri času "0" minut.

Mešanica V3 je dosegla nekoliko prevelik razlez 320 mm. Mešanico bi morali ponoviti in uporabiti manj vode ter povečati SP.



Grafikon 14: Diagram navora-hitrost vrtenja mešanice V3.

6.1.3 Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, ki je namočen

Podskupina mešanic, ki temelji na mešanicah z lahkim agregatom V Liapor, s to razliko, da smo tukaj lahki agregat V Liapor pred mešanjem namočili z dodatno vodo, da ne bo vpiljal zamesne vode.

Preglednica 26: Mešanice z lahkim agregatom V Liapor frakcije 1/8, ki je namočen.

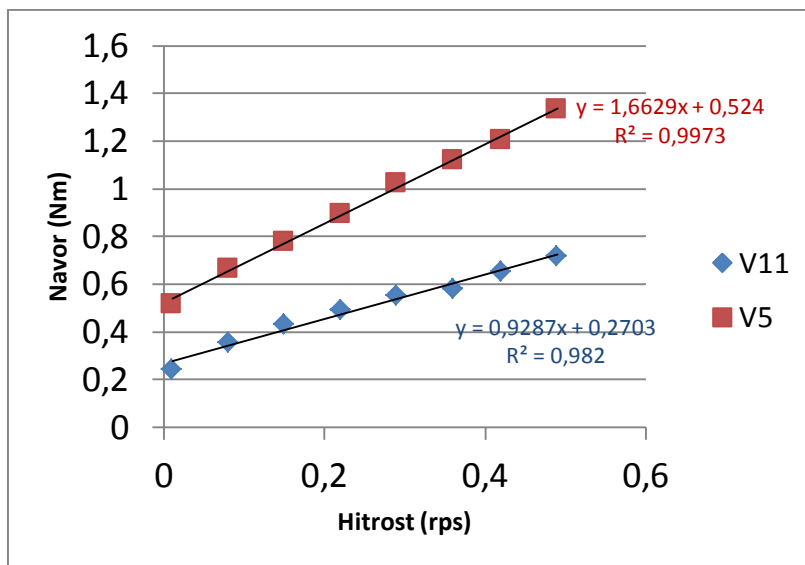
Mešanice	Čas merjenja t (min)	Razlez s posedom (mini slump ali standardni) (mm)	Reometer τ_0 (Pa)	Reometer η (Pas)	Sveža prostorninska masa mešanice (g/dm ³)
V11 (11. 3. 2013)	to	230	/	/	1404
	to	290	47,5	4,6	1386
V5 (11. 3. 2013)	to	230	92,2	8,2	/
SC (8. 5. 2013)	to	300	54,1	6,9	1256
B1 (15. 5. 2013)	to	730	46,6	9,5	1314
B2 (20. 5. 2013)	to	682,5	/	/	1270

Opomba:

- to... pri času 0 minut;
- z rdečo barvo so označeni razlezi, ki smo jih dobili iz mešanic velikega mešalca (uporabljen je večji stožec za merjenje razleza);
- z zeleno barvo je označena povprečna vrednost meritve v reometru, kjer smo mešanico 3-krat preizkusili v roku 5 minut;
- pri mešanicah SC, B1 in B2 z 10 % dodatne vode, za katero predpostavimo, da jo ekspandirana glina vpije, poškopimo agregat iz ekspandirane gline in ga pustimo, da tako odležava 30 minut, ko ga lahko uporabimo za izdelavo betona. Pri mešanicah V11 in V5 pa je bil V Liapor namočen 24 ur v vodi.

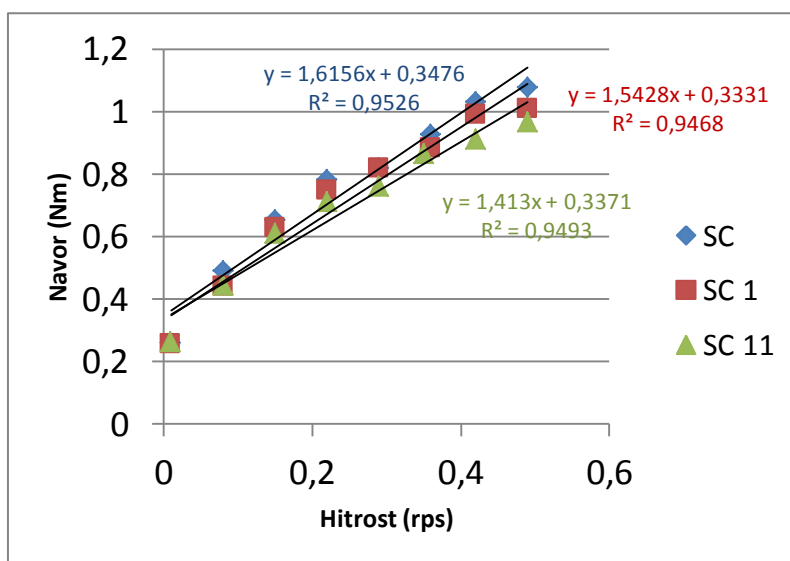
Pri vseh mešanicah V11, V5, SC, B1 in B2 smo uporabili enake količine V Liapora 1/8, cementa in peska 0/4. Spreminjali smo le količino vode in SP ter iskali stabilno mešanico z zadovoljnim razlezom.

Pri mešanici V11 smo izmerili premajhen razlez 230 mm, zato smo dodatno dodali še 3 g SP in izmerili razlez 290 mm. Prostorninska masa je bila zadovoljiva 1386 kg/m³. Pri mešanici V5 smo izmerili premajhen razlez 230 mm. Strižna napetost na meji tečenja mešanice V5 je bila previsoka. Pri mešanici V11 je bila nižja, ker je imela mešanica več SP in vode.



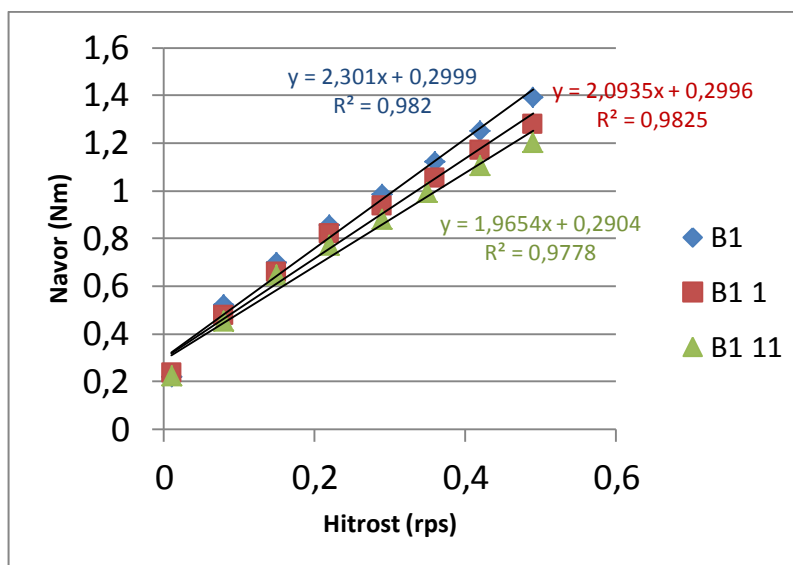
Grafikon 15: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanic V11 in V5.

Pri mešanici SC smo povečali količino vode in SP. Dosežen razlez 300 mm je bil idealen. Prostorninska masa sveže mešanice je znašala 1256 kg/m^3 .



Grafikon 16: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice SC (mešanico smo v roku 5 minut preizkusili 3-krat).

Pri mešanici B1 smo v primerjavi z mešanico SC zmanjšali količino vode in mešanico zamešali na velikem mešalcu. Dosežen razlez 730 mm je bil zadovoljiv. Strižna napetost na meji tečenja mešanice B1 se je malo zmanjšala oziroma poboljšala v primerjavi z mešanico SC, kljub temu da smo dodali manj vode. Vzrok tega je lahko, da smo mešanico iz malega mešalca 4 l zamešali na velikem mešalcu 30 l. Plastična viskoznost mešanice B1 se je zaradi zmanjšanja vode povečala v primerjavi z mešanico SC.



Grafikon 17: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice B1(mešanico smo v roku 5 min preizkusili 3-krat).

6.2 Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8

Druga skupina mešanic, s katerimi bomo primerjali mešanice z V Liaporom, so mešanice z lahkim agregatom W Liaporom. Na začetku smo poskušali zamešati v betonsko mešanico suh lahki agregat W Liapor. Ugotovili smo, da ko imamo W Liapor, je volumen zrn pri enaki masi agregata enkrat manjši kot pri navadnem V Liaporu (npr. 2 kg W Liapora ima enako prostornino zrn kot 1 kg V Liapora). Pri W Liaporu je poroznost namreč bistveno manjša.

Preglednica 27: Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8.

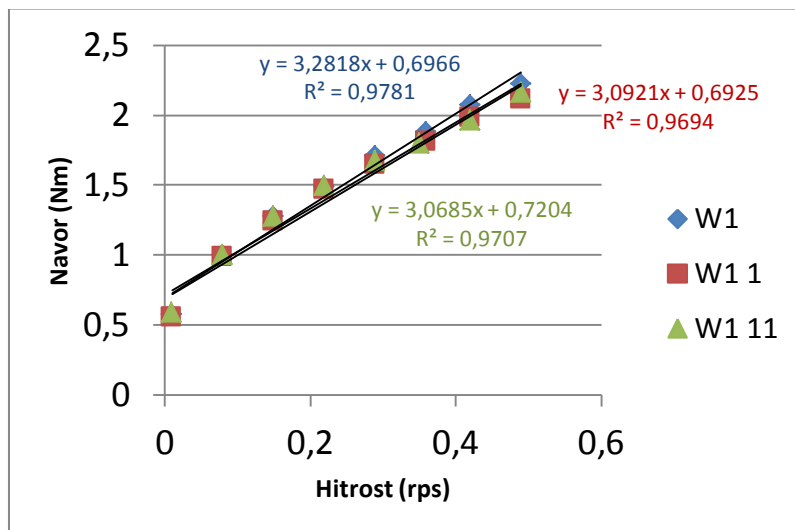
Mešanice	Čas merjenja t (min)	Razlez s posedom (mini slump ali standardni) (mm)	Reometer τ_0 (Pa)	Reometer η (Pas)	Sveža prostorninska masa mešanice (g/dm ³)
W1 (30. 4. 2013)	t0	172,5	/	/	/
	t0	205	/	/	/
	t0	245	112,1	14,1	1296
	t30	230	/	/	/

Opomba:

- t0... pri času 0 minut;
- t30... pri času 30 minut od začetka 1. mešanja;
- z zeleno barvo je označena povprečna vrednost meritve v reometru, kjer smo mešanico v roku 5 minut preizkusili 3-krat;

Mešanica W1 je imela slab razlez 172,5 mm, zato smo morali dodati dodatno količino 55 g vode in 15 g SP. Nato je bil dosežen razlez 245 mm. Prostorninska masa je bila 1296 kg/m³. Za nadaljnje

mešanice z W Liaporom smo se odločili zasnovati mešanice tako, da W Liapor z izbrano dodatno količino vode (10 %) prelijemo in ga pustimo, da tako odležava 30 minut, ko ga lahko uporabimo za izdelavo betona. To pa zato, da nimamo med mešanjem problemov z njim, ker močno vpija vodo. Strižna napetost na meji tečenja mešanice W1 je bila previsoka, kar je lahko posledica premajhne količine SP in W Liapor lahko vpije preveč zamesne vode.



Grafikon 18: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W1.

6.2.1 Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8, ki je namočen

Pri mešanici z W Liaporom z 10 % dodatne vode, za katero predpostavimo, da jo ekspandirana glina vpije, poštropimo agregat iz ekspandirane glin in ga pustimo, da tako odležava 30 minut, ko ga lahko uporabimo za izdelavo betona. To pa zato, da med mešanjem ne bo vpijal in odvezal zamesne vode. Mešanica je zato tudi časovno bolj stabilna. Prostorninska masa V Liapora je $1,2 \text{ g/cm}^3$, prostorninska masa W Liapora pa $0,6 \text{ g/cm}^3$, torej enkrat manj.

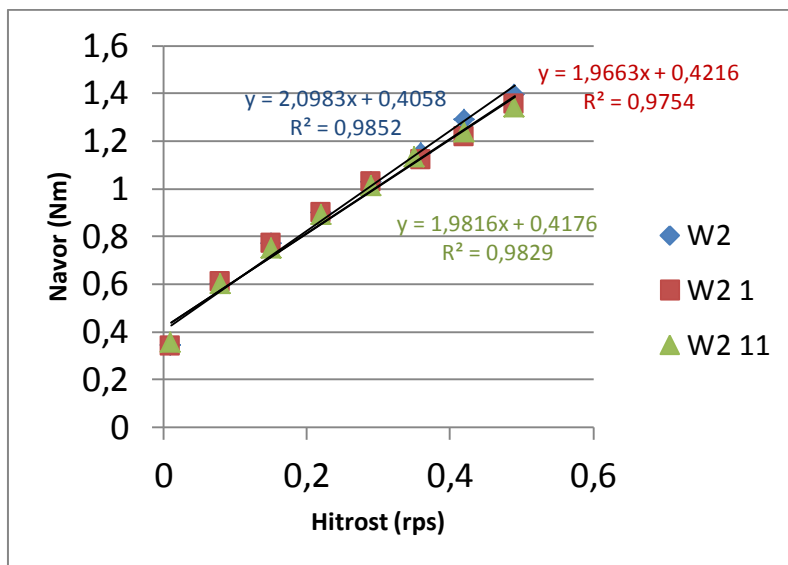
Preglednica 28: Mešanice z lahkim agregatom W Liapor frakcije 1/4 in W Liapor frakcije 4/8, ki je namočen.

Mešanice	Čas merjenja t (min)	Razlez s posedom (mini slump ali standardni) (mm)	Reometer τ_0 (Pa)	Reometer η (Pas)	Sveža prostorninska masa mešanice (g/dm ³)
W2 (7. 5. 2013)	t0	200	/	/	/
	t0	250	66	9,1	1464
	t30	232,5	73	9,5	/
W3 (7. 5. 2013)	t0	280	48,9	9,5	1242
	t30	287,5	51,4	9,6	1280
W4 (13. 5. 2013)	t0	580	/	/	/
	t0	600	/	/	/
	t0	600	/	/	1334
W5 (14. 5. 2013)	t0	/	150,6	21,1	1390
	t0	/	/	/	/
	t0	/	/	/	/

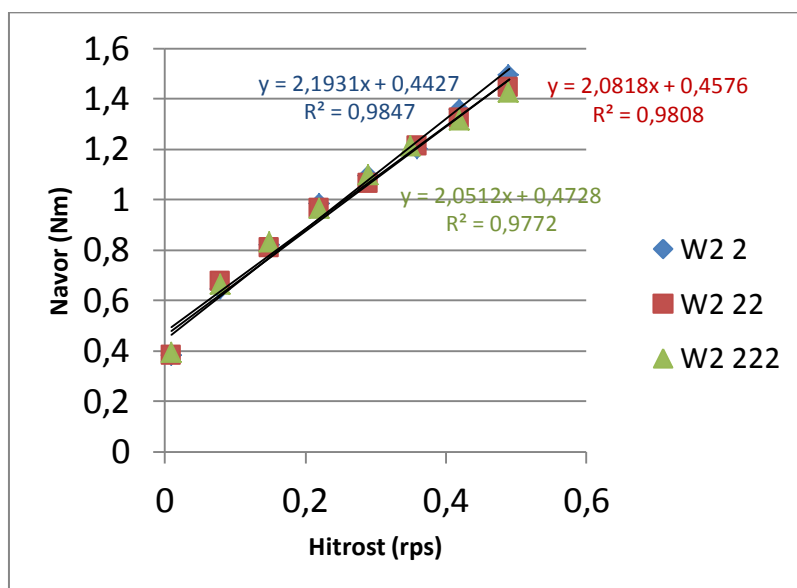
Opomba:

- t0 ... pri času 0 minut;
- t30 ... pri času 30 minut od začetka 1. mešanja;
- z rdečo barvo so označeni razlezi, ki smo jih dobili iz mešanic velikega mešalca (večji stožec za merjenje razleza);
- z zeleno barvo je označena povprečna vrednost meritve v reometru, kjer smo mešanico v roku 5 minut preizkusili 3-krat.

Mešanici W2 in W3 se razlikujeta samo v količini vode in SP. Mešanica W2 je imela zelo majhen razlez 200 mm, zato smo takoj dodali še vodo in premešali. Dosežen razlez je bil 250 mm. Prostorninska masa je bila zadovoljiva – 1464 kg/m³. Strižna napetost na meji tečenja mešanice W2 je bila malo previsoka, zato bi morali dodati več SP, da jo znižamo. Pri naslednji mešanici W3 smo to naredili. Plastična viskoznost je bila dobra. Mešanica je časovno zelo malo izgubljala. Po 30 minutah je strižna napetost na meji tečenja zelo malo narasla, plastična viskoznost pa je ostala skoraj enaka.

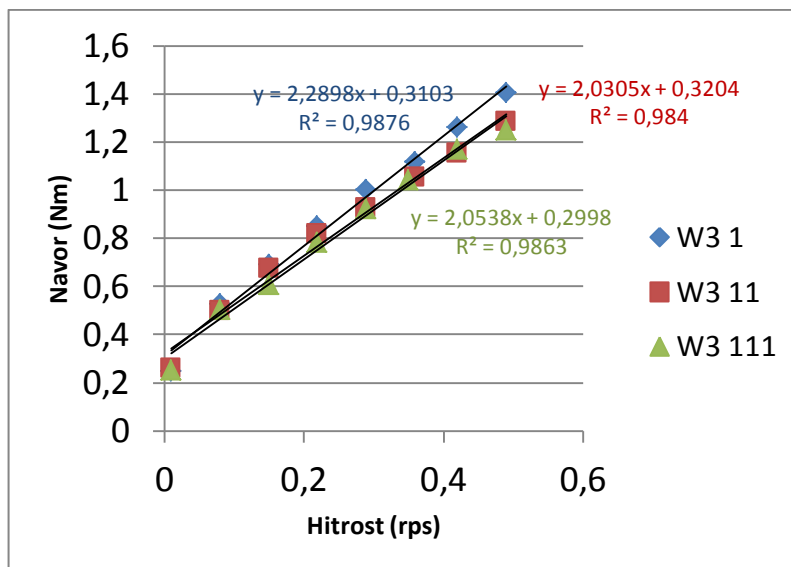


Grafikon 19: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W2 (pri času "0" takoj trikratna meritev v roku 5 min).

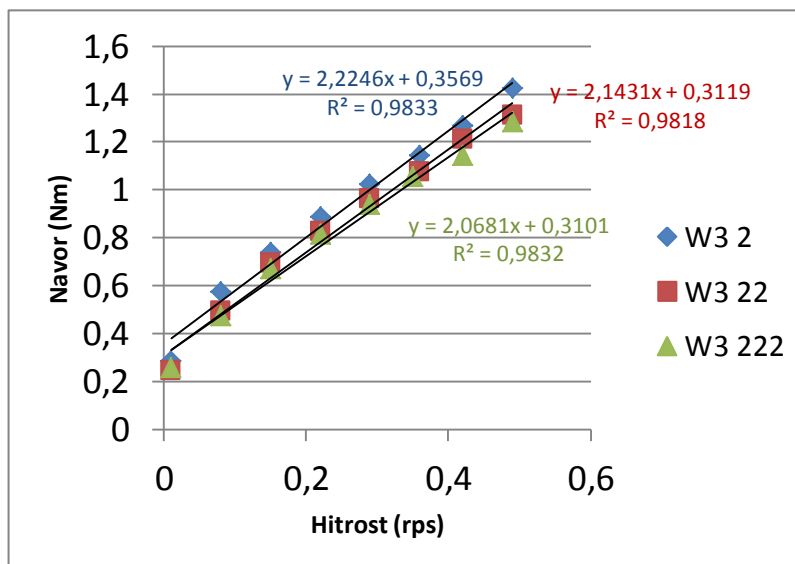


Grafikon 20: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W2 (pri času 30 min trikratna meritev v roku 5 min).

Mešanici W3 smo povečali količino SP za 15 g glede na mešanico W2. Mešanica je dosegla razlez 280 mm. Prostorninska masa je zadovoljiva – 1242 kg/m³. Mešanica časovno pravzaprav ni izgubljala razleza. Zaradi povečane količine SP pri mešanici W3 smo zmanjšali strižno napetost na meji tečenja v primerjavi z mešanico W2. Plastična viskoznost je dobra in približno enaka kot pri mešanici W2. Mešanica je časovno izgubljala zelo malo.

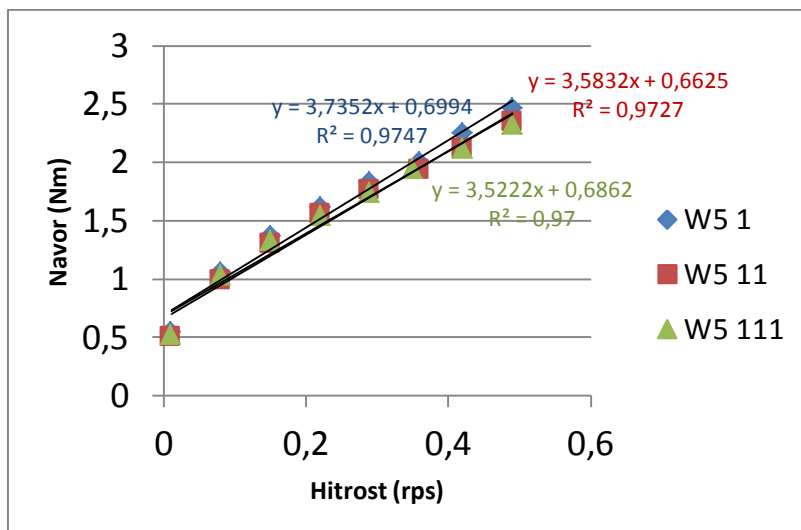


Grafikon 21: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W3 (pri času "0" trikratna meritev v roku 5 min).



Grafikon 22: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W3 (pri času 30 minut trikratna meritev v roku 5 minut).

Mešanica W5 se razlikuje od mešanice W4 samo v količini SP. Povečali smo SP za 30 g. Strižna napetost na meji tečenja mešanice W5 je malo previsoka. Plastična viskoznost je bila zadovoljiva.



Grafikon 23: Diagrami navor-hitrost vrtenja mešanice W5 (trikratna meritev v roku 5 min).

6.3 Tlačna trdnost

Dobljeni rezultati vzorcev so si sledili po naslednjem vrstnem redu od največje do najmanjše tlačne trdnosti:

- vzorci mešanice s suhim V Liaporom 1/8 (najvišja vrednost 28-dnevne tlačne trdnosti je bila pri mešanici V73 in je znašala 24,21 MPa);
- vzorci mešanice z V Liaporom 1/8, kjer smo dodatno dodali še kameno moko (najvišja vrednost 28-dnevne tlačne trdnosti je bila pri mešanici V10 in je znašala 21,56 MPa);
- vzorci mešanice z W Liaporom 1/4 in W Liaporom 4/8, ki je bil namočen (najvišja vrednost 28-dnevne tlačne trdnosti je bila pri mešanici W2 in je znašala 18,97 MPa);
- vzorci mešanice z V Liaporom 1/8, ki je bil namočen (najvišja vrednost 28-dnevne tlačne trdnosti je bila pri mešanici SC ponovitev in je znašala 18,27 MPa);
- vzorec mešanice s suhim W Liaporom 1/4 in W Liaporom 4/8 (najvišja vrednost 28-dnevne tlačne trdnosti je bila pri mešanici W1 in je znašala 17,73 MPa)

Preglednica 29: Mešanica V10, zamešana 13. 3. 2013, datum tlačnega preskusa: 20. 3. 2013. Tlačna trdnost po 7 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c = F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K1	4852	150/150/150	416	18,49	19,35
K2	5132	150/150/150	463	20,58	
K3	4904	150/150/151	430	18,98	

Preglednica 30: Mešanica V10, zamešana 13. 3. 2013. Datum preskusa: 10. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K4	5094	150/150/151	533	23,53	21,56
K5	4826	150/150/149,5	458	20,42	
K6	4828	150/150/149,5	465	20,74	

Preglednica 31: Mešanica V12, zamešana 14. 3. 2013. Datum preskusa: 21. 3. 2013. Tlačna trdnost po 7 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K1	4994	150/150/151	410	18,1	17,21
K2	4770	150/150/151	375,8	16,59	
K3	4658	150/150/150	381	16,93	

Preglednica 32: Mešanica V12, zamešana 14. 3. 2013. Datum preskusa: 11. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K4	4586	150/150/150	404	17,95	19,23
K5	4696	150/150/150	433	19,24	
K6	4844	150/150/150	461	20,49	

Preglednica 33: Mešanica V7, zamešana 15. 3. 2013. Datum preskusa: 22. 3. 2013. Tlačna trdnost po 7 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K1	4808	150/150/150	303,4	13,48	17,58
K2	4780	150/150/150	443,8	19,72	
K3	4840	150/150/150	439,4	19,53	

Preglednica 34: Mešanica V7, zamešana 15. 3. 2013. Datum preskusa: 12. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K4	4688	150/150/149,5	479,5	21,38	22,46
K5	5038	150/150/151	544,8	24,05	
K6	4792	150/150/149,5	492	21,94	

Preglednica 35: Mešanica V72, zamešana 18. 3. 2013. Datum preskusa: 27. 3. 2013. Tlačna trdnost 7 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K1	4982	150/150/150	498,5	22,16	22
K2	4954	150/150/150	502	22,31	
K3	4878	150/150/150	484,5	21,53	

Preglednica 36: Mešanica V72, zamešana 18. 3. 2013. Datum preskusa: 15. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K4	4694	150/150/150	477	21,2	21,88
K5	4800	150/150/150	490,6	21,8	
K6	5020	150/150/150,5	510,8	22,63	

Preglednica 37: Mešanica V73, zamešana 18. 3. 2013. Datum preskusa: 27. 3. 2013. Tlačna trdnost po 7 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K1	4794	150/150/149	480,1	21,48	20,62
K2	4930	150/150/149	451,9	20,22	
K3	4746	150/150/148	447,8	20,17	

Preglednica 38: Mešanica V73, zamešana 18. 3. 2013. Datum preskusa 15. 4. 2013. Tlačna trdnost po 28 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K4	4898	150/150/150	512,8	22,79	24,21
K5	4914	150/150/149,5	562,3	25,07	
K6	5050	150/150/150	557,2	24,76	

Mešanica V73, iz skupine mešanic s suhim lahkim agregatom V Liaporom, je dosegla najvišjo tlačno trdnost med mešanicami, ki je znašala 24,21 MPa.

Preglednica 39: Mešanica W1, zamešana 30. 4. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 20 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K1	4410	150/150/150	460,9	20,48	17,73
K2	4600	150/150/151	339,4	14,98	



Slika 21: Vzorec mešanice W1.

Preglednica 40: Mešanica W5, zamešana 14. 5. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 6 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K1	4580	151/151/151	407,7	17,88	18,67
K2	4560	150/150/151	423,2	18,68	
K3	4580	150/150/151	440,7	19,46	

Preglednica 41: Mešanica W4, zamešana 13. 5. 2013. Datum preskusa 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 7 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)	Povprečna vrednost (MPa)
K1	4500	150/150/150	422,9	18,8	18,08
K2	4450	150/150/150	396,6	17,63	
K3	4460	150/150/150	401	17,82	

Preglednica 42: Mešanica W2, zamešana 7. 5. 2013. Datum preskusa 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 13 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)
K1	4480	150/150/151	429,6	18,97

Preglednica 43: Mešanica SC, zamešana 8. 5. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 12 dneh.

Kalup	Masa (g)	Dimenzije (mm)	Sila (kN)	Tlačna trdnost $f_c=F/A_c$ (MPa)
K1	4160	150/150/148	290,9	13,1

Preglednica 44: Mešanica SC ponovitev, zamešana 8. 5. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 12 dneh.

Kalup	Masa	Dimenzije	Sila	Tlačna trdnost
	(g)	(mm)	(kN)	$f_c=F/A_c$ (MPa)
K1	4400	151/150/148	413,8	18,27

Preglednica 45: Mešanica B1, zamešana 15. 5. 2013. Datum preskusa 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih in 5 dneh.

Kalup	Masa	Dimenzije	Sila	Tlačna trdnost	Povprečna vrednost
	(g)	(mm)	(kN)	$f_c=F/A_c$ (MPa)	(MPa)
K1	4400	150/150/151	374,1	16,52	16,45
K2	4400	150/151/149	372,4	16,44	
K3	4360	150/150/150	368,7	16,39	

Preglednica 46: Mešanica B2, zamešana 20. 5. 2013. Datum preskusa: 20. 9. 2013. Tlačna trdnost po štirih mesecih.

Kalup	Masa	Dimenzije	Sila	Tlačna trdnost	Povprečna vrednost
	(g)	(mm)	(kN)	$f_c=F/A_c$ (MPa)	(MPa)
K1	4020	150/150/151	270,7	11,95	11,39
K2	3960	150/150/151	265,3	11,71	
K3	3930	151/150/148	238	10,51	

7 ZAKLJUČEK

Lahko agregatni beton v našem okolju ni splošno sprejet kot konstrukcijski material, ki istočasno omogoča tudi energetsko učinkovito gradnjo. Glavni razlogi za to so višja cena proizvoda, pomanjkanje splošno sprejetih smernic ter neobvladovanje tehnologije proizvodnje in vgradnje. Težave so še večje pri lahko agregatnih samozgoščevalnih mešanica (SCLC). SCLC so betoni, ki jih le vlijemo v opaže in jih dodatno ne zgoščujemo z vibriranjem. Pri njih se pojavljata dva glavna problema: težavno zagotavljanje stabilnosti (lahka agregatna zrna lahko zelo hitro splavajo na površje) ter hitro spreminjanje obdelovalnosti s časom, zaradi velike sposobnosti vpijanja vode, ki jo imajo zrna lahkega agregata.

To velja tudi za proizvod, uporabljen v moji diplomski nalogi – za Liapor. Zrna ekspandirane gline (Liapor) imajo veliko sposobnost vpijanja vode. Če agregata predhodno ne navlažimo, bo med mešanjem vpil velik del zamesne vode in s tem bistveno vplival na konsistenco sveže betonske mešanice – SCLC izgubi samozgoščevalne lastnosti. V okviru diplome smo preizkusili različne ukrepe za zmanjšanje vpijanja vode s strani agregatnih zrn. Kot najboljši ukrep (rešitev) se je pokazalo predhodno navlaženje agregatnih zrn s količino vode, ki ustreza 10 % vpijanja vode agregata, in sicer 30 minut pred pripravo betonske mešanice.

Beton iz lahkega agregata zahteva bolj natančno kontrolo sestavin, konstantnost sprojektiranih razmerij ter še bolj strikten nadzor nad vlažnostjo/suhostjo agregatnih zrn, v primerjavi z normalno težkim betonom. To še posebej velja za SCC mešanice. Če to upoštevamo, lahko sprojektiramo stabilen SCLC, ki ima istočasno ustrezno nizko gostoto in zadostno tlačno trdnost, kar smo pokazali tudi v diplomski. Uporaba rezultatov reoloških meritev s ConTec Viscometrom 5 postopek projektiranja zelo olajša in omogoča izbiro območja reoloških lastnosti, ki ustreza praktično uporabni SCLC mešanici.

Naslednji problem, s katerim smo se srečevali pri raziskavi, se je pojavil pri razkalupljanju preizkušancev. Odstranjevanje betonskega preizkušanca iz kalupa je bilo težavno. Vse kaže, da je lahko agregatni beton vpil opazno olje in se je potem površina betona zlepila s površino kalupa. Namesto opaznega olja bi verjetno lahko uporabili silikonsko pasto, vendar je le-ta dražja.

Zaradi manjših doseženih tlačnih trdnosti, ki so se gibale med 15 MPa in 25 MPa ter bolj krhke porušitve, kot pri običajnem betonu, smo zaključili, da bi bil naš SCLC primeren za uporabo za tlake, protihrupne ograje, predelne stene, za enodružinske hiše in garaže (dimenzije se lahko prilagodijo), nekonstrukcijske prefabricirane elemente, montažne elemente različnih vrst ter kot izolativen material. Za zahtevnejše konstrukcijske elemente bi morali doseči povprečno tlačno trdnost več kot 25 MPa (30 MPa).

Prednosti, ki jih dosežemo z uporabo lahko agregatnega SCC betona:

- uporaba običajno temelji na znižanju stroškov projekta;
- zmanjšana lastna teža betona;
- dobra toplotna izolativnost, ki je posledica večje toplotne učinkovitosti, ki se lahko doseže zaradi nizke gostote in celične strukture lahkega agregata;
- dobra zvočna izolativnost med etažami in bivalnimi enotami zaradi lahкости;
- z uporabo različnih opažev lahko dobiš raznovrstne oblike elementov.

Če primerjamo mešanice z low density Liaporom in high density Liaporom, so mešanice s high density Liaporom manj problematične pri mešanju. Manjša je nevarnost, da bi lahki agregat Liapor splaval na površje oziroma da bi SCLC, pripravljen s tem agregatom, segregiral. Za oba tipa mešanic pa bi priporočil, da se pred mešanjem lahki agregat Liapor namoči.

Zanimivi so določeni rezultati tlačnih preiskav. Mešanice s suhim low density Liaporom so dosegle največje tlačne trdnosti, vse do 24 MPa. Možna vzroka sta dva: pri low density Liaporu za SCLC smo uporabili skoraj za 1/3 več normalno težkega peska kot pri mešanicah s high density Liaporom, suh low density Liapor pa je lahko vpil tudi več zamesne vode in s tem najbolj zmanjšal vodo-cementno razmerje, kar pa ima seveda za posledico večjo tlačno trdnost.

VIRI

- [1] Hela, R., Hubertova, M. 2005. Development of self compacting lightweight concrete using lightweight Liapor aggregate. Osebna komunikacija. (12. 12. 2005).
- [2] Ries, J. P., Speck, J., Harmon, K. S. 2010. Lightweight Aggregate Optimizes the Sustainability of Concrete, Through Weight Reduction, Internal Curing, Extended Service Life, and Lower Carbon Footprint. Concrete Sustainability Conference, April 13-15, in Tempe, AZ. National Ready mixed Concrete: str. 1–15.
- [3] Sarkar, S. L., Satish, C., Berntsson, L. 1992. Interdependence of Microstructure and Strength of Structural Lightweight Aggregate Concrete. Cement & Concrete Composites. Faculte des sciences appliques, Universite de Sherbrooke, Qurbec, Canada, Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden: 239 str.
- [4] Chen, H. J., Jane, K. C., Peng, J. L. 2009. The properties of self compacting lightweight aggregate concrete. Second International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete SCC"2009-China June 5-7, Beijin China: str. 444–451
- [5] ACI 213R-03. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete.
- [6] Guide to the use of the lightweight aggregate in bridges. Concrete Bridge Development Group, The Concrete Centre Technical Guide No. 8.
- [7] Liapor. 2013. <http://www.liapor.com/en/start.php> (Pridobljeno 25. 7. 2013.)
- [8] Kumar Mehta, P. 1986. Concrete, Structure, Properties and Materials: str. 345, 346, 347, 351, 352.
- [9] Properties of lightweight concretes containing Lytag and Liapor. 2000. European Union Brite EuRam III, EuroLightCon, Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete. Project BE96-3942/R8: 5 str.
- [10] Kaffetzakis, M. I., Papanicolaou, C. G. 2010. Mix Design Procedure for Lightweight Aggregate SCC (LWASCC) Based on the Wet Packing Method. University of Patras Civil Engineering Department Structural Material Lab., Patras Greece. Aces workshop: innovative materials and techniques in concrete construction, Corfu October 10-2,2010: str. 2, 5, 6, 7, 11.
- [11] Wang Choi, Y., Jic Kim, Y., Cheol Shin, H., Young Moon, H. 2006. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete. Department of Civil Engineering, Semyung University, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Technical Institute of Daeshin Structural Engineering Co., South Korea: 1 str.
- [12] Walraven, J. 2007. Self compacting concrete: Challenge for designer and researcher. Delft University of Technology, The Netherlands: 1 str.
- [13] Wua, Z., Zhang, Y., Zheng, J., Ding, Y. 2009. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. Construction and Building Materials. 23. 2009: 2087 – 2092.
- [14] Roussel, N. 2006. A theoretical frame to study stability of fresh concrete. Materials and Structures. 39. 2006: 81–91.
- [15] Kim, Y. J., Choi, Y. W., Lachemi, M. 2010. Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. Construction and building materials. 24. 2010: 11–16.

[16] Lespatex. 2013.

<http://www.lespatex.si/dodatki-betonom/samozgoscevalni-betoni> (Pridobljeno 15. 9. 2013.)

[17] SIST EN 206-1:2003(sl). Beton - 1. del: specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

[18] SIST EN 13055-1:2002. Lahki agregati - 1. del: lahki agregati za beton, malto in injekcijsko malto.

[19] ACI 211.2-98. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete.

[20] Liapor. 2013. <http://www.liapor.com/at/gruppe/die-werke.html> (Pridobljeno 17. 9. 2013.)

[21] SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona – zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona.

[22] Lafarge. 2013. <http://www.lafarge.si> (Pridobljeno 28. 8. 2013.)

[23] SIST EN 197-1:2002. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.

[24] EN 934-2:2001(sl). Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso - 2.del: Kemijski dodatki za beton - definicije, zahteve, skladnost in označevanje.

[25] Hočevar, A., Kavčič, F. 2010. Določanje lastnosti svežega lahko vgradljivega in samozgoščevalnega betona. Tehnični informator. 77: 53–58.

[26] Hočevar, A., Kavčič, F., Bokan Bosiljkov, V. 2010. Zanesljivost reoloških meritev svežih malt in betonov.

[27] Hočevar, A., Bokan Bosiljkov, V., Kavčič, F. 2010. Preskušanje svežih betonov – uvod v reologijo. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Konferenčni zbornik: 32. Zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 7.–8. oktober, 2010. Ljubljana, slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 207–216.

[28] Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 111 str.

[29] Hočevar, A., Bokan Bosiljkov, V., Kavčič, F. 2010. Uporabna vrednost meritev reoloških lastnosti svežega betona. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Beton 21. stoletja: 6. redna letna konferenca ZBS, Lipica, 25.–26. marec, 2010. Ljubljana, svet strokovnjakov združenja za beton Slovenije: str. 95–104.

[30] Methods for Testing Fresh LightWeight Aggregate Concrete. December 1999. Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, EuroLightCon, European Union - Brite EuRam III. Project BE96-3942/R4: 30 str.

[31] kSIST FprEN 206:2013. Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

[32] Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan-Bosiljkov, V., Dujič, B. 2004/2005. Delovni zvezek gradiva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 5, 6, 12, 15, 57, 58, 61, 62, 63.

[33] SIST prEN 1097-6:2010. Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov – 6. del: Določevanje prostorninske mase zrn in vpijanje vode.

[34] kSIST FprEN 933-1:2011. Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.

[35] Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.) 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, inženirska zbornica Slovenije: str. EC-2 2–7.