

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:

Klopčič, J., 2015. Razvoj lahko-agregatnega samozgoščevalnega betona z deklariranimi lastnostmi. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V., somentor Sobočan, Š.): 84 str.

Datum arhiviranja: 21-12-2015

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:

Klopčič, J., 2015. Razvoj lahko-agregatnega samozgoščevalnega betona z deklariranimi lastnostmi. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V., co-supervisor Sobočan, Š.): 84 pp.

Archiving Date: 21-12-2015

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GRADBENIŠTVO
SMER GRADBENE
KONSTRUKCIJE**

Kandidat:

JURE KLOPČIČ

**RAZVOJ LAHKOAGREGATNEGA
SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA Z
DEKLARIRANIMI LASTNOSTMI**

Magistrsko delo št.: 15/II.GR

**DEVELOPMENT OF LIGHTWEIGHT SELF -
COMPACTING CONCRETE WITH DECLARED
PROPERTIES**

Graduation – Master Thesis No.: 15/II.GR

Mentorica:

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 18. 12. 2015

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Jure Klopčič izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom »Razvoj lahkoagregatnega samozgoščevalnega betona z deklariranimi lastnostmi«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju.

Ljubljana, 9.12.2015

Jure Klopčič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 691.3(497.4)(043.3)
- Avtor:** Jure Klopčič
- Mentor:** prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
- Somentor:** Štefan Sobočan, univ. dipl. inž. str.
- Naslov:** Razvoj lahkoagregatnega samozgoščevalnega betona z deklariranimi lastnostmi
- Tip dokumenta:** Magistrsko delo
- Obseg in oprema:** 84 str., 7 pregl., 58 sl.
- Ključne besede:** samozgoščevalni lahkoagregatni beton, reologija, plastična viskoznost, napetost na meji tečenja, tlačna trdnost, prostorninska masa

Izvleček

V magistrski nalogi smo se ukvarjali z razvojem samozgoščevalnega betona iz lahkega agregata s predpisanimi lastnostmi, kot sta razred tlačne trdnosti in največja ciljna gostota betona. Pri določanju samozgoščevalnih lastnosti smo kot osnovno orodje uporabili meritve reoloških lastnosti in izbiro optimalnega območja napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti. V prvem delu naloge prikazujemo lastnosti in specifikacije lahkega agregata in lahkoagregatnega betona. Te podatke smo pridobili na podlagi pregledane strokovne literature in standardov. V tem delu podajamo še nekatere splošne razlage o reologiji betona in modelih za opis tekočin ter predstavimo meritve z ultrazvokom in meritve toplotnega toka. Drugi del naloge, ki predstavlja jedro naloge, je obširnejši in je naravnano eksperimentalno. Najprej so prikazane preskusne metode in načini izvajanja preiskav ter izmerjene lastnosti materiala. Sledi analiza rezultatov meritev. Betonske mešanice smo razdelili v dve skupini. Najprej smo obravnavali preliminarne mešanice, ki so služile kot priprava za glavno skupino mešanic. Pri glavni skupini mešanic smo analizirali vpliv različnih parametrov na reološke lastnosti svežih cementnih kompozitov, kar prikazujemo z reografi. Nato smo izbrano betonsko mešanico vgradili v steno dimenzij 100 cm x 230cm x 6 cm. Homogenost vgrajenega betona smo ocenili z meritvami z ultrazvokom, njegovo izolativnost pa z meritvami toplotnega toka. Preiskave so bile opravljene v okviru sodelovanja s podjetjem, ki uporablja takšne betone v praksi.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	691.3(497.4)(043.3)
Author:	Jure Klopčič
Supervisor:	Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.
Cosupervisor:	Štefan Sobočan, BSc.
Title:	Development of lightweight self-compacting concrete with declared properties
Document type:	M. SC. Thesis
Scope and tools:	84 p., 7 tab., 58 fig.
Keywords:	lightweight self-compacting concrete, rheology, plastic viscosity, yield stress, compressive strength, density

Abstract

The aim of the master thesis was to develop lightweight self-compacting concrete made of lightweight aggregate and with declared properties, such as compressive strength class and maximal target density. Self-compacting properties were determined by measuring rheological properties and selecting the optimum range of yield stresses and plastic viscosities as a result of these measurements. In the first part of the thesis properties and specifications of lightweight aggregate and lightweight concrete are given. The data were obtained using relevant literature and standards. Common explanations about rheology of concrete and models for the description of liquids are also given, along with presentation of ultrasound testing and thermal current measurements. The second part of the thesis, which is experimental, represents the main part of my work. First the used test methods are given and the testing protocols are described, with obtained results of the tests. After that the test results are analysed. Concrete mixtures were divided in two groups. Preliminary concrete mixtures were first tested in order to define the composition of the main group of the mixtures. For the main mixtures rheological properties were first measured for different influencing parameters and presented in the form of rheographs. Then selected mixture was used to cast a concrete wall of 100 cm x 230 cm x 6 cm. The homogeneity of concrete in the wall was evaluated using ultrasound testing. The thermal insulation properties of the concrete were evaluated using thermal flow measurements. The study was carried out in the framework of cooperation with an enterprise that uses such concretes in practice.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov za strokovno pomoč in svetovanje pri pisanju magistrskega dela. Prav tako se zahvaljujem Franciju Čeponu in Boštjanu Jursinoviču za pomoč pri laboratorijskem delu magistrske naloge.

Hvala vsem sošolcem in prijateljem, ki so me v času študija vzpodbujali, in vsem drugim, ki so mi kakorkoli pomagali.

Zahvaljujem se družini za podporo skozi celoten študij. Najlepša hvala tebi moja Meta, da mi vlivaš voljo in moč, me razumeš in stojiš ob strani, ko te najbolj potrebujem. Hvala.

KAZALO VSEBINE

POPRAVKI	III
IZJAVE	IV
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VI
ZAHVALA	VII
1 UVOD	1
2 BETON	2
2.1 Normalno težki beton	2
2.2 Lahkoagregatni beton	3
2.2.1 Zgodovina lahkega betona	4
2.2.2 Lastnosti in primerjava lahkoagregatnega betona z normalno težkim betonom	5
2.2.3 Samozgoščevalni lahkoagregatni betoni	8
2.2.4 Uporabljeni materiali	10
2.2.4.1 Voda za pripravo betona	10
2.2.4.2 Cement	10
2.2.4.3 Lahki agregat	11
2.2.4.3.1 Osnovne lastnosti	12
2.2.4.3.2 Pridobivanje lahkega agregata iz ekspandirane gline	14
2.2.4.3.3 Ekološki in ekonomski vidik uporabe lahkega agregata	14
2.2.4.4 Agregat	15
2.2.4.5 Dodatki	15
2.2.4.5.1 Kemijski dodatki	15
2.2.4.5.2 Mineralni dodatki	16
3 PROJEKTIRANJE MEŠANICE SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA IZ LAHKEGA AGREGATA	18

3.1	Splošno o projektiranju betona	18
3.2	Smernice za izbiro deležev sestavin pri lahkoagregatnih betonih	20
3.3	Postopki mešanja	21
4	REOLOGIJA SVEŽIH SCLC MEŠANIC	23
4.1	Splošno o reologiji svežih betonskih mešanic	23
4.2	Svež beton – tekočina	25
4.3	Model za opis tekočine (svež beton) in njegove lastnosti	26
4.4	Reološke meritve tekočin	27
4.5	Vpliv posameznih sestavin na reologijo betona	29
5	MERITVE Z ULTRAZVOKOM IN MERITVE TOPLOTNEGA TOKA	30
5.1	Hitrost prehoda ultrazvoka	30
5.2	Meritve toplotnega toka	31
6	EKSPERIMENTALNI DEL	33
6.1	Sejalna analiza	33
6.2	Vpijanje vode in vlažnost	35
6.2.1	Vpijanje vode pri lahkem agregatu	35
6.2.2	Vlažnost lahkega agregata in peska	38
6.3	Mešanje betona	39
6.4	Preiskave na svežih in strjenih betonih	40
6.4.1	Preiskave betona v svežem stanju	40
6.4.2	Preiskave betona v strjenem stanju	44
6.5	Stena	45
7	REZULTATI MERITEV IN ANALIZ	48
7.1	Preliminarne mešanice	49
7.1.1	Osnovna mešanica	49
7.1.2	Vpliv količine superplastifikatorja na lastnosti mešanic	51
7.1.3	Mešanice z dodajanjem SP v intervalu med 20 in 30 % glede na izhodiščno količino	52

7.1.4	Mešanice s povečanjem deleža SP v intervalu med 20 in 25 % glede na izhodiščno količino ter meritve z reometrom	53
7.2	Glavna skupina mešanic	54
7.2.1	Vpliv aeranta	55
7.2.2	Vpliv gostilca	58
7.2.3	Vpliv apnenčeve moke	62
7.2.4	Vpliv vrste cementa	67
7.2.5	Veliki mešalec (betoniranje stene)	68
7.3	Preiskava z ultrazvokom	70
7.4	Meritve toplotnega toka	74
8	ZAKLJUČEK	78
	VIRI IN LITERATURA	81

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Največja suha prostorninska masa lahkega agregata v nasutem stanju (ACI 213 R-03, str. 6)	13
Preglednica 2: Zahteve za lahkoagregatni beton (Mehta, 2014, str. 431)	18
Preglednica 3: Priporočene vrednosti zračnih por za lahkoagregatni beton (ACI 213R-03, str. 9)	19
Preglednica 4: Priporočene vrednosti poseda za različne tipe konstrukcije (ACI 211.2-98, str. 5)	20
Preglednica 5: Presejki vseh vzorcev agregatov v %	35
Preglednica 6: Vpijanje vode zračno suhega lahkega agregata	36
Preglednica 7: Reološke lastnosti mešanic (mešanice s povečanim deležem SP v intervalu med 20 % in 25 % glede na izhodiščno količino SP)	54

KAZALO SLIK

Slika 1: Gostota lahkoagregatnega betona in namen uporabe (ACI 213R-79, str 4).....	5
Slika 2: Frakcije lahkega agregata LECA (http://www.leca.qa/)	13
Slika 3: Stopnja vlage v agregatu (ACI 211.2-98, str. 3)	20
Slika 4: Nedeformirano telo v 3D.....	24
Slika 5: Nedeformirano telo v 2D (levo) in deformirano telo v 2D (desno)	24
Slika 6: Krivulje toka za različne tipe tekočin (Koehler in Fowler, 2004, str. 14).....	26
Slika 7: Shematska primerjava krivulj toka normalnega in samozgoščevalnega betona.....	27
Slika 8: Geometrija tipičnega koaksialnega valjastega reometra (Koehler in Fowler, 2004, str. 30)....	28
Slika 9: Lahki agregat iz prvega zaboja (levo) in lahki agregat iz drugega zaboja (desno)	33
Slika 10: Sejalne krivulje.....	34
Slika 11: Vzorec lahkega agregata za določitev vpijanja vode	36
Slika 12: Vpijanje vode popolnoma suhega lahkega agregata	37
Slika 13: Vlažnost lahkega agregata in peska pred pripravo betona	38
Slika 14: Uporabljen reometer.....	41
Slika 15: L-zaboj preizkus.....	42
Slika 16: Razlez s posedom in J-obroč.....	43
Slika 17: Določanje prostorninske mase svežega in strjenega betona.....	44
Slika 18: Preša za določanje tlačne trdnosti betona (levo) in zdrobljen preizkušanelec po tlačni obremenitvi (desno)	45
Slika 19: Opaž stene (levo) in detajl cevi (desno)	46
Slika 20: Sprednja stran stene (levo) in zadnja stran stene (desno).....	47
Slika 21: Tlačna trdnost betona za osnovno mešanico	49
Slika 22: Primerjava tlačnih trdnosti betona za mali in veliki mešalec (osnovna mešanica)	50
Slika 23: Primerjava gosote betona za mali in veliki mešalec (osnovna mešanica).....	51
Slika 24: Mini razlez s posedom (mešanice z dodanim SP).....	52

Slika 25: Razlez s posedom (mešanice s povečanim SP v intervalu med 20 % in 30 % glede na izhodiščno količino)	53
Slika 26: Vpliv aeranta na vrednosti τ_0/μ (Wallevik, 2009, str. 6-12).....	55
Slika 27: Vpliv količine aeranta na razlez s posedom.....	56
Slika 28: Vpliv količine aeranta na plastično viskoznost.....	56
Slika 29: Vpliv količine aeranta na strižno napetost na meji tečenja	57
Slika 30: Reograf (vpliv aeranta)	57
Slika 31: Gostota betona v odvisnosti od dodanega aeranta	58
Slika 32: Tlačna trdnost v odvisnosti od količine dodanega aeranta	58
Slika 33: Vpliv količine gostilca na razlez s posedom.....	59
Slika 34: Vpliv količine gostilca na plastično viskoznost.....	60
Slika 35: Vpliv količine gostilca na strižno napetost na meji tečenja	60
Slika 36: Reograf (vpliv gostilca)	61
Slika 37: Gostota betona v odvisnosti od deleža gostilca	62
Slika 38: Tlačna trdnost v odvisnosti od dodanega gostilca	62
Slika 39: Vpliv oblike agregata in zrnavostne krivulje peska na vrednosti τ_0/μ (Wallevik, 2009, str. 6-20, str. 6-22).....	63
Slika 40: Vpliv količine apnenčeve moke na razlez s posedom.....	64
Slika 41: Vpliv količine apnenčeve moke na plastično viskoznost.....	64
Slika 42: Vpliv količine apnenčeve moke na strižno napetost na meji tečenja.....	65
Slika 43: Reograf (vpliv apnenčeve moke)	65
Slika 44: Gostota betona v odvisnosti od dodane apnenčeve moke.....	66
Slika 45: Tlačna trdnost v odvisnosti od dodane apnenčeve moke.....	66
Slika 46: Betonska mešanica z novim cementom	67
Slika 47: Posoda za beton.....	68
Slika 48: Tlačna trdnost (beton namenjen za izdelavo stene)	69
Slika 49: Opaž za steno	70
Slika 50: Naprava za preiskave z ultrazvokom	71
Slika 51: Raster na sprednji strani stene.....	71

Slika 52: Debelina stene	72
Slika 53: Hitrost ultrazvočnega valovanja.....	73
Slika 54: Primerjava med rezultati meritev z ultrazvokom in napeljavo v steni	74
Slika 55: Temperatura zraka.....	75
Slika 56: Temperatura stene	75
Slika 57: Toplotni tok skozi steno	76
Slika 58: Toplotna prevodnost stene	77

LIST OF TABLES

Table 1: Maximum dry loose bulk density requirements of lightweight aggregates (ACI 213R-03, p. 6)	13
Table 2: Requirements for structural lightweight concrete (Mehta, 2014, p. 431)	18
Table 3: Recommended air content for lightweight concrete (ACI 213R-03, p. 9)	19
Table 4: Recommended slumps for various types of construction (ACI 211.2-98, p. 5).....	20
Table 5: Passing through sieves for all specimens of used aggregates in %	35
Table 6: Water absorption of air dry lightweight aggregate	36
Table 7: Rheological properties of mixtures (mixtures with increased content of SP in interval between 20 % and 25 % with regard to basic SP content)	54

LIST OF FIGURES

Figure 1: Approximate density and use classification of lightweight aggregate concretes (ACI 213R-79, p. 4).....	5
Figure 2: Fractions of lightweight aggregate LECA (http://www.leca.qa/)	13
Figure 3: States of moisture in aggregate (ACI 211.2-98, p. 3)	20
Figure 4: Undeformed body in 3D	24
Figure 5: Undeformed body in 2D (left) and deformed body in 2D (right)	24
Figure 6: Flow curves for different types of fluid behaviour (Koehler and Fowler, 2004, p. 14)	26
Figure 7: Schematic comparison of flow curves for normal and self compacting concrete.....	27
Figure 8: Typical geometry of coaxial cylinders rheometer (Koehler and Fowler, 2004, p. 30)	28
Figure 9: Lightweight aggregate from first box (left) and lightweight aggregate from second box (right)	33
Figure 10: Aggregate grading.....	34
Figure 11: Sample of lightweight aggregate for water absorption	36
Figure 12: Absorption of lightweight aggregate in dry state	37
Figure 13: Moisture of lightweight aggregate and sand before concrete preparation	38
Figure 14: Used rheometer	41
Figure 15: L-box test	42
Figure 16: Slump flow test and J-ring test.....	43
Figure 17: Density determination of fresh and hardened concrete.....	44
Figure 18: Compression testing machine (left) and crushed sample after compression test (right).....	45
Figure 19: Formwork of wall (left) and detail of pipe (right).....	46
Figure 20: Frontside of wall (left) and backside of wall (right)	47
Figure 21: Compressive strength of concrete for basic mixture.....	49
Figure 22: Comparison of compressive strength of concrete for small and large mixer (basic mixture)	50
Figure 23: Comparison of concrete density for small and large mixer (basic mixture)	51
Figure 24: Mini slump flow test (mixtures with added SP).....	52

Figure 25: Slump flow test (mixtures with increased content of SP in interval between 20 % and 30 % with regard to basic volume).....	53
Figure 26: Effect of air entraining agent on the τ_0/μ values (Wallevik, 2009, p. 6-12)	55
Figure 27: Effect of dosage of air entraining agent on slump flow value	56
Figure 28: Effect of dosage of air entraining agent on plastic viscosity	56
Figure 29: Effect of dosage of air entraining agent on yield value	57
Figure 30: Reograph (effect of air entraining agent).....	57
Figure 31: Density of concrete in dependence of content of air entraining agent.....	58
Figure 32: Compressive strength in dependence of content of air entraining agent	58
Figure 33: Effect of dosage of stabilizer on slump flow value.....	59
Figure 34: Effect of dosage of stabilizer on plastic viscosity.....	60
Figure 35: Effect of dosage of stabilizer on yield value.....	60
Figure 36: Reograph (effect of stabilizer).....	61
Figure 37: Density of concrete in dependence of stabilizer content	62
Figure 38: Compressive strength in dependence of adding stabilizer.....	62
Figure 39: Effect of aggregate shape and particle size distribution of sand on τ_0/μ values (Wallevik, 2009, p. 6-20, p. 6-22).....	63
Figure 40: Effect of dosage of limestone filler on slump flow value.....	64
Figure 41: Effect of dosage of limestone filler on plastic viscosity.....	64
Figure 42: Effect of dosage of limestone filler on yield value	65
Figure 43: Reograph (effect of limestone filler)	65
Figure 44: Density of concrete in dependence of adding limestone filler.....	66
Figure 45: Compressive strength in dependence of adding limestone filler	66
Figure 46: Concrete mixture with new cement	67
Figure 47: Box for pouring concrete	68
Figure 48: Compressive strength (concrete for wall casting).....	69
Figure 49: Formwork of wall	70
Figure 50: Device for testing using ultrasound	71
Figure 51: Grid on front side of the wall.....	71

Figure 52: Wall thickness	72
Figure 53: Speed of ultrasonic waves	73
Figure 54: Comparison of ultrasound measurements and installation in the wall	74
Figure 55: Air temperature	75
Figure 56: Wall temperature	75
Figure 57: Heat flow through the wall	76
Figure 58: Thermal conductivity of wall	77

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ACI	Ameriški inštitut za beton (ang. <i>American concrete institute</i>)
ASTM	Ameriško združenje za testiranje in materiale (ang. <i>American Society for Testing and Materials</i>)
LWC	Lahkoagregatni beton (ang. <i>Lightweight concrete</i>)
SCC	Samozgoščevalni beton (ang. <i>Self compacting concrete</i>)
SCLC/SCLWC	Samozgoščevalni lahkoagregatni beton (ang. <i>Self compacting lightweight concrete</i>)

1 UVOD

Beton je poleg jekla najbolj razširjen konstrukcijski material. Odlikuje ga visoka tlačna trdnost, velika požarna odpornost ter lahko lokalno dostopni materiali, poleg tega pa omogoča izdelavo konstrukcijskih in nekonstrukcijskih elementov poljubnih oblik. Ima pa seveda tudi nekaj pomanjkljivosti. To so majhna natezna trdnost, potrebno je opaževanje, lastna teža v primerjavi s koristno obtežbo konstrukcije je velika, upoštevati je treba reološki vpliv krčenja in lezenja.

Pri izdelavi betona stremimo k čim večji tlačni trdnosti, čim manjšemu krčenju (da se izognemo razpokam zaradi oviranega krčenja) ter čim manjši gostoti, zmanjšamo lastno težo konstrukcije in izboljšamo izolativnost konstrukcijskih elementov. Ti faktorji so odvisni od tipa uporabljenega agregata, mešanice betona in njegove nege.

Lastno težo betona lahko zmanjšamo tako, da uporabljamo lahke agregate npr. ekspandirano glino. Z uporabo lahkih agregatov pa povečamo tudi toplotno izolativnost materiala. Povpraševanje po lahkih agregatih se zato stalno povečuje, njihove lastnosti pa so boljše poznali v 20. stoletju. Poleg ekspandirane gline lahko uporabimo tudi penjeno steklo ali ekspandiran polistiren. Lahke agregate pa lahko dobimo kot stranski oziroma odpadni produkt druge proizvodnje. Z njihovo uporabo prispevamo k zmanjšanju potrebe po naravnih virih pri proizvodnji betona. To predstavlja eno izmed ključnih smernic na področju okoljevarstva in industrije.

Z uporabo samozgoščevalnih betonov eliminiramo potrebo po zgoščevanju betona z vibriranjem. Samozgoščevalni beton je zaradi lastne teže in sposobnosti tečenja v svežem stanju, popolnoma sam sposoben zapolniti opaž poljubne oblike, pri tem pa oblije armaturo in se odzrača, ne da bi segregiral.

V magistrskem delu smo preverjali samozgoščevalne betone iz lahkih agregatov z naprednimi preskusnimi metodami. S pomočjo reometra smo merili reološke lastnosti svežih mešanic ter določali območje reoloških lastnosti, ki zagotavljajo stabilnost lahkoagregatnega betona v svežem stanju. Problem samozgoščevalnih lahkoagregatnih betonov je ravno v pojavu segregacije, saj lažji agregat splava na površje, ter v obvladovanju tehnologije izdelave, transporta in vgradnje betona. Osredotočili smo se na lahkoagregatni beton iz ekspandirane gline.

Magistrsko delo ima poleg uvoda še sedem poglavij. V drugem poglavju navajamo osnovne lastnosti in opise materialov, v tretjem prikazujemo projektiranje mešanice betona. V četrtem poglavju opisujemo splošno obnašanje cementnih kompozitov in pojem reologije. V petem poglavju prikazujemo uporabljeni metodi merjenja hitrosti ultrazvoka in toplotnega toka. V šestem in sedmem poglavju smo predstavili eksperimentalne preiskave analizirali rezultate. Na koncu podajamo zaključke.

2 BETON

Vrsta betona se določi glede na namen, uporabo ter pogoje okolja, ki jim bo betonski element izpostavljen. Beton ločimo glede na stopnjo strjevanja, na doseženo tlačno trdnost, na vrsto ojačitve ali na gostoto. Gostota normalno težkih betonov znaša med 2000 in 2800 kg/m³, medtem, ko je gostota lahkoagregatnih betonov manjša ali enaka od 2000 kg/m³.

Beton je heterogen material, saj je kompozitna mešanica med seboj povezanih sestavin (agregat, cement, voda in dodatki).

2.1 Normalno težki beton

Agregatna zrna tvorijo skelet, kar daje betonu trdnost in togost, ter zmanjšujejo dolgotrajne volumske spremembe, ki so značilne za cementi kamen. Pomembne lastnosti agregata, ki vplivajo na beton, so mineraloška sestava, ki vpliva na mehanske karakteristike in trajnost strjenega betona, na obdelavnost svežega betona pa vpliva zrnavostna sestava in oblika ter tekstura zrn. Agregate ločimo glede na način pridobivanja. V prvi skupini so naravni agregati, kateri se pridobivajo v kamnolomih z drobljenjem večjih kamnitih skladov ali iz rečnih nanosov. V drugi skupini so umetni agregati.

Cement, skupaj z vodo poveže zrna agregata v kompaktno maso betona. Pri izbiri cementa so pomembni parametri kemijska in mineraloška sestava ter finost mletja. Proces hidratacije cementa oziroma vezanja vode in cementa se začne takoj, ko pride cement v stik z vodo.

Voda omogoča viskoznost in kohezivnost svežega betona ter zadovoljivo vgradljivost in končno obdelavnost betona. Brez nje, ne bi bil mogoč proces hidratacije cementa. Uporabljamo vodo, za katero je dokazano, da je primerna za izdelavo betona. Ne sme vsebovati nobenih snovi, katere bi neugodno vplivale na proces hidratacije cementa ali pa bi povzročale korozijo armature v konstrukcijah iz armiranega betona. Brez dokaza o primernosti za izdelavo betona lahko uporabljamo vodo iz vodovodnega sistema.

Betonu po potrebi primešamo dodatke, ki spremenijo lastnosti svežega ali ostrjenega betona. Običajno se dodajajo v odstotkih glede na maso cementa v betonski mešanici. S svojimi fizikalnim ali kemijskim delovanjem lahko bistveno spremenijo lastnosti cementne paste. Možnosti spreminjanja lastnosti svežega oziroma strjenega betona so sledeče:

- pospeševanje oziroma zavlačevanje začetka vezanja cementa,
- povečanje obdelavnosti svežega betona, ne da bi povečali količino vode,

- zmanjšanje količine vode pri enaki obdelavnosti betona,
- preprečevanje zmrzovanja svežega betona,
- povečanje trdnosti betona,
- povečanje trajnosti betona,
- zmanjševanje prepustnosti betona,
- izboljšanje povezave med starim in novim betonom,
- povečanje erozijske odpornosti betona,
- zmanjševanje ali preprečevanje plastičnega krčenja ali povzročanja ekspanzije,
- sprememba hitrosti izcejanja ali zmanjšanje skupnega izcejanja vode iz betona,
- zmanjšanje segregacije betona,
- izboljšanje črpnosti betona,
- upočasnitev ali zmanjšanje razvoja toplote v mladem betonu zaradi hidratacije,
- preprečevanje škodljivih vplivov bazičnih komponent cementa na sestavine betona.

Kemijske dodatke razvrščamo glede na namen uporabe in sicer: plastifikatorje in superplastifikatorje, aerante, zaviralce in pospeševalce vezanja, pospeševalce strjevanja, zgoščevalce, dodatke za betoniranje pri nizkih temperaturah in druge. Dodajamo jih v majhnih količinah. Po drugi strani pa se mineralni dodatki dodajajo v večjih količinah. Med mineralne dodatke sodijo drobno mleti pucolani, mleta granulirana plavžna žindra, elektrofiltrski pepel, mleti apnenec ter odpadni prah pri proizvodnji ferosilicija in silicija (Saje, 2013).

2.2 Lahkoagregatni beton

Pri betonih normalne trdnosti se lahek agregat navadno uporabi, kadar želimo zmanjšati lastno težo konstrukcijskega elementa. Drugi način uporabe lahkega agregata pa je pri betonih visoke trdnosti. Po vgraditvi betona je potrebno vzdrževati zadostno vlažnost ter primerno temperaturo. Pri pravilnem vzdrževanju vlažnosti, se poveča trdnost, trajnost, vodoneprepustnost, odpornost na obrabo in odpornost proti zmrzovanju in tajanju. Pri procesu hidratacije vezivo nase veže vodo, ki je potrebna za ta proces, nekaj pa jo preide v okolico, saj je njena relativna vlažnost praviloma manjša od vlažnosti elementa. S premikanjem vode se v strukturi betona pojavijo napetosti in posledično deformacije, kar lahko privede do razpok. Z ustrežno nego lahko zmanjšamo takšne deformacije. Visokotrtni betoni imajo nizko vodocementno razmerje (v nadaljevanju v/c), kar pomeni, da ne vsebujejo dovolj vode za zasičenje kapilar med zrnih agregata v procesu hidratacije. Notranjo nego betona tako predstavljajo rezervoarji vode, ki omogočajo, da se voda iz finih kapilarnih por porabi kasneje. Kot rezervoarji vode se uporabljajo zrna predhodno namočenih lahkih agregatov. Lahke agregate odlikuje visoka vodovpojnost,

zato lahko z njimi ustvarimo notranje rezervoarje vode, iz katerih v procesu hidratacije cement srka vodo, kar upočasnjuje izsuševanje ter s tem avtogeno krčenje betona. Voda je na ta način bolj enakomerno razporejena po cementni pasti ter jo je na razpolago več, kot v primeru običajnega betona (Žnidaršič, 2012).

2.2.1 Zgodovina lahkega betona

Prvi zapisi glede uporabe lahkoagregatnega betona segajo več kot 2000 let nazaj. V Sredozemskem območju je še danes nekaj takšnih konstrukcij, med bolj znane sodijo rimski Pantheon, Kolosej ter pristanišče Cosa v Toskani. Slednje je bilo zgrajeno iz lahkih vulkanskih materialov leta 273 pred Kristusom. Z zatonom Rimskega imperija je bilo pozabljeno tudi znanje o lahkoagregatnih betonih (ACI, 2003).

Šele v 20. stoletju se je znova začela proizvodnja lahkoagregatnega betona v bolj izpopolnjeni obliki. Pionir na tem področju je bil izdelovalec opek Stephen J. Hayde iz Missourija. Sprva je iskal rešitev za prenapihnenost opek iz skrilavca in gline, katere so bile izpostavljene visokim temperaturam, v procesu žganja. Ugotovil je, da napihnjen material lahko uporabi namesto agregata in tako dobi lažji beton. Leta 1918 je patentiral proces izdelave lahkega agregata v rotacijski peči. Metoda izdelave takšnega agregata se od takrat do danes ni bistveno spremenila. Prva uporaba betona iz lahkega agregata je bila za namen ladijske industrije, leta 1919 so namreč zgradili 132 meterski tanker (ESCSI, 1971).

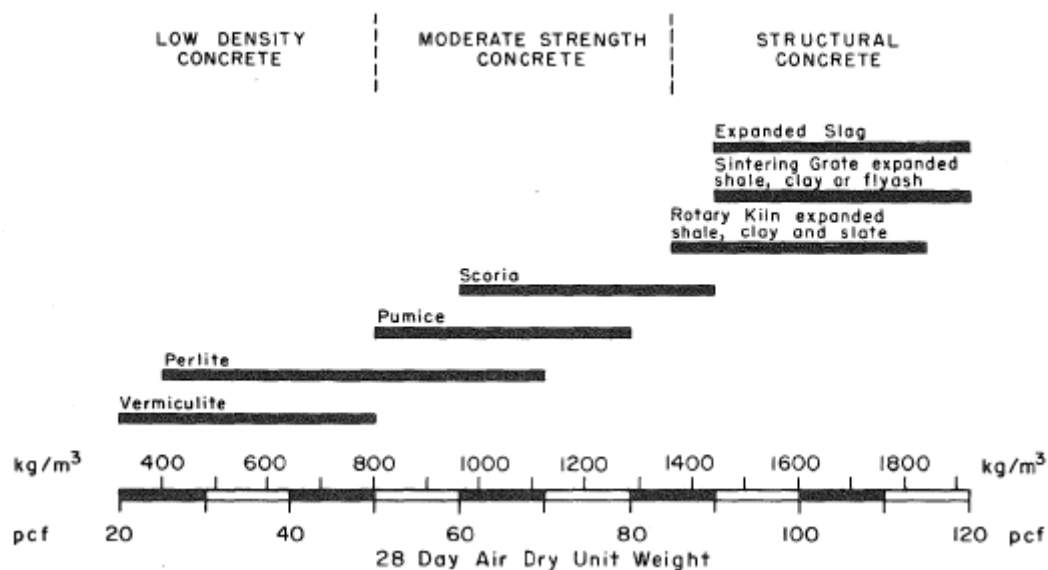
Hkrati so se v Evropi pojavili prvi predizdelani elementi iz aeriranega lahkega betona. Leta 1880 je nemški raziskovalec Michaelis prijavil patent za proces strjevanja s paro. Nato je prišlo do raziskovanja metod glede proizvodnje por s pomočjo ogljikovega dioksida, ki nastane z reakcijo med klorovodikovo kislino in apnencem. Stabilne pore v betonu so dosegali tudi z uporabo aluminija v prahu ter kalcijevega hidroksida, ki so ju dodal cementni mešanici. Velik korak naprej je leta 1920 naredil Šved Axel Eriksson, ko je odkril in nato leta 1923 izpopolnil metodo avtoklaviranja aeriranega (danes celičnega) betona. Ugotovil je, da se v procesu avtoklaviranja visokoporozen material strjuje hitro, hkrati pa je krčenje praktično zanemarljivo v primerjavi s sušenjem na zraku. Kasneje so ugotovili, da se namesto apna ali cementa lahko doda elektrofiltrski pepel, kar zmanjšuje stroške. S tem se je začela množična uporaba in izpopolnjevanje te metode, najprej zlasti v skandinavskih državah, Nemčiji in Nizozemski, danes pa je aeriran beton prisoten povsod po svetu (Van Boggelen, 2014).

2.2.2 Lastnosti in primerjava lahkoagregatnega betona z normalno težkim betonom

Razmerje med trdnostjo betona in njegovo lastno težo lahko povečamo na dva načina. Prvi način je, da uporabimo visoko trdne betone, s tem povečamo trdnost, gostota betona in s tem lastna teža elementov pa ostane enaka. Drugi način je z zmanjšanjem lastne teže (uporaba lahke agregatnih betonov, vgrajevanje votlih plastičnih krogel iz plastike) pri isti trdnosti betona.

V standardu SIST EN 206:2013 je lahki beton definiran kot beton, katerega gostota ni manjša od 800 kg/m³ ter ni večja od 2000 kg/m³. Lahko se v celoti ali delno proizvaja iz lahkega agregata.

V ameriških standardih so lahkoagregatni betoni (v nadaljevanju LWC) bolj podrobno opredeljeni, zato se v nadaljevanju sklicujemo tudi na te dokumente. V standardu ACI 213R-03 je lahki beton definiran kot beton z gostoto med 1120 in 1920 kg/m³, ki v celoti ali delno vsebuje lahki agregat. Minimalna tlačna trdnost takšnega betona znaša 17 MPa po 28 dneh. Zaradi uporabe LWC se lastna teža konstrukcije lahko zmanjša za 25 % ali več.



Slika 1: Gostota lahkoagregatnega betona in namen uporabe (ACI 213R-79, str 4)

Figure 1: Approximate density and use classification of lightweight aggregate concretes (ACI 213R-79, p. 4)

Elastični modul betona (v nadaljevanju E_c) je odvisen od hidratizirane cementne paste in agregata. Zaradi večjega elastičnega modula peska in gramoza od lahkega agregata, je posledično E_c normalno težkega betona večji kot E_c LWC. Slednji variira med 0,5 in 0,75 E_c normalno težkega betona, pri enaki trdnosti. Manjši, kot je E_c , manjša je togost betonskega elementa. Ta je definirana kot produkt med elastičnim modulom in vztrajnostnim momentom (ACI, 2003).

Lezenje betona je sorazmerno napetosti. Na velikost lezanja vpliva veliko parametrov, med njimi vrsta agregata in cementa, zrnastostna sestava agregata, količina vode v mešanici, vlažnost agregata v času priprave betona, delež zraka v betonu, starost betona ob obremenitvi, nega, dimezije elementa, relativna vlaga okolice in trajanje obremenitve. Lezenje zmanjšamo z uporabo visoko trdnega betona. Pri povečani trdnosti betona z 21 MPa na 35 MPa se lezenje bistveno zmanjša (ACI, 2003).

Lahkoagregatni betoni imajo običajno večje krčenje zaradi sušenja, kot betoni običajne trdnosti. Z višanjem trdnosti lahkoagregatnega betona se njegovo krčenje praviloma manjša. Krčenje pa zmanjšamo tudi z delno ali popolno zamenjavo lahkega finega agregata (zrna manjša od 4 mm) z naravnim peskom.

Pri majhnem v/c , se že v zgodnji fazi hidratacije pojavi avtogeno krčenje. Le to je mogoče omejiti z zamenjavo drobnozrnatega peska (približno 20 %) z vodo zasičenim lahkim agregatom. Beton se nato vlije v izolirane kalupe, kjer se začetna faza hidratacija pojavi v kvazi adiabatnih pogojih. To pomeni, da beton praktično ne odda nobene toplote okolici, niti je ne prejme, spreminja pa se njegova temperatura, prostornina in tlak. S tem se eliminira praktično celotno krčenje, brez uporabe dodatkov (Aitcin in Mindess, 2011).

Cepilna trdnost LWC variira med 0,7 in 1,0 cepilne trdnosti normalno težkega betona, če imata oba betona enako tlačno trdnost. Če se del lahkega agregata zamenja s peskom, se poveča cepilna trdnost takšnega betona. Sprijemnost z armaturo variira med 0,65 in 1,0 sprijemnosti normalno težkega betona, če imata oba enako tlačno trdnost (ACI, 2003).

V primeru, da je LWC pripravljen in negovan pravilno, je njegova odpornost na zmrzovanje in tajanje primerljiva z normalno težkim betonom. Analize kažejo, da v LWC nastane malo mikrorazpok. Vzrok temu je visoka sprijemnost agregata in cementnega kamna ter manjše notranje napetosti zaradi primerljivejših vrednosti modula elastičnosti cementnega kamna in lahkega agregata (ACI, 2003).

Karbonatizacija v betonu je posledica reakcije CO_2 (ogljikov dioksid), ki je v zraku in Ca(OH)_2 (kalcijev hidroksid), ki nastane v procesu hidratacije cementa. Rezultat reakcije je CaCO_3 (kalcijev karbonat) kateri slabša zaščitno vlogo betona pri koroziji jekla. Kalcijev karbonat zniža pH vrednost betona s 13 na 9, kar povzroči depasivacijo jeklene armature. Najpomembnejša zaščitna mehanizma pred korozijo jeklene armature sta debelina krovnega sloja ter prepustnost betona, ki je odvisna od v/c betona oziroma trdnosti (ACI, 2003).

Lastnost, ki pomembno vpliva na zaščito betona pred korozijo, je prepustnost betona. Večina študij je opravljenih pod statičnimi pogoji, kar je primerno za jezove in zadrževalnike vode ne pa za mostove in parkirne hiše, kjer je obtežba dinamična. Krovni sloj betona mora ostati neprepusten, kljub krčenju in temperaturni ter dinamični obtežbi. Prepustnost LWC je približno enaka oziroma manjša kot prepustnost normalno težkega betona, vendar pa se pod večjimi obremenitvami prepustnost LWC močno poveča.

Kvalitetno narejeni LWC imajo manjšo absorpcijo vode kot normalno težki beton, s tem pa ohranjajo manjšo gostoto materiala (ACI, 2003).

Velik vpliv na korozijo betona imata plina CO₂ (ogljikov dioksid) in SO₂ (žveplov dioksid), ki negativno vplivata na naše okolje. Odpornost LWC, ki je izpostavljen agresivnemu okolju in s tem koroziji, lahko izboljšamo z uporabo elektrofiltrskega pepela in metakaolina, kar znatno pripomore k odpornosti in trajnosti. Metakaolin kot ostali pucolani (mikrosilka, elektrofiltrski pepel) reagira s kalcijevim hidroksidom (apno), ki nastane pri procesu hidratacije cementa (Hubertova et al., 2009).

Pomembna lastnost LWC je odpornost na visoko temperaturno obtežbo. K boljši odpornosti pred požarom veliko pripomore agregat. Beton, v katerem je vgrajen lahek agregat iz ekspandirane gline, le ta je žgana iz surovine pri visokih temperaturah, je primeren za uporabo v konstrukcijah z večjim tveganjem požara. Dobre lastnosti takšnega agregata bistveno vplivajo na volumsko stabilnost betona v času požara. Visoka temperaturna odpornost LWC je odvisna tudi od tehnološkega procesa izdelave betona. Izboljša se s predhodnim namakanjem lahkega agregata, v prvi fazi strjevanja betona pa je odpornost manjša. V primeru, da se vsebnost vlage v elementu zmanjšuje (če je vlaga med 10 in 20 %), se zmanjšuje tudi odpornost na požarno obremenitev. Medtem ko vlaga, ki je manjša od 10 %, bistveno ne vpliva na požarno odpornost LWC (Bodnarova et al., 2014).

Požarna odpornost LWC srednjih tlačnih trdnosti od 21 MPa do 35 MPa je boljša kot požarna odpornost navadno težkega betona istega trdnostnega razreda. Razlog temu je manjši koeficient toplotne prevodnosti, in stabilnost agregata, kateri je v fazi žganja izpostavljen visoki temperaturi čez 1000 °C. Kljub temu pa je požarna odpornost visoko trdnih LWC, zaradi manjše prepustnosti, ki je povezana z visoko trdnimi betoni, manjša. Pri visokotrdnih LWC se zaradi visoke vsebnosti vlage lahko pojavi luščenje betona. Luščenje se lahko zmanjša z uporabo polipropilenskih vlaken. 0,1 % do 0,2 % dodanih vlaken lahko znatno zmanjša pojav luščenja betona pri požaru (ACI, 2003).

Toplotna prevodnost materiala nam pove, kolikšen toplotni tok teče skozi meter debelo steno pri temperaturni spremembi 1 kelvin ($\lambda = 1 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$). V splošnem je $\lambda = \lambda(T)$, vendar če temperaturne razlike v snovi niso prevelike, lahko računamo, da je $\lambda = \text{konst}$. Toplotna prevodnost normalno težkih betonov je različna, in sicer je odvisna od gostote, mikrostrukture in mineraloške sestave materiala, znaša pa od 0,8 W/(m · K) do približno 2,3 W/(m · K).

Betoni iz lahkega agregata lahko dosežejo toplotno prevodnost do 0,13 W/(m · K) (Liapor high-quality expanded clay, 2015).

Velik vpliv na toplotno prevodnost betona ima vsebnost vlage. Več vlage kot vsebuje beton, večja je toplotna prevodnost. Za 1 % povečanja vlage se toplotna prevodnost poveča za 6 %. Vgrajeni beton ima vedno določen delež vlage, ker je v ravnovesju z vlago v okolici. Ker je toplotna prevodnost λ izražena za material, ki je povsem suh, je za realno oceno faktor λ treba ustrezno korigirati (ACI, 2003).

Koeficient linearnega temperaturnega raztezka za LWC znaša med $7 \cdot 10^{-6}$ mm/mm/°C in $11 \cdot 10^{-6}$ mm/mm/°C, odvisno koliko peska se uporabi v mešanici (ACI, 2003).

Zmanjšanje lastne teže betona lahko znatno vpliva na zmanjšanje cene celotne konstrukcije, ki je v veliki meri odvisna od njene celotne teže. LWC je poleg ekonomskega vidika, učinkovitejši tudi z vidika ohranjanja okolja, uporabijo se namreč lahko materiali, ki nastanejo kot stranski oziroma odpadni produkt nekega drugega proizvoda. Na tem področju se večinoma uporabljata elektrofitrski pepel in žlindra (Hubertova et al., 2010).

Odlične trajnostne lastnosti na dolgi rok so rezultat podobnih togosti med agregatom in cementnim kamnom, kar privede do malo mikrorazpok in minimalizira napetosti med njima. Zaradi žganja pri visokih temperaturah se lahko površina lahkega agregata aktivira tako, da deluje kot pucolan, kar pomeni, da se tudi kemijsko poveže s cementnim kamnom. (Bremner et al., 2013).

2.2.3 Samozgoščevalni lahkoagregatni betoni

Povečevanje deleža armature v armiranobetonskih (v nadaljevanju AB) konstrukcijah pomeni povečanje konstrukcijske učinkovitosti elementov ter omejevanje širjenja razpok, hkrati pa predstavlja oteženo zgoščevanje svežega betona z vibriranjem, kar je nujno za zagotovitev ustrezne homogenosti AB elementov. Posledica je slabša kvaliteta in manjša trajnost AB konstrukcij. Takšnim problemom se je moč izogniti z uporabo samozgoščevalnega betona (v nadaljevanju SCC), ki so ga prvič predstavili leta 1988 na Japonskem (Bokan Bosiljkov, 2003).

SCC je beton, ki je pod delovanjem svoje lastne teže in tečenja popolnoma sam sposoben zapolniti opaž poljubne oblike, oblitu armaturo, se odzračiti in znivelirati, ne da bi pri tem segregiral. Beton mora imeti pri tem odlično sposobnost tečenja in visoko stabilno strukturo, kar dosežemo z ustrezno uporabo materialov, povečanim deležem praškastih delcev in kemijskimi dodatki za povečanje viskoznosti ter superplastifikatorji z dovolj dolgim časom delovanja. Pomembna je še pravilna kompatibilnost in zastopanost posameznih sestavin. Recepturo samozgoščevalnih mešanic je treba zagotoviti iz razpoložljivih lokalnih materialov in je praviloma ni moč prenesti iz drugih držav, kjer je takšna tehnologija izdelave najbolj razvita. Zato je takšno mešanico materialov največkrat potrebno zasnovati na novo. Pri slabo granuliranih drobljenih apnenčevih agregatih je potrebno, poleg običajne količine cementa, vključiti še relativno velik delež apnenčeve moke oziroma ustrezen del superplastifikatorja in dodatka za viskoznost. Pri mešanicah z dobrogranuliranim prodrom pa dosežemo ustrezne samozgoščevalne lastnosti, poleg običajne količine cementa, še z nekoliko večjo količino superplastifikatorja (Bokan Bosiljkov, 2003).

Samozgoščevalni lahkoagregatni beton (v nadaljevanju SCLC), je relativno nov gradbeni termin. Gre za kombinacijo samozgoščevalnih lastnosti in lahkoagregatnega betona. Uporablja se predvsem za rekonstrukcijo starih stavb, katere ne smejo biti preobremenjene, pri proizvodnji predizdelanih elementov in pri monolitnih konstrukcijah (Hela in Hubertova, 2005a). V mešanici in dodatkih praktično ni razlike med SCC in SCLC, razlika je le v uporabljenem agregatu (Wu et al., 2009).

Čeprav ima v splošnem SCC odlično pretočnost in odpornost na segregacijo v svežem stanju (Kim et al., 2010b), pa je problem pri SCLC ravno pojav segregacije svežega betona in pravilna izbira lahkega agregata. Pri tem je potrebno poznati lastnosti materiala, kot je absorpcija vode pri normalnem zračnem tlaku, v primeru črpanja betona pa pri visokem tlaku (Hela in Hubertova, 2005b).

Bistveni dejavnik, kateri vpliva na osnovne karakteristike svežega in mehanske lastnosti strjenega SCLC, je izbrana vrsta lahkega agregata. Pomembne lastnosti lahkega agregata so njegova gostota, trdnost materiala in absorpcija vode pod normalnim in visokim zračnim tlakom. Te lastnosti so povezane z notranjo poroznostjo in površino agregata. Zaradi manjše mase ima SCLC manjšo kinetično energijo, s tem pa je rahlo počasnejši kot normalno težki beton, zato je treba pri ugotavljanju reoloških lastnosti takšnega betona preveriti ustreznost metod. Zaradi visoke vpojnosti lahkega agregata je treba dodati količino vode pri mešanju ali pa predhodno namakati lahek agregat. Slednje je bolj priporočljivo, saj je težko določiti pravo količino absorbirane vode, ker imajo različne frakcije različno sposobnost vpijanja vode ter so že na začetku različno vlažne. Predhodno vlaženje agregata izloči probleme hitre izgube konsistence, in s tem probleme pri vgrajevanju ter izboljša fizikalno mehanske lastnosti kot sta trdnost in trajnost betona. Najlažji način vlaženja lahkega agregata je, da se ta 24 ur namaka v vodi. V praksi je to težje zagotoviti. (Hubertova in Hela, 2007).

SCC ima v primerjavi s konvencionalnim betonom veliko prednosti, kot so pridobitev na času izdelave, manjših stroških dela, ni potrebe po vibriranju, zmanjšanje prepustnosti in povečanje trajnosti. SCC ima v primeru uporabe lahkega agregata, zaradi manjše lastne teže, manjšo kinetično energijo, zato so v primerjavi z betonom iz normalnega agregata rahlo počasnejši in težje oblijejo armaturo. Drugi problem pa je vodovpojnost lahkega agregata, kar ima velik vpliv na reološke lastnosti betona. Z dodatkom superplastifikatorja se poveča pretočnost SCC hkrati pa se poveča možnost segregacije (Maghsoudi, 2011).

V primeru, da je betonu dodana velika količina praškastih dodatkov, kot je naprimer elektrofiltrski pepel, je svež beton bolj viskozen, v strjenem stanju pa ima višjo tlačno trdnost. To pripomore h kvaliteti SCC, ter preprečuje segregacijo takšnega betona v primeru dodajanja lahkega agregata. (Kim et al., 2010a).

Poleg zgoraj naštetih lastnosti ima SCLC manjšo sposobnost prenašanja duktilnih deformacij. Zato je potrebno biti pozoren pri projektiranju konstrukcij iz takšnega betona, saj se lahko pojavi krhka porušitev (Maghsoudi, 2011).

2.2.4 Uporabljeni materiali

V standardu SIST EN 206:2013 je določeno, da sestavine betona ne smejo vsebovati škodljivih primesi v količinah, ki bi lahko povzročile korozijo armature ali poslabšale trajnost betona ter morajo biti primerne za predvideno uporabo v betonu. Uporabiti se smejo le materiali z dokazano primernostjo za nameravano uporabo betona, ki je skladen s tem standardom. Tudi, če osnovni material velja za splošno primerne, to še ne pomeni da je primeren za vsako sestavo betona.

Standard SIST EN 206:2013 še dodaja, da za sestavine, za katere ni evropskega standarda, ki posebej obravnava to sestavino v betonu, ali če ta sestavina znatno odstopa od evropskega standarda oziroma če evropski standard ne obravnava določenega proizvoda, potem se primernost lahko dokaže na podlagi:

- evropske tehnične ocene ali
- predpisov veljavnih v kraju uporabe betona (npr. slovensko tehnično soglasje).

2.2.4.1 Voda za pripravo betona

Standard SIST EN 206:2013 določa, da mora biti voda, primerna za pripravo betona, skladna s standardom SIST EN 1008. Pri tem velja, da voda ne sme vsebovati sestavin, ki bi lahko neugodno vplivale na strjevanje, korozijo betona ali na zahtevane lastnosti betona. Voda, ponovno pridobljena iz procesov v industriji betona sama zase ali v kombinaciji s pitno vodo ali podtalnica skladna z EN 1008, se lahko uporablja kot voda za pripravo betona z ali brez armature ali vključenimi kovinami ali brez njih in tudi za prednapeti beton, ob pogoju, da so izpolnjene zahteve standarda EN 1008. Pitna voda velja za primerno v betonu, zato je ni potrebno preizkušati.

Pri projektiranju mešanic smo uporabili vodo iz Ljubljanskega vodovodnega omrežja.

2.2.4.2 Cement

Standard SIST EN 206:2013 določa, da za splošno primeren cement velja cement, skladen z SIST EN 197-1. Pri izbiri cementa je potrebno upoštevati:

- način izvajanja del,
- predvideno rabo betona,
- pogoje negovanja (npr. toplotna obdelava),

- dimenzije konstrukcije (razvoj hidratacijske toplote),
- okoljske pogoje, katerim bo konstrukcija izpostavljena (stopnje izpostavljenosti),
- morebitno reaktivnost agregata z alkalijami iz osnovnih agregatov.

Po standardu SIST EN 197-1:2011 je cement 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.

Cement, skladen s standardom SIST EN 197-1:2011, imenovan CEM cement, mora dati, če je pravilno odmerjen in zmešan z agregatom in vodo, beton ali malto, ki ostane dovolj dolgo primerno obdelaven. Po določenem času mora doseči predpisano trdnost in mora biti dolgo prostorninsko stabilen.

Glavne vrste cementov po standardu SIST EN 197-1:2011 so:

- CEM I – Portlandski cement,
- CEM II – Mešani portlandski cement,
- CEM III – Žlindrin cement,
- CEM IV – Ppucolanski cement,
- CEM V – Mešani cement.

Pri projektiranju mešanic smo uporabili dva cementa CEM I, ki ga proizvajata dve cementarni.

2.2.4.3 Lahki agregat

V splošnem agregat predstavlja približno 65 % do 75 % prostornine betona, zato ima največji vpliv na obdelovalnost svežega betona in mehanske lastnosti strjenega betona. Del agregata je v obliki grobih zrn, ki tvorijo skelet, preko katerega se prenašajo obremenitve, drobna zrna pa skupaj s cementom in vodo tvorijo cementno malto. Čim večje je največje zrno agregata, tem manjša je skupna površina agregata, kar pomeni manjšo potrebno količino cementne paste. Po drugi strani pa večja zrna pomenijo slabšo povezavo cementnega kamna, kar povzroča večje napetosti okoli zrn, kar privede do mikrorazpok.

V splošnem uporabljamo:

- lahke agregate,
- normalno težke agregate,
- težke agregate,

- reciklirane agregate.

Lahki agregati morajo biti skladni s standardom SIST EN 13055-1. V njem so podane lastnosti lahkih agregatov in lahkih polnilnih agregatov, ki se jih pridobi s predelovanjem naravnih, industrijskih ali recikliranih materialov. Standard pokriva lahke agregate, katerih gostota ne presega 2000 kg/m^3 , to so lahko:

- naravni agregati,
- agregati narejeni iz naravnih in industrijskih materialov,
- agregati narejeni iz industrijskih materialov,
- reciklirani agregati.

Lahki agregati so lahko torej naravni, to so vulkanski tufi in žlindre, magmatska kamnina riolit ter perlit. Medtem, ko med umetne materiale sodijo elektrofiltrski pepel, polistiren, ekspanzirano steklo in ekspanzirana glina.

Pri projektiranju mešanic smo uporabili lahki agregat iz ekspanzirane gline.

2.2.4.3.1 Osnovne lastnosti

Lahki agregat ima zaradi svoje strukture in celičastih por manjšo gostoto. Te pore nastanejo zaradi plina, ki se razvije pri segrevanju surovega materiala. Pore, velikosti od $5 \mu\text{m}$ do $300 \mu\text{m}$, so enakomerno porazdeljene po celotnem materialu. Pore blizu površja se v primeru izpostavitve vlagi hitro napolnijo z vodo, notranje pore pa se polnijo zelo počasi (ACI, 2003).

Oblika lahkega agregata je različna, in sicer odvisna od tehnologije izdelave in od materiala, iz katerega je izdelan agregat. Večinoma je okrogla in nepravilne oblike ali pa kockasta in pravilne oblike. Tekstura se razlikuje med večinoma gladkim površjem z malo površinskimi porami, do površine z veliko porami (ACI, 2003).

Suha prostorninska masa lahkega agregata znaša od $1/3$ do $2/3$ suhe prostorninske mase normalno težkega agregata. V primeru, da je ta prostorninska masa manjša, je treba dodati več cementa, da se zagotovi potrebna trdnost betona. Zahteve za suho prostorninsko maso lahkega agregata v nasutem stanju v ameriških standardih ASTM C 330 in ASTM C 331, so naslednje (ACI, 2003):

Preglednica 1: Največja suha prostorninska masa lahkega agregata v nasutem stanju (ACI 213 R-03, str. 6)

Table 1: Maximum dry loose bulk density requirements of lightweight aggregates (ACI 213R-03, p. 6)

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)

Čim manjša je frakcija agregata, oziroma čim manjši delci nastopajo v agregatu, tem večja je prostorninska masa.



Slika 2: Frakcije lahkega agregata LECA (<http://www.leca.qa/>)

Figure 2: Fractions of lightweight aggregate LECA (<http://www.leca.qa/>)

Poroznost lahkega agregata se določi kot vsota por posameznega delca agregata in praznin med temi delci. Poroznost je pomembna za vodovpojnost agregata. Lahki agregat lahko absorbira od 5 % do 25 % vode, glede na suho maso agregata. Po drugi strani večina normalno težkih agregatov absorbira manj kot 2 % vode. Vlažnost lahkih agregatov je zaradi zaloga vode, od 5 % do 10 % lahko pa tudi več. Pomembna razlika med absorbirano vodo v normalno težkih agregatih in lahkih agregatih je v tem, da je pri normalno težkih agregatih voda večinoma na površini zrna in že v fazi mešanja betona preide v pasto, medtem ko je absorbirana voda pri lahkih agregatih na površini in v notranjosti zrn. Slednja ne prehaja v cementno pasto v fazi mešanja betona, ampak se porabi pri hidrataciji betona (ACI, 2003).

Lahki agregati iz ekspanzirane gline imajo majhno gostoto, in sicer znaša od 380 kg/m³ do 710 kg/m³. Manjša teža betonskih elementov pomeni manjše stroške gradnje, hkrati pa se zmanjša tudi potresna nevarnost, saj so potresne sile sorazmerne masi elementov. Material odlikuje dobra toplotna in zvočna

izolativna sposobnost ter velika odpornost na požar. Ker je pH vrednost agregata približno 7, je nevtralen za kemične reakcije. Vodovpojnost agregata frakcij od 0 do 25 mm je 18 % lastne teže v času 72 ur po namakanju. Ravno tako je agregat stabilen pri okoljskih vplivih kot je zmrzovanje in tajanje (Leca Light Expanded Clay Aggregate, 2015).

Poleg toplotne izolativnosti in požarne odpornosti je lahek agregat iz ekspandirane gline sposoben akumulirati tudi toploto (Liapor high-quality expanded clay, 2015).

2.2.4.3.2 Pridobivanje lahkega agregata iz ekspandirane gline

Materiali, iz katerega so narejeni lahki agregati, so lahko različni. In sicer umetni agregati iz skrilavca, gline, elektrofilterskega pepela in plavžne žindre ter naravni lahki agregati iz vulkanske žindre, plovca in tufa (ACI, 2003).

Lahkoagregatna ekspandirana glina se pridobiva z žganjem gline v rotacijski peči, na podoben način kot cement, pri temperaturi okoli 1200 °C. Plini, ki pri tem nastanejo, naredijo na tisoče majhnih mehurčkov v materialu, ki se po ohladitvi kažejo kot pore v materialu (Leca Building Material LLC, 2015).

Pri žganju v rotacijski peči glina ekspandira do velikosti dvakratnika svoje prvotne dimenzije. To povzroči zmanjšanje gostote materiala za skoraj polovico (Bremner in Ries, 2007).

Iz približno enega kubičnega metra surove gline se zaradi naravnih lastnosti in postopka izdelave (žganja) ustvari približno pet kubičnih metrov lahkega agregata (Liapor high-quality expanded clay, 2015).

2.2.4.3.3 Ekološki in ekonomski vidik uporabe lahkega agregata

Z uporabo lahkega agregata zmanjšamo lastno teže konstrukcije od 20 % do 30 %, kar se kaže v zmanjšanju stroškov pri armaturi, opaževanju in delovni sili. Gradi se hitreje, poleg tega pa je cenejši tudi transport, zmanjšuje se tudi količina odpadnega materiala. Ko je objekt v uporabi, je zaradi dobrih izolativnih sposobnosti poraba energije manjša (Leca Light Expanded Clay Aggregate, 2015).

Lahki agregat iz ekspandirane gline je vsestransko uporaben. Poleg uporabe v betonu se lahko uporablja kot material za nasutje pri opornih zidovih, pri čemer je potrebno poudariti, da povzroči majhen zemeljski pritisk, uporabi se lahko kot drenaža ali kot nasutje, kjer je potrebna dodatna izolacija (npr. pohodna streha). Poleg uporabe v gradbeništvu se uporablja še za filtracijo vode in v kmetijske namene (Leca Building Material LLC, 2015).

Kljub temu, da se pri izdelavi lahkega agregata oziroma pri izdelavi lahkoagregatnega betona porabi več energije kot pri izdelavi normalno težkega betona, je končna poraba energije, gledano čez celotno obdobje uporabe konstrukcije, manjša. Z ekološkega vidika je tako smotrnejša uporaba lahkega agregata (Bremner in Ries, 2007).

2.2.4.4 Agregat

Za izdelavo betona smo, poleg grobega agregata iz ekspanzirane gline, uporabili še pesek pretežno silikatne sestave.

2.2.4.5 Dodatki

V zadnjih šestdesetih letih je opazen velik napredek pri dodatkih za beton. V razvitih državah se ti dodajajo osemdeset do devedeset odstotkom betonov, ki se proizvedejo. Dodatki so namenjeni izboljšanju obdelovalnosti, hitrejšemu oziroma počasnejšemu strjevanju, povečevanju trdnosti, povečanju zmrzlinke odpornosti, preprečevanju temperaturnih razpok, odpornosti na korozijo, ipd. Večina dodatkov ima ne le eno, temveč več funkcij, zato jih je težko razvrstiti le po namenu uporabe. Ločimo med kemijskimi dodatki in mineralnimi dodatki, kateri so navadno dodani v večjih količinah (Mehta in Monteiro, 2014).

2.2.4.5.1 Kemijski dodatki

Standard SIST EN 206:2013 pravi, da za splošno primerne veljajo kemijski dodatki, ki so skladni z EN 934-2. Kemijski dodatki se dodajajo zato, da se spremenijo lastnosti sveže mešanice ali strjenega betona. Praviloma se dodajajo v majhnih količinah in v času mešanja.

V splošnem kemijske dodatke ločimo glede na namembnost (Saje, 2013):

- aerante,
 - v sveži betonski mešanici ustvarijo majhne zračne mehurčke, premera 50 μm do 100 μm ,
 - povečajo odpornost betona na zmrzovanje in soli.
- plastifikatorji, superplastifikatorji, superplastifikatorji nove generacije,

- dodatki, ki povečujejo plastičnost svežega betona in s tem zmanjšujejo potrebo po vodi,
- omogočajo hitrejši prirast trdnosti, pri enaki količini cementa,
- omogočajo lažje vgrajevanje.
- zaviralci, pospeševalci,
 - zaviralci upočasnjujejo vezanje cementa. Uporabljajo se pri vgrajevanju betona ob visokih temperaturah okolja in pri velikih dimenzijah konstrukcijskih elementov,
 - pospeševalci pospešujejo hidratacijo cementa. Zmanjšujejo čas negovanja in zaščitne svežega betona ter pospešujejo razvoj trdnosti. Uporabljajo se pri vgrajevanju betona ob nizkih temperaturah okolja.
- gostilci/stabilizatorji,
 - jih je več vrst in imajo zelo različne lastnosti. V splošnem se uporabljajo za zmanjšanje segregacije grobih zrn agregata in notranjega ter površinskega izcejanja vode pri betonih SCC ter za preprečitev izgube materiala zaradi izpiranja med podvodnim betoniranjem. Stabilizatorji povečajo stabilnost betona zaradi zmanjšanja mobilnosti vode v betonu (Hočevar, 2013).

Ameriški standardi ASTM kemijske dodatke loči med dodatki za zmanjšanje vode (*ASTM C 494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*) ter med dodatki, ki namerno povzročijo zračne mehurčke v betonu (*ASTM C 260, Standard Specifications for Air-Entraining Admixtures for Concrete*) (Mehta in Monteiro, 2014).

Pri projektiranju mešanic smo uporabili kombinacijo superplastifikatorja (v nadaljevanju SP) ter aeranta.

Nekaterim mešanicam smo dodali tudi gostilec, z namenom povečanja viskoznosti cementne suspenzije.

2.2.4.5.2 Mineralni dodatki

Standard SIST EN 206:2013 pravi, da je mineralni dodatek fino presejan material, ki se uporablja za izboljšanje določenih lastnosti ali pa za doseganje posebnih lastnosti. Standard obravnava dve vrsti neorganskih dodatkov, in sicer:

- TIP I (skoraj inertne mineralne dodatke, ki so kemijsko praktično neaktivni),
 - primerna so mineralna polnila, ki so skladna s SIST EN 12620 ali SIST EN 13055
 - pigmenti, ki so skladni z EN 12878.
- TIP II (pucolanske ali latentno hidravlične mineralne dodatke),
 - primerni so elektrofitrski pepeli, ki so skladni s SIST EN 450-1,

- mikrosilka, ki je skladna s SIST EN 13263-1,
- mleta granulirana plavžna žlindra, ki je skladna s SIT EN 15167-1.

Mineralni dodatki, ki se betonu dodajajo v večjih količinah imajo ugoden vpliv na tehnične lastnosti betona. Izboljšajo se termične lastnosti, kemična odpornost, pojav razpok, poveča se trdnost in izboljša se obdelavnost svežega betona (Saje, 2013).

3 PROJEKTIRANJE MEŠANICE SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA IZ LAHKEGA AGREGATA

3.1 Splošno o projektiranju betona

Odločilnega pomena za beton je zaporedje dodajanja posameznih sestavin. Pomembno je, kdaj se doda voda v suho mešanico cementa in agregata, ter kolikšna je hitrost vrtenja mešalca. Material se izmenjuje z enega na drugi konec mešalca s kotaljenjem, pregibanjem in gnetenjem. Dodatki betonu pa se v večini primerov dodajajo v obliki vodne raztopine (Žarnić, 2005). To velja za običajne betone, medtem ko za betone iz lahkega agregata (LWC) velja drugačen protokol. Lopatice mešalca v primeru mešanja na suho lahki agregat zdrobijo, zato takšen agregat dodajamo proti koncu mešanja.

Mešanica betona je navadno narejena iz sestavin, ki so blizu betonarni, s tem zagotovimo relativno poceni konstrukcijski material. Ustrezno količino sestavin za beton torej določimo za vsak beton posebej, in se zato lahko razlikuje med posameznimi lokacijami proizvodnje betona (praviloma so to betonarne).

Mešanico betona je treba projektirati tako, da se razvije optimalna kombinacija lastnosti tako svežega kot strjenega betona. Praviloma so postavljene zahteve glede minimalne tlačne včasih tudi natezne trdnosti, razreda konsistence za posed in razlez ter najmanjša in največja vsebnost zraka v betonu. Te lastnosti so večinoma odvisne ena od druge, zato ni nujno, da izboljšanje ene lastnosti pomeni izboljšanje celotne mešanice (ACI, 2003).

Preglednica 2: Zahteve za lahkoagregatni beton (Mehta, 2014, str. 431)

Table 2: Requirements for structural lightweight concrete (Mehta, 2014, p. 431)

Air-Dried, 28-Day Unit Weight, Max. [kg/m ³ (lb/ft ³)]	28-Day Splitting Tensile Strength, min. [MPa (psi)]	28-Day Compressive Strength, min. [MPa (psi)]
All Lightweight Aggregates		
1760 (110)	2.2 (320)	28 (4000)
1680 (105)	2.1 (300)	21 (3000)
1600 (100)	2.0 (290)	17 (2500)
Combination of Normal Sand and Lightweight Aggregate		
1840 (115)	2.3 (330)	28 (4000)
1760 (110)	2.1 (310)	21 (3000)
1680 (105)	2.1 (300)	17 (2500)

Pomembna lastnost LWC je njegova gostota, ki daje ekonomsko upravičenost uporabe takšnega betona. Ni odvisna le od količine uporabljenega lahkega agregata, temveč tudi od količine cementa, vode ter vsebnosti por. Večja količina cementa pomeni večjo trdnost, hkrati pa pomeni tudi večjo gostoto betona. Večja vsebnost zračnih por pomeni manjšo gostoto, hkrati pa tudi manjšo trdnost betona (ACI, 2003).

Preglednica 3: Priporočene vrednosti zračnih por za lahkoagregatni beton (ACI 213R-03, str. 9)

Table 3: Recommended air content for lightweight concrete (ACI 213R-03, p. 9)

Maximum size of aggregate	Air content percent by volume
3/4 in. (19 mm)	4.5 to 7.5
3/8 in. (10 mm)	6 to 9

Osnovna metoda za določanje razmerja sestavin normalno težkega betona, absolutna volumska metoda (*»Absolute volume method«*), pri kateri je volumen svežega betona enak vsoti volumnov cementa, agregata, vode in zraka, ni primerna za projektiranje betona iz lahkega agregata. Kot prvo je težko določiti količino absorbirane vode v lahkem agregatu, kar posledično pomeni, da je težje določiti odvisnost med trdnostjo in v/c razmerjem kot pri običajnem betonu, pri katerem manjši v/c pomeni večjo trdnost. Trdnost LWC je v veliki meri odvisna od količine cementa in ne toliko od v/c, povečamo pa jo lahko z zmanjšanjem maksimalnega zrna agregata ali pa z delno zamenjavo drobnozrnatega lahkega agregata z normalno težkim. Kot drugo velja omeniti, da lahki agregat, ne le da vpija veliko količino vode (10 % do 20 %), ampak jo vpija tudi več tednov. Kot tretje pa gostota lahkega agregata variira z velikostjo frakcij (Mehta in Monteiro, 2014).

Za LWC je primernejša volumetrična metoda (*»Volumetric method«*), pri kateri določamo deleže posameznih sestavin s poskusi (*»Trial and error«*), toliko časa, da dobimo primerno obdelovalnost svežega betona in zadostno trdnost strjenega betona. Najbolj priročno je začeti z enakim volumnom drobnega in grobega agregata, nato pa prilagoditi količine v odvisnosti od razleza in segregacije (Mehta in Monteiro, 2014).

Bolj, kot je tekoča konsistenca LWC betona, večja je možnost pojava segregacije. To kontroliramo z omejitvijo maksimalnega poseda. Obdelovalnost LWC je dovolj dobra že pri posedu med 50 mm in 75 mm, medtem, ko ACI 213R-03 priporoča maksimalni posed 125 mm. Manjši kot je posed boljši je LWC. Pojav segregacije se kontrolira še z volumnom por v betonu. Te izboljšujejo še lastnosti pri zmrzovanju in tajanju. Priporočljiva vsebnost zraka je med 5 % in 7 %, kar pomeni, da se pri manjši količini vode zgodi enak posed, z manjšo možnostjo pojava segregacije (Mehta in Monteiro, 2014).

Preglednica 4: Priporočene vrednosti poseda za različne tipe konstrukcije (ACI 211.2-98, str. 5)

Table 4: Recommended slumps for various types of construction (ACI 211.2-98, p. 5)

Types of construction	Slump, in. (mm)*	
	Maximum [†]	Minimum [†]
Beams and reinforced walls	4 (100)	1 (25)
Building columns	4 (100)	1 (25)
Floor slabs	3 (75)	1 (25)

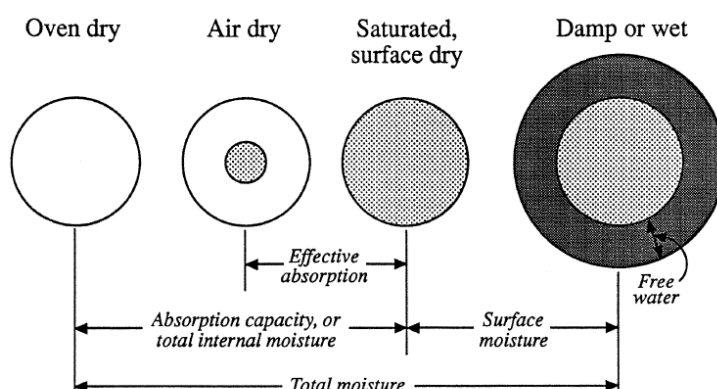
*Slump may be increased when chemical admixtures are used, provided that the admixture-treated concrete has the same or lower w/c or w/cm and does not exhibit segregation potential or excessive bleeding.

[†]May be increased 1 in. for methods of consolidation other than vibration.

3.2 Smernice za izbiro deležev sestavin pri lahkoagregatnih betonih

Za primerno izbiro deležev sestavin pri projektiranju mešanice betona smo si pomagali z ameriškimi standardi ACI 211.2-98, v katerih so priporočila glede izbire sestavin za lahkoagregatne betone.

Pri izbiri agregata dajemo prednost vlažnim agregatom, ker absorbirajo manj vode med mešanjem. Izbira vlažnega agregata pomeni tudi manjšo možnost pojava segregacije, hkrati pa pomeni, da beton doseže dovolj velik posed. Velja pa opozoriti, da je takšen beton bolj ranljiv na zmrzovanje in tajanje. V primeru da je beton narejen iz lahkega agregata z majhno vlažnostjo (manj od 10 %) in visoko absorpcijo vode, je zaželeno, da se agregat za kratek čas zmeša z 1/2 do 2/3 vode, ki je potrebna za mešanico (ACI, 1998).



States of moisture in aggregate. Heavy circle represents the aggregate; crosshatching represents moisture.²

Slika 3: Stopnja vlage v agregatu (ACI 211.2-98, str. 3)

Figure 3: States of moisture in aggregate (ACI 211.2-98, p. 3)

Pomemben vpliv na beton ima izbira frakcij posameznega agregata (drobno ali grobo zrnat). Dobra izbira agregata pomeni boljšo kontinuirno porazdelitev in s tem manjši delež votlin med agregatnimi zrnji. To pomeni, da je potrebna manjša količina cementne paste, to pa v končnem smislu pomeni večjo trdnost ter večjo ekonomičnost. Z manjšanjem maksimalne velikosti zrna se trdnost poveča (ACI, 1998).

V primeru zamenjave drobno zrnatega lahkega agregata z normalno težkim, je treba povečati delež grobega lahkega agregata. Hkrati pa zamenjava z normalno težkim agregatom pomeni tudi večjo trdnost in večji elastični modul (ACI, 1998).

3.3 Postopki mešanja

Protokoli mešanja betona so lahko različni, kot pišemo v poglavju 3.1, za beton iz lahkega agregata ne pride v poštev suho mešanje, saj lopatice mešalca lahek agregat zdrobijo, zato uporabimo drugačne načine mešanja. Miketič (2013) ugotavlja, da sta najbolj ustrezna protokola mešanja naslednja:

- Najprej naredimo cementno pasto, nato dodamo naravni pesek pred lahkim agregatom, zato da nastala malta zaščiti ekspandirana glinena zrna pred zdrobitvijo.
 1. V mešalec natočimo 1/2 vode in takoj dodamo cement,
 2. nato v pasto dodamo 2/3 superlastifikatorja (v nadaljevanju »SP«),
 3. nato dodajamo naravni agregat,
 4. dodamo 1/3 SP,
 5. dodamo 1/2 vode,
 6. nato dodamo še lahek agregat (najprej groba frakcija, nato fina frakcija),
 7. mešamo še 3 minute da SP doseže optimalni učinek.

- Suho mešanje cementa in naravnega peska, na tak način, da je pesek dodan v mešanico pred lahkim agregatom.
 1. V mešalec damo cement in naravni agregat ter suho mešamo,
 2. nato dodamo 2/3 vode,
 3. dodamo SP,
 4. dodamo 1/3 vode,
 5. nato dodamo še lahek agregat (najprej groba frakcija, nato fina frakcija),

6. mešamo še 3 minute da SP doseže optimalni učinek.

Pred tem rešimo problem prevelikega vpijanja vode na naslednja načina (Miketič, 2013):

- predpostavimo, da do vgraditve v opaže, agregat vpije 7,5 % vode, ki jo dodamo vodi, ki je potrebna za mešanje betona,
- lahek agregat poškopimo z 10 % dodatne vode, nato ga pustimo odležati 30 minut, preden ga uporabimo za mešanico.

Pri pripravi betona iz lahkega agregata smo sledili nekaterim priporočilom standarda ACI 211.2-98 v poglavjih 3 in 4.

4 REOLOGIJA SVEŽIH SCLC MEŠANIC

4.1 Splošno o reologiji svežih betonskih mešanic

Reologija je veda, ki proučuje deformiranje in tečenje snovi, od elastičnih snovi do tekočin. Pri tem raziskuje povezavo med silo, deformacijo in časom. Podskupina reologije je viskometrija, katera preiskuje povezave med napetostjo in hitrostjo deformiranja (silo in deformacijo). Viskoznost je definirana kot upor proti tečenju oziroma upor tekočine proti deformaciji. V primeru, da je ta upor velik, je viskoznost materiala velika (Hočevar, 2013).

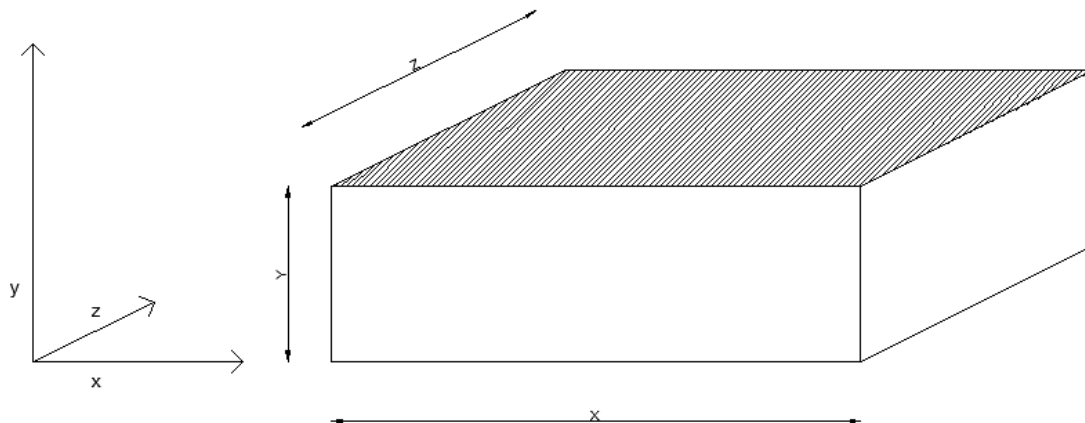
Betonska mešanica je sestavljena iz več sestavin kot so cement, voda in agregat. Zaradi napetosti med zrnom trdne faze in vode postaja ta sistem vedno bolj koheziven in se ga upošteva kot fizikalno telo z določenimi fizikalnimi, mehanskimi in reološkimi lastnosti. Lastnosti betonske mešanice se spreminjajo od začetka mešanja do strjevanja betonske mešanice. Najpomembnejša lastnost sveže betonske mešanice je konsistenca. To je skupek lastnosti svežega betona, ki vplivajo na njegove transportne lastnosti (vgradljivost, obdelavnost, zgostitev). Konsistenca betona je parameter, ki določa plastičnost betona. Standardi predpisujejo metode določanja konsistence sveže betonske mešanice in kriterije za posamezne stopnje konsistence (trdoplastična, srednjeplastična, mehkoplastična in tekoča) (Žarnić, 2005).

Glavna dejavnika pri reoloških lastnostih sta količina vode in količina cementne paste, ki predstavljata dispergirani sistem z zelo veliko kontaktno površino med tekočo in trdno fazo. S procesom hidratacije cementa se povečuje vsebnost trdne faze. Posledica procesa hidratacije cementa je postopno zmanjševanje sposobnosti deformiranja sveže betonske mešanice (Žnidaršič, 2007).

V betonski mešanici z večjo količino grobega agregata pride do notranjega trenja, kar privede do večje strukturne viskoznosti. V drobnem agregatu namreč prosta voda zapolni votline, zato je začne primanjkovati med zrni grobega agregata. Ob povečevanju v/c razmerja se strukturna viskoznost zmanjšuje. Hkrati pa se pri visokem v/c razmerju pojavi segregacija. Pri tem se zniža mehanska trdnost, vodoneprepustnost, odpornost na vremenske razmere itd. Po drugi strani pa pri zmanjševanju količine vode oziroma v/c razmerja, betonska mešanica izgublja kohezijo, razpada, zato se je ne more obravnavati kot homogene mešanice. Strukturno viskoznost lahko zmanjšamo z uporabo kemijskih dodatkov (plastifikator, superplastifikator), pri čemer se količina vode ne povečuje (Žnidaršič, 2007).

Na spodnji sliki (slika 4) prikazujemo telo dimenzij x , y , z . Zgornja ploskev ima površino $A = x \cdot z$. Če na to ploskev deluje sila F v ravnini, v kateri ta ploskev leži, potem je ta sila strižna. Strižna sila povzroči strižno napetost:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

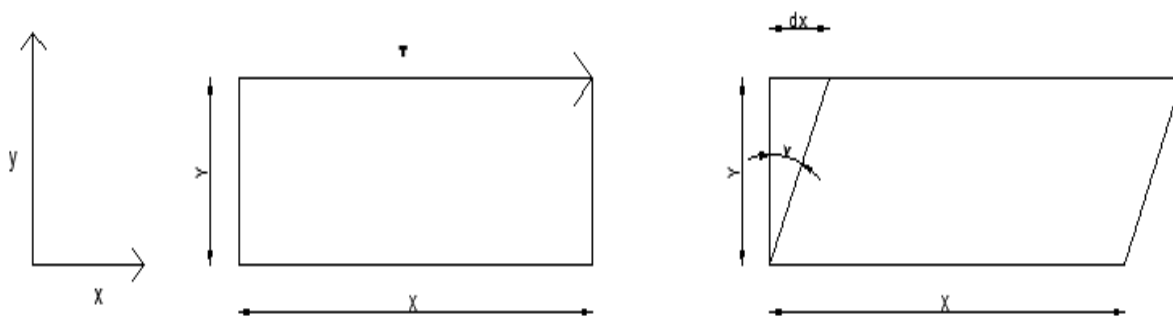


Slika 4: Nedeformirano telo v 3D

Figure 4: Undeformed body in 3D

V času dt se telo zaradi delovanja strižne sile deformira na vrhu ploskve za dx (slika 5). Deformacija se lahko opiše tudi s kotom γ . Razmerje med deformacijo in časom, potrebnim za deformacijo imenujemo strižna hitrost, to je pravzaprav hitrost deformiranja materiala:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (4.2)$$



Slika 5: Nedeformirano telo v 2D (levo) in deformirano telo v 2D (desno)

Figure 5: Undeformed body in 2D (left) and deformed body in 2D (right)

Razmerje med strižno napetostjo (τ) in strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$) pa imenujemo viskoznost (η):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.3)$$

4.2 Svež beton – tekočina

Strjen beton se ob kratkotrajnih obremenitvah obnaša kot elastično telo, po prenehanju obtežbe se namreč vrne v prvotno obliko. Ob dolgotrajnih obremenitvah pa tudi strjen beton prikazuje viskozne lastnosti. Ta pojav se imenuje lezenje betona. Svež beton pa ima lastnosti viskoplastične tekočine, kar je hibridna lastnost, pri kateri se material pod neko kritično mejo (napetost na meji tečenja) obnaša kot trdno telo in steče, ko je ta meja presežena. Visko-plastična tekočina se po prenehanju obtežbe ne povrne v začetno stanje. Tekočino opišemo preko parametra viskoznost, ta je odvisen od medsebojnih interakcij delcev. Zaradi te lastnosti je svež beton obdelaven (Hočevar, 2013).

V splošnem lahko tekočine ločimo med idealne, kjer je viskoznost tako majhna, da jo lahko zanemarimo ter realne oziroma viskozne. Slednje lahko ločimo med Newtonske tekočine, kjer je viskoznost konstantna ter ne-Newtonske, pri katerih se viskoznost spreminja.

Lahko pa tekočine razdelimo v štiri glavne skupine (Wallevik, 2009, Hočevar, 2013):

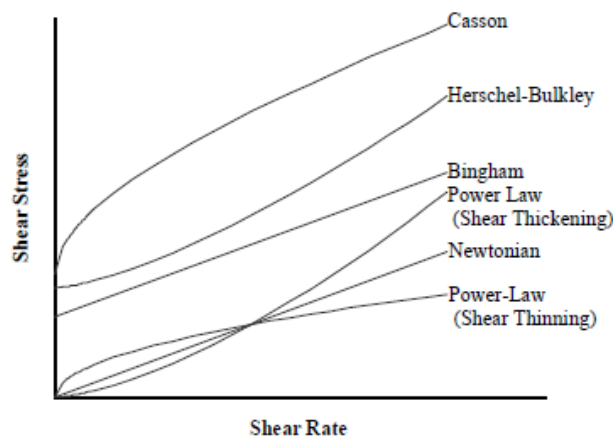
- Newtonska tekočina,
- Ne-Newtonska tekočina, časovno neodvisna,
- Ne-Newtonska tekočina, časovno odvisna,
- Visko-elastična tekočina.

Kot rečeno, je v primeru Newtonske tekočine viskoznost konstantna za vsako strižno hitrost. Takšno viskoznost imenujemo dinamična viskoznost. Viskoznost ne-Newtonske tekočine, ki je časovno neodvisna, je odvisna od strižne hitrosti, kar pomeni, da nima konstantne vrednosti. Takšno viskoznost imenujemo navidezna viskoznost. V primeru ne-Newtonske, časovno odvisne tekočine, je viskoznost odvisna od strižne hitrosti in od časa, ko je tekočina izpostavljena strigu. Visko-elastična tekočina pa je časovno odvisna tekočina, pri kateri material pod obtežbo kaže tako elastične kot viskozne lastnosti (Wallevik, 2009, Hočevar, 2013).

Podrobneje si pogledajmo časovno neodvisne ne-Newtonske tekočine, za katere velja, da je njihova viskoznost odvisna od strižne hitrosti. Tekočine te vrste delimo v tri skupine (Wallevik, 2009, Hočevar, 2013):

- tekočine s strižnim redčenjem (shear thinning) oziroma psevdoplastične tekočine, katerih lastnost je, da se z večanjem strižne hitrosti, viskoznost zmanjšuje.
- tekočine s strižnim zgoščanjem (shear thickening) oziroma dilatantne tekočine, katerih lastnost je, da se z večanjem strižne hitrosti, viskoznost povečuje.

- tekočine, ki imajo neko trdnost na meji tečenja. Material steče šele tedaj, ko strižna napetost preseže napetost na meji tečenja. Med tečenjem pa se ti materiali lahko obnašajo Newtonsko (Binghamova tekočina), psevdoplastično ali dilatantno. Primer takšnega materiala je beton.



Slika 6: Krivulje toka za različne tipe tekočin (Koehler in Fowler, 2004, str. 14)

Figure 6: Flow curves for different types of fluid behaviour (Koehler and Fowler, 2004, p. 14)

4.3 Model za opis tekočine (svež beton) in njegove lastnosti

Tako kot pri mehaniki trdnih teles, lahko tudi pri mehaniki tekočin za posamezen opis tekočine uporabimo matematični model materiala. Ta povezuje komponente tenzorja deformacij s komponentami tenzorja napetosti.

Mnogo tekočin potrebuje vsaj neko minimalno napetost, da začnejo teči, tudi beton. Takšno napetost imenujemo napetost na meji tečenja. Beton ob neki napetosti začne teči, in ko je ta napetost manjša od napetosti na meji tečenja, beton preneha teči (preizkus s posedom). Preprost model za opis takšne tekočine je Binghamov model. Ta ohranja linearno odvisnost med med strižno napetostjo in strižno hitrostjo ter vključuje napetost na meji tečenja (Hočevar, 2013):

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (4.4)$$

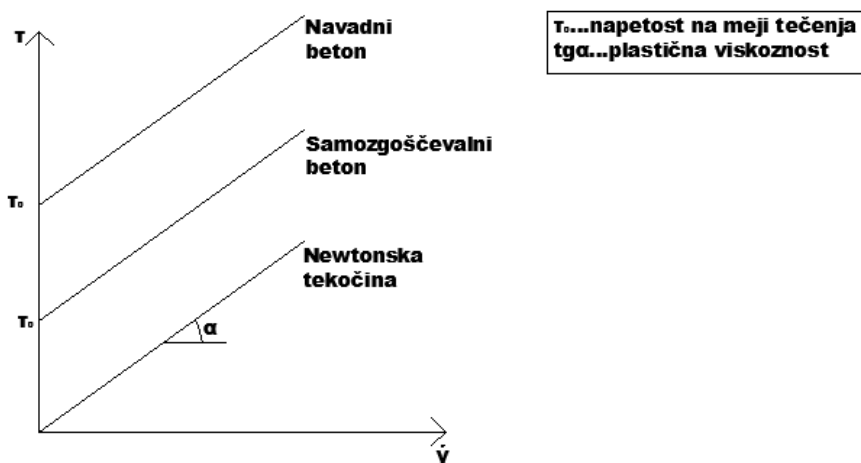
V Binghamovem modelu koeficient viskoznosti η zamenja plastična viskoznost μ , pri kateri se upošteva prirast strižne napetosti nad napetostjo na meji tečenja (Hackley in Ferraris, 2001, Hočevar, 2013):

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (4.5)$$

Obnašanje materiala torej opišeta konstanti τ_0 in μ , katerih ne moremo določiti neposredno ampak se iz njih lahko izpelje enačba s parametri, katere lahko merimo. Izpeljemo lahko enačbe za obnašanje tekočine med vrtečimi se valji ter obnašanje tekočine med gibanjem v cevi. Rezultat preiskave reoloških parametrov svežega betona se tako lahko poda v obliki (Hočevvar et al., 2010):

$$T = G + H \cdot N \quad (4.6)$$

V zgornji enačbi T predstavlja navor (upor proti strigu), N je frekvenca vrtenja oziroma hitrost vrtenja, H je mera za odpornost betona proti naraščujoči hitrosti gibanja (koeficient viskoznosti), G pa predstavlja navor oziroma silo, ki je potrebna za začetek gibanja materiala (navor na meji tečenja). G predstavlja presečišče premice z navpično osjo (Hočevvar et al., 2010). Kalibrirani reometri omogočajo preračun vrednosti G in H na osnovne Binghamove parametre τ in μ , slednji so bili tudi izhodni podatki pri meritvah v laboratorijskem delu.



Slika 7: Shematska primerjava krivulj toka normalnega in samozgoščevalnega betona

Figure 7: Schematic comparison of flow curves for normal and self compacting concrete

Viskoznost je upor tekočine proti tečenju, podaja se v enotah $\text{Pa} \cdot \text{s}$. Napetost na meji tečenja pa je kritična strižna napetost, ko začne tekočina teči, podaja se v enotah Pa .

4.4 Reološke meritve tekočin

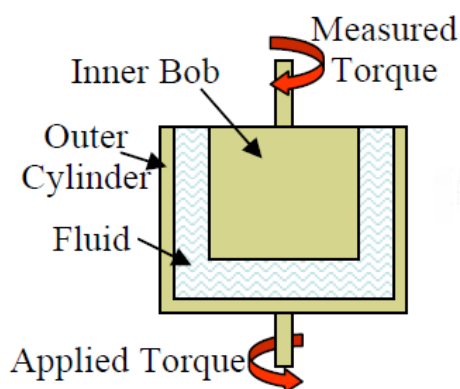
Za merjenje reoloških lastnosti tekočin uporabljamo reometer, ki nam poda več parametrov kot viskometer, ki nam poda le viskoznost in je primeren le za Newtonske tekočine. Obstaja več vrst

reometrov, ki se razlikujejo glede na geometrijo in na vrste toka. Ker proizvajalci opreme izhajajo iz različnih modelov strižnega deformiranja tekočine, rezultati meritev velikokrat niso primerljivi. Poleg tega za tovrstne preiskave ne obstaja standard, zato se za določanje reoloških lastnosti svežih betonskih mešanic še vedno najbolj pogosto uporabljajo standardne preiskave, kot sta metoda z razlezom in metoda s posedom.

Reometre lahko razdelimo na dva osnovna tipa. In sicer med kapilarne, ki delujejo po principu tečenja tekočine skozi ozko cev, ter rotacijske, ki so bolj primerni za meritve na svežih betonskih mešanicah (Hočevnar, 2013). V laboratoriju smo uporabljali rotacijski reometer, zato v nadaljevanju prikazujemo nekatere osnovne lastnosti takšnih reometrov.

Pri rotacijskih reometrih tekočino neprekinjeno strižemo med dvema površinama, pri katerih se ena oziroma obe vrtila. Prednost takšnih reometrov je, da material lahko strižemo neomejeno dolgo časa, ter tako spremljamo prehodna območja ter dosežemo ravnotežno stanje. Rotacijske reometre delimo na (Hočevnar, 2011, Hočevnar, 2013):

- koaksialne valjaste reometre:
 - delujejo po principu vrtenja zunanjšega oziroma notranjšega valja, medtem ko drugi valj miruje,
 - površini obeh valjev sta narebreni kar preprečuje zdrs.
- reometre z vzporednimi ploščami:
 - delujejo po principu vrtenja dveh horizontalnih plošč, ki strižeta betonsko mešanico.
- mešalni reometri z rotorjem:
 - delujejo po principu vrtenja navpične osi, na kateri so lopatice, merimo pa upor proti vrtenju, ki se ustvarja,
 - primerni so za delo na terenu, saj omogočajo izvedbo naprav manjših dimenzij.



Slika 8: Geometrija tipičnega koaksialnega valjastega reometra (Koehler in Fowler, 2004, str. 30)

Figure 8: Typical geometry of coaxial cylinders rheometer (Koehler and Fowler, 2004, p. 30)

V magistrskem delu smo uporabili ConTec Viscometer 5, ki spada med koaksialne valjaste reometre. Reometer sestavlja električni motor, ki poganja zunanji cilindar, notranji cilindar pa miruje. Tipala v zgornjem delu notranjega cilindra merijo upor betonske mešanice. Meritve se posredujejo direktno računalniku, ki jih nato preko programske opreme Freshwin (BML Viscometer) prikaže na uporabniku prijazen način. Rezultat meritev je prikazan grafično kot diagram navora in hitrosti vrtenja, iz katerega nato program izračuna parametra μ in τ . Shranjene podatke nato izvozimo v programsko datoteko Microsoft Excel.

4.5 Vpliv posameznih sestavin na reologijo betona

Rezultate iz preiskav z reometrom najlažje prikažemo s tako imenovanim reografom. To je diagram, v katerem so prikazani posamezni vplivi sestavin betona. Na ordinatni osi je prikazana strižna napetost na meji tečenja, na abscisni osi pa plastična viskoznost.

Po Binghamovem modelu je torej sposobnost tečenja odvisna od velikosti napetosti na meji tečenja. Če med tečenjem betonske mešanice torej strižna napetost pade pod napetost na meji tečenja, se tečenje betona ustavi. In čim nižja je napetost na meji tečenja, tem večja je sposobnost tečenja betona.

Hkrati pa nizka strižna napetost na meji tečenja lahko povzroči segregacijo, kar rešujemo z večanjem plastične viskoznosti. Želimo torej doseči čim manjšo strižno napetost na meji tečenja (τ_0) ter takšno plastično viskoznost (μ), ki zagotavlja stabilnost betona.

To rešujemo z dodajanjem oziroma odzemanjem posameznih sestavin v betonu:

- več vode pomeni manjša strižna napetost na meji tečenja in manjša viskoznost,
- več superplastifikatorja pomeni manjša strižna napetost na meji tečenja,
- več praškastih delcev pomeni večja viskoznost,
- več zaobljenega agregata pomeni manjšo viskoznost.

Te sestavine v splošnem delujejo tako, kot je opisano zgoraj. Vpliv posameznih sestavin ter analizo rezultatov pri eksperimentalnem delu naloge, prikazujemo v magistrski nalogi v poglavju 7.

5 MERITVE Z ULTRAZVOKOM IN MERITVE TOPLOTNEGA TOKA

5.1 Hitrost prehoda ultrazvoka

Metoda merjenja časa prehoda ultrazvoka je neporušna metoda, ki se uporablja za posredno ocenjevanje mehanskih lastnosti betonskih elementov, predvsem tlačne trdnosti in modula elastičnosti. Hkrati pa spreminjanje hitrosti širjenja longitudinalnih valov skozi material omogoča ugotavljanje propadanja materialov (Uranjek, 2011).

Pri določanju hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi preizkušane po navadi uporabljamo ultrazvočni aparat s sprejemnikom in oddajnikom, ki ju postavimo na nasprotni si ploskvi (med seboj vzporedni stranici preizkušanca). Z napravo merimo čas potovanja signala od oddajne do sprejemne sonde. Na osnovi časa prehoda ultrazvočnega valovanja in razdalje med sprejemnikom in oddajnikom (debelina preizkušanca) izračunamo hitrost širjenja ultrazvočnih valov po naslednji enačbi:

$$v_P = \frac{L_P}{t_P} \quad (5.1)$$

kjer je v_P (km/s) hitrost širjenja ultrazvoka, t_P (μ s) čas potovanja signala in L_P razdalja med sprejemnikom in oddajnikom (mm).

Hitrost ultrazvočnih valov v materialu je odvisna od gostote materiala ter vrednosti elastičnega modula E in Poissonovega koeficienta materiala μ . Med temi karakteristikami velja naslednja zveza:

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (5.2)$$

Manjša kot je gostota materiala več časa je potrebnega za prehod ultrazvoka, posledično je manjša tudi hitrost ultrazvočnih valov.

Hitrost potovanja ultrazvoka skozi betonski element znane debeline je pogosto mera za kvaliteto vgrajenega betona, s pomočjo ultrazvoka pa lahko kontroliramo tudi homogenost betona v elementu. Če se hitrost potovanja vzdolžnih ultrazvočnih valov med posameznimi merilnimi mesti ne razlikuje bistveno, potem obstaja velika verjetnost, da je beton v elementu homogen.

Na hitrost ultrazvoka vpliva tudi vlaga v materialu in njena porazdelitev. Pri materialu zasičenem z vlago je hitrost ultrazvoka hitrejša.

Rezultati merjenja hitrosti prehoda ultrazvoka so prikazani v poglavju 7.

5.2 Meritve toplotnega toka

Drugi zakon termodinamike pravi, da toplota teče sama od sebe, od mesta z višjo temperaturo k mestu z nižjo temperaturo. V splošnem velja, da je temperatura v snovi na različnih mestih različna hkrati pa se spreminja s časom. Porazdelitev temperature opredelimo tako, da povemo njeno vrednost v vsaki točki snovi in v vsakem trenutku.

Toplotni tok (P) je množina toplote, ki se v časovni enoti prenese skozi prečni presek, zakon za prevajanje toplote pravi:

$$P = -\lambda \cdot S \frac{dT}{dx} \quad (5.3)$$

Pri tem je $\frac{dT}{dx}$ gradient temperature, λ pa je koeficient toplotne prevodnosti z osnovno enoto $W/(m \cdot K)$. V splošnem je $\lambda = \lambda(T)$, vendar če temperaturne razlike v snovi niso prevelike lahko računamo kot, da je $\lambda = \text{konst.}$

Gostota toplotnega toka (W/m^2) pa nam pove kolikšen toplotni tok teče skozi enoto površine v eni časovni enoti. Gostota toplotnega toka skozi steno je sorazmerna z gradientom temperature in toplotno prevodnostjo:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5.4)$$

V primeru, ko se temperatura obravnavanega dela stene ne spreminja več govorimo o stacionarnem stanju. Prihajajoči toplotni tok je torej enak odhajajočemu. V začetnem stanju sicer razmere v steni niso stacionarne, s časom pa se notranja stena segreje na notranjo temperaturo, zunanja pa se ohladi na zunanjo temperaturo. Ko se v steni vzpostavi stacionarno stanje, skozi teče konstanten toplotni tok, temperatura pa linearno pada od toplejše proti hladnejši strani. Toplotni tok za stacionarno stanje zapišemo kot:

$$P = \frac{\lambda \cdot S}{d} \cdot (T_{n1} - T_{z1}) \quad (5.5)$$

Pri tem je T_{n1} temperatura na notranji površini stene in T_{z1} temperatura na zunanji površini stene.

Prehod toplote skozi steno merimo s termočlenom, ki v daljšem časovnem obdobju, v enakih časovnih intervalih, izmeri toplotni tok, ki prehaja skozi steno ter temperaturi zraka v prostoru T_n in okolici T_z . Princip delovanja temelji na temperaturnemu gradientu. V vodniku (žica) se, kadar je podvržen temperaturnemu gradientu, pojavi električni tok. Temperaturna razlika torej povzroči razliko električnih potencialov, ki jo izmerimo.

Termočlen sestavlja tanka ploščica, za katero je znana debelina in toplotna prevodnost materiala. Ploščico se s toplotno prevodno pasto zalepi na steno. Termočlen generira majhne izhodne napetosti, premosorazmerne z gostoto toplotnega toka, ki se preko pretvornika povezanega z računalnikom, zapisujejo kot odčitki toplotnega toka..

Rezultati merjenja toplotnega toka so prikazani v poglavju 7.

6 EKSPERIMENTALNI DEL

V eksperimentalnem delu magistrskega dela smo se ukvarjali s preizkušanjem vpliva različnih dodatkov na lahkoagregatni beton, na njegove reološke lastnosti, obdelavnost, lastno težo in tlačno trdnost. Eksperimentalni del naloge smo izvedli v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju UL FGG (KPL). Pripravili smo več različnih mešanic betona z različnimi dodatki. Priprava betonov je potekala v poletnem času, ko so bile temperature zraka v laboratoriju visoke. Mešali smo v malem, 5 litrskem mešalcu (betona je bilo le za en kalup dimenzij 15^3 cm^3) ter v večjem, 50 litrskem mešalcu (količine zmešanega betona so bile 30 litrov, 50 litrov ali 60 litrov).

6.1 Sejalna analiza

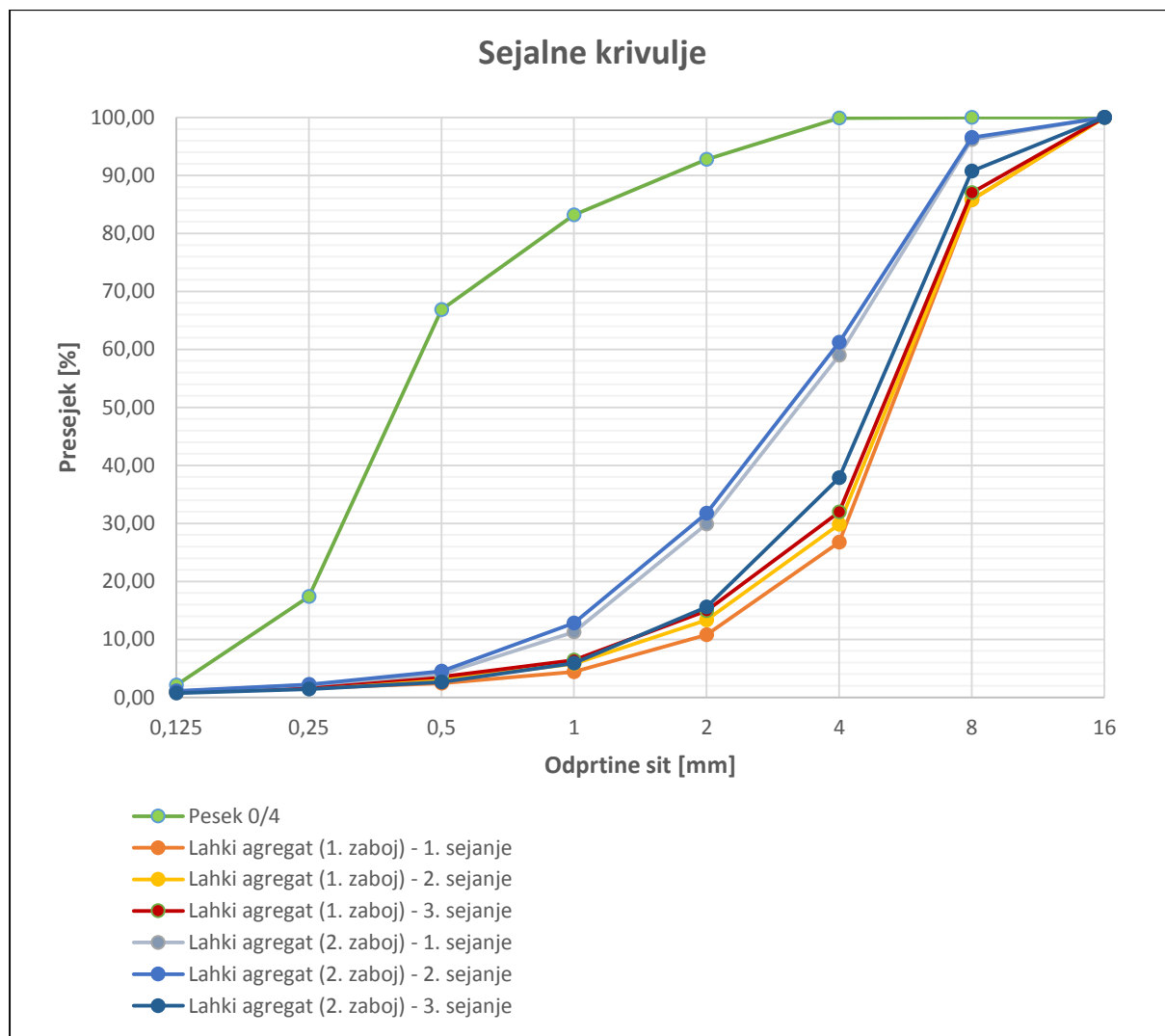
Kot lahki agregat smo v betonih uporabili agregat iz ekspanzirane gline. Ker se lahki agregat iz ekspandirane gline proizvaja v rotacijski peči in je lahko v različnih oblikah in velikostih, težimo k temu, da je njegova oblika čimbolj pravilna, zaradi lažjega sejanja. Hkrati pa manjši delci pomenijo povečanje gostote agregata (ACI, 2003). Slednje se je izkazalo tudi v našem primeru. Za pripravo betonov smo uporabili lahki agregat iz dveh zabojev (različni šarži). V prvem zaboju je bil agregat že na oko bolj grob kot v drugem (slika 9), različne frakcije pa so lepo vidne tudi na sliki 10, kjer so prikazane sejalne krivulje lahkega agregata, ki smo ga odvzeli iz različnih globin dveh zabojev. Uporaba lahkega agregata različne zrnastvne sestave je vplivala tudi na gostoto betona. Le ta je bila večja pri betonu, kjer so pri lahkem agregatu prevladovale bolj fine frakcije agregata.



Slika 9: Lahki agregat iz prvega zaboja (levo) in lahki agregat iz drugega zaboja (desno)

Figure 9: Lightweight aggregate from first box (left) and lightweight aggregate from second box (right)

V betonih smo uporabili tudi normalno težki droben agregat (pesek) frakcije 0/4. Lahki agregat je bil frakcije 0/8. Vzorce obeh agregatov smo posušili v sušilnici pri temperaturi 60 °C, sušenje je potekalo 2 dni, nato smo vsak agregat presejali.



Slika 10: Sejalne krivulje

Figure 10: Aggregate grading

Sejalne krivulje lahkega agregata iz prvega zaboja so približno enake, kar pomeni, da je bil v prvem zaboju lahek agregat homogen po celotni višini. Pri drugem zaboju pa smo pri vzorcih, ki sta bila odvzeta iz zgornjega in srednjega dela zaboja dobili drugačni sejalni krivulji, za kateri je značilen visok delež frakcij 0,5/1; 1/2 in 2/4 ter majhen delež frakcije 4/8, v primerjavi s sejalnimi krivuljami lahkega agregata iz prvega zaboja. Odstopa le tretja sejalna krivulja pri drugem zaboju, le ta se približuje sejalnim krivuljam lahkega agregata iz prvega zaboja.

Pesek je bil skladiščen le v enem zaboju. Iz slike 10 vidimo, da ima večji delež finih frakcij kot lahki agregat (zeleno sejalna krivulja), kar je seveda v skladu s pričakovanji. Zanimivo pa je, da je kar 70 % zrn peska manjšega od 0,5 mm, čeprav gre za frakcijo 0/4.

Preglednica 5: Presejki vseh vzorcev agregatov v %

Table 5: Passing through sieves for all specimens of used aggregates in %

Sito [mm]	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125
Pesek 0/4	100,0	100,0	99,9	92,8	83,2	66,9	17,4	2,1
Lahki agregat (1. zaboju) - 1. sejanje	100,0	85,8	26,8	10,8	4,4	2,4	1,6	0,9
Lahki agregat (1. zaboju) - 2. sejanje	100,0	85,8	29,8	13,3	5,8	3,0	1,8	1,0
Lahki agregat (1. zaboju) - 3. sejanje	100,0	87,0	32,0	14,9	6,4	3,5	2,0	1,0
Lahki agregat (2. zaboju) - 1. sejanje	100,0	96,2	59,0	29,9	11,3	4,0	2,2	1,0
Lahki agregat (2. zaboju) - 2. sejanje	100,0	96,6	61,2	31,7	12,8	4,5	2,2	1,1
Lahki agregat (2. zaboju) - 3. sejanje	100,0	90,8	37,8	15,6	5,9	2,6	1,4	0,7

6.2 Vpijanjanje vode in vlažnost

6.2.1 Vpijanjanje vode pri lahkem agregatu

Zaradi por v lahkem agregatu ta vpije določen del vode, ki je relativno velik v primerjavi z naravnim agregatom. Vpijanjanje vode je materialna karakteristika.

Uporabljeni lahki agregat smo dobili v zračno suhem stanju, kar pomeni, da je v notranjosti zrn že vseboval določen delež vode. Odvzeti vzorec materiala smo stehali in ga za 24 ur namočili v vodo, obrisali vodo s površine zrn ter nato vzorec še enkrat stehali. Nato smo določili količino vode, ki jo lahki agregat vpije v 24 urah, glede na izhodiščno, zračno suho stanje. Vzorec lahkega agregata v merilnem valju je bilo potrebno obtežiti, da le ta ni splaval na površje (slika 11).



Slika 11: Vzorec lahkega agregata za določitev vpijanja vode

Figure 11: Sample of lightweight aggregate for water absorption

Rezultati vpijanja vode so bili sledeči:

Preglednica 6: Vpijanje vode zračno suhega lahkega agregata

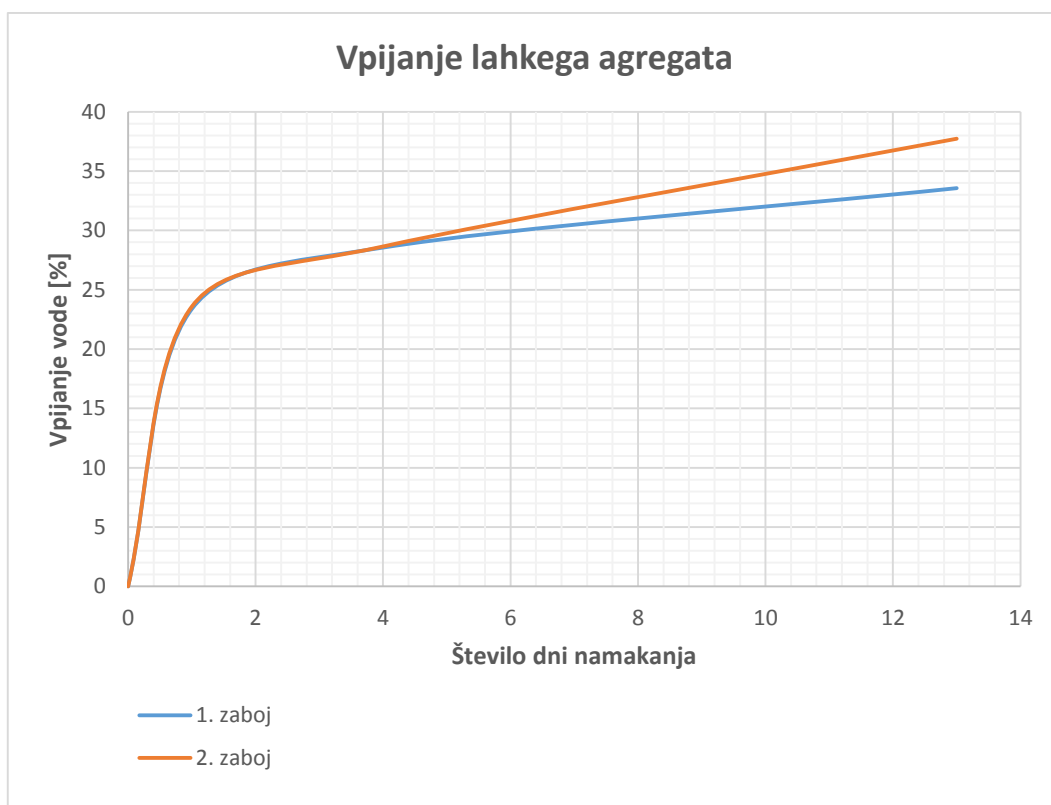
Table 6: Water absorption of air dry lightweight aggregate

Masa, zračno suh [g]	Masa, vlažen po 24 urah [g]	Vpijanje [%]
201,55	213,47	5,91
186,89	197,41	5,63

V nadaljevanju smo upoštevali vrednost vpijanja vode 6 %. Pred vsako pripravo betonske mešanice smo en dan prej stehali potrebno količino lahkega agregata ter mu dodali 6 % vode (glede na njegovo maso). Agregat smo nato dobro premešali ter posodo z agregatom pokrili s plastično folijo, da smo preprečili sušenje agregata. Agregat z dodano vodo je v posodi odleževal 24 ur. Na ta način smo želeli doseči čim bolj enakomerno porazdelitev vode med zrni lahkega agregata.

Absorpcijo vode smo preverili tudi za popolnoma suh lahki agregat, in sicer za oba zaboja. Po končani sejalni analizi smo vzorce lahkega agregata sušili v mikrovalovni pečici do stalne mase.. Ker je odstranitev vode s površine agregatnih zrn v primeru drobnih zrn zelo zahtevna naloga, smo pri teh preiskavah uporabili le zrna, ki so ostala na situ 4 mm, to je frakcijo lahkega agregata 4/8. Po sušenju v mikrovalovni pečici smo vzorce stehtali (m_0), nato pa smo jih namočili v vodi za 1, 4 in 13 dni. Po predpisanem odležavanju v vodi smo agregatna zrna obrisali, da smo z njih odstranili površinsko vodo. Nato smo vzorec agregata ponovno stehtali (m_{PS}). Vpijanje vode smo določili kot:

$$U = \frac{(m_{PS} - m_S)}{m_S} \cdot 100 [\%] \quad (6.1)$$



Slika 12: Vpijanje vode popolnoma suhega lahkega agregata

Figure 12: Absorption of lightweight aggregate in dry state

Vpijanje vode je za oba zaboja praktično enako. V obeh zabojih je bil namreč uporabljen isti material, ravno tako smo preverjali iste frakcije (ostanek na situ 4 mm). Razlika se pojavi le po 13 dneh, 1. zaboaj vpije 33,6 % vode, drugi pa 37,7 %. Vpijanje vode po 1 dnevu je za 1. zaboaj 23,4 %, za 2. zaboaj pa 23,6

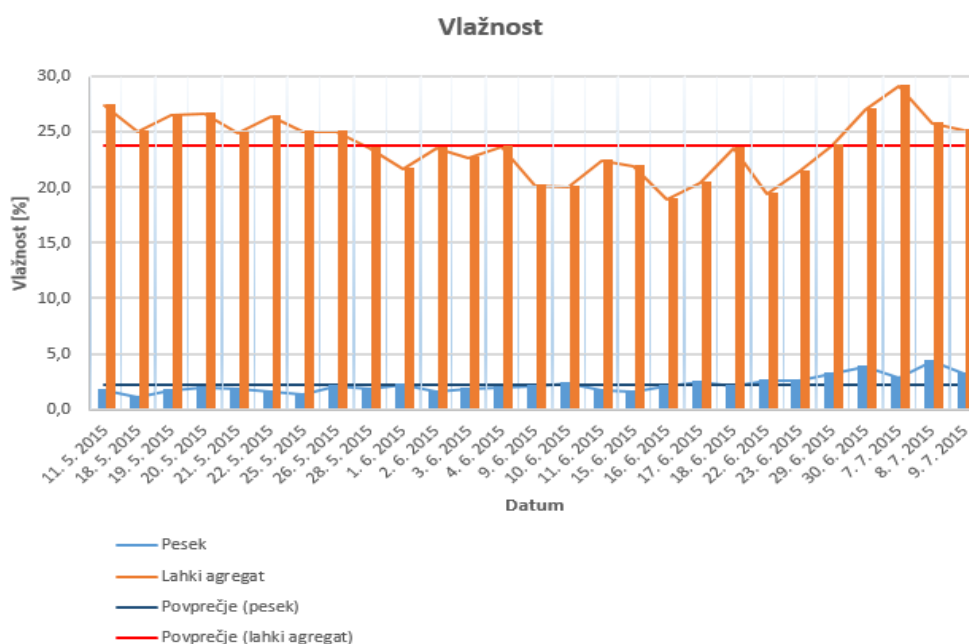
%, v povprečju 23,5 %. Slednji rezultat je primerljiv z rezultati, ki jih podajamo v naslednjem poglavju, kjer smo s 6 % mase namočili zračno suh lahki agregat ter ga nato posušili do popolnoma suhega stanja.

6.2.2 Vlažnost lahkega agregata in peska

Pred vsako pripravo betonske mešanice smo preverili vlažnost lahkega agregata in peska in s tem preverili vhodne sestavine. Glede na dejansko vlažnost lahkega agregata in naravnega peska smo nato prilagodili količino vode, ki smo jo dodali v betonsko mešanico. Na ta način smo zagotovili enako sestavo betona pri vseh ponovitvah priprave betonske mešanice posamezne sestave.

Vlažnost lahkega agregata, ki se je nahajal v zaboju, je znašala 19,8 %. Kot smo že omenili, smo pred vsako pripravo betona, lahkemu agregatu 24 ur pred zmešanjem betona dodali 6 % vode. Po 24 urah smo iz agregata odvzeli vzorec, ga stehali in nato posušili v mikrovalovni pečici, da smo dobili popolnoma suh material ter ga ponovno stehali. Povprečna vlažnost lahkega agregata pred pripravo betona je znašala 23,8 %, posamezne meritve pa prikazujemo na sliki 13.

Podobno kot pri lahkem agregatu smo vlažnost preverjali tudi za pesek. Povprečna vlažnost peska je znašala 2,0 %, proti koncu preiskav pa 2,3 %. Zadnjih pet vzorcev peska je bilo namreč vzeti na dnu zaboja, kjer je bila vlažnost peska nekoliko višja. Posamezne rezultate meritev vlažnosti peska prikazujemo na sliki 13.



Slika 13: Vlažnost lahkega agregata in peska pred pripravo betona

Figure 13: Moisture of lightweight aggregate and sand before concrete preparation

6.3 Mešanje betona

Poleg osnovnih sestavin, tj. cement, pesek, voda in lahki agregat, smo uporabili še različne kemijske in mineralne dodatke ter različne deleže teh dodatkov. Namen pristopa je bil preveriti vpliv vrste in količine različnih dodatkov na reološke in trdnostne lastnosti betona.

Protokol mešanja smo uporabili enak, kot je naveden v poglavju 3.3. In sicer smo najprej na suho zmešali cement in naravni pesek, v primeru uporabe apnenčeve moke kot mineralnega dodatka, pa smo v tej fazi dodali še apnenčevo moko. Sledilo je doziranje vode in kemijskih dodatkov. Na koncu smo dodali še lahki agregat.

Sestavine, katerih vpliv smo spremljali v okviru preiskav so naslednje:

- Cement – uporabili smo dve vrsti cementa CEM I. Kljub enaki vrsti cementa v skladu s standardom SIST EN 197-1, nikoli nimamo identičnih cementov, če uporabimo cementa dveh različnih proizvajalcev. Zanimalo nas je, kateri cement je bolj kompatibilen z uporabljenim superplastifikatorjem in aerantom. Različen cement namreč lahko reagira različno glede na posamezni dodatek.
- Aerant – med mešanjem smo ga dodajali potem, ko smo v mešanico dodali superplastifikator. Lahki agregat je sicer lahko za nekajkrat lažji od normalno težkega agregata, vendar pa je lahko za specialne namene uporabe lastna teža še vedno prevelika, kar pa lahko rešimo z dodajanjem aeranta. Ta poleg povečanja zmrzlinke odpornosti zmanjša tudi lastno težo, saj v betonu ustvari majhne zračne mehurčke. Delež aeranta, ki smo ga dodali mešanici, je izražen glede na maso cementa. Ta delež smo spreminjali, da smo videli, kako se spreminjajo lastnosti betonske mešanice v odvisnosti od deleža aeranta.
- Superplastifikator – preverjali smo vpliv različnih deležev (dozacije) SP v posameznih betonskih mešanicah.
- Gostilec oziroma stabilizator – uporabili smo proizvod v obliki prahu ter ga med mešanjem dodali cementu. Gostilec deluje kot dodatek za zadrževanje vode, pri tem se zmanjša izločanje vode iz betona ter poveča viskoznost cementne paste. Na ta način se lahko prepreči segregacija betona. Uporablja se tudi za podvodno betoniranje, saj se z večjo viskoznostjo zmanjša nevarnost izpiranja. Pri preverjanju vpliva gostilca smo zmanjšali količino cementa za 5 % ter pri tem povečali maso vode za 3 krat glede na maso odvzetega cementa (za isti volumen zmanjšanja cementa, smo povečali volumen vode, ker je gostota cementnih delcev blizu 3 g/cm^3 , vode pa 1 g/cm^3 , to pomeni povečanje mase vode za 3 krat glede na maso odvzetega cementa) ter glede na novo maso cementa dodali delež gostilca, nato smo to maso spreminjali, da smo videli obnašanje betonske mešanice v odvisnosti od količine gostilca.

- Apnenčeva moka – je praškasti material, ki se pridobiva z mletjem apnenca ali pa z odpraševanjem drobljenega apnenčevega agregata. Njena gostota je manjša od gostote cementa, zato smo jo uporabili za zmanjševanje lastne teže in istočasno za zmanjšanje cene betona, saj je cement najdražja sestavina betonske mešanice. Moko smo uporabili tako, da smo delež cementa zmanjšali ter dodali enako prostornino zrn moke. Tudi v tem primeru smo spreminjali delež moke v betonski mešanici, da smo spremljali obnašanje betonske mešanice v odvisnosti od količine apnenčeve moke.

Poleg zgoraj naštetih sestavin je na same lastnosti betona vplival tudi uporabljen mešalec. Betone smo mešali v velikem 50 litrskem ali v malem 5 litrskem laboratorijskem mešalcu. Z isto recepturo betona smo namreč dobili različne lastnosti betonske mešanice v svežem stanju, glede na to ali smo mešali v velikem ali malem mešalcu.

Analizo in rezultate posameznih mešanic prikazujemo v poglavju 7.

6.4 Preiskave na svežih in strjenih betonih

Po končanem mešanju betona smo opravili preiskave na sveži betonski mešanici, in sicer takoj na začetku in čez pol ure, v določenih primerih pa še čez eno uro. Ko se je beton strdil, smo opravili še preiskave na strjenih betonskih vzorcih. Preiskave, ki smo jih uporabili v magistrskem delu, so opisane v naslednjem poglavju.

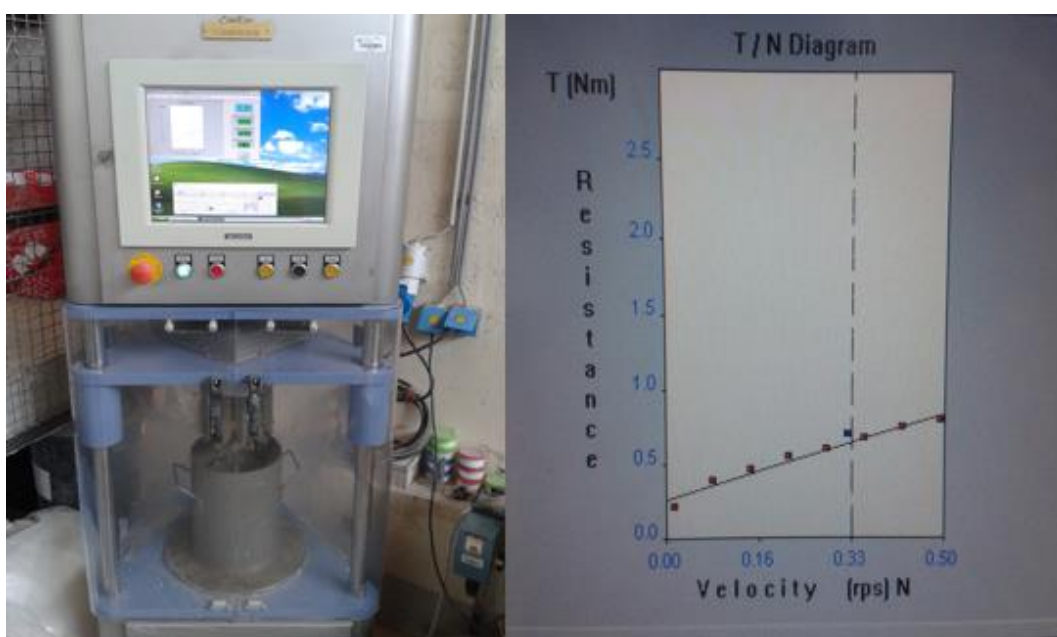
6.4.1 Preiskave betona v svežem stanju

Pri svežem betonu je pomembna njegova obdelovalnost. Zlasti pri lahkoagregatnih samozgoščevalnih betonih je pomembna njegova sposobnost tečenja in prehajanja med ovirami. Takšen beton mora v celoti zapolniti kalup, oblitati armaturo in instalacijske vode, ne da bi segregiral. Z uporabo lahkega agregata je to včasih težko zagotoviti, še posebej pri raznih napeljavah in instalacijskih vodih, ki se pojavijo v realnem stanju. V sklopu magistrskega dela smo opravili naslednje preizkuse na svežem betonu:

- Meritve reoloških lastnosti z reometrom – reometer je naprava, ki meri strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala. Uporabili smo koaksialni valjasti reometer ConTec Viscometer 5. Ta deluje po principu vrtenja zunanjega valja, medtem ko notranji valj miruje. Material se spravi v gibanje pri najvišji hitrosti, dokler se ne ustvari neko ravnotežno stanje. Nato hitrost vrtenja po korakih pada (Hočevnar, 2014). Površini obeh valjev sta narebreni, da

preprečujeta zdrs materiala. Notranji valj meri navor pri različnih hitrostih vrtenja, nato se določi strižna napetost na meji tečenja τ_0 (Pa) ter plastična viskoznost μ (Pa · s) svežega betona. Reometer predpostavlja, da je beton Binghamova tekočina in zato upošteva Binghamov model. Podrobneje o tem pišemo v poglavju 4.

Program sam izračuna napetost na meji tečenja in viskoznost, rezultat pa je prikazan tabelarično. Rezultat se prikaže tudi kot diagram navora v odvisnosti od hitrosti vrtenja. Ker je upoštevan Binghamov model, je rezultat premica. Naklon te premice predstavlja viskoznost.



Slika 14: Uporabljen reometer

Figure 14: Used rheometer

Naš cilj je bil doseči dovolj visoko viskoznost betonske mešanice, v kateri ima cementna malta dovolj visoko »lepljivost«, da učinkovito poveže zrna lahkega agregata in tako prepreči segregacijo. Hkrati pa mešanica ne sme biti preveč viskozna, ker potem počasi teče. Istočasno smo želeli bistveno znižati strižno napetost na meji tečenja. Vsi ti parametri so odvisni od sestavin in količine sestavin v mešanici, kar prikazujemo v poglavju 7.

- Metoda razleza s posedom (slump flow) – enostavna preizkusna metoda, pri kateri se ugotavlja sposobnost tečenja samozgoščevalnega betona. Preiskava se izvaja v skladu s standardom SIST EN 12350-8. Beton zlijemo v standardni prisekan stožec, ki ga nato dvignemo in opazujemo, kako daleč se bo beton razlezel. Rezultat je povprečje med največjim premerom in premerom pravokotno na največjega. Premer se odčita na 0,5 cm natančno. Večji kot je premer, večja je sposobnost tečenja betona oziroma njegova sposobnost zapolnjevanja.

Pri preizkusu se lahko meri tudi čas, ki je potreben da se beton razleze do premera 500 mm. Večji, kot je ta čas, večja je viskoznost betona.

- Metoda mini razleza s posedom (mini slump flow) – podobna metoda kot metoda razleza s posedom, le da smo uporabili manjši prisekan stožec.
- L-zaboj (L-shape box test) – metoda, ki se izvaja z zabojemi v obliki črke L. Preiskava se izvaja v skladu s standardom SIST EN 12350-10. S preiskavo ovrednotimo sposobnost zapolnjevanja, odpornosti na segregacijo, predvsem pa sposobnost prehajanja sveže mešanice med ovirami in sposobnost mešanice, da se samonivelira. Beton je stabilen, če je droben in grob agregat enakomerno porazdeljen po vidni površini (Skarendahl in Petersson, 2000).

Metode nismo uporabili pri vseh betonih, ampak zgolj pri mešanicah, ki smo jih pripravili v velikem mešalcu, in to le v začetni fazi preizkušanja betona, dokler nismo določili sestave samozgoščevalnega betona. Preiskavo smo opravili takoj po mešanju, po pol ure, ter čez eno uro.



Slika 15: L-zaboj preizkus

Figure 15: L-box test

- J-obroč (J-ring) – enostavna metoda, ki se izvaja s prisekanim stožcem, tako kot metoda razleza s posedom. Vendar se pri tem preizkusu uporabi še obroč s posameznimi armaturnimi palicami. Preiskava se izvaja v skladu s standardom SIST EN 12350-12. Pri preizkusu se preverjajo sposobnost tečenja in odpornost proti blokiranju. V primeru, da se pojavi plato za palicami,

potem beton segregira. Lahko se pojavi tudi blokiranje grobega agregata med palicami. Če se zrna agregata razporedijo enakomerno po površini, je mešanica stabilna (Bartos et al., 2002).

Metode nismo uporabili pri vseh betonih, ampak zgolj pri mešanicah, ki smo jih pripravili v velikem mešalcu in to le v začetni fazi preizkušanja betona, dokler nismo določili sestave samozgoščevalnega betona. Preiskavo smo opravili takoj po mešanju, po pol ure, ter čez eno uro.



Slika 16: Razlez s posedom in J-obroč

Figure 16: Slump flow test and J-ring test

- Določanje prostorninske mase svežega betona je potrebno izvesti v skladu s standardom SIST EN 12350-6. Prostorninska masa svežega betona je zanesljiv pokazatelj mnogih lastnosti strjenega betona. Betoni primerljive sestave vendar z večjo prostorninsko maso so bolj zgoščeni in imajo po strditvi tudi boljše mehanske lastnosti, vodonepropustnost, zmrzlinško odpornost ipd. Določa se takoj po končani izdelavi vzorca, tako, da se kalup z vzorcem z zunanje strani dobro očisti in stehta, poznati pa moramo maso praznega kalupa. Maso nato delimo s prostornino kalupa (Žarnić et al., 2009). Pri preiskavah smo, poleg standardnih kalupov za izdelavo kock z robom 15 cm, uporabljali kalup prostornine 1 liter.

Rezultate preiskav na svežih betonskih mešanicah prikazujemo v poglavju 7.

6.4.2 Preiskave betona v strjenem stanju

Preverjali smo prostorninsko maso ter tlačno trdnost strjenih vzorcev.

Strjene betonske vzorce smo izmerili s kljunastim merilom ter jih tehtali. Maso vzorcev smo nato delili z njihovo prostornino ter tako dobili prostorninsko maso. Uporabljeni kalupi za izdelavo vzorcev so bili dimenzij 150 mm x 150 mm x 150 mm oziroma 100 mm x 100 mm x 100 mm.



Slika 17: Določanje prostorninske mase svežega in strjenega betona

Figure 17: Density determination of fresh and hardened concrete

Tlačno trdnost betona določamo na standardnih preizkušancih v obliki kock ali valjev. Pred preizkusom izmerimo dimenzije preizkušanca in njegovo maso. Nato s pomočjo preše določimo največjo silo, ki jo je preizkušaneč sposoben prevzeti (porušno silo). Na osnovi dimenzij in porušne sile izračunamo tlačno trdnost betona. Glede na to, da standardi predpisujejo določanje razreda tlačne trdnosti betona, je treba poznati vplive velikosti preizkušanca na tlačno trdnost. Razred tlačne trdnosti betona določamo pri starosti 28 dni (Žarnić et al., 2009).

Za preizkušanje tlačne trdnosti betona smo uporabili preizkušance iz kalupov dimenzij 150 mm x 150 mm x 150 mm oziroma 100 mm x 100 mm x 100 mm. Osredotočili smo se predvsem na enodnevno tlačno trdnost, saj smo v primeru mešanja v malem mešalcu imeli na voljo dovolj betona le za en preizkušaneč, ki smo ga strli po enem dnevu.



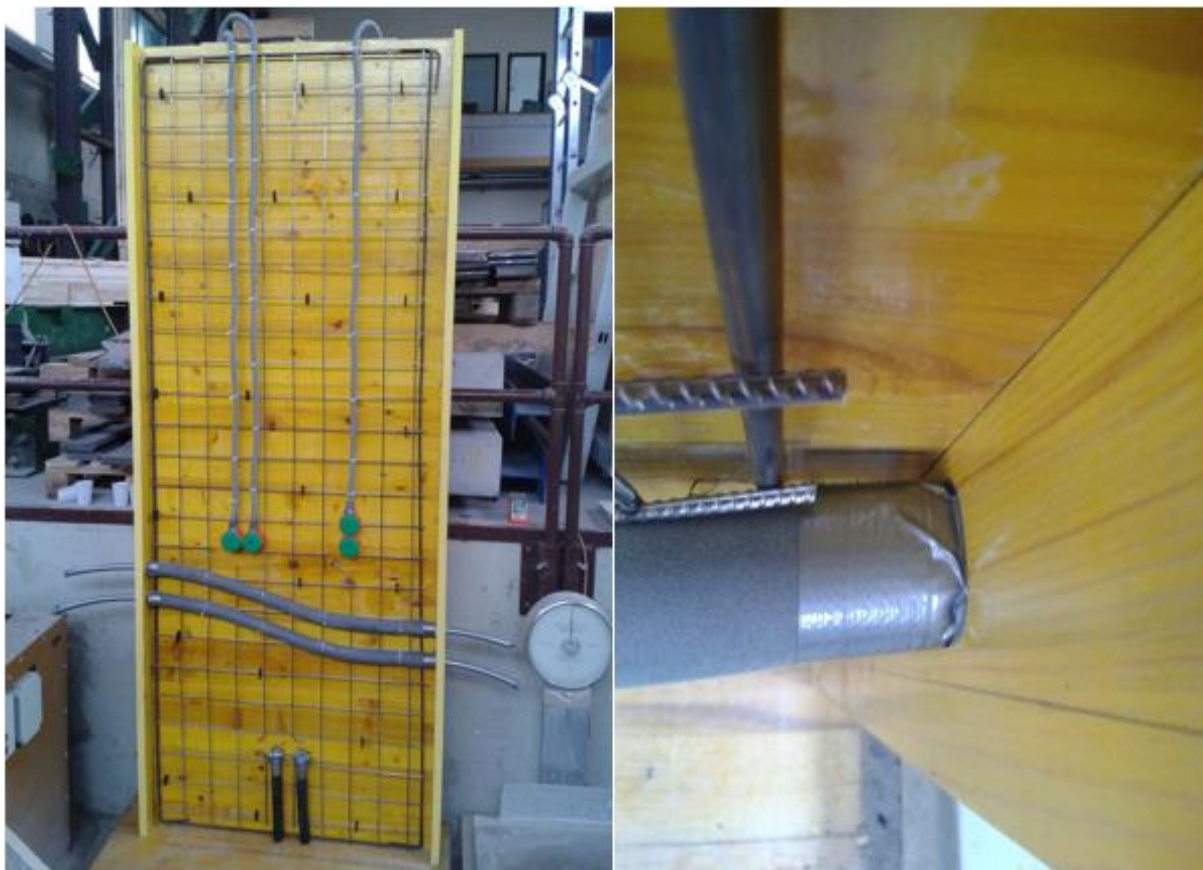
Slika 18: Preša za določanje tlačne trdnosti betona (levo) in zdrobljen preizkušaneec po tlačni obremenitvi (desno)

Figure 18: Compression testing machine (left) and crushed sample after compression test (right)

Rezultate preiskav glede prostorninske mase ter tlačne trdnosti vzorcev betona v strjenem stanju prikazujemo v poglavju 7.

6.5 Stena

Poleg standardnih preizkušancev (kock), smo zabetonirali še steno, dimenzij 100 cm x 230 cm x 6 cm. V steni se je poleg armature nahajala še napeljava za vodo in elektriko (ovire). Namen betoniranja takšne stene je bil, da preizkusimo sposobnost tečenja in zapolnjevanja lahkoagregatnega betona, ki smo ga izbrali na podlagi obširnih predhodnih preiskav. Na strjeni steni smo opravili še preiskavo homogenosti betona, s pomočjo ultrazvoka, ter določili koeficient toplotne prevodnosti, s pomočjo meritev toplotnega toka. Rezultati teh preiskav so prikazani v poglavju 7.



Slika 19: Opaž stene (levo) in detajl cevi (desno)

Figure 19: Formwork of wall (left) and detail of pipe (right)

Kljub številnim oviram, ter zelo majhnim dimenzijam odprtin, ki so omogočale pretok betona iz zgornjega dela opažnega elementa v spodnji, je izbran beton dobro zapolnil opaž. Na površini smo opazili le lepotne nepravilnosti v obliki manjših in večjih zračnih mehurčkov. Ti so verjetno posledica odzračevanja betona, saj je bila najenostavnejša pot za odzračevanje proti steni opaža in nato navzgor vzdolž opaža. Pri vgrajevanju betona nismo uporabili nobenih vibratorjev. Za doseglo boljše kvalitete površine stene smo na sprednji strani le rahlo potolkli z gumijastim kladivom. Stena je bila lepo ravna, le proti sredini se kaže rahlo izbočenje zaradi premajhne togosti uporabljenega lesenega opaža.



Slika 20: Sprednja stran stene (levo) in zadnja stran stene (desno)

Figure 20: Frontside of wall (left) and backside of wall (right)

7 REZULTATI MERITEV IN ANALIZ

Osnovno recepturo lahkoagregatnega betona smo vzeli iz predhodnih analiz, opravljenih na Katedri za preskušanje materialov in konstrukcij UL FGG (KPMK).), pri čemer smo za izdelavo betona uporabili nove osnovne materiale. V mešanicah smo nato spreminjali predvsem količine glavnih sestavin ter uporabljenih dodatkov. Učinek spreminjanja količine ene sestavine je ovrednoten s pomočjo reografa. V sestavi mešanic smo upoštevali izmerjeno vlažnost lahkega agregata in naravnega peska ter glede na ta podatek izračunali količino dodane vode. Podrobnosti o sestavi mešanic oziroma posameznih recepturah betonov, ne prikazujemo, ker je magistrska naloga potekala v okviru razvojno raziskovalnega projekta za eno od slovenskih podjetij predizdelanih proizvodov iz betona. Prikazujemo pa vpliv posameznih sestavin na mešanico betona. V poglavju so prikazani tudi rezultati meritev z ultrazvokom in meritev toplotnega toka na armiranobetonski steni, ki je bila končni rezultat moje magistrske naloge.

Betonske mešanice smo razdelili v dve osnovni skupini. In sicer preliminarne mešanice, s pomočjo katerih smo preverili, kakšna odstopanja dobimo, če uporabimo recepture, ki so bile rezultat predhodnih preiskav na KPMK. Na podlagi rezultatov preiskav preliminarnih mešanic smo izbrali vrste sestavin in njihove izhodiščne deleže za glavno skupino mešanic. Cilj študije glavne skupine mešanic je bil, da se čim bolj približamo zahtevanim lastnostim lahkoagregatnim betonom in sicer sposobnosti tečenja in zapolnjevanja ob vzdrževani stabilnosti, gostoti lahkoagregatnega betona in ciljni tlačni trdnosti po 16 urah ali enem dnevu. Te lastnosti pa so odvisne od sestave mešanice, načina doziranja materialov v mešalec ter od vrste mešalca in količina zamešanega betona v mešalc. Osnovni skupini mešanic smo razdelili na podskupine. In sicer na podskupino mešanic pri katerih smo uporabili mali mešalec, in podskupino mešanic pri katerih smo uporabili veliki mešalec. V posameznih poglavjih v nadaljevanju so prikazani rezultati preiskav na svežih betonskih mešanicah ter rezultati preiskav na strjenih betonskih vzorcih.

Pri vseh sestavah betona smo uporabljali isti lahki agregat in pesek. Pri preliminarnih mešanicah smo uporabili lahek agregat iz prvega zaboja, pri glavni skupini pa iz drugega zaboja. Pri preliminarnih mešanicah smo naredili le preiskave razleza s posedom ter preverjali gostoto svežega betona. V nekaterih primerih pa smo opravili še preiskave z L-zabojem in J-obročem ter preiskave z reometrom, v času takoj po mešanju, po 30 minutah ter po 60 minutah. S temi preiskavami smo potrdili rezultate glede obdelovalnosti betona, ki so nam služili kot izhodišče za izbiro mešanic za nadaljnje delo. Pri glavni skupini mešanic pa smo opravili preiskave z reometrom ter preiskave razleza s posedom v času takoj po mešanju in po 30 minutah.

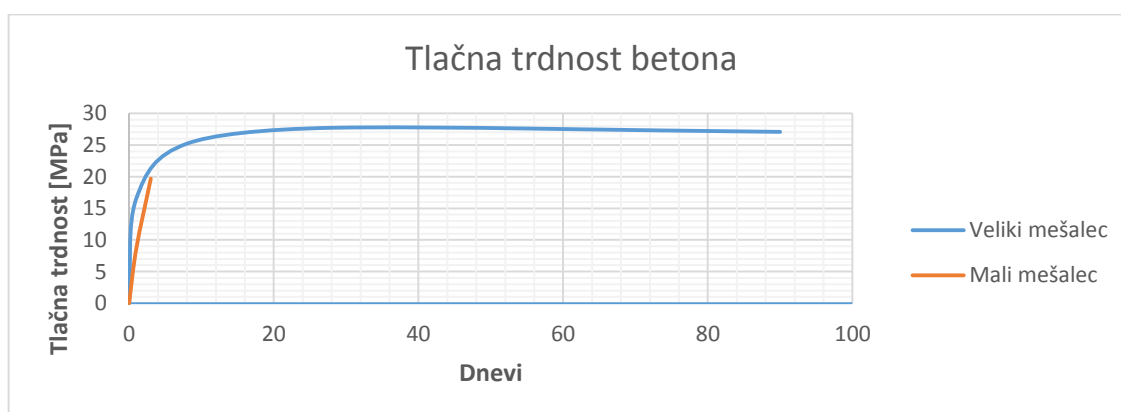
7.1 Preliminarne mešanice

Preliminarne mešanice so bile osnovni pokazatelj, v katero smer moramo spreminjati količino osnovnih sestavin in dodatkov. Skušali smo dobiti mešanico z zadovoljivim razlezom s posedom, ki bo stabilna in dovolj viskozna. Velikost razleza s posedom, ki ga iščemo, je približno 300 mm za mini razlez s posedom in 700 mm za standardni razlez s posedom. Hkrati je bilo treba doseči zahtevano gostoto betona in tlačno trdnost.

Pri preliminarnih raziskavah smo naredili 4 mešanice v velikem mešalcu, od tega 3 različne. Po vsakem mešanju smo beton vgradili v vsaj 7 kock dimenzij 150 mm x 150 mm x 150 mm, skupaj 35 kock. V malem mešalcu smo pripravili 38 mešanic, od tega 11 različnih sestav. Za vsakim mešanjem smo beton vgradili v po eno kocko dimenzij 150 mm x 150 mm x 150 mm, skupaj 38 kock.

7.1.1 Osnovna mešanica

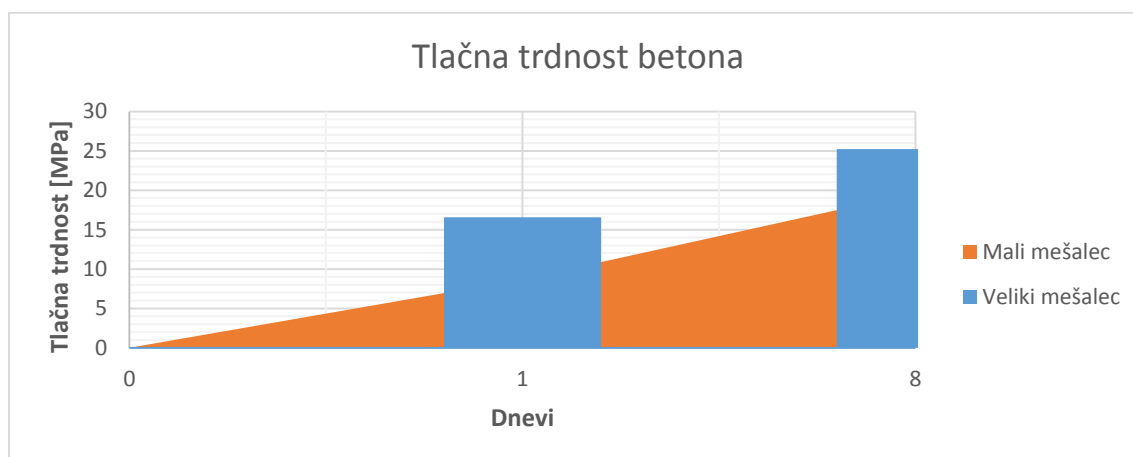
Najprej smo naredili osnovno mešanico, katera je bila pripravljena ob upoštevanju recepture iz predhodnih preiskav lahkoagregatnih betonov na KPMK. Beton smo zamešali v velikem mešalcu (13 kock) ter 4 mešanice v malem mešalcu (4 kocke). Pri tem je bila enodnevna tlačna trdnost betona ustrezna, gostota svežega betona in tudi strjenega betona pa previsoka, glede na naše zahteve. Pojavile so se tudi razlike v rezultatih med mešanicami pripravljenimi v malem mešalcu in mešanicami, pripravljenimi v velikem mešalcu. Mini razlez s posedom smo določali le za mali mešalec, in sicer je znašal okoli 223 mm. To je premalo za dobro obdelavnost samozgoščevalnega betona. Zato smo v nadaljevanju povečali količino superplastifikatorja (SP), da smo zagotovili bolj tekočo mešanico, in dodali aerant, da smo zagotovili manjšo gostoto.



Slika 21: Tlačna trdnost betona za osnovno mešanico

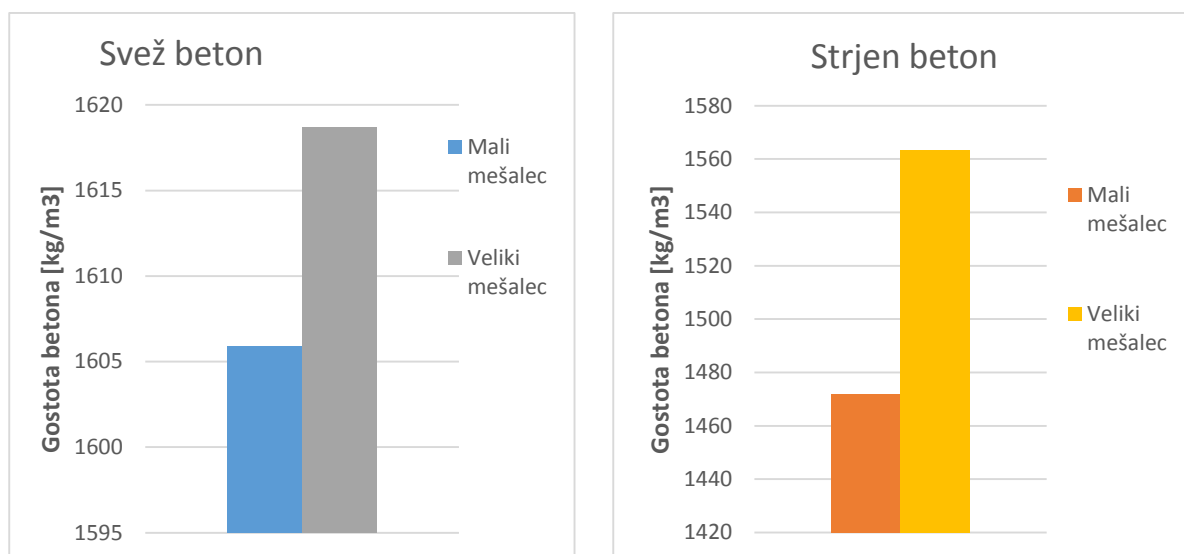
Figure 21: Compressive strength of concrete for basic mixture

Na sliki 21 prikazujemo naraščanje tlačne trdnosti betona s starostjo za osnovno mešanico betona. Njen graf poteka zvezno. Na sliki 22 primerjamo tlačno trdnost betona, pripravljene v velikem in malem mešalcu na podlagi enake osnovne recepture. Vrednosti so povprečje rezultatov preiskav posameznih vzorcev. Vidimo, da dosega lahkoagregatni beton, pripravljen v večjem mešalcu, višje tlačne trdnosti. Na sliki 23 je prikazana gostota betona, pripravljene v velikem in malem mešalcu. Pri betonih, zamešanih v velikem mešalcu, je gostota betona večja, kot pri betonih zmešanih v malem mešalcu. Takšen trend se kaže tudi v nadaljevanju, kar pomeni, da smo pri mešanju z malim mešalcem, na ne varni strani, kar se tiče gostote betona. Očitno nam mešanje z majhnim mešalcem omogoča vnos večje količine stabilnih zračnih por, zaradi delovanja aeranta in morda tudi kombinacije aeranta in superplastifikatorja. Večja poroznost betona pa pomeni seveda nižjo tlačno trdnost, zato so rezultati tlačne trdnosti, prikazani na sliki 22, logični – nižja tlačna trdnost betona, pripravljene v malem mešalcu, zaradi večjega deleža zraka v mešanici.



Slika 22: Primerjava tlačnih trdnosti betona za mali in veliki mešalec (osnovna mešanica)

Figure 22: Comparison of compressive strength of concrete for small and large mixer (basic mixture)

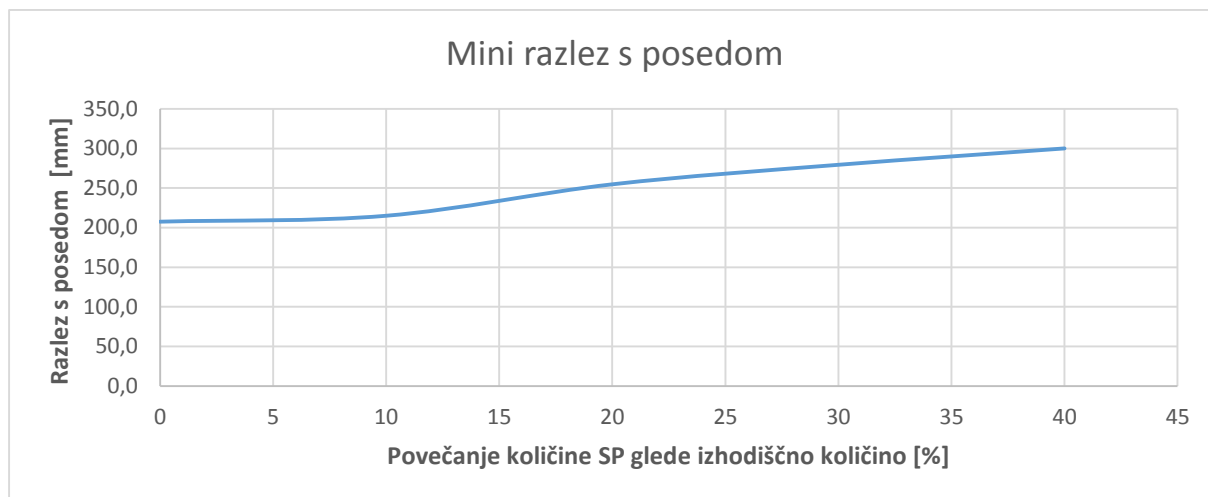


Slika 23: Primerjava gosote betona za mali in veliki mešalec (osnovna mešanica)

Figure 23: Comparison of concrete density for small and large mixer (basic mixture)

7.1.2 Vpliv količine superplastifikatorja na lastnosti mešanic

Naslednje mešanice smo pripravili le v malem mešalcu. Vse mešanice so vsebovale 0,2 % aeranta glede na maso cementa. Parameter, ki smo ga spreminjali, pa je bil delež SP. Vnaprej smo pripravili protokol večanja deleža SP, in sicer 10 % (0,95 % glede na maso cementa), 20 % (1,03 % glede na maso cementa), 30 % (1,12 % glede na maso cementa) in 40 % (1,21 % glede na maso cementa) več, kot v izhodiščni mešanici. Z večanjem deleža SP smo uspešno povečali sposobnost tečenja in zapolnjevanja betona (razlez s posedom), istočasno pa se je zmanjšala tudi gostota betona. V primeru 40 % dodanega SP glede na izhodiščno količino začne mešanica segregirati, na pogled se obnaša kot mivka v vodi. Najbolje se obnesejo mešanice med 20 in 30 % več superplastifikatorja kot v izhodiščni mešanici, zato v naslednjih mešanicah ostanemo v tem intervalu dodanega SP. Na sliki 24 prikazujemo mini razlez s posedom v odvisnosti od dodanega SP. Ciljni vrednosti 300 mm se sicer približamo šele pri 35 %, ko je začela betonska mešanica postajati nestabilna.



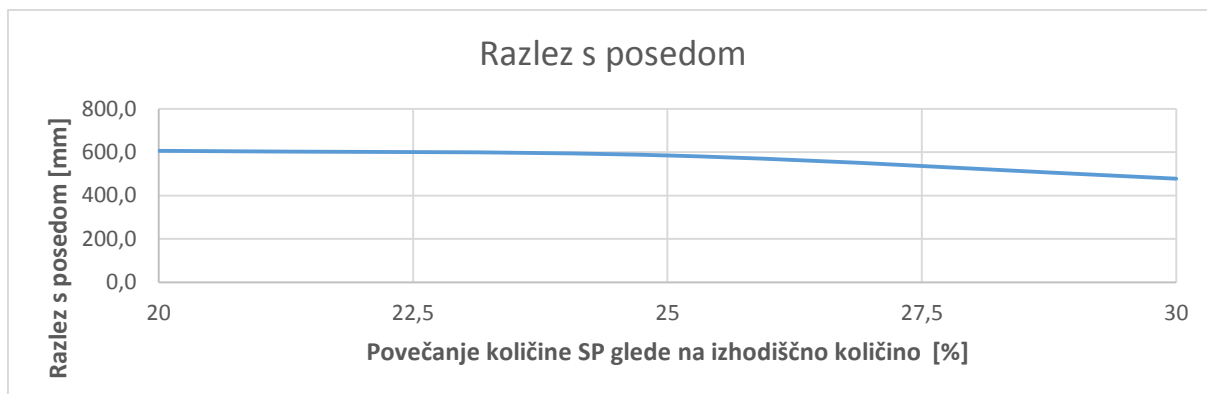
Slika 24: Mini razlez s posedom (mešanice z dodanim SP)

Figure 24: Mini slump flow test (mixtures with added SP)

7.1.3 Mešanice z dodajanjem SP v intervalu med 20 in 30 % glede na izhodiščno količino

V tem poglavju obravnavamo mešanice, pri katerih je bila količina dodanega SP med 20 % (1,03 % glede na maso cementa) in 30 % (1,12 % glede na maso cementa) večja kot pri izhodiščni mešanici. Hkrati pa smo pri teh mešanicah spremenili še delež aeranta, ki smo ga zmanjšali na 0,12 % glede na maso cementa. Zmanjšali smo tudi količino vode, da smo povečali stabilnost betona. In sicer smo pri mešanicah z 20 % SP več pustili količino vode enako, kot pri prvotni mešanici, pri mešanicah s 25 % SP več smo odvzeli 3,6 % vode glede na izhodiščno količino vode. Pri mešanicah s 30 % SP več pa smo odvzeli 10 % vode glede na izhodiščno količino vode. Gostota betona z zmanjšano količino aeranta je še vedno ustrezna, medtem ko odvzemanje vode (pri večanju SP), pomeni manjšanje razleza s posedom. Najbolje se obnesejo mešanice med 20 in 25 % več SP, ter z enako količino vode kot izhodiščni beton (20 % povečanje SP) ali kvečjemu za največ 3,6 % zmanjšano količino vode (25 % povečanje SP), glede na količino vode pri izhodiščni mešanici. Na sliki 25 prikazujemo razlez s posedom v odvisnosti od povečanja deleža SP in istočasnega zmanjšanja deleža vode. Vidimo, da uspemo do 25 % povečanja deleža SP in istočasnega zmanjšanja deleža vode vzdrževati enak razlez s posedom, v nadaljevanju pa povečan delež SP ne uspe izničiti vpliva zmanjšane količine vode na sposobnost tečenja in zapolnjevanja.

V tej fazi in v nadaljevanju preiskav nismo več uporabljali mini razleza s posedom, ampak smo uporabili preiskavo razleza s posedom v skladu s standardom (SIST EN 12350-8).



Slika 25: Razlez s posedom (mešanice s povečanim SP v intervalu med 20 % in 30 % glede na izhodiščno količino)

Figure 25: Slump flow test (mixtures with increased content of SP in interval between 20 % and 30 % with regard to basic volume)

7.1.4 Mešanice s povečanjem deleža SP v intervalu med 20 in 25 % glede na izhodiščno količino ter meritve z reometrom

V tem poglavju obravnavamo mešanice s povečanim deležem SP med 20 in 25 %, glede na izhodiščno količino. Aerant pri teh mešanicah in tudi v nadaljevanju ostaja pri količini 0,12 % glede na maso cementa. Količina vode pri mešanicah z 20 % več SP ostane ista, količina pri mešanicah s 25 % več SP pa je zmanjšamo za 3,6 %, glede na prvotno količino vode. V tej fazi in v nadaljevanju opravimo še dodatne preiskave z reometrom. Vse preiskave opravimo v času $t = 0$ min in času $t = 30$ min. Z reometrom preverimo plastično viskoznost in napetost na meji tečenja, s testom razleza s posedom pa sposobnost tečenja in zapolnjevanja. Rezultati preiskav so prikazani v preglednici 7.

Mešanice označimo s kraticami SP20 (20 % več SP) in SP25 (25 % več SP). Skušamo dobiti mešanico s čim manjšo napetostjo na meji tečenja in dovolj visoko viskoznostjo, ki istočasno zagotavljata ustrezno sposobnost tečenja in zapolnjevanja. Mešanice SP20, pri katerih je manj SP, imajo manjšo napetost na meji tečenja kot mešanice SP25. S časom napetost na meji tečenja narašča, hkrati se tudi razlika med napetostima na meji tečenja v času 0 min in 30 min med mešanicama SP20 in SP25 povečuje. Plastična viskoznost je pri mešanicah SP25 višja kot pri mešanicah SP20, in sicer se razlika v viskoznosti s časom povečuje. Gostota je v obeh primerih podobna. Razlez s posedom je večji pri mešanicah SP20, vendar pa se s časom razlika med razlezoma med mešanicama SP20 in SP25 zmanjšuje.

Preglednica 7: Reološke lastnosti mešanic (mešanice s povečanim deležem SP v intervalu med 20 % in 25 % glede na izhodiščno količino SP)

Table 7: Rheological properties of mixtures (mixtures with increased content of SP in interval between 20 % and 25 % with regard to basic SP content)

Mešanica (% SP več)	SP20	SP25
Gostota betona [kg/m ³]	1361	1359
Razlez s posedom v času 0 min [mm]	648	580
Razlez s posedom v času 30 min [mm]	552	536
Napetost na meji tečenja (0 min) [Pa]	66,1	82,7
Napetost na meji tečenja (30 min) [Pa]	77,0	98,3
Plastična viskoznost (0 min) [Pa · s]	6,4	7,2
Plastična viskoznost (30 min) [Pa · s]	8,3	10,8

Obe mešanici (z 20 oziroma 25 % SP več) nato pripravimo še v velikem mešalcu. Pri tem se ponovno pokažejo odstopanja kot v poglavju 7.1.1 (večja gostota betona in istočasno večja tlačna trdnost).

V nadaljevanju se osredotočimo na mešanico SP20, ker se bolje obnaša in ima boljše obdelovalne lastnosti. To mešanico nato kombiniramo z različnimi dodatki. Rezultate prikazujemo v poglavju 7.2.

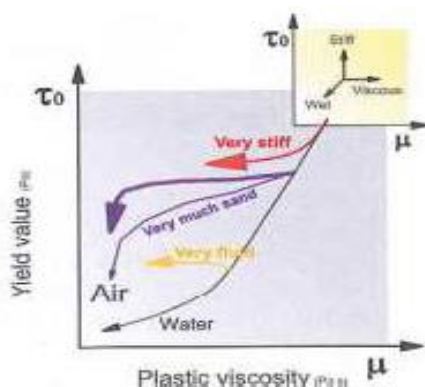
7.2 Glavna skupina mešanic

Deleži dodatkov pri glavni skupini mešanic temeljijo na preliminarnih mešanicah. Natančneje na mešanici SP20 (osnovna mešanica), katero smo modificirali s posameznimi dodatki ter pri tem preverjali izbrane lastnosti betona v svežem in strjenem stanju.

V glavni skupini mešanic smo pripravili 3 mešanice v velikem mešalcu. Pri tem smo naredili 11 kock dimenzij 150 mm x 150 mm x 150 mm, ostalo smo porabili za betoniranje stene. V malem mešalcu smo pripravili 50 mešanic, po 16 različnih recepturah. Za vsakim mešanjem smo izdelali po eno kocko dimenzij 150 mm x 150 mm x 150 mm ali 100 mm x 100 mm x 100 mm. Skupaj 42 kock dimenzij 150 mm x 150 mm x 150 mm in 16 kock dimenzij 100 mm x 100 mm x 100 mm.

7.2.1 Vpliv aeranta

Dodajanje aeranta zmanjša plastično viskoznost materiala, napetost na meji tečenja pa se ne spremeni bistveno (Wallevik, 2009). Dodajanja aeranta pomeni tudi lažji beton, saj v njem nastopa več zračnih mehurčkov, hkrati pa to pomeni tudi manjšo tlačno trdnost betona. Splošni vpliv aeranta na parametra plastične viskoznosti in napetosti na meji tečenja prikazujemo na sliki 26.

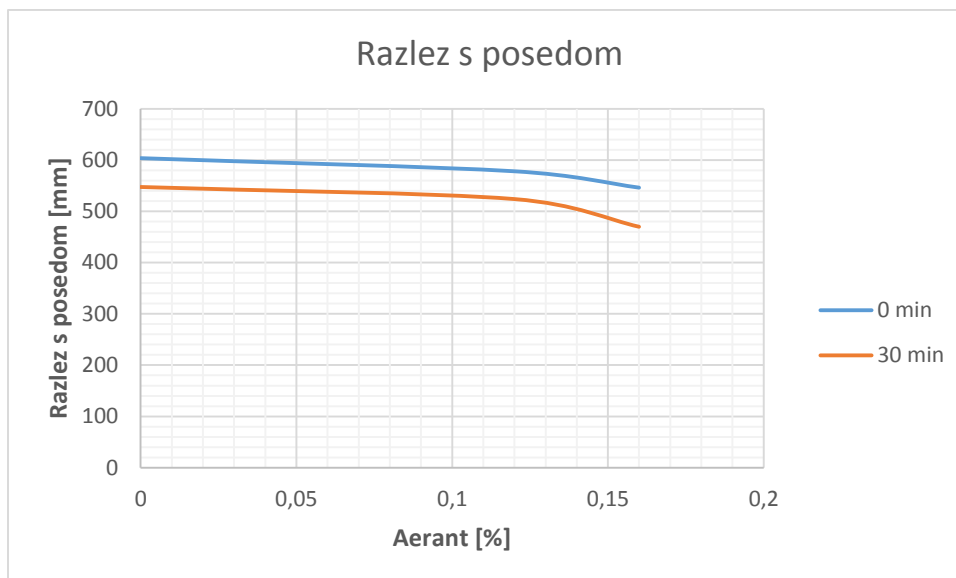


Slika 26: Vpliv aeranta na vrednosti τ_0/μ (Wallevik, 2009, str. 6-12)

Figure 26: Effect of air entraining agent on the τ_0/μ values (Wallevik, 2009, p. 6-12)

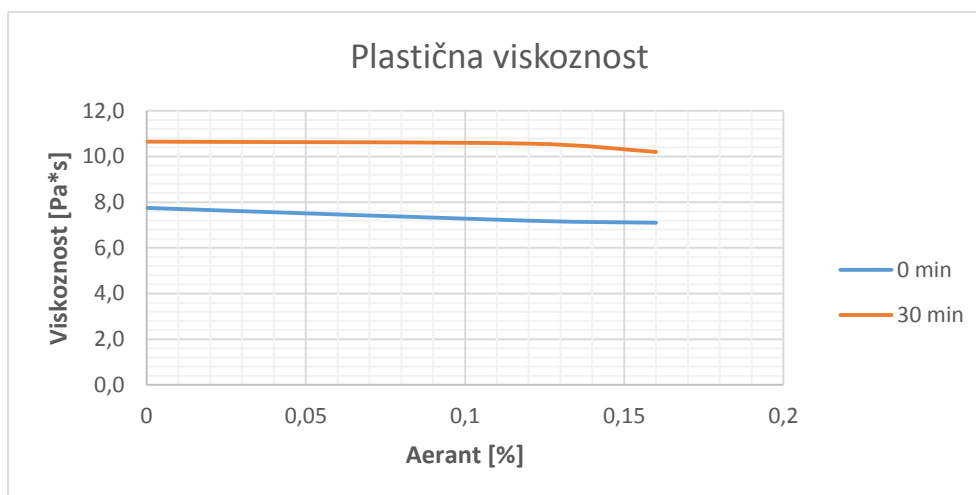
V mešanicah, ki smo jih pripravili z dodajanjem aeranta, je postopek mešanja ostal enak, kot pri izbrani osnovni mešanici. Ostale količine sestavin so ostale enake, glede na izbrano betonsko mešanico. Spreminjali smo le količino aeranta.

V našem primeru je imel aerant oziroma oblikovani zračni mehurčki, ki so bili rezultat dodanega aeranta, vpliv tako na strižno napetost na meji tečenja kot na plastično viskoznost betona. In sicer je viskoznost z dodajanjem aeranta rahlo padala, kar je pričakovano, medtem, ko pa je napetost na meji tečenja z dodajanjem aeranta rahlo naraščala, posledica česar je verjetno tudi manjšanje razleza. Na spodnjih slikah prikazujemo vpliv deleža aeranta na razlez s posedom (slika 27), plastično viskoznost (slika 28) in napetost na meji tečenja (slika 29).



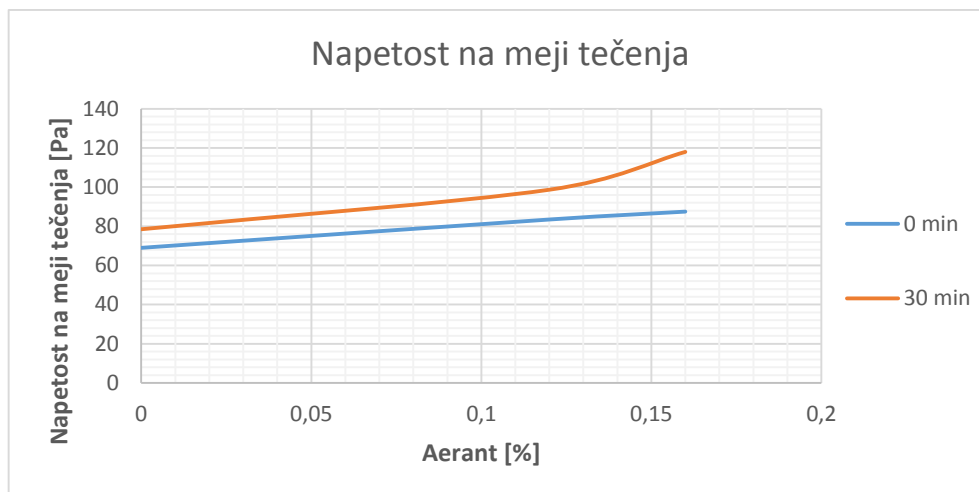
Slika 27: Vpliv količine aeranta na razlez s posedom

Figure 27: Effect of dosage of air entraining agent on slump flow value



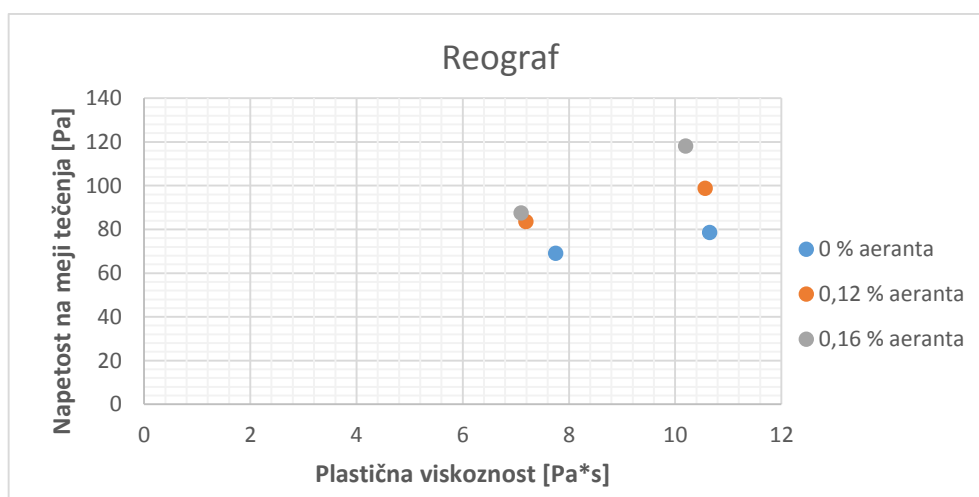
Slika 28: Vpliv količine aeranta na plastično viskoznost

Figure 28: Effect of dosage of air entraining agent on plastic viscosity



Slika 29: Vpliv količine aeranta na strižno napetost na meji tečenja

Figure 29: Effect of dosage of air entraining agent on yield value

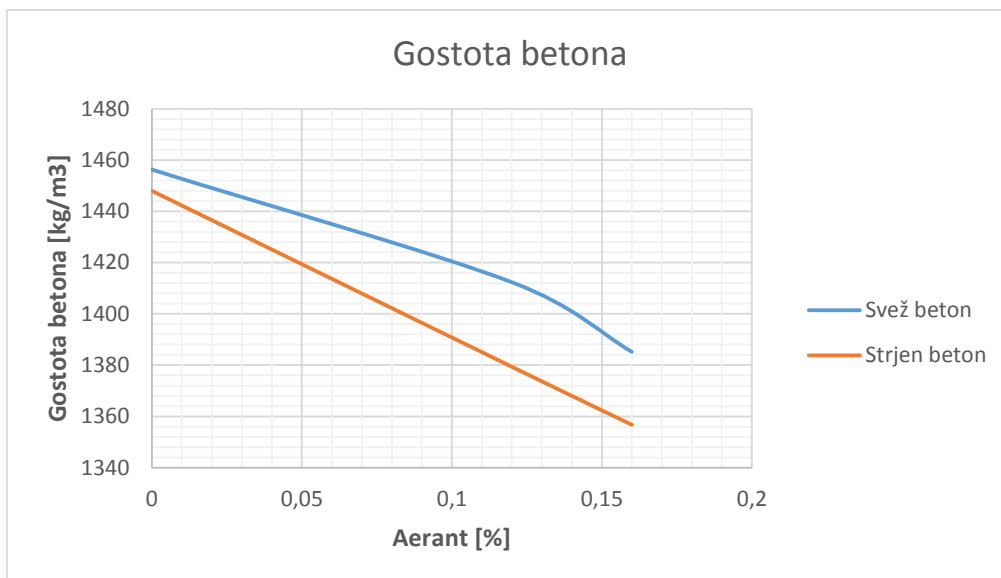


Slika 30: Reograf (vpliv aeranta)

Figure 30: Reograph (effect of air entraining agent)

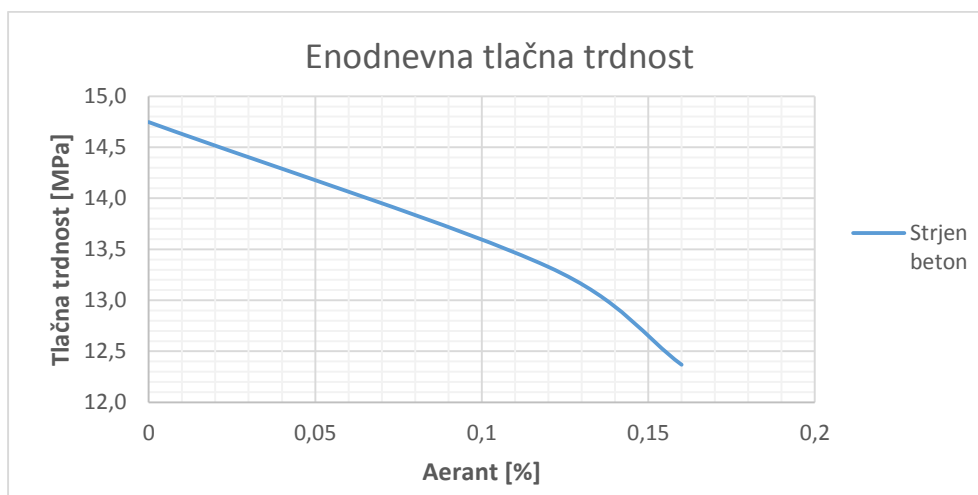
Na sliki 30 prikazujemo reograf za betonske mešanice, pri katerih smo večali delež. Reograf prikazuje rezultate v času 0 in po 30 minutah. S časom se plastična viskoznost in napetost na meji tečenja povečujeta. Napetost na meji tečenja se povečuje tudi z dodajanjem aeranta, medtem, ko se viskoznost z dodajanjem aeranta rahlo zmanjšuje.

Na slikah 31 in 32 prikazujemo gostoto betona in njegovo tlačno trdnost po enem dnevu, v odvisnosti od dodanega aeranta. Pričakovano se gostota betona z dodajanjem aeranta manjša, ravno tako pa pada tudi tlačna trdnost.



Slika 31: Gostota betona v odvisnosti od dodanega aeranta

Figure 31: Density of concrete in dependence of content of air entraining agent



Slika 32: Tlačna trdnost v odvisnosti od količine dodanega aeranta

Figure 32: Compressive strength in dependence of content of air entraining agent

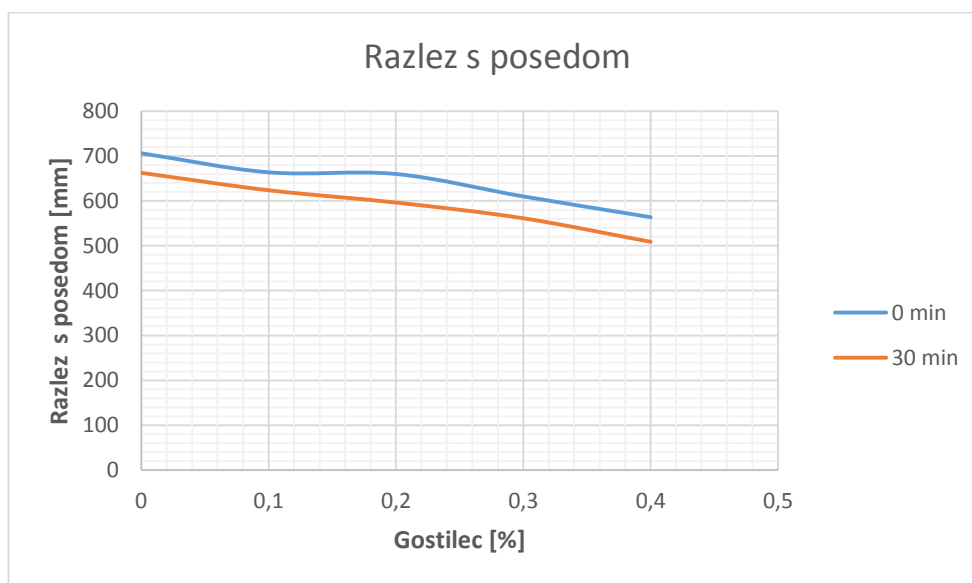
7.2.2 Vpliv gostilca

Gostilec ali stabilizator se uporablja za zmanjšanje segregacije grobih zrn agregata, zmanjševanje notranjega ter površinskega izcejanja vode pri samozgoščevalnih betonih, preprečevanje izpiranja cementnih delcev ter preprečevanje ločevanja agregatnih delcev in cementne paste. Gostilec (stabilizator) poveča stabilnost betona zaradi zmanjšanja mobilnosti vode v betonu, kar pomeni

povečanje plastične viskoznosti (Wallevik, 2009, Hočevnar, 2013). Uporaba gostilca je zelo razširjena pri betoniranju pod vodo, saj prepreči izgubo materiala zaradi izpiranja.

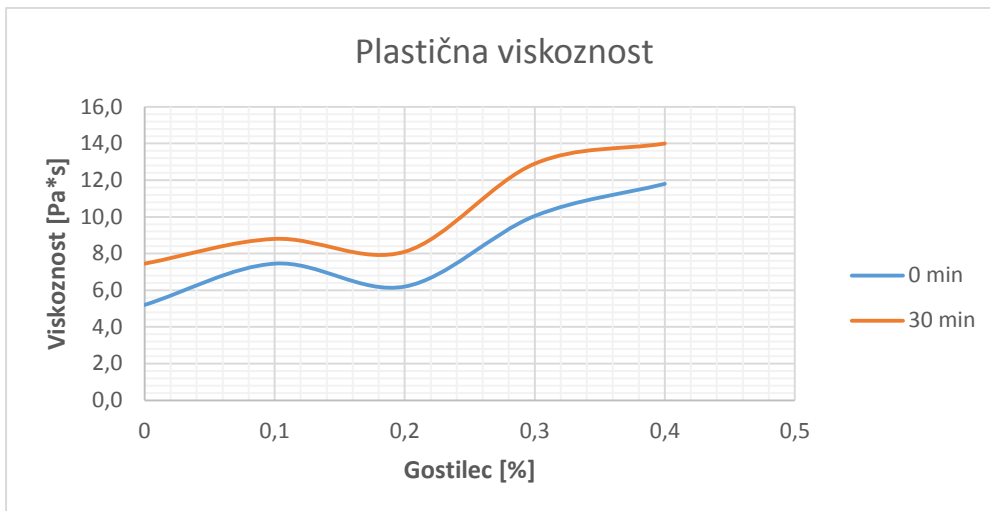
Pri mešanicah smo upoštevali prvoten način mešanja ter ostali pri enaki količini aeranta ter superplastifikatorja kot pri izbrani osnovni betonski mešanici. Zmanjšali smo količino cementa za 5 % ter pri tem povečali maso vode za 3 krat glede na maso odvzetega cementa (za isti volumen zmanjšanja cementa, smo povečali volumen vode, ker je gostota cementnih delcev blizu 3 g/cm^3 , vode pa 1 g/cm^3 , to pomeni povečanje mase vode za 3 krat glede na maso odvzetega cementa) ter glede na novo maso cementa dodali delež gostilca. Delež gostilca smo nato povečevali z 0,1 % glede na maso cementa, vse do 0,4 %. Rezultate prikazujemo v nadaljevanju.

Razlez s posedom se z dodajanjem gostilca zmanjšuje (slika 33), kar je verjetno posledica večje plastične viskoznosti in večje napetosti na meji tečenja (sliki 34 in 35). Mešanica je na pogled bolj »medena« in manj tekoča ter se zelo »lepi« na stožec in tudi sama masa betona je bolj lepljiva.



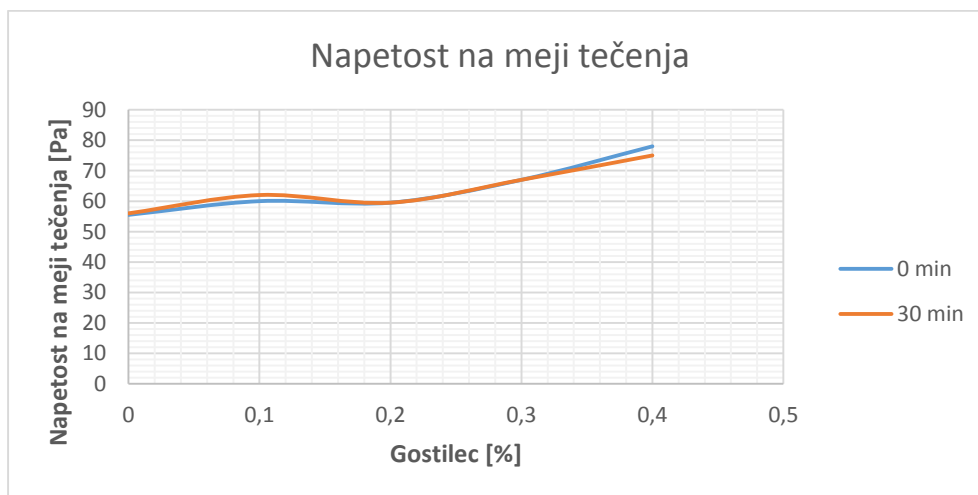
Slika 33: Vpliv količine gostilca na razlez s posedom

Figure 33: Effect of dosage of stabilizer on slump flow value



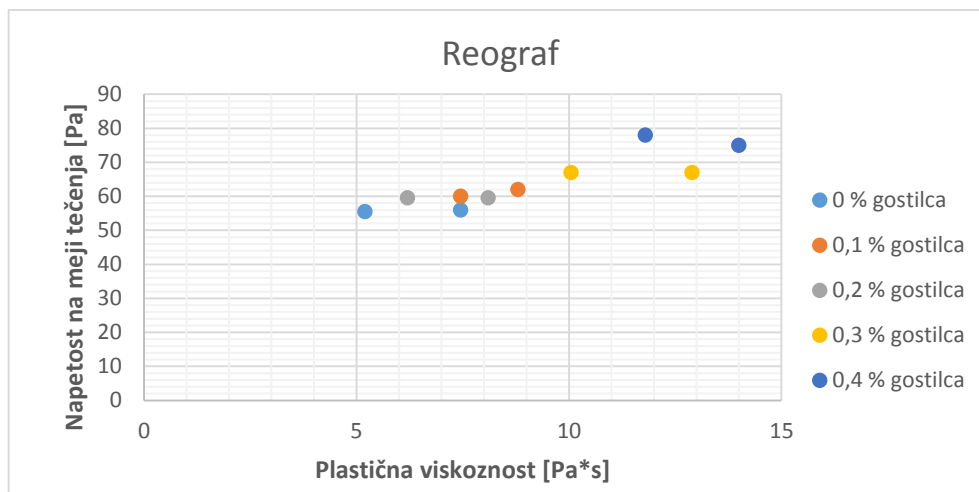
Slika 34: Vpliv količine gostilca na plastično viskoznost

Figure 34: Effect of dosage of stabilizer on plastic viscosity



Slika 35: Vpliv količine gostilca na strižno napetost na meji tečenja

Figure 35: Effect of dosage of stabilizer on yield value

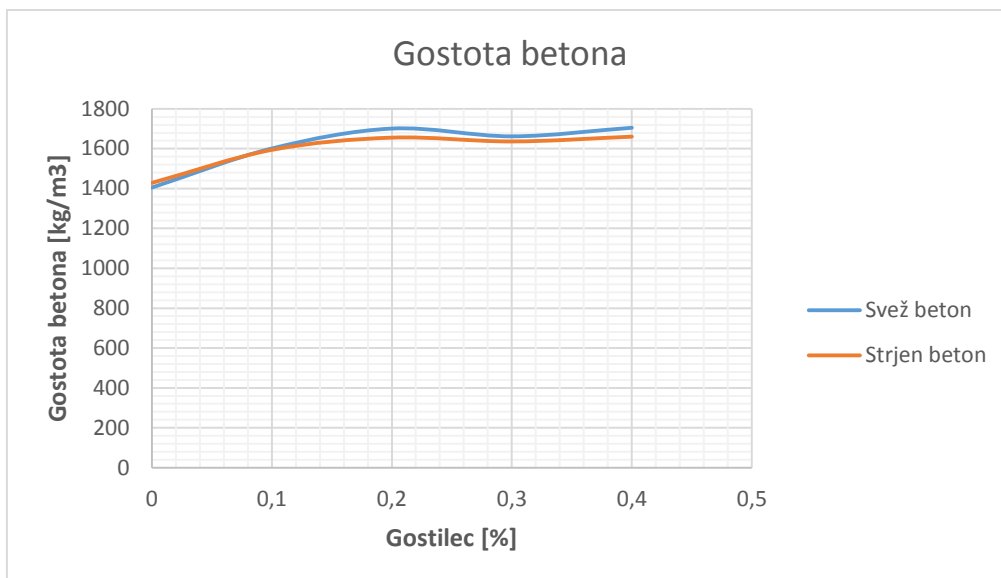


Slika 36: Reograf (vpliv gostilca)

Figure 36: Reograph (effect of stabilizer)

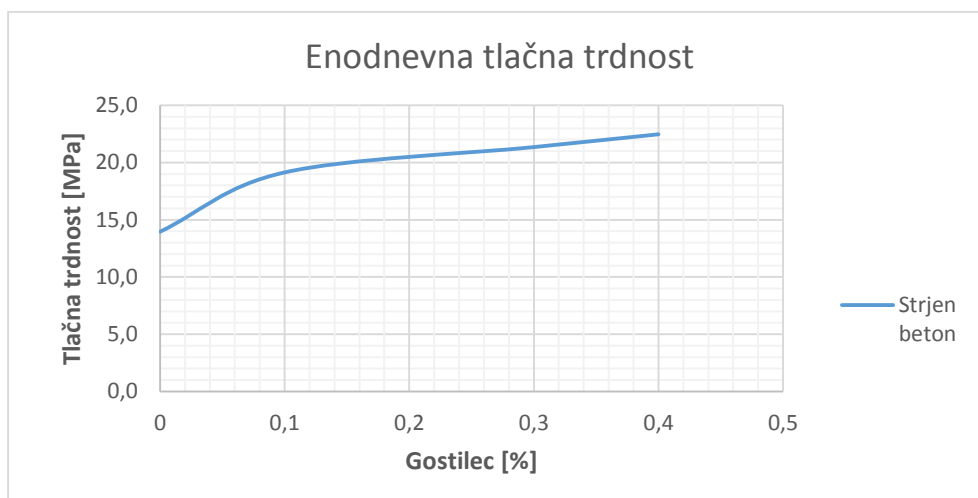
Na sliki 36 je prikazan reograf za reološke karakteristike betona pri različnih količinah dodanega gostilca za čas $t = 0$ min in čas $t = 30$ min. Plastična viskoznost s časom narašča, medtem, ko je napetost na meji tečenja tudi po 30 minutah približno enaka. Z dodajanjem gostilca se ta dva parametra zvišujeta. Napetost na meji tečenja se zviša le za spoznanje, medtem, ko se zelo močno poveča viskoznost.

Mešanica je na pogled bolj gosta, ob dvigovanju pa opazimo, da je težja kot osnovna mešanica. Gostota betona z dodajanjem gostilca narašča, in sicer naraste kar za 18 % pri 0,4 % dodanega gostilca, glede na gostoto betona brez dodanega gostilca. V primerjavi z izbrano osnovno mešanico je torej gostota betona bistveno večja. Enodnevna tlačna trdnost je večja, kot pri izbrani izhodiščni betonski mešanici, hkrati pa se z večanjem gostilca tlačna trdnost povečuje. Na sliki 37 in 38 prikazujemo gostoto in enodnevno tlačno trdnost betona v odvisnosti od deleža gostilca v betonu.



Slika 37: Gostota betona v odvisnosti od deleža gostilca

Figure 37: Density of concrete in dependence of stabilizer content



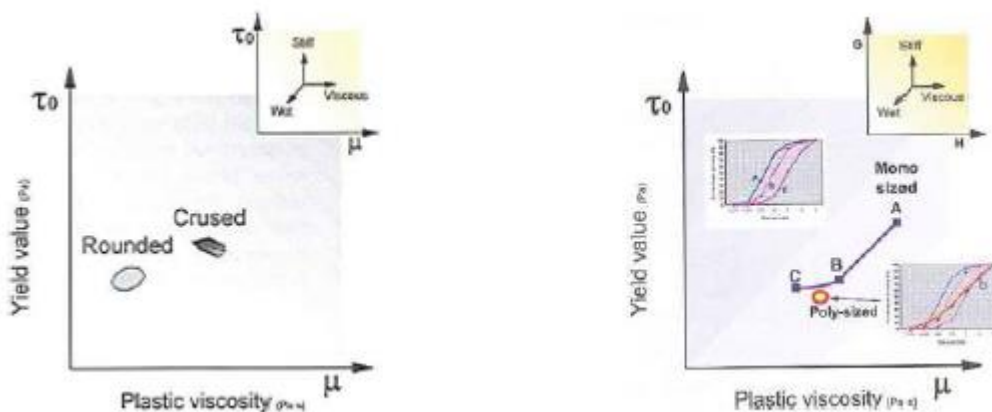
Slika 38: Tlačna trdnost v odvisnosti od dodanega gostilca

Figure 38: Compressive strength in dependence of adding stabilizer

7.2.3 Vpliv apnenčeve moke

Del Portland cementa lahko nadomestimo z odpadnim materialom iz drugih obratov, kot je elektorfiltrski pepel, mleta granulirana plavžna žindra ali apnenčeva moka, ki se pridobi z odpraševanjem drobljenega agregata. S pravilno izbiro kamene moke lahko močno znižamo v/c razmerje v betonu in ohranimo enako obdelavnost betona (Bokan Bosiljkov, 2003). Učinek kamene

moke je izrazit predvsem v betonih, ki imajo manj cementa. Pomembna je predvsem oblika delcev, tekstura in zrnavostna porazdelitev, podobno kot to velja pri večjih agregatnih zrnih. V samozgoščevalnih betonih, kamena moka zniža vrednosti reoloških parametrov in poveča njegovo stabilnost oziroma odpornost proti segregaciji. Hkrati pa dodatek kamene moke pomeni večjo porabo plastifikatorja (Hočevar, 2013).



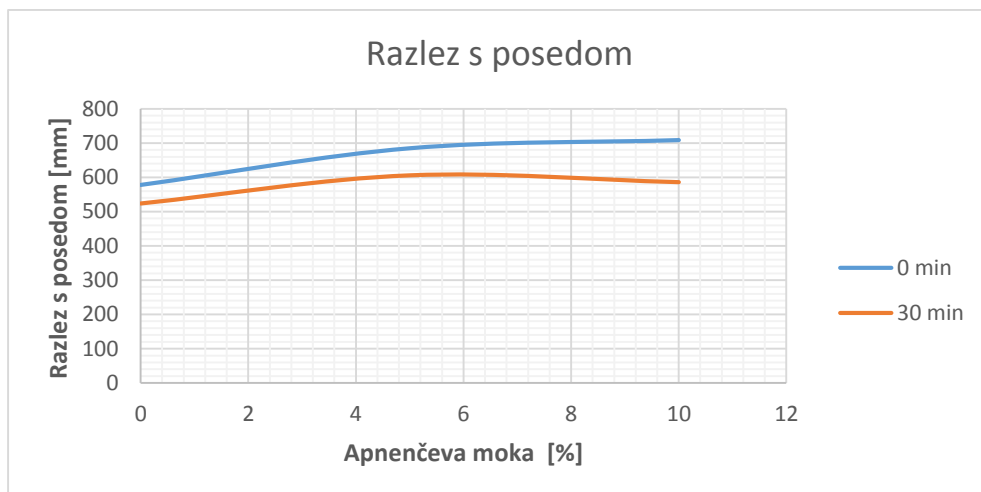
Slika 39: Vpliv oblike agregata in zrnavostne krivulje peska na vrednosti τ_0/μ (Wallevik, 2009, str. 6-20, str. 6-22)

Figure 39: Effect of aggregate shape and particle size distribution of sand on τ_0/μ values (Wallevik, 2009, p. 6-20, p. 6-22)

Kamena moka spremeni zrnavostno sestavo peska, kar pomeni, da ima beton manjšo napetost na meji tečenja in plastično viskoznost ter ima večjo stabilnost in odpornost proti segregaciji (slika 39). Apnenčeva moka skupaj s cementom tvori pasto med agregatnimi zrnji, kar omogoča neovirano gibanje večjih zrn agregata.

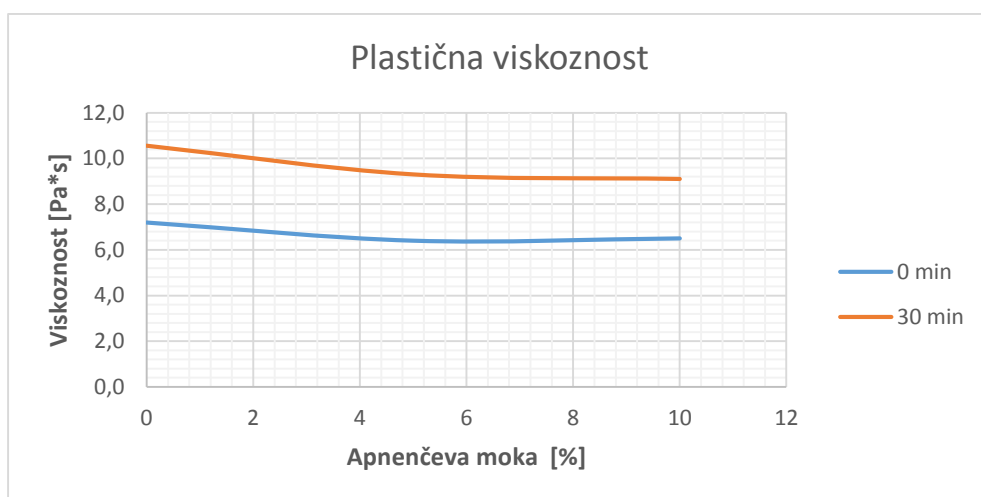
V betonskih mešanica, ki smo jih pripravili z dodatkom apnenčeve moke, smo odvzeli cement (5 % oziroma 10 % mase) in nato dodali enako maso apnenčeve moke, ki smo jo primešali k cementu. Vse ostale količine so ostale enake kot pri izbrani osnovni mešanici, ravno tako tudi postopek mešanja.

Razlez s posedom se s povečevanjem deleža apnenčeve moke rahlo povečuje (slika 40), kar je verjetno posledica manjše plastične viskoznosti in manjše napetosti na meji tečenja (sliki 41 in 42).



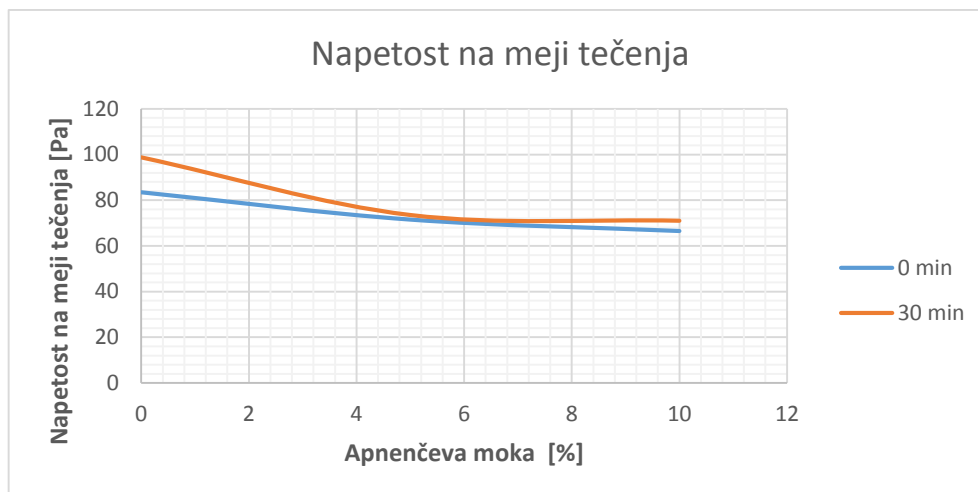
Slika 40: Vpliv količine apnenčeve moke na razlez s posedom

Figure 40: Effect of dosage of limestone filler on slump flow value



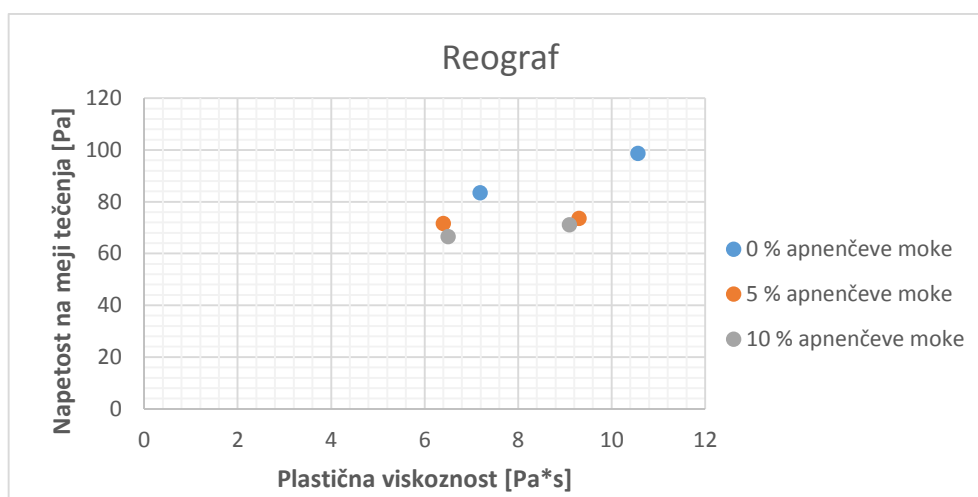
Slika 41: Vpliv količine apnenčeve moke na plastično viskoznost

Figure 41: Effect of dosage of limestone filler on plastic viscosity



Slika 42: Vpliv količine apnenčeve moke na strižno napetost na meji tečenja

Figure 42: Effect of dosage of limestone filler on yield value



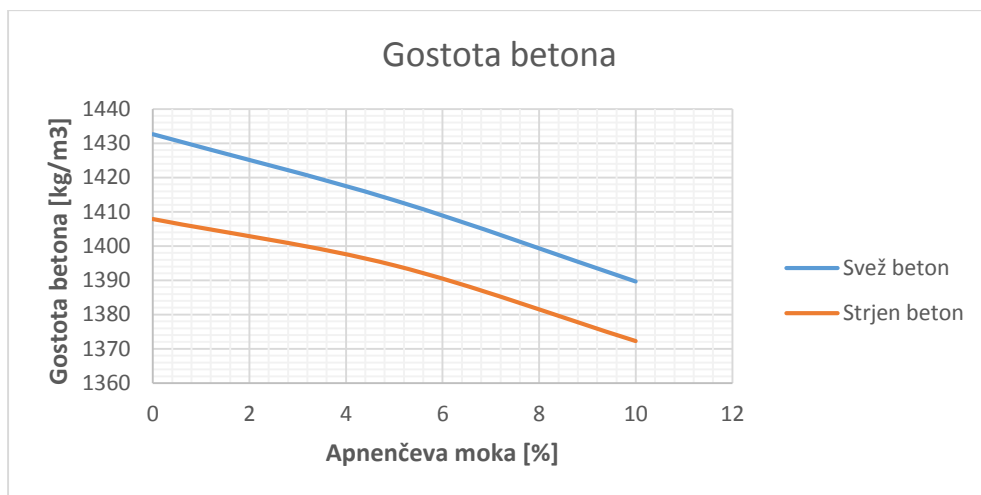
Slika 43: Reograf (vpliv apnenčeve moke)

Figure 43: Reograph (effect of limestone filler)

Na sliki 43 je prikazan reograf za reološke karakteristike betona pri različnih količinah dodane apnenčeve moke za čas $t = 0$ min in čas $t = 30$ min. Napetost na meji tečenja in plastična viskoznost s časom naraščata. Z dodajanjem moke pa se ta dva parametra zmanjšujeta, kar je v skladu s pričakovanji, saj moka s cementom tvori pasto za lažje gibanje večjih zrn v betonski mešanici.

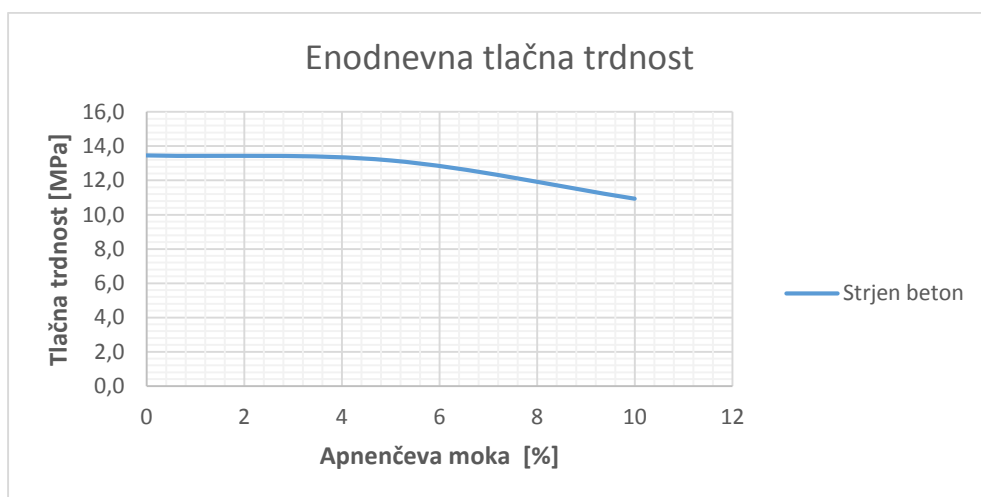
Gostota betona se z dodajanjem apnenčeve moke rahlo zmanjšuje. Moka ima manjšo gostoto zrn kot cement, zato se manjša tudi gostota betonske mešanice. Na sliki 44 primerjamo gostoto betonskih mešanic pri dodajanju apnenčeve moke. Primerjamo zgolj rezultate za gostoto, ki so bili opravljeni v sklopu meritev glede vpliva apnenčeve moke na obnašanje lahkoagregatnega samozgoščevalnega

betona, in ne povprečja celotnih preiskav, zato ker so bile to mešanice, pri katerih smo uporabili pesek na dnu posode, ki je bil bolj vlažen, kot pri ostalih mešanicah. Pri tem smo korigirali količino vode, vendar zaradi majhnega števila preiskav ne moremo povprečiti vseh rezultatov preiskav.



Slika 44: Gostota betona v odvisnosti od dodane apnenčeve moke

Figure 44: Density of concrete in dependence of adding limestone filler



Slika 45: Tlačna trdnost v odvisnosti od dodane apnenčeve moke

Figure 45: Compressive strength in dependence of adding limestone filler

Enodnevna tlačna trdnost se s povečevanjem količine apnenčeve moke zmanjšuje, kar je pričakovano, saj smo zmanjševali količino cementa v betonski mešanici, ter s tem povečevali v/c količnik. Trdnost po enem dnevu je za beton z 10 % apnenčeve moke za približno petino manjša, kot pri betonu brez apnenčeve moke.

7.2.4 Vpliv vrste cementa

Ko nižamo v/c razmerje, lahko zmanjšamo količino vode, kar poveča plastično viskoznost betona, ali pa povečamo količino cementa, kar le zmerno poveča viskoznost betona. Količina vode ima torej veliko večji vpliv kot količina cementa. Vpliv na reološke lastnosti ima tudi finost mletja cementa. Bolj kot je cement fino mlet, večjo ima napetost na meji tečenja in manjšo plastično viskoznost (Wallevik, 2009).

Analizo vpliva cementa smo naredili na devetih mešanicah. V prvem koraku smo zamenjali cement CEM I, ki smo ga uporabili v vseh ostalih mešanicah, zamenjali s CEM I drugega proizvajalca. Pri tem je sestava betonske mešanice ostala povsem enaka kot pri izbrani osnovni mešanici. V nadaljevanju smo spreminjali tudi delež aeranta, da smo videli njegovo delovanje pri drugem cementu. Pri tem smo opazili, da je mešanica bolj tekoča kot pri uporabi prvega cementa.

Pri enaki količini aeranta, ima mešanica z novim cementom za 6 % (cca. 80 kg) večjo gostoto, hkrati pa ima za 20 % višjo enodnevno tlačno trdnost. Podobno gostoto kot pri prvem cementu, dobimo šele pri 0,35 % dodanega aeranta (osnovna mešanica ima 0,12% aeranta), vendar pa se beton pri takšni količini že zelo močno peni, hkrati pa je tlačna trdnost za 10% manjša, kot pri normalnem doziranju aeranta. Vzrok temu je verjetno drugačna kompatibilnost novega cementa z uporabljenimi kemijskimi dodatki. Ti namreč odreagirajo drugače, kot v primeru, ko smo uporabili prvi cement. Na spodnji sliki (slika 46) prikazujemo mešanico z 0,27 % aeranta in novim cementom, kjer so lepo vidni številni zračni mehurčki na površini betona.



Slika 46: Betonska mešanica z novim cementom

Figure 46: Concrete mixture with new cement

Beton z novim cementom je bolj tekoč, zato ima tako večjo sposobnost tečenja in zapolnjevanja. Razlez s posedom se rahlo povečuje z večanjem količine aeranta, vendar pa ni bistveno drugačen od tistega, ki

smo ga izmerili pri mešanicah s prvim cementom. Napetost na meji tečenja se z dodajanjem aeranta zmanjšuje, vendar je pri isti količini aeranta in SP višja, kot pri mešanicah s prvim cementom. Plastična viskoznost z naraščanjem vsebnosti aeranta narašča, vendar je pri isti količini dodatkov nižja, kot pri mešanicah s prvim cementom. Gostota in tlačna trdnost se z večanjem deleža aeranta zmanjšujeta.

Mešanice z novim cementom imajo sicer dobro sposobnost tečenja, vendar pa je zaradi njihove prevelike gostote, ki je bila osnovna zahteva, primernejša uporaba prvega cementa. Prav tako ne moremo predstaviti zanesljivih reoloških lastnosti teh mešanic, saj je bilo narejeno premajhno število preizkusov, pri razpoložljivih rezultatih pa je prevelik raztros vrednosti, kar bi lahko bilo tudi posledica morebitne segregacije betonov med preiskavo.

7.2.5 Veliki mešalec (betoniranje stene)

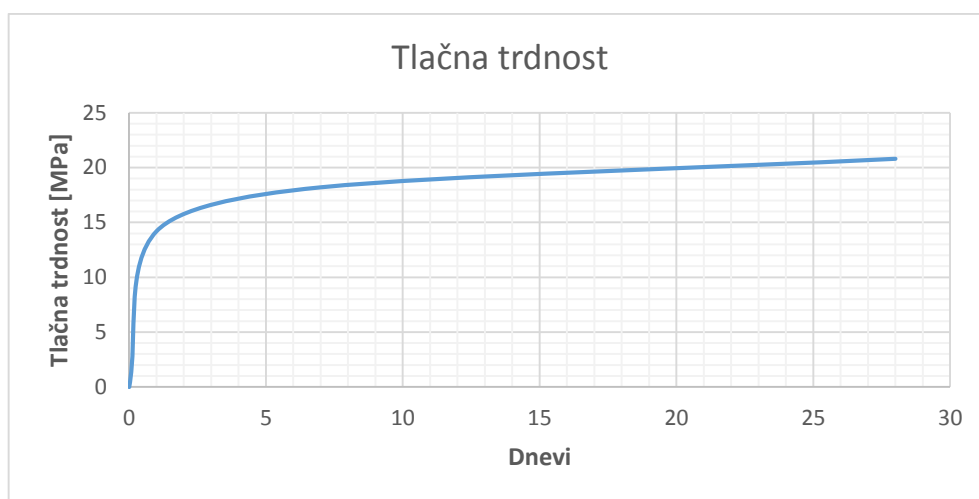
V velikem mešalcu smo pripravili več mešanic lahkoagregatnega samozgoščevalnega betona za izdelavo stene višine 230 cm, širine 100 cm in debeline 6 cm. Prva mešanica, ki smo jo pripravili, je bila izbrana osnovna mešanica, vendar pa nismo dodali vse vode, ampak smo uporabili 7,1 % manj vode, ker je bila mešanica dovolj tekoča. Preverili smo gostoto, ki je znašala 1570 kg/m^3 , kar več glede na zahteve. Zamešali smo tri polne mešalce betona, ki smo ga nato s pomočjo posode za beton (slika 47) vlili v opaž prve stene, Pri tem smo imeli tehnične težave, saj so deske opaža popustile in beton je stekel iz opaža.



Slika 47: Posoda za beton

Figure 47: Box for pouring concrete

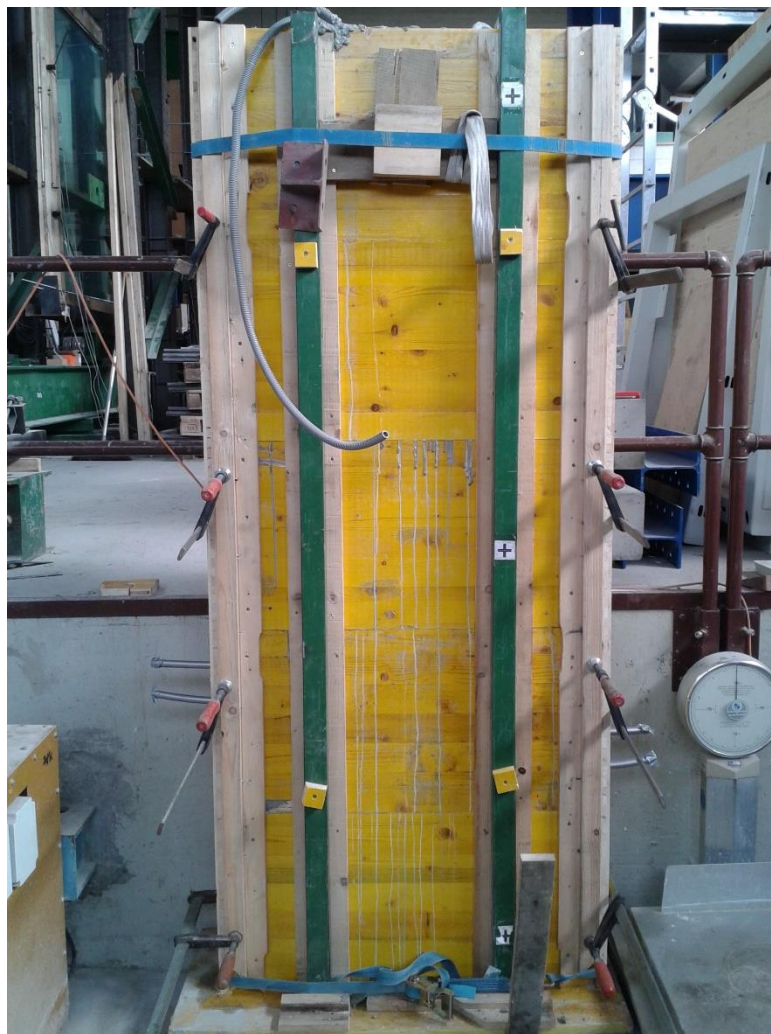
Mešanico betona za drugo steno smo modificirali tako, da smo povečali delež aeranta na 0,15 %. Količino betona, ki smo jo pripravili, je bila enaka polovici kapacitete mešalca. Beton smo vgradili v 11 kock dimenzij 150 mm x 150 mm x 150 mm. Gostota betona je bila 1540 kg/m^3 , kar je za skoraj 150 kg več kot pri malem mešalcu. Se pa približamo ciljni gostoti betona, ki je 1500 kg/m^3 . Enodnevna tlačna trdnost je za 10 % višja, kot pri mešanju v malem mešalcu. Prikaz prirastka tlačne trdnosti za obravnavani beton prikazujemo na naslednji sliki (slika 48).



Slika 48: Tlačna trdnost (beton namenjen za izdelavo stene)

Figure 48: Compressive strength (concrete for wall casting)

Zadnjo mešanico v velikem mešalcu smo pripravili z namenom, da izdelamo novo betonsko steno z nameščenimi instalcijskimi vodi in debelino 6 cm. Uporabili smo isto količino superplastifikatorja in aeranta kot pri drugi (predhodni) mešanici, le da pri tej nismo dodali vse vode, ampak smo je porabili 10,6 % manj, glede na planirano količino, saj je bila mešanica dovolj tekoča, že pri manjši količini vode. Tudi v tem primeru je gostota svežega betona znašala cca. 1540 kg/m^3 . Najprej smo zamešali tri polne mešalce betona, ki smo ga nato s posodo za beton (slika 47) vlili v opaž, ki ga prikazujemo na spodnji sliki (slika 49). Steno smo naslednji dan razopazili. Temperatura na njeni površini je znašala $40 \text{ }^\circ\text{C}$, beton je odlično zapolnil opaž in prevzel njegovo obliko, ostalo je le nekaj zračnih mehurčkov na površini stene, kateri niso imeli prostora, da bi se odzračili. Prednja in zadnja stran stene sta prikazani na sliki 19. Preiskave, ki smo jih opravili na betonski steni, so predstavljene v naslednjih poglavjih.



Slika 49: Opaž za steno

Figure 49: Formwork of wall

7.3 Preiskava z ultrazvokom

Meritve z ultrazvokom smo opravili šestnajsti dan po razopazanju stene. Na steno smo narisali mrežo z rastrom 10 cm x 10 cm, tako na sprednji kot na zadnji strani. Mreži na obeh straneh stene sta se popolnoma prekrivali. Meritve smo izvajali v vsakem od presečišč mreže, v smeri pravokotno na površino stene (vzdolž njene debeline). V širino stena meri 100 cm, v višino 230 cm, v debelino pa znaša 6 cm pri straneh oziroma proti notranjosti stene več, saj je opaž pod pritiskom betona postal izbočen. To upoštevamo tudi pri izračunih hitrosti potovanja ultrazvoka vzdolž debeline stene. Z merilno napravo merimo čas (mikrosekunde), ki je potreben, da ultrazvočno valovanje pride od oddajnika ultrazvočnih valov na sprednji strani stene do sprejemnika ultrazvočnih valov na zadnji strani stene. Čas prehoda ultrazvoka, ki smo ga izmerili na posameznem merilnem mestu, smo delili z debelino stene na tem mestu

in kot rezultat dobili hitrost ultrazvočnih valov. Uporabljena merilna naprava je prikazana na sliki 50, razdelitev stene na rastre pa na sliki 51.



Slika 50: Naprava za preiskave z ultrazvokom

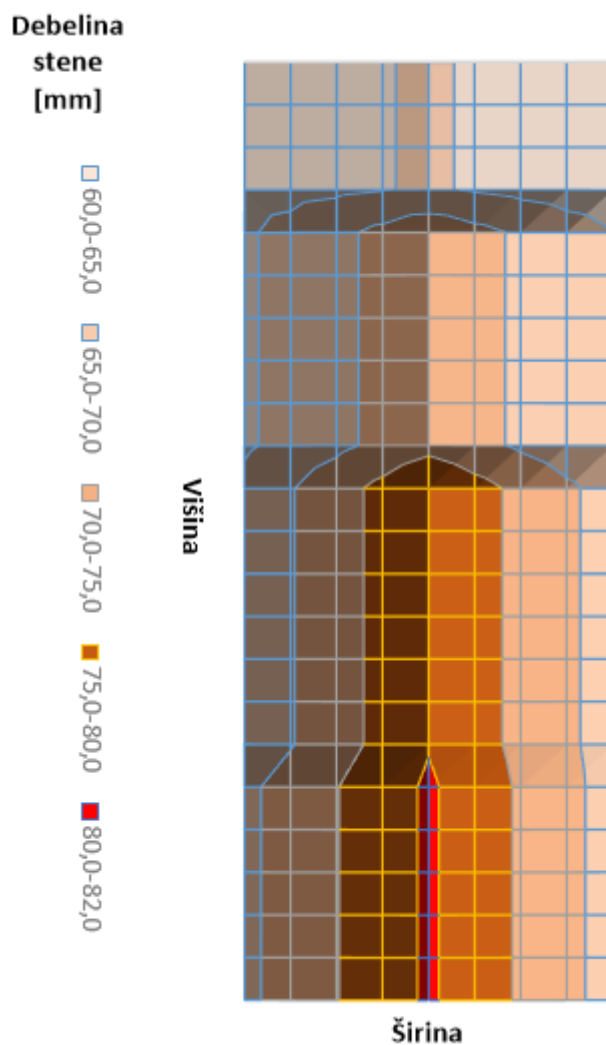
Figure 50: Device for testing using ultrasound



Slika 51: Raster na sprednji strani stene

Figure 51: Grid on front side of the wall

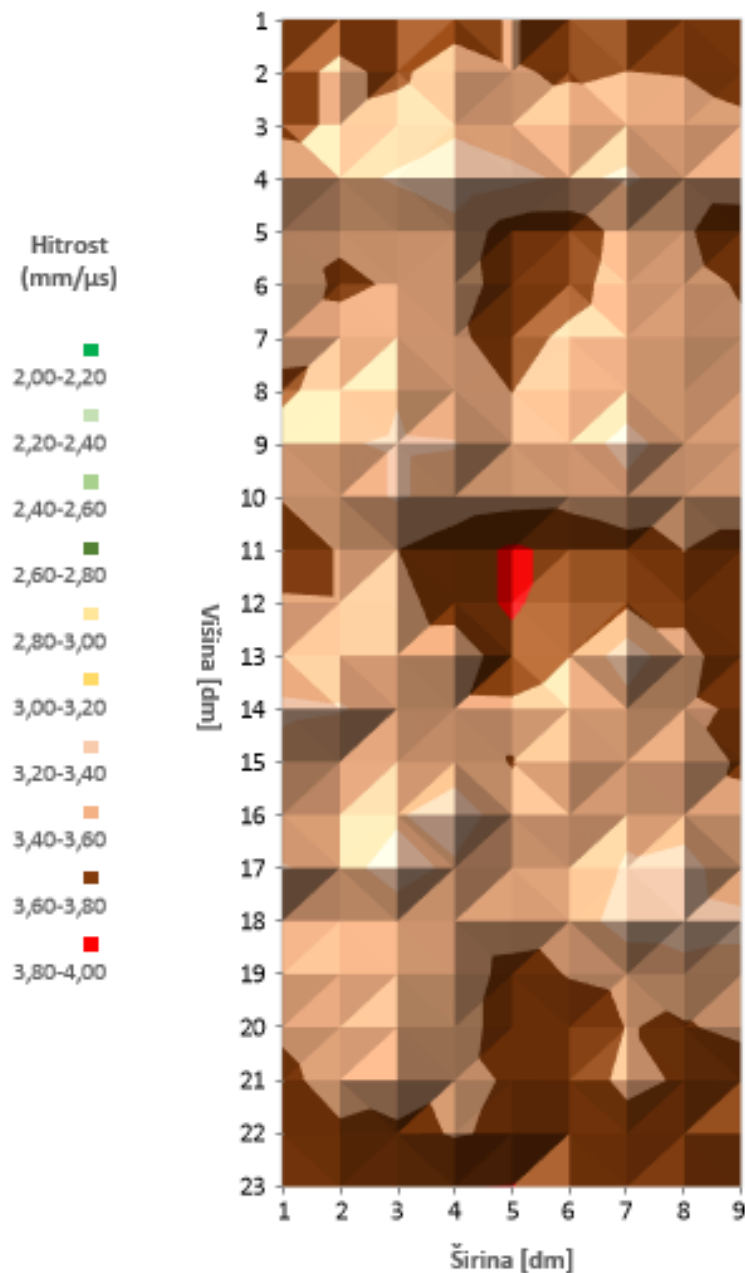
Na sliki 52 prikazujemo dejanske debeline stene v mm. Največja debelina je po sredini in na dnu stene. Vzrok temu je, da je opaž najmanj fiksiran ravno na sredini, torej se tam najprej izboči, ravno tako je na dnu največja sila pritiska betona, zato je tam izbočenje največje.



Slika 52: Debelina stene

Figure 52: Wall thickness

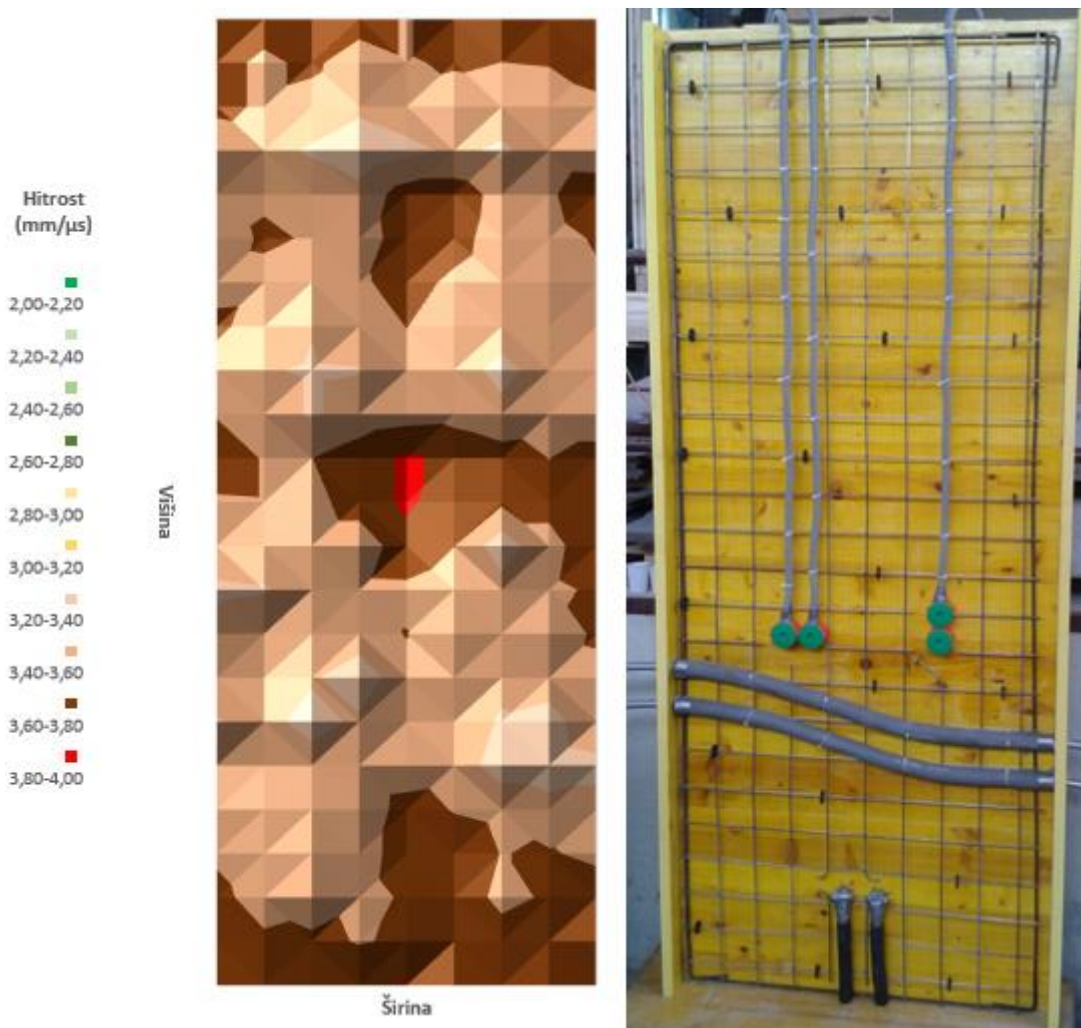
Hitrost ultrazvoka skozi steno prikazujemo na spodnji sliki (slika 52). Pri izračunu smo upoštevali ukrivljenost oziroma izbočenje stene. Manjša kot je gostota materiala, več časa je potrebno za prehod ultrazvočnega valovanja skozi steno. Z manjšanjem gostote ter podaljševanjem časa se posledično manjša tudi hitrost valovanja. Manjša gostota v betonu se lahko pojavi v delih, kjer je več zračnih mehurčkov in več lahkega agregata. V primeru segregacije lahek agregat splava na površje, težji ostane na dnu, ter jezato na vrhu stene manj gost material kot na njenem dnu.



Slika 53: Hitrost ultrazvočnega valovanja

Figure 53: Speed of ultrasonic waves

Na zgornji sliki (slika 53) so prikazane hitrosti ultrazvočnega valovanja skozi steno. Največje hitrosti so na dnu, kar je pričakovano, saj je najbolj gost beton spodaj. Zelo velike hitrosti so še na sredini stene, kjer je v okolici največ ovir (slika 54), katere zadržijo več materiala v okolici. Iz zgornjih rezultatov lahko zaključimo, da ne pride do segregacije betonske mešanice, saj je porazdelitev gostote (oziroma hitrosti ultrazvoka), po celotni steni približno enaka, saj so območja največjih hitrosti spodaj, v sredini ter tudi na vrhu stene.

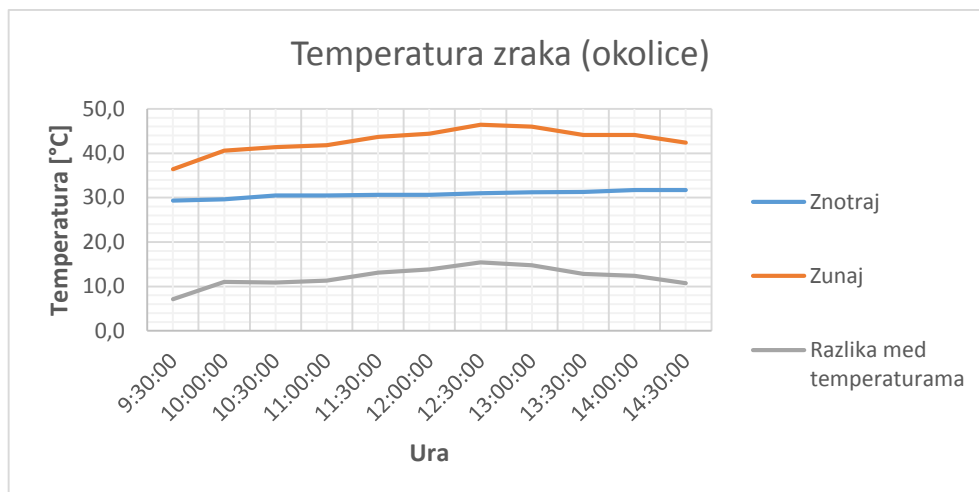


Slika 54: Primerjava med rezultati meritev z ultrazvokom in napeljavo v steni

Figure 54: Comparison of ultrasound measurements and installation in the wall

7.4 Meritve toplotnega toka

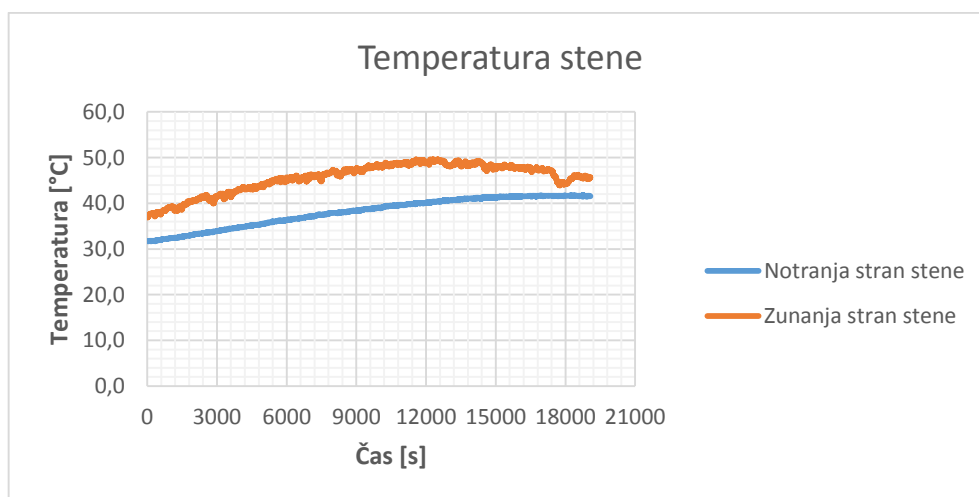
Meritve toplotnega toka smo opravili petindvajseti dan po razopaženju stene. Poiskus je potekal tako, da smo steno s sprednjo stranjo naslonili na zunanja vrata laboratorija, dimenzij 81,5 cm in 190,5 cm, pod kotom 87°. Ploščico za merjenje temperature stene, dimenzij 11 cm x 11 cm, smo namestili na zadnjo stran na sredino stene na višino 127 cm. Vreme je bilo sončno, temperature prikazujemo na spodnjem grafu (slika 55). Stanje, ki ga obravnavamo, ni čisto stacionarno stanje temveč realno stanje. Zunanja in notranja temperatura stene se približujeta ena drugi. Predvidevamo, da bo toplotna prevodnost betonske stene med 0,8 in 1 W/(m · K).



Slika 55: Temperatura zraka

Figure 55: Air temperature

Temperatura zraka znotraj laboratorija se ves čas rahlo povečuje. Zunanja temperatura zraka do 13:00 ure ves čas narašča, nato rahlo pade. Povprečna razlika med temperaturama znaša 12,1 °C. Zunanja temperatura je merjena neposredno na soncu.



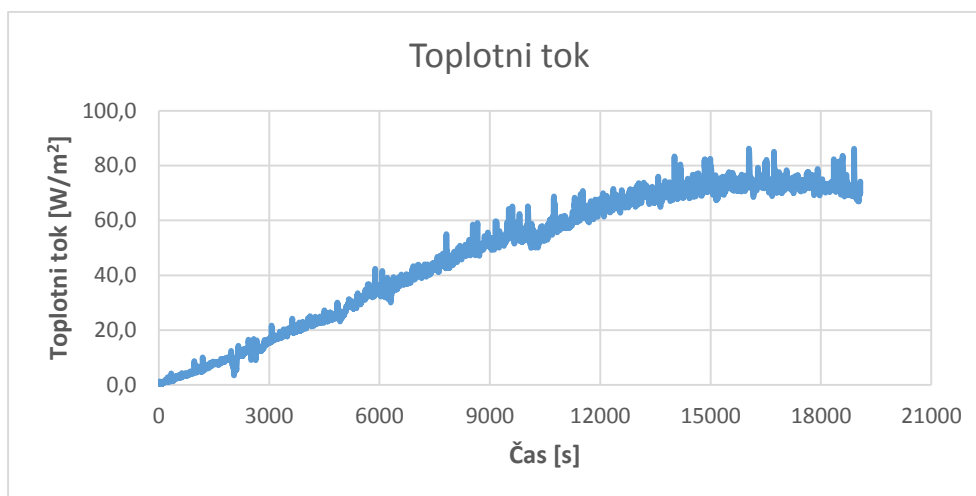
Slika 56: Temperatura stene

Figure 56: Wall temperature

Temperaturo, ki jo merimo neposredno na steni, prikazujemo na zgornji sliki. Merimo temperaturo na zunanji in notranji strani stene, s pomočjo programa nato izračunamo toplotni tok in toplotno prevodnost.

Temperaturi notranje in zunanje strani stene se približujeta ena drugi. V nekem trenutku dosežeta ravnovesje. Najvišja temperatura na zunanji strani znaša 49,6 °C, na notranji pa 41,8 °C, razlika med njima je 7,7 °C. Najnižja temperatura na zunanji strani stene je 34,5 °C, na notranji strani pa 31,0 °C, razlika med njima je 3,6 °C.

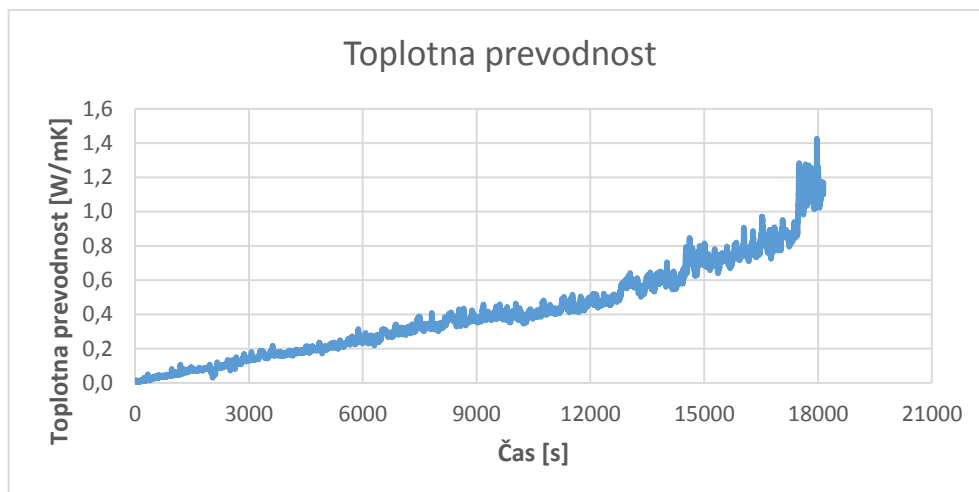
Toplotni tok, ki teče skozi steno, prikazujemo na spodnji sliki. Ta se s časom povečuje, nato pa se ustali pri približno 72,3 W/m². Toplotni tok teče iz mesta z višjo temperaturo proti mestu z nižjo temperaturo. Ko se temperaturi izenačita, toplotni tok preneha teči.



Slika 57: Toplotni tok skozi steno

Figure 57: Heat flow through the wall

Ko se toplotni tok ustali, lahko izračunamo toplotno prevodnost same stene. In sicer upoštevamo del, ko toplotna prevodnost ne narašča več. Dosežen plato (slika 58) nato povprečimo in dobimo vrednost koeficienta toplotne prevodnosti $\lambda = 1,12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Iz literature dobimo podatek, da toplotna prevodnost betona, ki vsebuje izključno lahki agregat lahko znaša do 0,13 W/(m · K) (Liapor high-quality expanded clay, 2015), medtem, ko toplotna prevodnost normalno težkega betona znaša med 0,8 W/(m · K) do približno 2,3 W/(m · K) (poglavje 2.2.2). Toplotna prevodnost betona pa je odvisna tudi od vsebnosti vlage v betonu. Lahek agregat deluje kot rezervoar za vodo, zato je v njem shranjen del vode. V daljšem časovnem obdobju se ta voda porabi za hidratacijo cementa, s tem pa se zmanjša toplotna prevodnost betona. Treba je tudi upoštevati, da so obravnavane betonske mešanice vsebovale le približno 16 % masni delež lahkega agregata, ostali deleži so bili pesek, cement in voda. Torej beton ni v celoti iz lahkega agregata, ampak vsebuje tudi del normalno težkega peska.



Slika 58: Toplotna prevodnost stene

Figure 58: Thermal conductivity of wall

8 ZAKLJUČEK

Kljub temu, da je zelo razširjena uporaba betona v gradbeništvu, pa beton iz lahkega agregata ni splošno sprejet kot konstrukcijski material. Čeprav z uporabo takšnega betona dobimo manjšo lastno težo konstrukcijskih elementov ter izboljšane izolativne sposobnosti. Razlogov za neuporabo lahkoagregatnega betona je več. Konstrukcijsko gledano je tlačna trdnost, ki je primarno najpomembnejša lastnost betona, nižja v primerjavi z normalno težkim betonom. Poleg pomanjkanja splošno sprejetih smernic ter neobvladovanju tehnologije proizvodnje in vgradnje pa prevladuje še relativno visoka cena materiala, kar v trenutnih razmerah na trgu še dodatno znižuje uporabo lahkega agregata pri pripravi betona.

V magistrski nalogi smo se osredotočili na samozgoščevalni beton iz lahkega agregata. Takšen beton je samo zaradi delovanja lastne teže popolnoma sam sposoben zapolniti opaž poljubne oblike. Takšne lastnosti dosežemo z uporabo ustreznih materialov, s povečanim deležem praškastih delcev ter uporabo superplastifikatorjev. Glavni problem pri uporabi lahkega agregata je zagotavljanje stabilnosti betonske mešanice. Lahka agregatna zrna namreč pri preveč tekoči mešanici zelo hitro splavajo na površje. Takšen problem rešujemo tako, da mešanico naredimo dovolj viskozno, da »prime« lahek agregat, da ta ne splava na površje.

V okviru magistrske naloge smo sodelovali s slovenskim podjetjem, ki izdeluje predizdelane elemente iz betona. Podjetje nam je dobavilo večino potrebnih materialov in podalo osnovne zahteve za beton. Doseči je bilo treba ustrezno tlačno trdnost, majhno gostoto betona ter primerne obdelovalne lastnosti. Pri preiskavah smo izhajali iz rezultatov predhodnih raziskav na KPMK, katere smo ustrezno modificirali.

Lahek agregat ima veliko sposobnost vpijanja vode. Pomembno je, da ustrezno spremljamo vlažnostne parametre materiala (vhodne podatke), saj le tako lahko določimo ustrezno sestavo betonske mešanice. Popolnoma suh lahek agregat je pri obravnavanem materialu po enem dnevu vpil kar 23,5 % vode, zato smo zračno suh material, ki je vseboval nekaj manj kot 20 % vode, poškopili v 6 % vode in ga pustili odležavati 24 ur v zaprti posodi. S tem smo zagotovili, da lahek agregat med mešanjem betona ne vpije dela zmesne vode, kar bi bistveno vplivalo na hitro izgubljanje obdelavnost svežega betona.

Drug pomemben vhodni parameter je zrnastostna sestava lahkega agregata. V našem primeru smo ugotovili različno zrnastostno sestavo v dveh zabojih, ki smo jih uporabili. Drugi zaboj je vseboval bolj drobnozrnat material, kar pomeni višjo gostoto betona. Prvi zaboj smo uporabili za preliminarne mešanice, medtem ko smo drug zaboj uporabili za glavno skupino mešanic.

Recepturo betona za izhodiščno mešanico smo pridobili na podlagi predhodnih raziskav na KPMK. Z ustreznim dodajanjem superplastifikatorja in aeranta smo mešanico modificirali, tako, da smo dobili

ustrezen razlez, majhno gostoto ter zadostno tlačno trdnost. Pojavijo se razlike v lastnostih svežega in posledično tudi strjenega betona, če beton mešamo v malem ($4 - 5 \text{ dm}^3$) ali velikem mešalcu (50 dm^3). Mešanice z malim mešalcem imajo nižjo tlačno trdnost ter nižjo gostoto, kot mešanice pripravljene v velikem mešalcu. Vzrok temu je verjetno oblika lopatic, ki je popolnoma različna ter hitrost mešanja, ki se pri obeh mešalcih prav tako razlikuje. Pri mešanju v malem mešalcu je delovanje aeranta bolj učinkovito in posledično vsebuje beton več zraka in s tem nižjo gostoto in nižjo tlačno trdnost, kot beton enake sestave zamešan v velikem mešalcu. Poleg tega obstaja še drugi vplivni parametri. V primeru da sestavine odstopajo od izračunane oziroma ocenjene vrednosti (npr. vlažnost, masa, ipd.) to v velikem mešalcu pomeni manjši vpliv na končne lastnosti mešanice, saj se vpliv porazdeli na večjo količino materiala.

Glavno skupino mešanic smo določili na podlagi modificirane preliminarnе mešanice. To mešanico smo nato kombinirali z različnimi dodatki, pri čemer smo preverjali njihov vpliv na reološke lastnosti. Vpliv vrste in količine dodatka na reološke parametre sveže mešanice ni bil vedno enak vplivu, ki ga za enako sestavino lahko najdemo v literaturi. Vzrok temu je verjetno uporaba lokalnih osnovnih sestavin z drugačnimi lastnostmi.

V sklopu prvih mešanic glavne skupine smo postopno dodajali več aeranta, ostale sestavine pa so ostale enake. Večanje deleža aeranta je zmanjševalo plastično viskoznost in razlez s posedom, medtem, ko se je napetost na meji tečenja povečevala. Zračni mehurčki v betonu namreč delujejo kot kroglični ležaji, večjim delcem namreč omogočajo, da se lažje premikajo eden mimo drugega (Banfill, 2006). Pričakovano se je zmanjšala tudi gostota betona ter enodnevna tlačna trdnost, saj zaradi aeranta v betonu nastaja več zračnih mehurčkov.

V sklopu drugih mešanic glavne skupine smo dodajali gostilec. Najprej smo zmanjšali količino cementa in povečali količino vode, nato pa smo glede na novo količino cementa dodajali gostilec. Njegovo dodajanje je povečalo plastično viskoznost in napetost na meji tečenja, medtem ko se je razlez s posedom zmanjševal. Gostilec namreč zmanjšuje mobilnost vode v betonu s tem, da jo zadrži in zmanjša njeno izločanje, kar poveča viskoznost (Wallevik, 2009, Hočevnar, 2013). Gostota betona ter enodnevna tlačna trdnost se z dodajanjem gostilca povečujeta, kar je verjetno posledica vpliva gostilca na vsebnost zračnih por. Ocenjujemo namreč, da uporabljen gostilec poslabša ali celo onemogoči delovanje aeranta.

V sklopu tretjih mešanic glavne skupine smo dodajali apnenčevo moko. S tem smo želeli zmanjšati predvsem količino cementa in s tem tudi ceno betona ter še dodatno zmanjšati gostoto betona, saj smo za enako količino dodane moke odvzeli cement, pri katerem je gostota zrn večja od gostote zrn apnenčeve moke. Dodajanje moke je zmanjšalo plastično viskoznost in napetost na meji tečenja, medtem ko se je razlez s posedom povečeval. Apnenčeva moka skupaj s cementom namreč oblikuje debelo plast paste med agregatnimi zrni, kar omogoča neovirano gibanje večjih zrn agregata, ter tako

povečuje razlez. Gostota betona in enodnevna tlačna trdnost se v skladu s pričakovanji zmanjšata, saj se je vodo-cementno razmerje z večanjem deleža moke večalo.

V sklopu četrth mešanic glavne skupine smo namesto prvotnega cementa dodali drug cement. Kemijski dodatki lahko namreč popolnoma drugače vplivajo na različne cemente. To se je izkazalo tudi v našem primeru. Mešanica z enakimi količinami sestavin, le z drugim cementom, je imela višjo gostoto ter višjo enodnevno tlačno trdnost. Ravno tako je opaziti tudi nasproten trend naraščanja oziroma padanja pri plastični viskoznosti in napetosti na meji tečenja, pri dodajanju aeranta mešanicam z različnim cementom.

Izbrano mešanico smo nato pripravili v velikem mešalcu ter z betonom zapolnili steno dimenzij 100 cm x 230 cm x 6 cm, z raznimi napeljavami (ovire). S tem smo preverili sposobnost zapolnjevanja lahkoagregatnega samozgoščevalnega betona in njegovo odpornost proti segregaciji. Betonska mešanica je, brez da bi beton vibrirali, v celoti zapolnila opaž. Segregacije betona ni bilo, kar smo preverili tudi s preiskavo z ultrazvokom. Merili smo čas prehoda ultrazvoka iz ene strani stene na drugo stran, potem pa izračunali še hitrost potovanja ultrazvoka skozi steno. Večja kot je hitrost, večja je gostota materiala. V našem primeru je bila gostota betona enakomerno razporejena po celotni steni, s čimer smo potrdili homogeno sestavo betona v steni

Nazadnje smo opravili še meritve toplotnega toka skozi steno. Zanimala nas je toplotna prevodnost takšne stene. Rezultati meritev so pokazali, da je koeficient toplotne prevodnosti obravnavane betonske stene $\lambda = 1,12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Pričakovali smo vrednost za λ med 0,8 in 1 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, rezultati so torej realni. Nekoliko višja vrednost dobljene toplotne prevodnosti je verjetno posledica dejstva, da beton ni v celoti narejen iz lahkega agregata ampak le delno, saj vsebuje še normalno težek agregat.

Velja še izpostaviti težko doseženo ponovljivost preiskav na posameznih mešanicah, kljub velikemu številu mešanj (ponovitev preiskav na enaki mešanici), ter nekonsistenčnost mešanic narejenih v malem in velikem mešalcu. Kot priporočilo za nadaljnje delo bi izpostavil, da se opazuje natančen vpliv enega dodatka s povečevanjem v manjših korakih ter z velikim številom mešanic, pripravljenih v malem mešalcu. Nato pa se pokaže primerjava še z nekaj mešanicami, pripravljenimi v velikem mešalcu. Zgornji rezultati so namreč zgolj osnovni pokazatelj, v katero smer kažejo reološki parametri v primeru dodajanja različnih dodatkov lahkoagregatnemu betonu.

VIRI IN LITERATURA

- Aitcin, P., C., Mindess, S. 2011. Sustainability of Concrete. Spon Press, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon: str. 301.
- Banfill, P., F., G. 2006. Rheology of fresh cement and concrete. School of the Built Environment, Heriot-Watt University Edinburgh, UK: str. 61-130.
- Bartos, P. J. M., Sonebi, M., Tamimi, A. K. 2002. Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests – Report of RILEM TC 145-WSM. RILEM: 156 str.
- Bodnarova, L., Hela, R., Hubertova, M., Novakova, I. 2014. Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures. Faculty of Civil engineering, Brno University of Technology. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering Vol:8 No:12, 2014: str. 1139-1142.
- Bokan Bosiljkov, V. 2003. Samozgoščevalni betoni – največji napredek v tehnologiji betona zadnjih nekaj desetletij. Pomursko Akademsko Znanstvena Unija. Prispevek na znanstveni konferenci 2003: 2 str.
- Bokan Bosiljkov, V. 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. Cement and Concrete Research 33,9: str. 1279-1286.
- Bremner, T. W., Ries, J. P. 2007. How lightweight aggregate contributes to sustainability. University of New Brunswick, Canada. The Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI), USA: 14 str.
- Bremner, T. W., Ries, J. P., Wolfe, W. H. 2013. Environmentally friendly uses of lightweight aggregates. Department of Civil Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, N. B., Canada, ESCSI, Norlite Corporation: 9 str.
- ESCSI Expanded Shale, Clay and Slate Institute. 1971. Lightweight concrete, history, applications, economics: 43 str.
- Hackley, V. A., Ferraris, C. F. 2001. Use of nomenclature in Dispersion Science and Technology. Washington, National Institute of Standards and Technology: 72 str.
- Hela, R., Hubertova, M. 2005a. Development of lightweight self-compacting concrete using Liapor lightweight aggregate. Centre for Integrated Design of Advanced Structures: 2 str.
- Hela, R., Hubertova, M. 2005b. Development of self compacting lightweight concrete using lightweight Liapor aggregate. Centre for Integrated Design of Advanced Structures: 2 str.

Hočevar, A. 2013. Reološke lastnosti cementnih kompozitov v svežem stanju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba A. Hočevar): 165 str.

Hočevar, A., Bokan Bosiljkov, V., Kavčič, F. 2010. Preizkušanje svežih betonov – uvod v reologijo. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Konferenčni zbornik: 32 zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Slovenija, 7.-8. oktober, 2010. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 207-216.

Hubertova, M., Hela, R. 2007. Development and experimental study on the properties of lightweight self compacting concrete. Brno University of Technology, Institute of Technology of Building Materials and Components, Brno, Czech Republic. LSM k.s. (Liapor), Czech Republic. 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete: str. 851-856.

Hubertova, M., Hela, R., Stavinoha, R. 2009. Durability of light-weight concrete with expanded clay aggregate. R and D in Lias Vintirov, LSM (Light-weight Building Material) k.s., Czech Republic, Department of Civil Engineering, Brno University of Technology, Institute of Technology of Building Materials and Components, Brno, Czech Republic. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II: str. 117-122.

Hubertova, M., Hela, R., Stavinoha, R. 2010. Expanded clay thermo insulating concrete. Lias Vintirov, lehký stavbení materiál k.s., Czech Republic. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Czech Republic. CESB10 Prague: 8 str.

Kim, Y. J., Choi, Y. W., Lachemi, M. 2010a. Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon, Korea. Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, Korea. Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Canada. Construction and Buildings Materials 24 (2010): str. 11-16.

Kim, Y. J., Jeon, S. J., Choi, M. S., Kim, Y. J., Choi, Y. W. 2010b. The quality properties of self consolidating concrete using lightweight aggregate. Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon, Korea. Semyung University, Jecheon, Korea. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – High Performance, Fiber reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications: str. 1342-1346.

Koehler, E. P., Fowler, D. W. 2004. Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete, ICAR report 105-3F Austin, ICAR: 306 str.

Maghsoudi, A. A., Mohamadpour, Sh., Maghsoudi, M., 2011. Mix design and mechanical properties of self compacting light weight concrete. Civil Engineering Department, Shaheed Bahonar University of

Kerman, Kerman, Iran. International Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 3, September 2011: str. 230-236.

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. 2014. Concrete: Microstructure, Properties and Materials, Fourth Edition. New York. McGraw-Hill Education: 675 str.

Miketič, A. 2013. Samozgoščevalni betoni z agregatom iz ekspanzirane gline. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba A. Miketič): 74 str.

Saje, D. 2013. Študijsko gradivo pri predmetu Izbrana poglavja iz masivnih konstrukcij. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 55 str.

Skarendahl, A., Petersson, Ö. 2000. Self-Compacting Concrete – State of the Art Report of RILEM TC 174-SCC. RILEM: 168 str.

Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba M. Uranjek): 261 str.

Van Boggelen, W. 2014. History of Autoclaved Aerated Concrete. Aircrete Europe B.V., Oldenzaal, The Netherlands: 8 str.

Wallevik, O. H. 2009. Introduction to rheology of fresh concrete. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219 str.

Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., Ding, Y. 2009. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dailan University of Technology, Dailan, China. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China. Construction and Buildings Materials 23 (2009): str. 2087-2092.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 351 str.

Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V. 2009. Delovni zvezek gradiva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. 146 str.

Žnidaršič, M. 2007. Vpliv konsistence, aeriranja in trajne mokre nege na odpornost betona z večjim deležem kamene moke proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba M. Žnidaršič): 90 str.

Žnidaršič, Š. 2012. Vpliv vsebnosti jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata na krčenje betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba Š. Žnidaršič): 35 str.

Standardi:

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

ACI 213R-03. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete.

ACI 213R-79. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete.

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

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

SIST EN 197-1:2011. Cement – 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.

SIST EN 206:2013. Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

SIST EN 934-2:2002. Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso – 2. del: Kemijski dodatki za beton – Definicije, zahteve, skladnost, označevanje in obležavanje.

Internetni viri:

Cementol Gostilec L. 2015. <http://www.tkk.si/si/izdelki/izdelki-glede-na-lastnosti/gradimo-in-saniramo/cementol/kemijski-dodatki-za-zadrzevanje-vode-in-podvodno-betoniranje/cementol-gostilec-l> (Pridobljeno 6. 8. 2015.)

Leca. 2015. <http://www.leca.qa/> (Pridobljeno 1. 3. 2015.)

Leca Building Material LLC. 2015. http://www.aeonline.ae/13/company/21/90/97/company_13.html (Pridobljeno 2. 3. 2015.)

Leca Light Expanded Clay Aggregate. 2015. <http://www.leca.ae/> (Pridobljeno 1. 3. 2015.)

Liapor high-quality expanded clay. 2015. <http://www.liapor.com/en/start.php> (Pridobljeno 5. 3. 2015.)