

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:

Kresal, B., 2016. Vpliv kemijskih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V., somentor Hočevar, A.): 59 str.

Datum arhiviranja: 11-07-2016

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:

Kresal, B., 2016. Vpliv kemijskih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V., co-supervisor Hočevar, A.): 59 pp.

Archiving Date: 11-07-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

BOJAN KRESAL

**VPLIV KEMIJSKIH DODATKOV NA REOLOŠKE
LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA**

Diplomska naloga št.: 536/SOG

**INFLUENCE OF CHEMICAL ADMIXTURES ON
RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRESH CONCRETE**

Graduation thesis No.: 536/SOG

Mentorica:

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

dr. Andraž Hočevar

Ljubljana, 30. 06. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent Bojan Kresal, vpisna številka 26108264, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Vpliv kemijskih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona

IZJAVLJAM**1. Obkrožite eno od variant a) ali b)**

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|--|
| UDK: | 624.012.4:691.3(497.4)(043.2) |
| Avtor: | Bojan Kresal |
| Mentor: | prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad. |
| Somentor: | dr. Andraž Hočevar, univ. dipl. inž. grad. |
| Naslov: | Vpliv kemijskih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona |
| Tip dokumenta: | diplomska naloga |
| Obseg in oprema: | 59 str., 32 pregl., 21 sl., 35 graf. |
| Gljučne besede: | sveža betonska mešanica, reologija, posed, razlez, plastična viskoznost, strižna napetost na meji tečenja |

Izveček

V okviru diplome smo izvajali raziskave na svežem betonu. Glavni namen raziskav je bil preučiti vpliv kemijskih dodatkov na reološke lastnosti sveže betonske mešanice. Meritve reoloških parametrov smo izvajali z reometrom ConTec Viscometer 5. Vzporedno smo izvajali tudi preiskave poseda in razleza svežega betona ter pri uporabi aeranta določili še delež zraka v betonu. Vse mešanice so bile sestavljene iz agregata, vode in cementa ter kemijskega dodatka. Kot kemijski dodatek smo uporabili superplastifikator, aerant in stabilizator. Uporabili smo tudi dve različni vrsti cementa. Dobljene rezultate smo analizirali ter opravili primerjave med strižno napetostjo na meji tečenja in plastično viskoznostjo ter posedom in razlezom svežega betona, v različnih časih po zamešanju betona.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.012.4:691.3(497.4)(043.2)
Author: Bojan Kresal
Supervisor: Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.
Cosupervisor: Andraž Hočevar, Ph. D
Title: Influence of chemical admixtures on rheological properties of fresh concrete
Document type: Graduation Thesis
Scope and tools 59 p., 32 tab., 21 fig., 35 sch.
Key words: fresh concrete mixture, rheology, slump, flow, plastic viscosity, shear yield stress

Abstract

Within the thesis we carried out tests on fresh concrete mixtures. The main purpose of the tests was to examine the influence of chemical admixtures on rheological properties of fresh concrete. Measurement of rheological parameters was carried out with ConTec Viscometer 5 rheometer. In parallel, we also carried out slump test and flow table test on fresh mixtures and determined air content for mixtures with air-entraining agent. All concrete mixtures were composed of aggregate, water, cement and chemical admixture. As admixture, superplasticizer, air-entraining agent and stabilizer were used. We also used two different types of cement. The obtained results were analysed and comparison between shear yield stress and plastic viscosity, as well as slump and flow value were made in different times after mixing of fresh concrete.

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil svoji mentorici prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov in somentorju dr. Andražu Hočevarju za strokovno svetovanje, potrpežljivost in spodbudo pri nastajanju diplomskega dela.

Zahvalil bi se tudi ženi Katji, svojim staršem, Nacetu, Piki in Tini za spodbudo v času izdelovanja naloge ter za podporo v času študija.

Hvala tudi prijateljem in sošolcem za nepozabne trenutke v času študija.

KAZALO VSEBINE

| | |
|---|------------|
| STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA | I |
| IZJAVE | II |
| BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK | III |
| BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT | IV |
| ZAHVALA | V |
| 1 UVOD | 1 |
| 2 SPLOŠNO O BETONU | 2 |
| 2.1 Uvod v beton | 2 |
| 2.2 Voda v betonu | 3 |
| 2.3 Mineralni agregat | 4 |
| 2.3.1 Zrnastostna sestava agregata | 5 |
| 2.3.2 Oblika zrn agregata | 6 |
| 2.3.3 Vlažnost agregata | 6 |
| 2.3.4 Trdnost agregata | 7 |
| 2.4 Cement | 7 |
| 2.4.1 Proizvodnja cementa | 8 |
| 2.4.2 Regulatorna na področju cementov | 9 |
| 2.4.3 Čisti portlandski cement (CEM I) | 11 |
| 2.5 Kemijski dodatki | 11 |
| 3 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA | 16 |
| 3.1 Uvod v reologijo | 16 |
| 3.2 Namen reoloških meritev | 16 |
| 3.3 Klasifikacija tekočin | 17 |
| 3.4 Bingham-ov model tekočine | 18 |
| 3.5 Reometri | 19 |
| 3.5.1 Koaksialni valjasti reometer | 20 |
| 4 METODE PREISKAV | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1 Preizkus z razlezom | 21 |
| 4.2 Preizkus s posedom | 23 |
| 4.3 Določanje deleža por v svežem betonu | 25 |
| 4.4 Preiskave z reometrom | 26 |
| 5 OPIS UPORABLJENIH MATERIALOV IN RECEPTURA BETONSKIH MEŠANIC | 27 |
| 5.1 Cement | 27 |
| 5.2 Voda | 28 |
| 5.3 Agregat | 28 |
| 5.4 Superplastifikator | 29 |
| 5.5 Aerant | 29 |
| 5.6 Stabilizator | 30 |
| 5.7 Receptura betonskih mešanic | 30 |
| 5.7.1 Osnovna betonska mešanica | 30 |
| 5.7.2 Skupina mešanic, pri katerih smo večali količino superplastifikatorja | 33 |
| 5.7.3 Skupina mešanic, pri katerih smo večali količino aeranta | 34 |
| 5.7.4 Skupina mešanic, pri katerih smo večali količino stabilizatorja | 34 |
| 6 REZULTATI MERITEV | 36 |
| 6.1 Betonske mešanice z različnima cementoma in različnimi deleži superplastifikatorja | 37 |
| 6.2 Betonske mešanice z različnimi deleži aeranta | 47 |
| 6.3 Mešanice z različnimi deleži stabilizatorja | 52 |
| 7 ZAKLJUČEK | 56 |
| VIRI | 57 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|--|----|
| Preglednica 1 : 27 vrst običajnih cementov po SIST EN 197-1 [6] | 10 |
| Preglednica 2 : Parametri Bingham-ovega modela tekočne [20] | 19 |
| Preglednica 3 : Stopnje razleza | 23 |
| Preglednica 4 : Stopnje poseda | 24 |
| Preglednica 5 : Lastnosti cementa CEM I 42,5 R [15] | 27 |
| Preglednica 6 : Karakteristike cementa CEM II/A -M (LL-S) 42,5 R [14] | 27 |
| Preglednica 7 : Zrnavost posameznih frakcij | 28 |
| Preglednica 8 :Karakteristike uporabljenega PCE superplastifikatorja [11] | 29 |
| Preglednica 9 : Lastnosti aeranta [12] | 30 |
| Preglednica 10 : Lastnosti stabilizatorja [13] | 30 |
| Preglednica 11 : Delež PCE superplastifikatorja dodanega osnovni mešanici CR-1 | 33 |
| Preglednica 12 : Delež PCE superplastifikatorja dodanega osnovni mešanici CL-1 | 34 |
| Preglednica 13 : Delež aeranta, dodanega osnovni mešanici CR-1 | 34 |
| Preglednica 14 : Delež stabilizatorja dodanega osnovni mešanici CL-1 | 35 |
| Preglednica 15 : Rezultati meritev za betone skupine CR-1 pri času $t = 0$ | 37 |
| Preglednica 16 : Rezultati meritev za betone skupine CL-1 pri času $t = 0$ | 37 |
| Preglednica 17 : Rezultati preiskav na betonu CR-1 – vpliv časa | 39 |
| Preglednica 18 : Rezultati preiskav na betonu CL-1 – vpliv časa | 39 |
| Preglednica 19 : Rezultati preiskav na betonu CR-1a – vpliv časa | 41 |
| Preglednica 20 : Rezultati preiskav na betonu CL-1a – vpliv časa | 41 |
| Preglednica 21 : Rezultati preiskav na betonu CR-1b – vpliv časa | 43 |
| Preglednica 22 : Rezultati preiskav na betonu CL-1b – vpliv časa | 43 |
| Preglednica 23 : Rezultati preiskav na betonu CR-1c – vpliv časa | 45 |
| Preglednica 24 : Rezultati preiskav na betonu CL-1c – vpliv časa | 45 |
| Preglednica 25 : Rezultati preiskav betonske mešanice CRA-1 pri času $t = 0$ | 47 |
| Preglednica 26 : Rezultati preiskav za beton CRA-1a – vpliv časa | 48 |
| Preglednica 27 : Rezultati preiskav za beton CRA-1c – vpliv časa | 49 |
| Preglednica 28 : Rezultati preiskav za beton CRA-1b – vpliv časa | 50 |
| Preglednica 29 : Rezultati preiskav CG-1 pri času $t = 0$ | 52 |
| Preglednica 30 : Rezultati preiskav za beton CG-1a – vpliv časa | 53 |
| Preglednica 31 : Rezultati preiskav za beton CG-1b – vpliv časa | 54 |
| Preglednica 32 : Rezultati preiskav za beton CG-1c – vpliv časa | 55 |

KAZALO SLIK

| | |
|---|----|
| Slika 1 : Struktura betona s prodrom (levo) in drobljenim agregatom (desno) | 2 |
| Slika 2(levo) : Gramoznica[30] | 4 |
| Slika 3(desno) : Kamnolom[31] | 4 |
| Slika 4 : Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm (SIST 1026:2016) | 5 |
| Slika 5 : Shematski prikaz postopka sejanja agregata [32] | 6 |
| Slika 6 : Shematski prikaz stopenj vlažnosti agregata [33] | 7 |
| Slika 7 : Tehnološka shema proizvodnje cementa (A. Ipavec, 2013 – vir: A. Ipavec, Tehnološki proces proizvodnje cementa v Salonitu Anhovo, prezentacija za študente UL FGG, Anhovo, 18.10.2013) | 8 |
| Slika 8 : Razmerje med navorom, ki ga merimo z reometrom, in strižno napetostjo. | 18 |
| Slika 9(levo) : Program FRESHwin | 20 |
| Slika 10(desno) : Cemagref IMG [20] | 20 |
| Slika 11 : Oprema za preiskus z razlezom | 21 |
| Slika 12 : Potek preizkusa (SIST EN12350-5: 2009) | 21 |
| Slika 13 : Mejenje razleza $d = (d_1+d_2) / 2$ (SIST EN12350-5: 2009) | 22 |
| Slika 14 : Razlezna miza in kalup (SIST EN12350-5: 2009) | 22 |
| Slika 15 : Oprema za preiskus s posedom | 23 |
| Slika 16 : Meritev poseda (SIST EN 12350-2:2009) | 24 |
| Slika 17 : Oblike poseda (SIST EN 12350-2:2009) | 25 |
| Slika 18 : Poroziometer [35] | 26 |
| Slika 19 : ConTec VISCOMETER 5 | 26 |
| Slika 20 (levo) : Tehnica | 36 |
| Slika 21 (desno) : Mešalec | 36 |

KAZALO GRAFKONOV

| | |
|--|----|
| Grafikon 1 : Zrnavostne sestave posameznih frakcij in agregata | 28 |
| Grafikon 2 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od deleža SP v času $t = 0$ pri sestavah CR-1 | 37 |
| Grafikon 3 : Posed in razlez v odvisnosti od deleža SP pri času $t = 0$ pri sestavah CR-1 | 37 |
| Grafikon 4 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od deleža SP v času $t = 0$ pri sestavah CL-1 | 38 |
| Grafikon 5 : Posed in razlez v odvisnosti od deleža SP pri času $t = 0$ pri sestavah CL-1 | 38 |
| Grafikon 6 : Posed in razlez brez dodanega SP pri mešanici CL-1 v odvisnosti od časa | 40 |
| Grafikon 7 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja pri mešanici CL-1 brez dodanega SP v odvisnosti od časa | 40 |
| Grafikon 8 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1a | 42 |
| Grafikon 9: Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1a | 42 |
| Grafikon 10 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CL1a | 42 |
| Grafikon 11 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CL1a | 42 |
| Grafikon 12 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1b | 44 |
| Grafikon 13 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1b | 44 |
| Grafikon 14 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CL-1b | 44 |
| Grafikon 15 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CL-1b | 44 |
| Grafikon 16 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1c | 46 |
| Grafikon 17 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1c | 46 |
| Grafikon 18 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CL-1c | 46 |
| Grafikon 19 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CL-1c | 46 |
| Grafikon 20 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji plastičnosti v odvisnosti od deleža aeranta v času $t = 0$ | 47 |
| Grafikon 21 : Posed in razlez v odvisnosti od deleža aeranta v času $t = 0$ | 47 |
| Grafikon 22 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1a | 48 |
| Grafikon 23 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1a | 48 |
| Grafikon 24 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1c | 49 |

| | |
|--|----|
| Grafikon 25 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1c | 49 |
| Grafikon 26 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1b | 50 |
| Grafikon 27 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1b | 50 |
| Grafikon 28 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od deleža stabilizatorja v času $t = 0$ | 52 |
| Grafikon 29: Posed in razlez v odvisnosti od deleža stabilizatorja pri času $t = 0$ | 52 |
| Grafikon 30 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1a | 53 |
| Grafikon 31 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1a | 53 |
| Grafikon 32 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1b | 54 |
| Grafikon 33 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1b | 54 |
| Grafikon 34 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1c | 55 |
| Grafikon 35 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CG 1c | 55 |

KRATICE

| | |
|----------------|---|
| V/C | Vodocementno razmerje |
| P | Plastifikator |
| SP | Superplastifikator |
| HP | Hiperplastifikator |
| f_c | Tlačna trdnost |
| τ | Strižna napetost |
| γ | Strižna hitrost |
| η | Koeficient viskoznosti |
| $\tau_0, SNMT$ | Strižna napetost na meji tečenja |
| T | Navor |
| N | Hitrost vrtenja |
| H | Koeficient viskoznosti (odpornost proti naraščajoči hitrosti gibanja) |
| t | Čas |

1 UVOD

Beton je najbolj razširjen gradbeni material, ki ga z vgrajevanjem v opaže poljubno oblikujemo. V strjenem stanju dosegamo zahtevano tlačno trdnost, prostorninsko obstojnost ter trajnost betona. Najpogostejši parametri trajnosti so odpornost proti karbonatizaciji, odpornost proti obrabi, odpornost proti prodoru vode in odpornost proti zmrzovanju. Glavne sestavine betonske mešanice so mineralni agregat, portlandski cement in voda. Moderni beton pa pogosto vsebujejo tudi mineralne in/ali kemijske dodatke. Ti dodatki izboljšajo lastnosti betona v svežem ali strjenem stanju.

V preteklosti so strokovnjaki s področja tehnologije betona veliko pozornosti namenjali predvsem lastnostim in raziskavam strjenih betonov. Danes pa se daje vse več pozornosti tudi raziskavam na svežih mešanicah. Obnašanje svežega betona in delo z njim močno vplivata na lastnosti strjenega betona. Zato je treba najprej doseči ustrezne lastnosti betona v svežem stanju. V praksi se za preverjanje lastnosti svežega betona še vedno uporabljajo preizkusne metode, s katerimi ocenjujemo obdelavnost betona v skladu s standardiziranimi postopki.

Zaradi novih materialov in tehnologij gradnje se na raziskovalnem področju že uporabljajo nove preizkusne metode, ki temeljijo na določanju fizikalnih lastnosti svežih betonov. Cilj novih preizkusnih metod je natančnejše ovrednotenje lastnosti svežih betonov. Temu cilju se je za zdaj najbolj približala metoda merjenja reoloških lastnosti svežih mešanic z reometrom. Preiskave svežih betonov z reometrom so zato jedro te diplomske naloge. Pri meritvah smo uporabljali koaksialni valjasti reometer ConTec VISCOMETER 5. Proučevali smo vpliv kemijskih dodatkov na lastnosti svežega betona takoj po zamešanju betona (čas 0 minut) ter po 20, 40 in 60 minutah po zamešanju. Vzporedno smo izvajali tudi preiskave poseda in razleza svežega betona ter pri uporabi aeranta še delež zraka v betonu. Osnovne sestavine betona so bile drobljen karbonatni agregat, portlandski cement in voda. Kot kemijski dodatek smo uporabili superplastifikator, aerant in stabilizator. Uporabili smo tudi dve različni vrsti cementa. Rezultate preiskav smo analizirali ter opravili primerjave med strižno napetostjo na meji tečenja in plastično viskoznostjo ter posedom in razlezom svežega betona, v različnih časih po zamešanju mešanice.

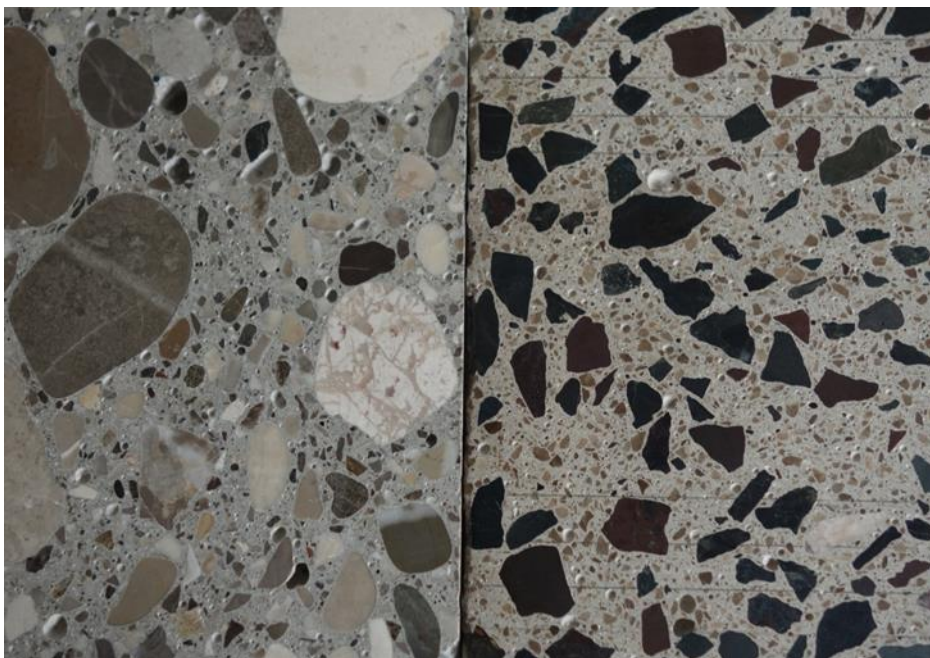
2 SPLOŠNO O BETONU

2.1 Uvod v beton

Beton je kompozitni gradbeni material, ki po zamešanju vseh sestavin najprej veže, po prehodu v strjeno agregatno stanje pa mu s časom narašča trdnost. Sestavljen je iz:

- mineralnega agregata,
- cementa,
- vode,
- mineralnih dodatkov in
- kemijskih dodatkov.

Osnovni materiali v betonu so agregat, voda in vezivno sredstvo-cement. Reakcija med vodo in cementom se imenuje hidratacija, pri kateri se cementna pasta preoblikuje v cementni kamen, ki je osnovni gradnik betona. Reakcija hidratacije cementa je eksotermna – med reakcijo se toplota sprošča. S pomočjo dodatkov lahko izdelamo prilagodljiv in v gradbeništvo najpogosteje uporabljen material - beton. Slika 1 prikazuje strukturo betona, izdelanega s prodom in strukturo betona izdelanega z drobljencem.



Slika 1 : Struktura betona s prodom (levo) in drobljenim agregatom (desno)

2.2 Voda v betonu

Voda predstavlja osnovno komponento za pripravo betonske mešanice, ki omogoča vezanje in strjevanje cementa. Za pripravo betonske mešanice je primerna voda iz javnega vodovodnega omrežja brez posebnega vonja in okusa. Če vode iz javnega vodovodnega omrežja nimamo na razpolago ali pa izdelujemo beton višjih kakovosti, je treba vodni vir predhodno analizirati.

V skladu s standardom SIST EN 206:2013 je za pripravo betona splošno primerna voda, ki je skladna z določili standarda SIST EN 1008. Slovenski standard SIST 1026:2016 pa dodatno navaja, da voda za pripravo betona, navajam: » ne sme vsebovati sestavin, ki neugodno vplivajo na strjevanje ali na zahtevane lastnosti betona ali pa so škodljive zaradi korozije armature. Pitna voda se vedno šteje za primerno in je zato ni treba preverjati. S preskusi po SIST EN 1008 pa je treba dokazati primernost:

- vode, ki se črpa iz podzemnih virov,
- površinske vode in industrijske odpadne vode,
- vode, reciklirane iz proizvodnje betona.«

Slovenski standard SIST EN 1008:2003 razvršča vodo za pripravo betona v naslednje skupine:

- pitna voda se upošteva kot primerna za uporabo v betonu in je ni treba preizkušati,
- voda, ki je ponovno pridobljena iz procesov v industriji betona je običajno primerna za uporabo v betonu, vendar mora ustrezati zahtevam standarda v dodatku A,
- podtalnica je lahko primerna za uporabo v betonu, vendar je treba njeno ,
- prirodna površinska voda in industrijska odpadna voda je primerna za uporabo v betonu, vendar mora biti preizkušena,
- morska voda ali manj slana voda se lahko uporablja v betonih brez vgrajene armature ali druge kovine, ni pa primerna za izdelavo armiranega ali prednapetega betona,
- komunalna voda ni primerna za uporabo v betonu,

2.3 Mineralni agregat

Agregat je najbolj zastopan material v betonu in zavzema 60-80 % njegove prostornine. Za pripravo betona se uporabljata drobljen agregat (tudi drobljenec) ali gramoz.

Drobljenec pridobivamo v kamnolomih kot je na Sliki 3, najprej z miniranjem in potem z drobljenjem kamnov. Zrna drobljenega agregata imajo ostre robove. Druga vrsta je gramoz aluvialnega izvora, ki ga kopljemo iz rečnih korit ali gramoznic na Sliki 2. Zrna gramozna imajo zaobljene robove. Beton iz gramozna ima običajno boljšo obdelavnost kot beton iz drobljenca [1].



Slika 2(levo) : Gramoznica[30]

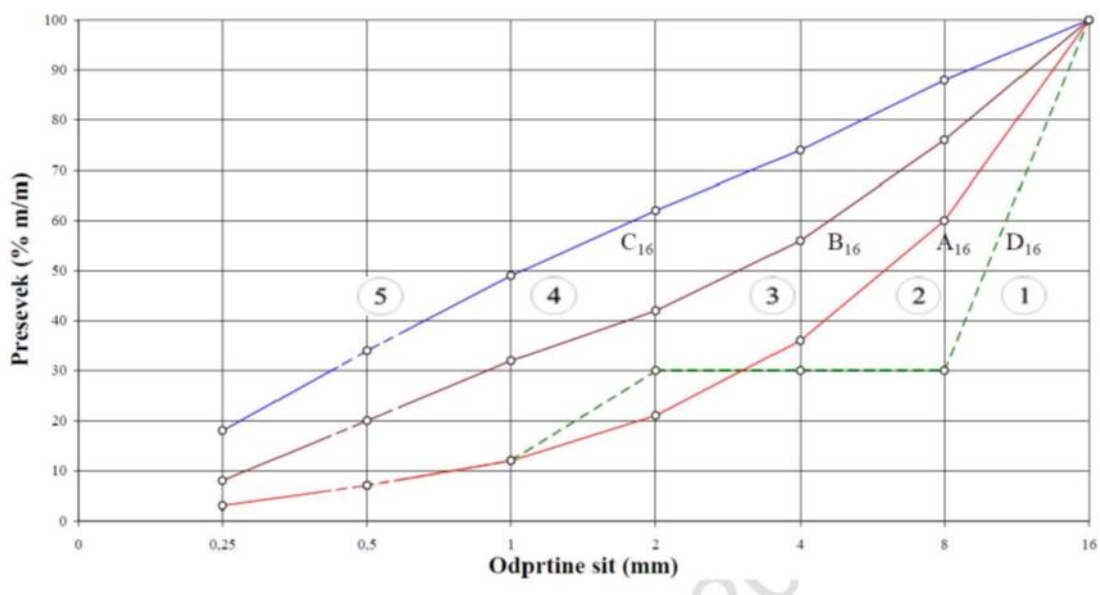
Slika 3(desno) : Kamnolom[31]

Mineralni agregat je praviloma inerten material, ki ga vgrajujemo v cementne betone. Njegova vloga v betonu je, da:

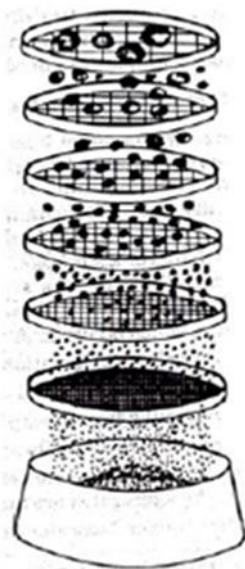
- kontrolira gostoto betona
- kontrolira modul elastičnosti betona
- omogoča ekonomičnost betona, ker je najcenejša komponenta betona,
- nižja temperaturo betona, ker odvaja toploto zaradi hidratacije cementa,
- manjša krčenje betona,
- zagotavlja kohezivnost betona, zato ga je v svežem stanju lahko obdelovati.

2.3.1 Zrnavostna sestava agregata

Zrnavostno sestavo agregata ugotavljamo s sejanjem. Agregat, ki ima ustrezno porazdelitev zrn po velikosti, omogoča izdelavo svežega betona, ki ima dobro kohezivnost, je odporen proti segregaciji in se ga da enostavno vgraditi. V strjenem stanju ima tak beton ustrezno trdnost, obstojnost in izpolnjuje zahteve za kvaliteto površine betonskih elementov. Tak agregat optimalno zapolni prostornino betona. Meje, v katerih naj se nahaja zrnavostna sestava agregata, navaja standard SIST 1026:2016 s priporočenimi mejnimi krivuljami zrnivosti. Priporočene mejne krivulje zrnivosti so podane za mešanice agregata 0/8, 0/16, 0/32 in 0/63 mm v dodatku NB. Primer priporočenih mejnih krivulj za mešanico agregata 0/16 mm je prikazan na Sliki 4.



Slika 4 : Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm (SIST 1026:2016)



Slika 5 : Shematski prikaz postopka sejanja agregata [32]

Da lahko v praksi zagotovimo čim bolj optimalno sestavo agregata, so v separacijah na voljo različne frakcije agregata, ki jih pridobijo s sejanjem. Droben agregat so zrna agregata, ki se pri sejanju presejejo skozi sito 4 mm. Drobne frakcije, ki jih lahko nabavimo v separacijah pa so 0/4 mm (vedno) ter 0/2 in 0/1 mm (v določenih separacijah). Grob agregat so zrna agregata, ki pri sejanju ostanejo na situ 4 mm. Grobe frakcije, ki jih lahko nabavimo v separacijah, so 4/8, 8/16, 16/32 in 32/63 mm..

2.3.2 Oblika zrn agregata

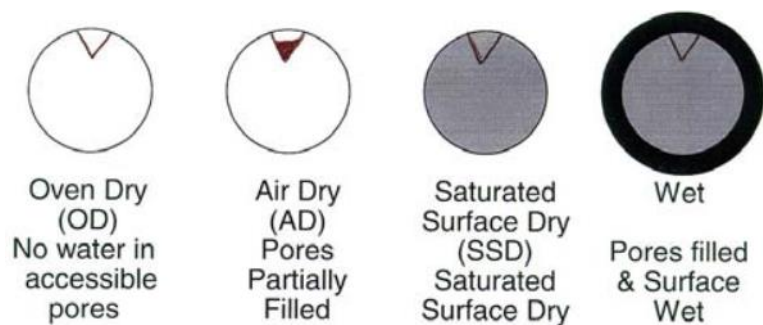
Oblika zrn agregata je odvisna od izvora agregata. Pri gramozu je idealna kroglasta oblika, pri drobljencu pa kockasta. Za betone iz gramozu je pri enakem vodo-cementnem razmerju značilna boljša vgradljivost, v primerjavi z betoni iz drobljenca. Po drugi strani pa pri enakem vodo-cementnem razmerju betoni z drobljencem dosegajo višje trdnosti in togosti [1].

2.3.3 Vlažnost agregata

Agregat je običajno vlažen. Različne stopnje vlažnosti agregata so shematsko prikazane na Sliki 6. Pred uporabo agregata za izdelavo betona je treba ugotoviti, kakšna je dejanska vlažnost agregatnih zrn. Ta podatek je pomemben zaradi zagotavljanja zahtevanega vodo-cementnega razmerja betona. Če je

agregat suh, je treba k vodi za vodo-cementno razmerje dodati vodo, ki jo bodo zrna agregata vpila. Če je na površini agregata voda (agregat je moker), pa je treba zmanjšati količino vode, ki jo dodamo betonski mešanici, za količino vode, ki je na površini zrn agregata.

Pri količini vlage v agregatu jih razdelimo na štiri stopnje:



Slika 6 : Shematski prikaz stopenj vlažnosti agregata [33]

2.3.4 Trdnost agregata

Trdnost agregata je pomembna lastnost, saj je od nje lahko odvisna trdnosti betona. Z agregatom, ki ima nizko trdnost, ne moremo izdelati betona, ki ima visoko trdnost. Ustrezno trdnost agregata lahko enostavno ocenimo s pregledom porušne površine betona, po tlačni, upogibni ali cepilni preiskavi betona. Če je vsaj polovica grobih agregatnih zrn prelomljenih (ni iztrganih iz cementnega kamna) ima agregat ustrezno trdnost [1].

2.4 Cement

Cement je hidravlično vezivo, ki začne takoj, ko pride v stik z vodo, vezati. Po koncu vezanja, ko preide cementna pasta v trdno agregatno stanje, postaja cementni kamen s časom vse bolj trden in lahko prenaša visoke tlačne obremenitve.

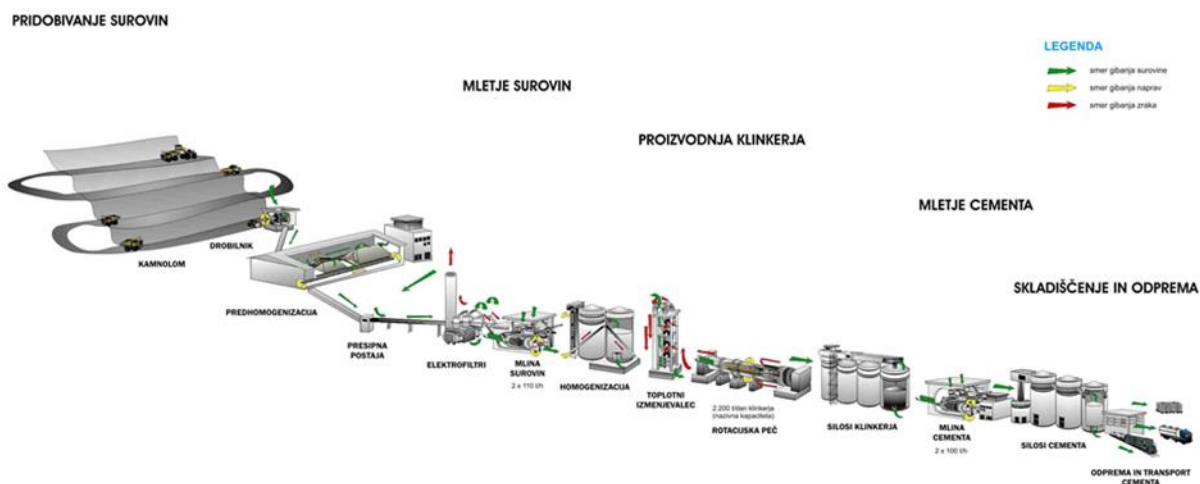
2.4.1 Proizvodnja cementa

Proizvodnja cementa poteka v štirih fazah:

- Pridobivanje surovin,
- Priprava surovinske mešanice,
- Žganje cementnega klinkerja,
- Mletje cementa.

Shemo proizvodnje cementa prikazuje Slika 7.

Cementni klinker proizvodimo z žganjem zmlate surovinske mešanice, ki je običajno sestavljena iz apnenca, laporja, gline oziroma skrilavca, v rotacijski peči pri približno 1450 °C [28]. Za ustrezno kemijsko sestavo, ki omogoča dobro žganje in formiranje mineralov klinkerja v peči, moramo surovinski mešanici pogosto dodati različne dodatne materiale, kot so pepelnata žlindra, boksit, železova ruda in piritni ogorki [15]. Klinker je material, ki nastane po hitrem ohlajanju žgane surovinske mešanice. Klinker nato z dodatkom sadre zmeljemo v fin prah – čisti portlandski cement. Pri mešanih cementih pa dodamo klinkerju pri mletju še mineralni dodatek ali kombinacijo mineralnih dodatkov.



Slika 7 : Tehnološka shema proizvodnje cementa (A. Ipavec, 2013 – vir: A. Ipavec, Tehnološki proces proizvodnje cementa v Salonitu Anhovo, prezentacija za študente UL FGG, Anhovo, 18.10.2013)

2.4.2 Regulativa na področju cementov

Zahteve in merila skladnosti za običajne cemente so v evropski uniji regulirani s standardom EN 197-1 [6]. Standard definira 27 različnih vrst običajnih cementov. Zanje določa deleže, v katerih se gibljejo klinker in mineralni dodatki. Določa tudi vrste mineralnih dodatkov v cementih in njihove lastnosti. Glavne komponente cementa, poleg klinkerja, ki jih standard dovoljuje, so: granulirana plavžna žindra, pucolan, filtrski pepel, žgani skrilavec, mikrosilika in apnenec. Preglednica 2 podaja sestavo 27 vrst običajnih cementov.

Preglednica 1 : 27 vrst običajnih cementov po SIST EN 197-1 [6]

| Glavne vrste | Oznaka 27 proizvodov (vrste običajnih cementov) | | Sestava (odstotek mase ^{a)}) | | | | | | | | | | Manj pomembne sestavine | |
|---|--|---------------------------------------|--|------------------------------|---------------------|---------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------|---------|-------|-------------------------|-----|
| | | | Glavne sestavine | | | | | | | | | | | |
| | | | Klinker | Granulirana plavžna žilindra | Mikrosilika | Pucolan | | Elektrofiltrski pepel | | Žgani skrilavec | Apnenec | | | |
| K | S | D ^{b)} | naravni P | naravni kalcinirani Q | silicijski V | kalcijski W | T | L | LL | | | | | |
| CEM I | Portlandski cement | CEM I | 95-100 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| CEM II | Portlandski cement z dodatkom žilindre | CEM II/A-S | 80-94 | 6-20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM II/B-S | 65-79 | 21-35 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Portlandski cement z dodatkom mikrosilike | CEM II/A-D | 90-94 | - | 6-10 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM II/A-P | 80-94 | - | - | 6-20 | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Portlandski cement z dodatkom pucolana | CEM II/B-P | 65-79 | - | - | 21-35 | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM II/A-Q | 80-94 | - | - | - | 6-20 | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM II/B-Q | 65-79 | - | - | - | 21-35 | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM II/A-V | 80-94 | - | - | - | - | 6-20 | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Portlandski cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela | CEM II/B-V | 65-79 | - | - | - | - | 21-35 | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM II/A-W | 80-94 | - | - | - | - | - | 6-20 | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM II/B-W | 65-79 | - | - | - | - | - | 21-35 | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM II/A-T | 80-94 | - | - | - | - | - | - | 6-20 | - | - | - | 0-5 |
| | Portlandski cement z dodatkom žganega skrilavca | CEM II/B-T | 65-79 | - | - | - | - | - | - | 21-35 | - | - | - | 0-5 |
| | | Portlandski cement z dodatkom apnenca | CEM II/A-L | 80-94 | - | - | - | - | - | - | - | 6-20 | - | 0-5 |
| | | | CEM II/B-L | 65-79 | - | - | - | - | - | - | - | 21-35 | - | 0-5 |
| | | | CEM II/A-LL | 80-94 | - | - | - | - | - | - | - | - | 6-20 | 0-5 |
| CEM II/B-LL | 65-79 | - | - | - | - | - | - | - | - | 21-35 | 0-5 | | | |
| Portlandski mešani cement ^{c)} | CEM II/A-M | 80-94 | <----- 6-20 -----> | | | | | | | | | | 0-5 | |
| | CEM II/B-M | 65-79 | <----- 21-35 -----> | | | | | | | | | | 0-5 | |
| CEM III | Žilindrin cement | CEM III/A | 35-64 | 36-65 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM III/B | 20-34 | 66-80 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM III/C | 5-19 | 81-95 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| CEM IV | Pucolanski cement ^{c)} | CEM IV/A | 65-89 | - | <----- 11-35 -----> | | | | - | - | - | - | 0-5 | |
| | | CEM IV/B | 45-64 | - | <----- 36-55 -----> | | | | - | - | - | - | 0-5 | |
| CEM V | Mešani cement ^{c)} | CEM V/A | 40-64 | 18-30 | - | <----- 18-30 -----> | | | | - | - | - | - | 0-5 |
| | | CEM V/B | 20-39 | 31-50 | - | <----- 31-50 -----> | | | | - | - | - | - | 0-5 |

^{a)} Vrednosti v razpredelnici se nanašajo na vsoto glavnih in manj pomembnih sestavin.

^{b)} Delež mikrosilike je omejen na 10 %.

^{c)} Pri mešanih portlandskih cementih CEM II/A-M in CEM II/B-M, pucolanskih cementih CEM IV/A in CEM IV/B ter mešanih cementih CEM V/A in CEM V/B morajo biti glavne sestavine, razen klinkerja, podane v oznaki cementa (za primer glej točko 8).

2.4.3 Čisti portlandski cement (CEM I)

Glavni oksidi v cementnem klinkerju so CaO (60-70 %), SiO₂ (18-22 %), Al₂O₃ (4-6 %) in Fe₂O₃ (2-4 %). Ti oksidi sestavljajo približno 95 % klinkerja in so prisotni v obliki štirih mineralnih faz:

- alita, 3CaO·SiO₂ (C3S), 55-65 %
- belita, 2CaO·SiO₂ (C2S), 15-25 %
- aluminata, 3CaO·Al₂O₃ (C3A), 8-14 %
- ferita, 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ (C4AF), 8-12% [A. Ipavec, doktorat].

Alit in belit sta glavna minerala klinkerja. Ko reagirata z vodo, nastaja kalcijev silikat hidrat (C-S-H gel) in kalcijev hidroksid (Ca(OH)₂), ki mu pravimo tudi prosto apno.

Hitrost hidratacije cementa je odvisna od, navajam [1]:

- »sestave klinkerja in količine primesi v mineralih klinkerja,
- mikrostrukture klinkerja, ki je odvisna od razmer pri žganju klinkerja,
- količine in oblike kalcijevega sulfata,
- finosti in zrnastne sestave cementa,
- vodo-cementnega razmera pri pripravi mešanice,
- razmer pri zorenju mešanice in
- prisotnosti kemijskih dodatkov v mešanici«.

2.5 Kemijski dodatki

Načrtno razvite kemijske dodatke za beton so v tehnologiji betona začeli uporabljati po letu 1930[29 in 3]. Omogočajo nam proizvodnjo betonov z zahtevanimi lastnostmi. Kemijske dodatke dodajamo v betonsko mešanico med mešanjem betona in to v majhnih količinah. Njihov delež podajamo glede na maso cementa, če ni drugače navedeno. Kemijske dodatke lahko tudi kombiniramo. Pri tem je pomembno, da so kompatibilni med seboj.

Glavni namen uporabe teh dodatkov je [16]:

- zmanjšati stroške izdelave betonskih konstrukcij,
- lažje doseganje zahtevanih lastnosti betonov kot z drugimi načini,
- vzdrževanje kvalitete cementnih betonov med mešanjem, transportom, vgradnjo in nego betona,

- reševanje problemov med betoniranjem na terenu.

Poznamo več vrst kemijskih dodatkov [17]:

- aeranti:
 - izboljšujejo obdelavnost svežih betonov,
 - zmanjšujejo izcejanje vode in segregacijo v svežih betonih,
 - povečujejo odpornost proti zmrzovanju in tajanju.
- pospeševalci vezanja:
 - povečajo hitrost hidratacije cementa (skrajšajo čas vezanja in pospešijo razvoj zgodnje trdnosti),
- plastifikatorji in superplastifikatorji:
 - znižujejo količino vode za doseganje zahtevane konsistence; ta učinek izkoriščamo za doseganje visokih trdnosti (nižamo vodo-cementno razmerje)
 - omogočajo obdelavnost betonov z manjšo količino cementa,
 - izboljšajo obdelavnost betona,
 - imajo lahko zavlačevalni učinek.
- zavlačevalci:
 - upočasnijo proces hidratacije cementa v svežem betonu in s tem podaljšajo vezanje cementa,
 - omogočajo daljše transportne čase sveže mešanice.
- stabilizatorji:
 - povečajo stabilnost svežega betona
 - z njimi dosegamo večjo vodoneprepustnost,
 - z njimi dosegamo večjo odpornost proti koroziji armature.
- dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah:
 - znižujejo ledišče vode.

V nadaljevanju natančneje obravnavamo kemijske dodatke, ki smo jih uporabili za pripravo betonov v okviru diplomske naloge. To so plastifikatorji in superplastifikatorji, aeranti in stabilizatorji.

Plastifikatorji (P) in superplastifikatorji (SP)

Plastifikatorji in superplastifikatorji so prav gotovo najpomembnejša skupina kemijskih dodatkov za betone.

Osnovni namen uporabe teh dodatkov je [3]:

- doseganje višjih trdnosti z zmanjševanjem vodocementnega faktorja (V/C) in vzdrževanju enake obdelavnosti svežega betona,
- doseganje enake obdelavnosti svežega betona pri manjši količini cementa, s čimer se zmanjša hidratacijska toplota,
- povečanje obdelavnosti svežega betona pri določenem V/C faktorju,
- povečanje obdelavnosti za vgrajevanje v težko dostopne predele.

Plastifikatorji in superplastifikatorji so površinsko aktivne snovi, disperganti, ki delujejo na principu zmanjšanja V/C razmerja. Med seboj se razlikujejo po mehanizmu delovanja. Z negativno nabitimi funkcionalnimi skupinami se adsorbirajo na pozitivno nabito površino cementa. Plastifikatorji in superplastifikatorji prve generacije z adsorbiranjem na cementne delce le tem podelijo enak naboj. Posledica je elektrostatični odboj delcev cementa, ki preprečuje njihovo kosmičenje. Pri superplastifikatorjih nove generacije (PCE superplastifikatorjih) je mehanizem delovanja podoben, saj se prav tako adsorbirajo na cementne delce. Je pa pri teh dodatkih združevanje cementnih delcev preprečeno tudi zaradi prostorskega (tudi steričnega) odboja, ki ga povzročijo dolge glavne in stranske verige superplastifikatorja [3].

Učinek plastifikatorja in superplastifikatorja je odvisen od kemijske in mineralne sestave cementa, količine cementa, vrste in sestave agregata, vrste in sestave mineralnih dodatkov, drugih kemijskih dodatkov v betonu in pogojev okolja [3].

Plastifikatorje ali superplastifikatorje uporabimo, kadar želimo oziroma moramo [3]:

- izboljšati lastnosti svežega betona:
 - zagotoviti zahtevano obdelavnost ob manjši količini vode, daljši čas zagotoviti zahtevano obdelavnost.
- zmanjšati stroške betonskih del z zmanjšano potrebo po energiji, manjšim številom delavcev in hitrejšim vgrajevanjem,

- pripraviti beton s posebnimi lastnostmi:
 - s predpisanim V/C razmerjem, predpisano minimalno začetno trdnostjo, z določenim časom obdelavnosti.
- betonirati v neugodnih vremenskih pogojih,
- izboljšati kvaliteto strjenega betona

Plastifikatorji in superplastifikatorji nam torej omogočajo, da pripravimo svež beton vseh konsistenčnih stopenj in homogene strukture, transportni beton z dolgim časom obdelavnosti, da beton vgradimo v težjih pogojih ali v zahtevnejše opaže, da dosegamo visoke zgodnje in končne trdnosti, da pripravimo vodoneprepusten beton, itd.

Pomembno je tudi vedeti, da se lahko plastifikatorji kombinirajo s superplastifikatorji, zavlačevalci ali s pospeševalci. Paziti pa je treba, da so uporabljeni proizvodi medsebojno kompatibilni [3].

Aeranti

Aeranti so kemijski dodatki, ki omogočijo oblikovanje zračnih mehurčkov v svežem betonu. Vzporedno pa izboljšajo tudi obdelavnost svežega betona. Ko preide beton v strjeno stanje, so zračni mehurčki prostor, kamor se sprosti voda pod pritiski, ki jih povzroči zmrzovanje betona. Ta voda zavzema le del prostornine zračne pore. Ko voda v zračnem mehurčku zmrzne, ne povzroča pritiskov na strukturo betona. Obenem zračni mehurčki prekinajo tudi sistem kapilarni por v strukturi betona. S tem ovirajo transport vode, ki lahko vsebuje škodljive snovi za beton in/ali armaturo, v notranjost prereza.

Glavni razlogi za uporabo aerantov v betonu so:

- izboljšanje obstojnosti betonov,
- povečanje odpornosti betonov proti zmrzovanju in tajanju,
- povečanje odpornosti betonov proti koroziji.

Stabilizatorji

Stabilizatorji so dodatki, ki povečajo stabilnost svežega betona. Poimenujemo jih tudi dodatki za preprečevanje izpiranja pri podvodnem betoniranju (angleško »anti-washout admixtures«) in modifikatorji viskoznosti (angleško »viscosity enhancing admixtures«). Ti dodatki povečajo kohezivnost svežega betona in njegovo odpornost proti segregaciji. Zato se uporabljajo tam, kjer imamo probleme z notranjim in površinskim izcejanjem vode v svežem betonu, ločevanja agregatnih delcev in cementne paste ter kjer želimo preprečiti izpiranje cementnih delcev iz betona. Te pojave opazimo predvsem pri betonih z znižano viskoznostjo, z bolj tekočo konsistenco in pri črpnih betonih, ko so izpostavljeni visokim strižnim hitrostim, ki se pojavljajo med črpanjem in zgoščevanjem. Stabilizatorji

Mehanizmi delovanja stabilizatorjev so različni: lahko zvišajo viskoznost vode ali povečajo privlačne sile med cementnimi delci in na tak način povečajo kohezivnost svežega betona in s tem njeno viskoznost in/ali strižno napetost na meji tečenja. Lahko pa so stabilizatorji tudi mineralni dodatki betonu z veliko specifično površino, kot sta mikrosilika in elektrofiltrski pepel [34].

3 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA

Tekst v tem poglavju je povzet predvsem po knjigi Introduction to rheology of fresh concrete, avtorja Olafur H. Wallevika [19], ki je osnovni učbenik na področju reologije svežega betona. Olafur H. Wallevik pa je s sodelavci razvil tudi reometer, ConTec VISCOMETER 5, s katerim smo merili reološke lastnosti betonov v tej diplomu.

3.1 Uvod v reologijo

Reologija je znanstvena veda, ki preučuje deformiranje in tečenje snovi. Reologija raziskuje zveze med silo, deformacijo in časom. Viskometrija, ki je podskupina reologije, pa raziskuje zveze med napetostjo in hitrostjo deformiranja. Viskoznost je definirana kot upor proti tečenju oziroma upor tekočine proti deformiranju. Če je ta upor velik, bo viskoznost visoka.

V praksi se še vedno uporabljata metodi ocene konsistence svežega betona s posedom ali z razlezom. Ti metodi ne uspeata zaznati vseh posebnosti naprednih betonov. Znanstveniki so zato iskali boljše metode za merjenje lastnosti svežih betonov. Na podlagi raziskav so ugotovili, da so sveži betoni še najbolj podobni Binghamovi tekočini. Ta ugotovitev je spodbudila reološke preiskave na svežih betonskih mešanica.

3.2 Namen reoloških meritev

Namen reoloških meritev je naslednji [19]:

- Razumeti interakcije med različnimi sestavinami betona in dobiti vpogled v strukturo materiala. Obstaja zveza med velikostjo in obliko delcev v suspenziji ter viskoznostjo suspenzije (betona).
- Reološki testi omogočajo kontrolo kakovosti surovin, procesov in končnih proizvodov. Reologija meri vzorec materiala kot celoto in interakcije med sestavinami.
- Reologija služi kot orodje pri dimenzioniranju opreme, ki se uporablja v procesu vgradnje betona. Učinkovitost črpalke za beton in tečenje po togih ceveh (po cevovodu) so odvisni od reoloških lastnosti betona.

- Rezultate reoloških raziskav lahko uporabi tudi kupec, ko določa sprejemljive lastnosti proizvoda (betona).

3.3 Klasifikacija tekočin

Tekočine razvrščamo v štiri glavne skupine, Newtonske tekočine, ne-Newtonske tekočine, ki so časovno neodvisne in ne-Newtonske tekočine, ki so časovno odvisne ter visko-elastične tekočine. V nadaljevanju bomo v kratkem predstavili lastnosti prvih dveh skupin tekočin.

- **Newtonska tekočina**

Pri Newtonskih tekočinah je viskoznost enaka (konstanta) za vse strižne hitrosti. Njihovo obnašanje opišemo z linearno odvisnostjo med strižno napetostjo (τ) in strižno hitrostjo (γ). Newtonske tekočine so na primer voda, olje in gorivo [19].

- **Ne-Newtonska tekočina, časovno neodvisna**

Viskoznost časovno neodvisnih ne-Newtonskih tekočin je odvisna od strižne hitrosti. Ločimo tri skupine ne-Newtonskih tekočin [19]:

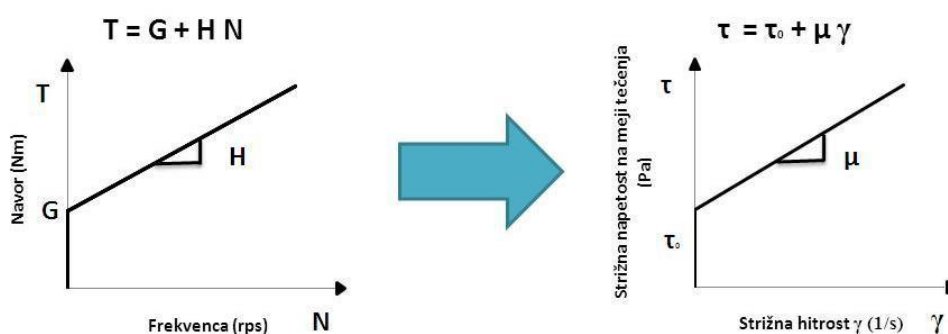
- tekočine s strižnim redčenjem (shear thinning) - pri njih se viskoznost zmanjšuje z večanjem strižne hitrosti. Takšne tekočine so šamponi, barve, pomarančni sok, itd.
- tekočine s strižnim zgoščanjem (shear thickening) - pri njih se viskoznost z višanjem strižne hitrosti večja. To so materiali iz gosto stisnjenih delcev, kot na primer 50 % pasta krompirjevega škroba v vodi,
- tekočine, ki imajo napetost na meji tečenja, ne tečejo same od sebe. Da stečejo, mora strižna napetost preseči napetost na meji tečenja. Takšne snovi, ki se obnašajo kot trdna snov pod napetostjo na meji tečenja in kot tekočina nad to napetostjo, imenujemo tudi viskoplastične snovi. Takšne tekočine najlažje opišemo z Binghamovim modelom za tekočine. Mednje spada tudi svež beton.

3.4 Bingham-ov model tekočine

Najpreprostejši model za opis obnašanja tekočine je Newtonska tekočina. Model je linearna odvisnost med strižno napetostjo (τ) in strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$). Glavna lastnost Newtonske tekočine je, da se tečenje pojavi že pri napetosti skoraj enaki nič. Razmerje med strižno napetostjo in strižno hitrostjo imenujemo plastična viskoznost (μ) materiala. Beton ni Newtonska tekočina, saj potrebuje vsaj minimalno napetost, da začne teči. To napetost imenujemo strižna napetost na meji tečenja (τ_0). Model pa ohranja linearno zvezo med strižno napetostjo in strižno hitrostjo: $\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$, kar pomeni da sta parametra τ_0 in μ konstanti.

Konstant τ_0 in μ ne moremo neposredno izmeriti. Lahko pa s pomočjo teh konstant izpeljemo enačbe s parametri, ki jih lahko merimo. Rezultat preiskave reoloških parametrov svežega betona z reometrom je največkrat podan v obliki: $T = G + H \cdot N$ (glej sliko 8).

V enačbi je T navor (upor proti striženju), N je frekvenca vrtenja, H je mera za odpornost betona proti naraščajoči hitrosti gibanja (koeficient viskoznosti) in G je navor, ki je potreben za začetek gibanja betona (navor na meji tečenja). Gre za dinamični navor na meji tečenja, saj meritev z reometrom poteka od največje hitrosti vrtenja proti najmanjši. Kalibrirani reometri omogočajo preračun vrednosti G in H na Binghamova parametra τ_0 in μ (napetost na meji tečenja in plastična viskoznost (ICAR, 2007).



Slika 8 : Razmerje med navorom, ki ga merimo z reometrom, in strižno napetostjo.

Preglednica 2 : Parametri Bingham-ovega modela tekočne [20]

| Relativni parametri | Osnovni parametri |
|---|---|
| $T=G+H \cdot N$ | $\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$ |
| $T = \text{navor (Nm)}$ | $\tau = \text{strižna napetost (Pa)}$ |
| $G = \text{'G-vrednost' (Nm), povezana s } \tau_0$ $H = \text{'H-vrednost' (Nm.s), povezana z } \mu$ $N = \text{frekvenca vrtenja (rps)}$ | $\tau_0 = \text{strižna napetost na meji tečenja (Pa)}$ $\mu = \text{plastična viskoznost (Pa.s)}$ |

3.5 Reometri

Reometri so naprave, s katerimi merimo:

- statično strižno napetost na meji tečenja svežega betona, ki je minimalna vrednost napetosti, s katero sprožimo tečenje mirujoče mešanice,
- dinamično strižno napetost na meji tečenja svežega betona, to je napetost, ki je potrebna, da mešanica teče,
- plastično viskoznost (μ) svežega betona, ki predstavlja upor spremembi hitrosti striženja. Če merimo upor, ki ga nudi sveža mešanica betona pri različnih hitrostih striženja dobimo premico, katere naklon je plastična viskoznost svežega betona.

Poznamo tri osnovne tipe reometrov (Banfill, 2001):

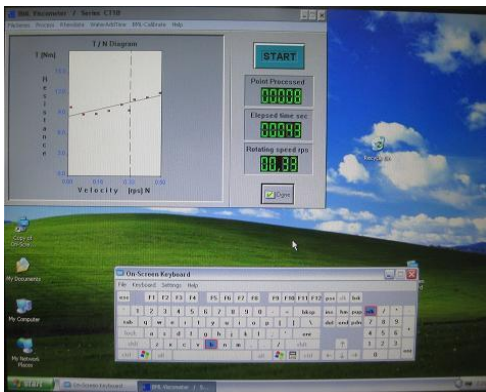
- koaksialni valjasti reometer,
- reometer z vzporednimi ploščami,
- mešalni reometer z rotorjem.

V nadaljevanju bomo predstavili koaksialni valjasti reometer, ki smo ga uporabili za meritve reoloških lastnosti betonov v okviru diplomske naloge.

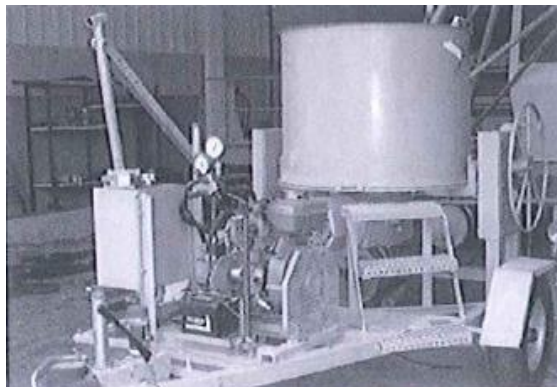
3.5.1 Koaksialni valjasti reometer

Koaksialni valjasti reometri delujejo na principu vrtenja zunanjšega ali notranjega valja, drugi valj pa miruje. Zdrs med površino valja in betonom se preprečuje z rebri. Primera takšnih reometrov sta: ConTec VISCOMETER 5 (slika 9 levo) in CEMAGREF – IMG (slika 10 desno).

V diplomski nalogi smo uporabili ConTec VISCOMETER 5, ki ga sestavljajo notranji in zunanji valj, električni motor ter računalnik, ki upravlja z motorjem. ConTec VISCOMETER 5 deluje tako, da motor vrti posodo (zunanji valj), tipala v zgornjem delu notranjega cilindra pa merijo upor, ki ga povzroča svež beton. Tipala posredujejo podatke računalniku, ki jih s pomočjo programa FRESHwin shrani (slika 9). Shranjene podatke izvozimo v program Microsoft Excel, kjer jih analiziramo.



Slika 9(levo) : Program FRESHwin



Slika 10(desno) : Cemagref IMG [20]

4 METODE PREISKAV

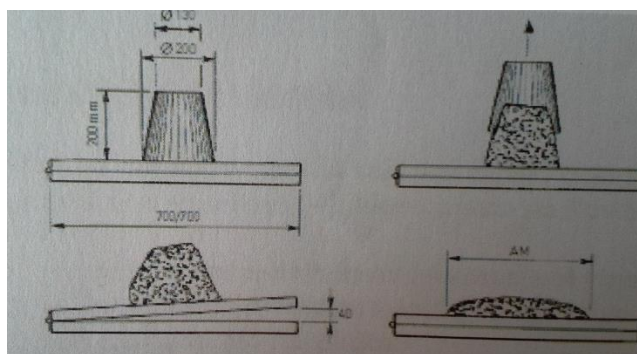
4.1 Preizkus z razlezom

Določanje konsistence svežega betona z razlezom poteka v skladu z določili slovenskega standarda SIST EN 12350-5:2009. Metoda je bila razvita v tridesetih letih dvajsetega stoletja. Oprema za izvedbo preiskave je prikazana na sliki 14.

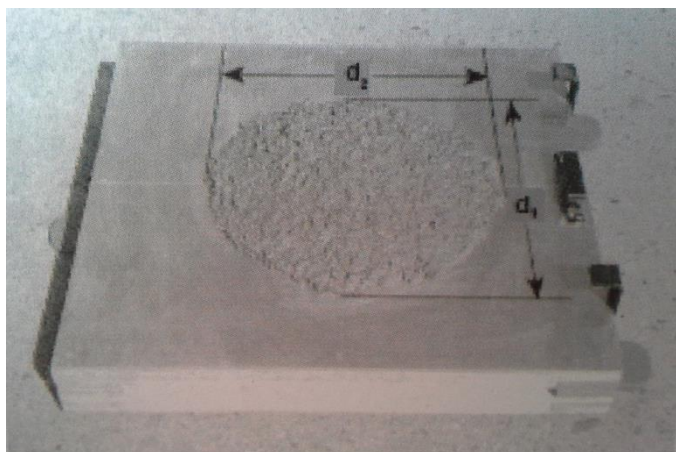


Slika 11 : Oprema za preizkus z razlezom

Preizkus meri deformacije vzorca svežega betona na ravni plošči. Beton vgradimo v kovinski kalup v dveh plasteh, vsako plast pa nabijamo z lesenim nabijačem z 10 udarci. Po odstranitvi kalupa se beton najprej posede zaradi lastne teže. Nato sledi razlez zaradi dvigovanja in spuščanja razlezne mize. Mizo dvignemo za 4 cm in jo nato spustimo, da prosto pade. Postopek ponovimo 15-krat. V tem času se betonska mešanica razleze po razlezni mizi. Na koncu izmerimo dva med seboj pravokotna premera (slika 15). Povprečje premerov zaokrožena na 10mm je mera konsistence (d) (slika 16).



Slika 12 : Potek preizkusa (SIST EN12350-5: 2009)

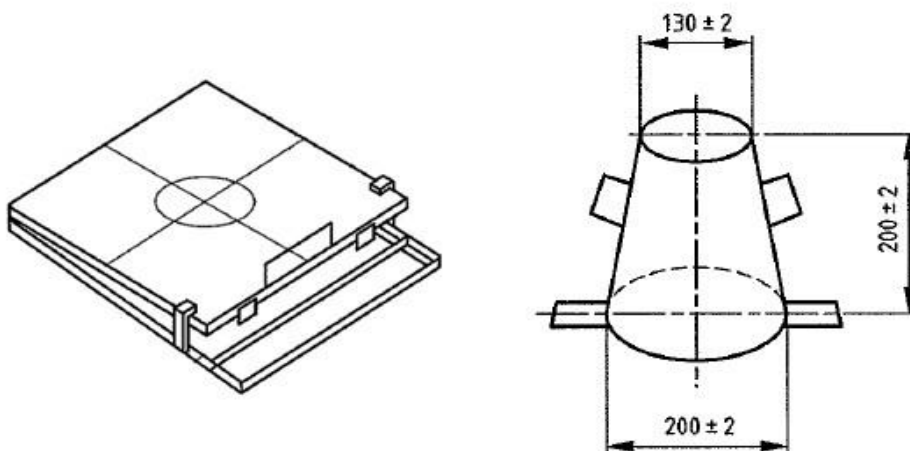


Slika 13 : Mejenje razleza $d = (d_1+d_2) / 2$ (SIST EN12350-5: 2009)

Metoda je primerna za razleze med 340 in 620 mm. Preizkus ni primeren za penobeton, za beton brez finih delcev in za beton z največjim zrnom agregata 63 mm.

Za izvedbo preizkusa potrebujemo:

- kalup (slika 17),
- mizo za razlez (slika 17),
- nabijalo,
- meter,
- posodo za mešanje,
- zidarsko žlico,
- štoparico in
- vodno tehtnico.



Slika 14 : Razlezna miza in kalup (SIST EN12350-5: 2009)

Z merjenjem razleza torej določamo konsistenco preizkušanca. Pripišemo ji eno izmed šestih stopenj, določenih po standardu SIST EN 206(Preglednica 3).

Preglednica 3 : Stopnje razleza

| Stopnja | Premer v (mm) |
|----------------|----------------------|
| F1 | ≤ 340 |
| F2 | 350 do 410 |
| F3 | 420 do 480 |
| F4 | 490 do 550 |
| F5 | 560 do 620 |
| F6 | ≥ 630 |

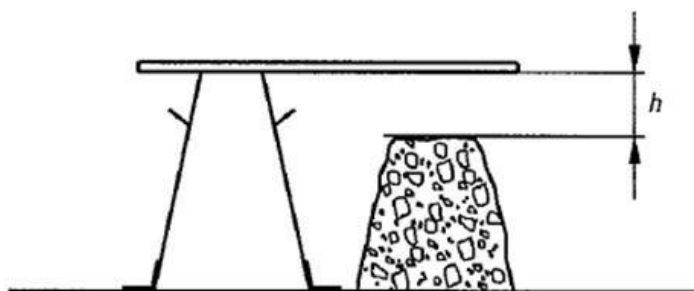
4.2 Preizkus s posedom

Določanje konsistence svežega betona s posedom poteka v skladu z določili slovenskega standarda SIST EN 12350-2 : 2009. Oprema za preizkus je prikazana na sliki 15. Metoda je bila razvita okoli 1910 v ZDA.



Slika 15 : Oprema za preizkus s posedom

Preizkus s posedom je najenostavnejša metoda za določanje konsistence svežih betonov. Merimo deformacije zgoščenega betona v obliki prisekanega stožca, ki se posede zaradi lastne teže. Beton vgrajujemo v kovinski stožec standardiziranih mer. Vsakič napolnimo tretjino stožca in vsako plast zgostimo s 25 vbodi s standardizirano kovinsko palico. Vsako plast prebodemo samo do spodaj ležeče plasti betona. Na koncu počasi dvignemo stožec in ga postavimo ob betonski stožec. Izmerimo razliko v višinah med kovinskim stožcem in betonskim vzorcem (slika 16).



Slika 16 : Meritev poseda (SIST EN 12350-2:2009)

Metoda je primerna za posede svežega betona med 10 in 210 mm. Preizkus ni primeren za beton z največjim zrnem agregata nad 40 mm in v primeru, da se posed v prvi minuti po odstranitvi stožca še vedno spreminja.

Za izvedbo preskusa potrebujemo:

- prisekani stožec za oblikovanje preizkušanca,
- lijak,
- zgoščevalno palico,
- meter,
- ravno površino,
- posodo za mešanje,
- zidarsko žlico,
- vlažno krpo,
- lopatico,
- štoparico,
- vodno tehtnico.

Z merjenjem poseda torej določamo konsistenco preizkušanca. Pripišemo ji eno izmed petih stopenj, določenih po standardu SIST EN 206 (Preglednica 4).

Preglednica 4 : Stopnje poseda

| Stopnja | Posed v (mm) |
|---------|--------------|
| S1 | 10 do 40 |
| S2 | 50 do 90 |
| S3 | 100 do 150 |
| S4 | 160 do 210 |
| S5 | ≥ 220 |

Rezultat preiskave sta lahko dve obliki poseda:

- a) pravilen posed - preizkušanec se posede, vendar zadrži razločno vidno simetrično obliko. Obstaja izmerljiva razlika med višino kalupa in višino posedenega preizkušanca iz svežega betona,
- b) posed s porušitvijo preizkušanca - preizkušanec se razleze po osnovni plošči in preneha posedovati razločno vidno sled svoje prvotne stožčaste oblike,



a). Pravilen posed b). Posed s porušitvijo preizkušanca

Slika 17 : Oblike poseda (SIST EN 12350-2:2009)

4.3 Določanje deleža por v svežem betonu

Določanje deleža por v svežem betonu poteka v skladu z določili slovenskega standarda SIST EN 12350-7 : 2009(SIST EN...). Metodo smo uporabljali pri betonih z dodanim aerantom. Vsebnost zraka smo določili z manometersko metodo s porozimetrom(slika 18). Pred vgrajevanjem betona v napravo, moramo beton dobropremešati. Vgrajevanje izvedemo v treh plasteh. Vsako plast moramo dobro zvibrirati. Ko je posoda polna nanjo namestimo pokrov. Ko je pokrov nameščen napravo napolnimo z vodo preko odprtine ventila, dokler voda ne izteka iz drugega ventila. Ko zrak neha izhajati zapremo oba ventila, ter z zračno črpalko v napravo vtisnemo zrak, da izenačimo začetni pritisk. Po izravnavi tlaka s pomočjo izpusnega ventila odpremo glavni zračni ventil. Nato odčitamo indeks, ki nam predstavlja delež por v % v betonu.



Slika 18 : Porozimeter [35]

4.4 Preiskave z reometrom

Če uporabimo za izdelavo betona različne dodatke, mineralne in kemijske, postane svež beton kompleksna suspenzija. Pri takih betonih standardne metode za oceno reoloških lastnosti praviloma niso dovolj učinkovite. Zato vse bolj narašča potreba po zmogljivejših preizkusnih metodah za sveže betone, kamor sodijo tudi meritve reoloških lastnosti svežega betona. Z reometri merimo strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala. Na podlagi odziva, zveze med strižno napetostjo in strižno hitrostjo, določimo karakteristične reološke parametre svežega betona. Binghamov model tekočine je največkrat dovolj za opis tečenja svežega betona.



Slika 19 : ConTec VISCOMETER 5

5 OPIS UPORABLJENIH MATERIALOV IN RECEPTURA BETONSKIH MEŠANIC

5.1 Cement

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili dve vrsti cementa. Prvi je bil cement CEM I 42,5 R (cement 2). To je portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo (R). sestavljen je iz najmanj 95% klinkerja. Kot regulator vezanja mu je dodana sadra. Primeren je za najzahtevnejše gradnje in v primerih, ko se zahtevajo visoke trdnosti [15]. Lastnosti cementa so navedene v preglednici 5.

Preglednica 5 : Lastnosti cementa CEM I 42,5 R [15]

| Kemijske zahteve | Zahteve standarda | Dosežene vrednosti |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Vsebnost sulfata (SO_3) | <4,0 % | <3,0 % |
| Mehanske in fizikalne lastnosti | | |
| Zgodnja trdnost, 2 dneva | > 20 MPa | > 28 MPa |
| Standardna trdnost, 28 dni | 42,5 — 62,5 MPa | > 54 MPa |
| Čas začetka vezanja | >60 min | > 100 min |
| Prostorninska obstojnost | < 10 min | < 1 min |
| Prostorninska teža | 3,05 — 3,10 g/cm ³ | |

Druga vrsta cementa, ki smo jo uporabili, je bil portlandski cement CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R (cement 1). To je cement z dodanim mletim apnencem in mleto granulirano plavžno žlindro. Vsebuje najmanj 80 %, 6-20 % mešanega mineralnega dodatka, apnenca in žlindre, ter največ 5 % polnil in sadro kot regulator vezanja. Namenjen je za najzahtevnejše gradnje in je združljiv z različnimi dodatki za betone [14]. Lastnosti cementa so navedene v preglednici 6.

Preglednica 6 : Karakteristike cementa CEM II/A -M (LL-S) 42,5 R [14]

| Kemijske zahteve | Zahteve standarda | Dosežene vrednosti |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|
| Vsebnost sulfata (SO_3) | $\leq 4,0$ % | 2,8 % |
| Vsebnost klorida | $\leq 0,1$ % | 0,05 % |
| Mehanske in fizikalne lastnosti | | |
| Zgodnja trdnost, 2 dneva | ≥ 20 MPa | 27 MPa |
| Standardna trdnost, 28 dni | 42,5 — 62,5 MPa | 52 MPa |
| Čas začetka vezanja | ≥ 60 min | 180 min |
| Prostorninska obstojnost | ≤ 10 min | 1 min |

5.2 Voda

Pri preizkusih smo uporabljali pitno vodo.

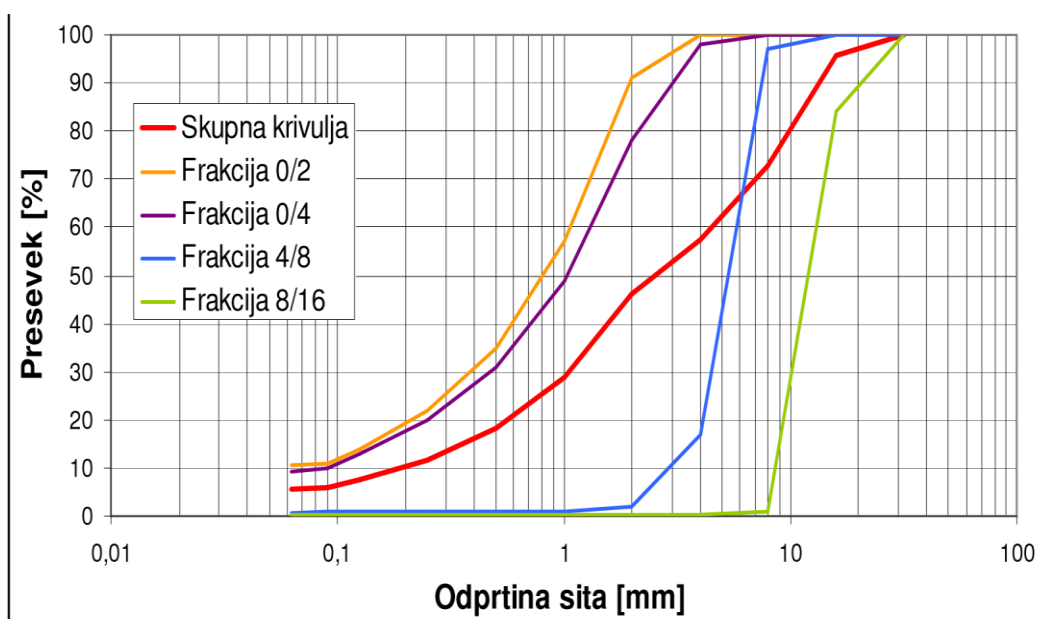
5.3 Agregat

Pri preizkusih smo uporabljali drobljen apnenčev agregat iz kamnoloma. Agregat smo sestavili iz štirih frakcij, katerih zrnovostna sestava je navedena v preglednici 7. Delež posamezne frakcije v agregatu je znašal 22 % mase za frakcijo 0/2 mm, 33 % mase za frakcijo 0/4 mm, 18 % mase za frakcijo 4/8 mm in 27 % mase za frakcijo 8/16 mm. Zrnovostna sestava agregata je prikazana na grafikonu 1.

Preglednica 7 : Zrnovost posameznih frakcij

| Frakcija | Presevek v % skozi sito | | | | | | | | | | |
|----------|-------------------------|-------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| | 0,063 | 0,090 | 0,125 | 0,25 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 8,0 | 16,0 | 32,0 |
| 0/2 | 10 | 11 | 14 | 22 | 35 | 57 | 91 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 0/4 | 9 | 10 | 13 | 20 | 31 | 49 | 78 | 98 | 100 | 100 | 100 |
| 4/8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 17 | 97 | 100 | 100 |
| 8/16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 84 | 100 |

Grafikon 1 : Zrnovostne sestave posameznih frakcij in agregata



5.4 Superplastifikator

V naših preiskavah smo uporabljali visoko učinkovit superplastifikator nove generacije – spolikarboksilatni superplastifikator ali PCE superplastifikator.

V tehničnem listu proizvoda lahko preberemo, da nam njegova uporaba omogoča:

- močno zmanjšanje vsebnosti vode ob nespremenjeni obdelavnosti svežega betona in s tem povečanje trdnosti,
- močno izboljšanje obdelavnosti ob nespremenjeni vsebnosti vode,
- počasnejše zmanjševanje obdelavnosti svežega betona s časom kot pri uporabi plastifikatorjev in superplastifikatorjev prve generacije.

PCE superplastifikator se veže na cementne delce. Polimerne molekule obdajajo cementne delce ter s tem preprečijo njihovo združevanje. Adsorbcija poteka postopno, zato je čas povečane obdelavnosti daljši kot pri superplastifikatorjih prve generacije. Dodajamo ga v količini od 0,2 % do 1,5 % glede na maso cementa – odvisno od vrste cementa, želene obdelavnosti in V/C razmerja [11]. Lastnosti uporabljenega PCE superplastifikatorja so navedene v preglednici 8.

Preglednica 8 :Karakteristike uporabljenega PCE superplastifikatorja [11]

| Lastnosti | Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji |
|------------------------------|--|
| Izgled | Tekočina rjavo rumene barve |
| Gostota, 20°C | 1,06 ± 0,02 kg/dm ³ |
| pH | 3 ± 1 |
| Vsebnost vodotopnih kloridov | Ne vsebuje kloridov |
| Vsebnost alkalij | <3 % |

5.5 Aerant

Aerant smo v beton dodajali z namenom povečanja stabilnosti svežega betona. Uporabljeni aerant se dodaja v majhnih količinah glede na maso cementa, zato ga v mešanico betona doziramo razredčenega v vodi [12]. Lastnosti aeranta so navedene v preglednici 9.

Preglednica 9 : Lastnosti aeranta [12]

| Lastnosti | Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji |
|------------------------------|---|
| Izgled | Tekočina rumeno-rjave barve |
| Gostota, 20°C | 1,01 ± 0,02 kg/dm ³ |
| Vsebnost suhe snovi | 5,0 ± 0,5 % |
| pH | 12 ± 1 |
| Vsebnost vodotopnih kloridov | Ne vsebuje kloridov |
| Vsebnost alkalij | < 1 % |

5.6 Stabilizator

Stabilizator smo dodajali z namenom povečanja odpornosti svežega betona proti izcejanju vode. S tem smo želeli povečati odpornost svežega betona proti segregaciji. Stabilizator dodajamo v količini od 0,02 – 0,2 % glede na maso cementa. Lastnosti stabilizatorja so navedene v preglednici 10.

Preglednica 10 : Lastnosti stabilizatorja [13]

| Lastnosti | Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji |
|---------------------|---|
| Izgled | Mlečno bela tekočina značilnega vonja |
| Gostota, 20°C | 1 kg/dm ³ |
| Vsebnost suhe snovi | 25 ± 1,2 % |
| pH | 2,5 ± 0,5 |

5.7 Receptura betonskih mešanic

5.7.1 Osnovna betonska mešanica

Pred izvedbo preiskav smo izdelali recepturo za osnovno betonsko mešanico brez dodatkov. Osnovni izračun smo izdelali za 1 m³ betona.

Osnovni podatki:

$$m_{\text{cem}} = 400 \text{ kg}$$

$$V/C = 0,5$$

$$m_{\text{vode}} = 200 \text{ kg}$$

$$m_{\text{agr.}} = ?$$

$$p = 2 \%$$

$$\rho_{\text{cem}} = 3010 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{voda}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{agr.}} = 2700 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{vode}} = m_{\text{vode}} / \rho_{\text{voda}} = 0,2 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{cem}} = m_{\text{cem}} / \rho_{\text{cem}} = 0,133 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{zrak}} = 1 \text{ m}^3 * p = 0,02 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{agr}} = 1 \text{ m}^3 - V_{\text{vode}} - V_{\text{cem}} - V_{\text{zrak}} = 0,647 \text{ m}^3$$

$$m_{\text{agr}} = V_{\text{agr}} * \rho_{\text{agr.}} = 1747 \text{ kg}$$

Ko izračunamo maso površinsko suhega z vodo zasičenega agregata, ga je treba razdeliti na frakcije, v skladu z izbrano zrnastostno sestavo agregata.

$$m_{\text{agr } 0/2} = 22\% \quad m_{\text{agr}} = 384,34 \text{ kg}$$

$$m_{\text{agr } 2/4} = 33\% \quad m_{\text{agr}} = 576,51 \text{ kg}$$

$$m_{\text{agr } 4/8} = 18\% \quad m_{\text{agr}} = 314,46 \text{ kg}$$

$$m_{\text{agr } 8/16} = 27\% \quad m_{\text{agr}} = 471,69 \text{ kg}$$

Ker smo v eksperimentalnem delu uporabljali suh agregat, je treba v nadaljevanju mase frakcij v površinsko suhem z vodo zasičenem stanju privedi na mase frakcij v suhem stanju. To storimo z upoštevanjem podatkov o vpijanju vode posamezne frakcije. Z odebeljeno pisavo je prikazan njen delež pri posamezni frakciji agregata.

$$m_{agr\ 0/2} = m_{suh\ agr\ 0/2} + \frac{0,99}{100} \cdot m_{suh\ agr\ 0/2} \rightarrow m_{suh\ agr\ 0/2} = \frac{m_{agr\ 0/2}}{1,0099} = 380,57\ kg$$

$$m_{suh\ agr\ 2/4} = \frac{m_{agr\ 2/4}}{1,0072} = 572,39\ kg$$

$$m_{suh\ agr\ 4/8} = \frac{m_{agr\ 4/8}}{1,0075} = 312,12\ kg$$

$$m_{suh\ agr\ 8/16} = \frac{m_{agr\ 8/16}}{1,0035} = 470,04\ kg$$

Ker bo suh agregat ob mešanju betona nekaj vode vpil, je to vodo treba dodati vodi za vodo-cementno razmerje. Njeno količino izračunamo tako, da od mase vsake frakcije v površinsko suhem z vodo zasičenem stanju odštejemo maso frakcije v suhem stanju.

$$m_{vode\ 0/2} = 384,38\ kg - 380,57\ kg = 3,81\ kg$$

$$m_{vode\ 2/4} = 576,57\ kg - 572,39\ kg = 4,18\ kg$$

$$m_{vode\ 4/8} = 314,50\ kg - 312,12\ kg = 2,38\ kg$$

$$m_{vode\ 8/16} = 471,74\ kg - 470,04\ kg = 1,70\ kg$$

Potrebna količina vode je vsota med maso vode, ki jo agregat vpije in določeno maso vode.

$$m_{dodane\ vode} = 12,07\ kg$$

$$m_{\text{vode}} = 212,07 \text{ kg}$$

Ker smo pri preizkusih mešali 40 litrov betona, je bilo treba mase vseh materialov deliti s 25 ali množiti z 0,04.

$$m_{\text{vode}} = 8,48 \text{ kg}$$

$$m_{\text{cem}} = 16 \text{ kg}$$

$$m_{0/2} = 15,22 \text{ kg}$$

$$m_{2/4} = 22,90 \text{ kg}$$

$$m_{4/8} = 12,49 \text{ kg}$$

$$m_{8/16} = 18,80 \text{ kg}$$

5.7.2 Skupina mešanic, pri katerih smo večali količino superplastifikatorja

Pri mešanicah, kjer smo uporabili PCE superplastifikator, smo njegov delež v betonu postopno večali in sicer od 0,1 %, preko 0,2 % do 0,3 %. To smo storili tako pri sestavi s cementom CEM II/A-M(LL.S) 42,5R (osnovna mešanica brez superplastifikatorja CR-1 – preglednica 11) kot pri sestavi s cementom CEM I 42,5R (osnovna mešanica brez superplastifikatorja CL-1 – preglednica 12).

Preglednica 11 : Delež PCE superplastifikatorja dodanega osnovni mešanici CR-1

| Ime mešanice | Masa cementa | Delež superplastifikatorja | Masa superplastifikatorja |
|--------------|--------------|----------------------------|---------------------------|
| CR-1 | 400kg | 0 % | 0 kg |
| CR-1a | 400kg | 0,1 % | 0,4 kg |
| CR-1b | 400kg | 0,2 % | 0,8 kg |
| CR-1c | 400kg | 0,3 % | 1,2 kg |

Preglednica 12 : Delež PCE superplastifikatorja dodanega osnovni mešanici CL-1

| Ime mešanice | Masa cementa | Delež superplastifikatorja | Masa superplastifikatorja |
|--------------|--------------|----------------------------|---------------------------|
| CL-1 | 400kg | 0 % | 0 kg |
| CL-1a | 400kg | 0,1 % | 0,4 kg |
| CL-1b | 400kg | 0,2 % | 0,8 kg |
| CL-1c | 400kg | 0,3 % | 1,2 kg |

Pri mešanicah CR-1 in CL-1 smo torej postopno večali delež superplastifikatorja, ki smo ga vmeša v betonsko mešanico sočasno z vodo. Vpliv PCE superplastifikatorja na lastnosti svežega betona je zelo odvisen od vrste cementa in je viden že s prostim očesom.

5.7.3 Skupina mešanic, pri katerih smo večali količino aeranta

V tej skupini betonov je bila osnovna mešanica brez dodatka mešanica CR-1 s cementom CEM II/A-M(LL.S) 42,5R. V nadaljevanju smo mešanici dodali aerant in sicer smo delež aeranta večali od 0,04 % do 0,06 % in nato zmanjšali nazaj na 0,05 %.

Preglednica 13 : Delež aeranta, dodanega osnovni mešanici CR-1

| Ime mešanice | Masa cementa | Delež aeranta | Masa aeranta |
|---------------|--------------|---------------|--------------|
| CRA-1a | 400kg | 0,04 % | 0,16 kg |
| CRA-1b | 400kg | 0,06 % | 0,24 kg |
| CRA-1c | 400kg | 0,05 % | 0,2 kg |

Pri mešanicah z aerantom smo torej osnovni betonski mešanici dodali aerant, pri čemer smo njegov delež spreminjali od mešanice CRA-1a do mešanice CRA-1c. Aerant smo najprej razredčili z vodo in ga potem vmešali v beton sočasno z vodo. Vpliv aeranta na lastnosti svežega betona je viden že pri merjenju poseda in razleza.

5.7.4 Skupina mešanic, pri katerih smo večali količino stabilizatorja

Pri mešanicah skupine CG-1 smo uporabljali cement CEM I 42,5R in povečali vodo-cementno razmerje betona na 0,62. S tem smo dosegli izcejanje vode pri sestavi brez dodanega stabilizatorja.

Preglednica 14 : Delež stabilizatorja dodanega osnovni mešanici CL-1

| Ime mešanice | Masa cementa | Delež stabilizatorja | Masa stabilizatorja |
|---------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------|
| CG-1a | 400kg | 0,1 % | 0,4 kg |
| CG-1b | 400kg | 0,15 % | 0,6 kg |
| CG-1c | 400kg | 0,2 % | 0,8 kg |

Pri mešanicah CG-1 smo osnovni betonski mešanici povečali V/C faktor ter postopno dodajali stabilizator, ki se ga vmeša sočasno z vodo. Delež stabilizatorja se dodaja glede na maso cementa. Njegov vpliv je viden že s prostim očesom saj je beton bolj gost.

6 REZULTATI MERITEV

Preiskave v okviru diplomskega dela smo izvajali v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Na začetku vsake preiskave je bilo treba stehtati (slika 20) vse sestavine betona in suhe sestavine dati v boben mešalca. Najprej smo v boben mešalca dali frakciji 4/8 mm in 8/16 mm, nato cement, za tem pa še preostali dve frakciji. Sledilo je 30 s mešanja suhih sestavin v protitočnem laboratorijskem mešalcu na sliki 21. Po 30 sekundah mešanja smo dodali v boben mešalca vodo in kemijski dodatek. Ob tem smo začeli z merjenjem časa hidratacije cementa v betonu in tudi časa, ko smo izvedli preiskave. Mokro mešanje je potekalo 3 minute. To je bilo dovolj, da ni bilo več sledu o suhih delcih in da je bila mešanica homogena premešana.

Da bi ugotovili, kako se lastnosti svežega betona spreminjajo s časom, smo na vsaki sestavi betona opravili preiskave v štirih različnih časovnih intervalih po koncu mešanja betona, to je takoj po zamešanju (čas 0 min) in po 20, 40 in 60 minutah po zamešanju. V vsakem času smo najprej opravili meritve z reometrom, za tem pa še meritvi poseda in razleza. Pri mešanicah z dodanim aerantom smo izmerili tudi delež zračnih por v svežem betonu. Za vsako betonsko mešanico in čas po koncu mešanja betona smo posamezno preiskavo opravili trikrat. Rezultat preiskave je povprečje treh meritev. Meritve poseda, razleza in deleža por smo opravili v skladu s standardi.

Rezultate preiskav prikazujemo v obliki grafikonov in preglednic. Prva dva grafikona in prva preglednica v vsakem izmed poglavij prikazujeta vpliv spremembe deleža izbranega dodatka na reološke lastnosti (plastično viskoznost in strižno napetost na meji tečenja) in obdelavnost svežega betona v času $t=0$. Grafikoni in preglednica v nadaljevanju pa prikazujejo vpliv izbranega dodatka na iste lastnosti v odvisnosti od časa.



Slika 20 (levo) : Tehtnica



Slika 21 (desno) : Mešalec

6.1 Betonske mešanice z različnima cementoma in različnimi deleži superplastifikatorja

Analizo smo opravili na dveh skupinah betonskih mešanic, CR-1, CR-1a, CR-1b, CR-1c in CL-1, CL-1a, CL-1b in CL-1c. Sestava obeh mešanic je bila v obeh skupinah povsem enaka, različna sta si bila le cementa. V skupini CL-1 smo uporabili cement CEM I 42,5 R (cement 2), v skupini CR1 pa cement CEM II / A-M(LL-S) 42,5 R (cement 1).

Preglednica 15 : Rezultati meritev za betone skupine CR-1 pri času $t = 0$

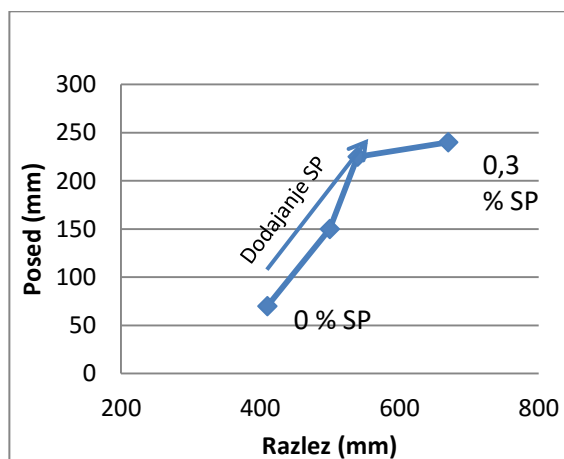
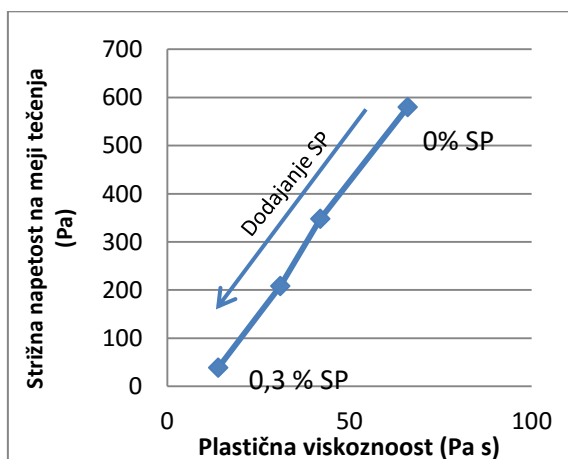
| Ime mešanice | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|--------------|----------|-------|--------|--------|----------|
| | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| CR-1 | 0 | 70 | 410 | 66 | 580 |
| CR-1a | 0,1 | 150 | 500 | 42 | 348 |
| CR-1b | 0,2 | 225 | 540 | 31 | 208 |
| CR-1c | 0,3 | 240 | 670 | 14 | 39 |

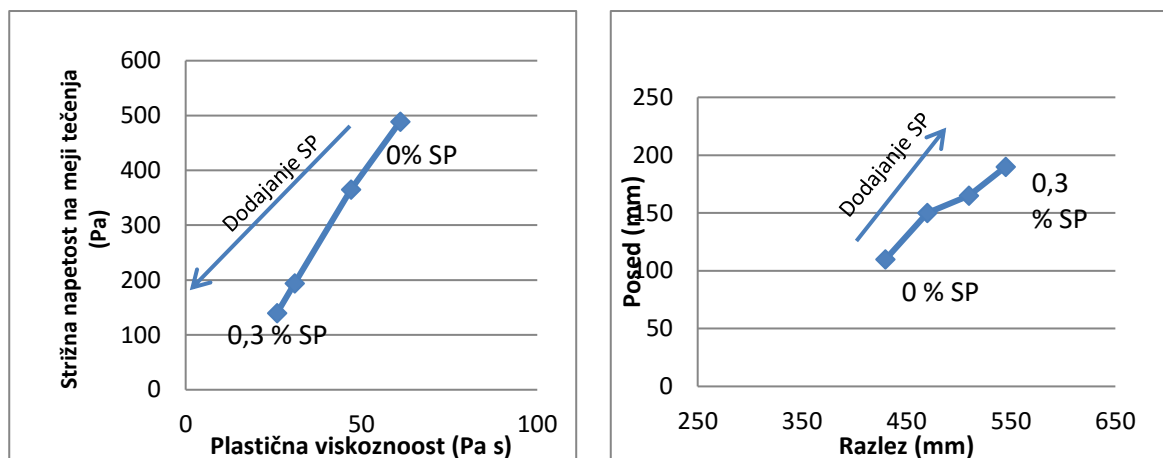
Preglednica 16 : Rezultati meritev za betone skupine CL-1 pri času $t = 0$

| Ime mešanice | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|--------------|----------|-------|--------|--------|----------|
| | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| CL-1 | 0 | 110 | 430 | 61 | 489 |
| CL-1a | 0,1 | 150 | 470 | 47 | 365 |
| CL-1b | 0,2 | 165 | 510 | 31 | 194 |
| CL-1c | 0,3 | 190 | 545 | 26 | 140 |

Grafikon 2 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od deleža SP v času $t = 0$ pri sestavah CR-1

Grafikon 3 : Posed in razlez v odvisnosti od deleža SP pri času $t = 0$ pri sestavah CR-1



Grafikon 4 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od deleža SP v času $t = 0$ pri sestavah CL-1**Grafikon 5 : Posed in razlez v odvisnosti od deleža SP pri času $t = 0$ pri sestavah CL-1**

Zgornji grafikoni (grafikoni 2 do 5) prikazujejo, kako se lastnosti svežega betona spreminjajo z deležem PCE superplastifikatorja. Iz vseh grafikonov se vidi, da ima superplastifikator velik vpliv na vse štiri parametre, ki smo jih preiskovali. Večanje deleža superplastifikatorja bistveno zniža vrednost strižne napetosti na meji tečenja, kar je v skladu s pričakovanji. Istočasno pa se bistveno niža tudi plastična viskoznost. Zadnja ugotovitev je drugačna od ugotovitve tujih raziskovalcev. Ti namreč pravijo, da superplastifikator vpliva predvsem na zmanjšanje strižne napetosti na meji tečenja, medtem ko na plastično viskoznost nima večjega vpliva. Večanje deleža superplastifikatorja je bistveno povečalo tudi posed in razlez svežega betona.

Pri sestavi brez superplastifikatorja je imel beton s cementom 2 boljšo obdelavnost, ter nižjo strižno napetost na meji tečenja, kot beton s cementom 1. Z dodatkom superplastifikatorja in večanjem njegove količine pa je bil bolj obdelaven beton s cementom 1. To pomeni, da je superplastifikator bolj učinkovit v kombinaciji s cementom 1. Pri največjem deležu superplastifikatorja, 0,3%, doseže beton s cementom 1 tudi bistveno nižjo plastično viskoznost in strižno napetost na meji tečenja, kot beton s cementom 2.

Zaključimo lahko, da dodatek PCE superplastifikatorja in večanje njegovega deleža bistveno vplivata na oba reološka parametra svežega betona – bistveno se znižata tako strižna napetost na meji tečenja kot plastična viskoznost.

CR-1 in CL-1 SP=0%

Preglednica 17 : Rezultati preiskav na betonu CR-1 – vpliv časa

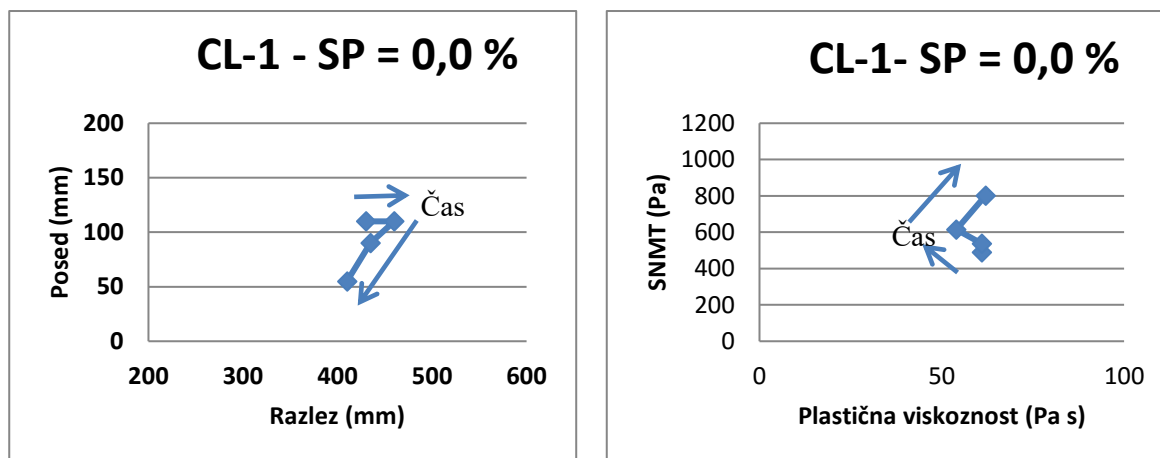
| CR-1 | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|----------------------|---------------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Čas v min | 0 | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0 | 70 | 410 | 65,6 | 580 |

Preglednica 18 : Rezultati preiskav na betonu CL-1 – vpliv časa

| CL-1 | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|----------------------|---------------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Čas v min | 0 | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0 | 110 | 430 | 61 | 489 |
| 20 | 0 | 110 | 460 | 61 | 537 |
| 40 | 0 | 90 | 435 | 54 | 614 |
| 60 | 0 | 55 | 410 | 62 | 802 |

Grafikon 6 : Posed in razlez brez dodanega SP pri mešanici CL-1 v odvisnosti od časa

Grafikon 7 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja pri mešanici CL-1 brez dodanega SP v odvisnosti od časa



Pri osnovnih sestavah betonov brez kemijskega dodatka – CR-1 in CL-1, se je strižna napetost na meji tečenja s časom povečevala, na plastično viskoznost pa čas ni imel večjega vpliva. Majhen posed in razlez pri času 0 kažeta na to, da je bila mešanica brez superplastifikatorja kohezivna in težje obdelavna. Po standardu SIST EN 206 jih lahko uvrstimo v skupini S2 in F2.

Pri osnovni mešanici vidimo, da ima beton CR-1 manjšo obdelavnost ter večjo strižno napetost na meji tečenja, kot beton CL-1.

Pri mešanici CR-1 smo opravili meritve samo v času 0 min, zato grafov nisem prikazal. Predvidevam, da bi se beton CR-1 s časom obnašal podobno kot CL-1.

CR-1a in CL-1a SP=0,1%

Preglednica 19 : Rezultati preiskav na betonu CR-1a – vpliv časa

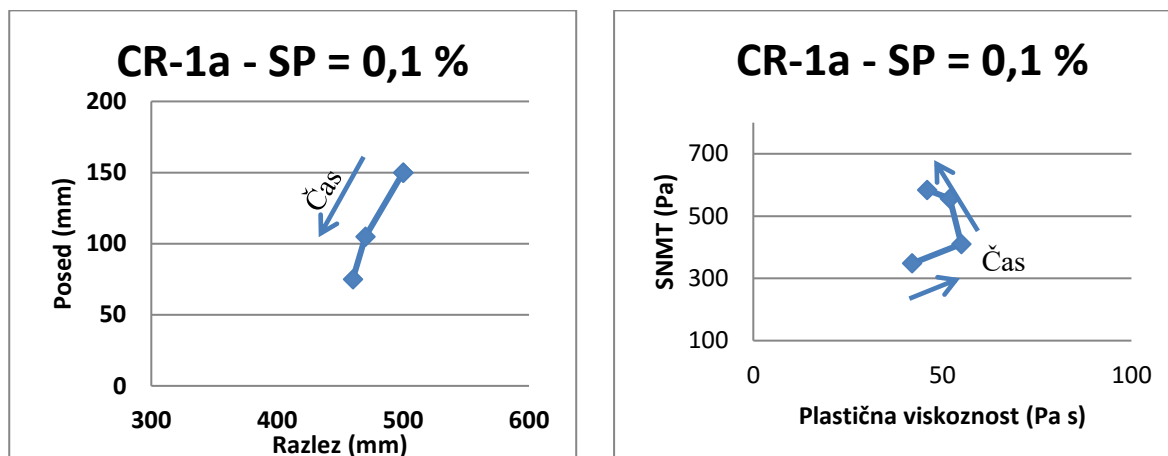
| CR-1a | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|------------------|-----------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Čas v min | 0 | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,1 | 150 | 500 | 42 | 348 |
| 20 | 0,1 | 150 | 500 | 55 | 410 |
| 40 | 0,1 | 105 | 470 | 52 | 556 |
| 60 | 0,1 | 75 | 460 | 46 | 584 |

Preglednica 20 : Rezultati preiskav na betonu CL-1a – vpliv časa

| CL-1a | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|------------------|-----------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Čas v min | 0 | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,1 | 150 | 470 | 47 | 365 |
| 20 | 0,1 | 90 | 420 | 51 | 513 |
| 40 | 0,1 | 70 | 400 | 57 | 614 |
| 60 | 0,1 | 45 | 380 | 59 | 707 |

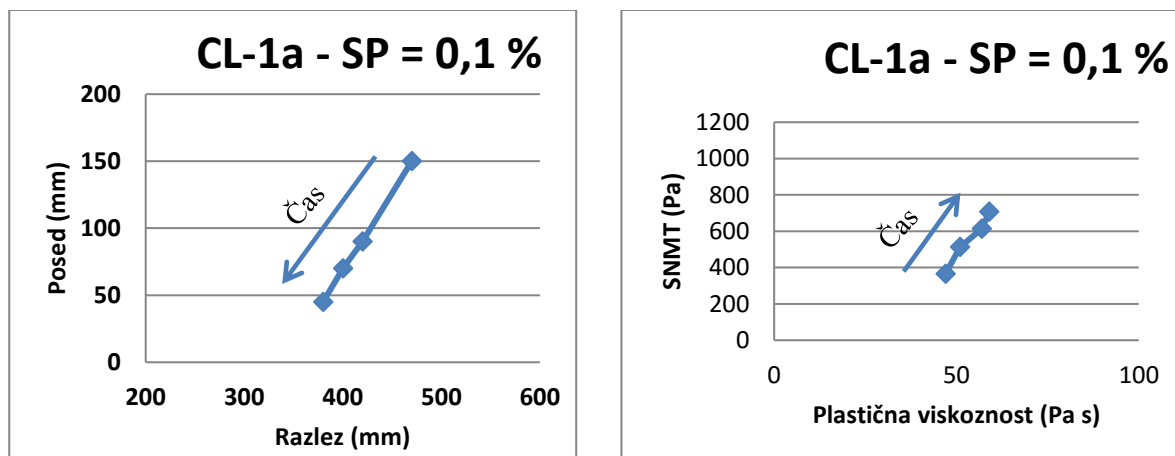
Grafikon 8 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1a

Grafikon 9: Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1a



Grafikon 10 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CL1a

Grafikon 11 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CL1a



Pri deležu PCE superplastifikatorja 0,1 % se se posed in razlez s časom konstantno zmanjšujeta. V začetnem času ($t=0$) sta bila ta dva parametra podobna pri obeh betonih, po eni uri ($t=60$ min) pa ima beton s cementom 2 manjšo obdelavnost. Strižna napetost na meji tečenja in plastična viskoznost pri betonu s cementom 1 konstantno naraščata s časom, pri betonu s cementom 2 pa strižna napetost na meji tečenja s časom vseskozi narašča, plastična viskoznost pa po 20 minutah naraste, potem pa do konca meritev pada (po 40 in 60 minutah).

CR-1b in CL-1b SP=0,2%

Preglednica 21 : Rezultati preiskav na betonu CR-1b – vpliv časa

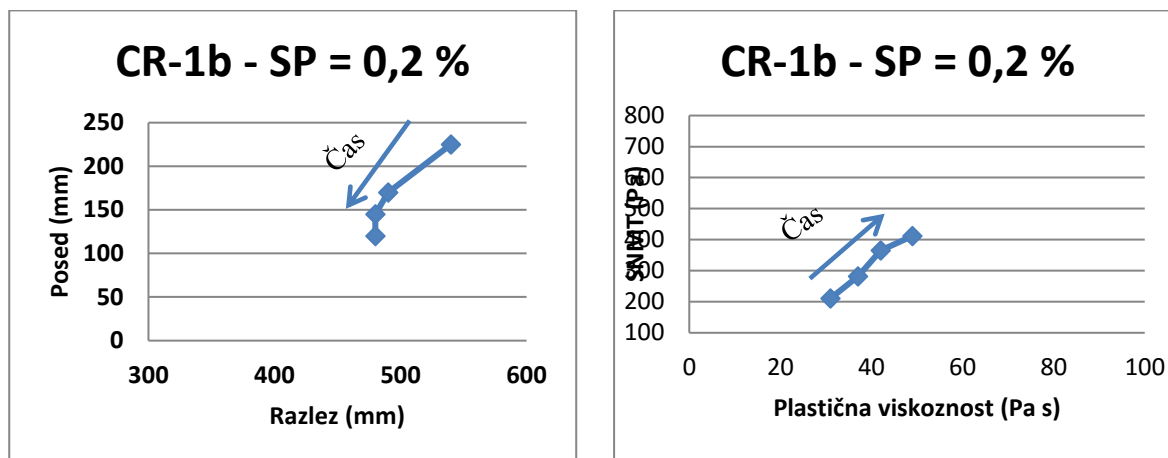
| CR-1b | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|----------------------|---------------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Čas v min | 0 | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,2 | 225 | 540 | 31 | 211 |
| 20 | 0,2 | 170 | 490 | 37 | 282 |
| 40 | 0,2 | 145 | 480 | 42 | 365 |
| 60 | 0,2 | 120 | 480 | 49 | 412 |

Preglednica 22 : Rezultati preiskav na betonu CL-1b – vpliv časa

| CL-1b | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|----------------------|---------------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Čas v min | 0 | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,2 | 165 | 510 | 31 | 194 |
| 20 | 0,2 | 120 | 480 | 42 | 311 |
| 40 | 0,2 | 120 | 440 | 52 | 403 |
| 60 | 0,2 | 95 | 390 | 59 | 519 |

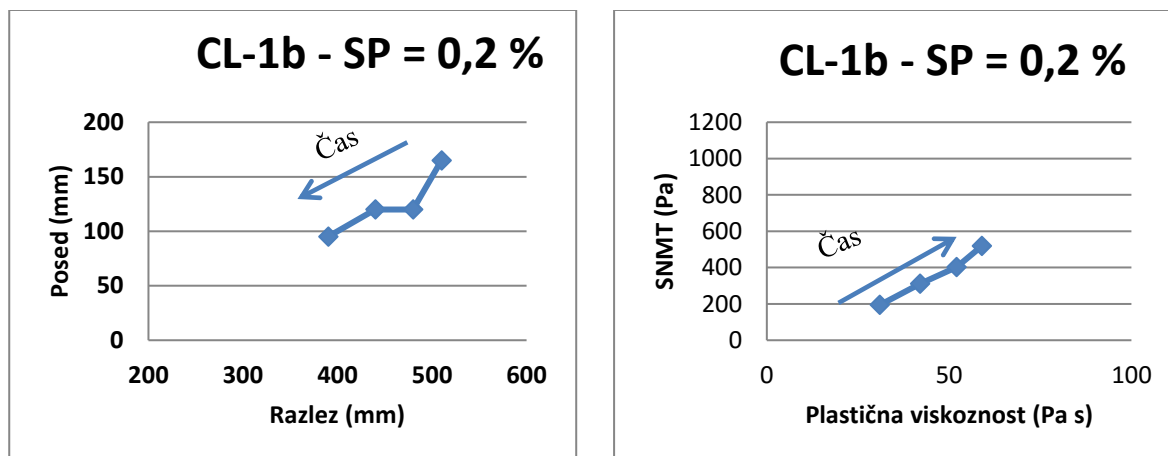
Grafikon 12 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1b

Grafikon 13 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1b



Grafikon 14 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CL-1b

Grafikon 15 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CL-1b



Pri mešanicah CR-1b in CL-1b smo dodali 0,2 % superplastifikatorja glede na maso cementa. Posed in razlez se tudi pri tem deležu superplastifikatorja zmanjšujeta s časom pri obeh mešanicah. Je pa pri betonu CR-1b razlez od časa 20 minut naprej približno konstanten, med tem ko posed počasi pada. V vseh časih od zamešanja obdelavnost s časom pada. Ima pa beton s cementom 1– CR-1b, boljše obdelavnost kot beton s cementom CL-1b. Strižna napetost na meji tečenja in plastična viskoznost s časom naraščata. Pri obeh mešanicah sta ta dva parametra manjša kot pri mešanicah CR-1b in CL-1b.

CR-1c in CL1c SP=0,3%

Preglednica 23 : Rezultati preiskav na betonu CR-1c – vpliv časa

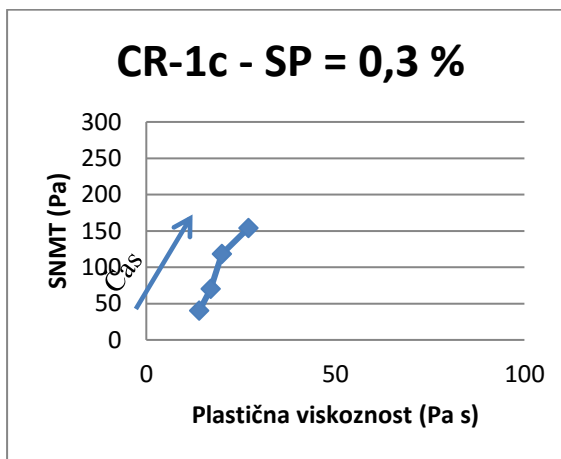
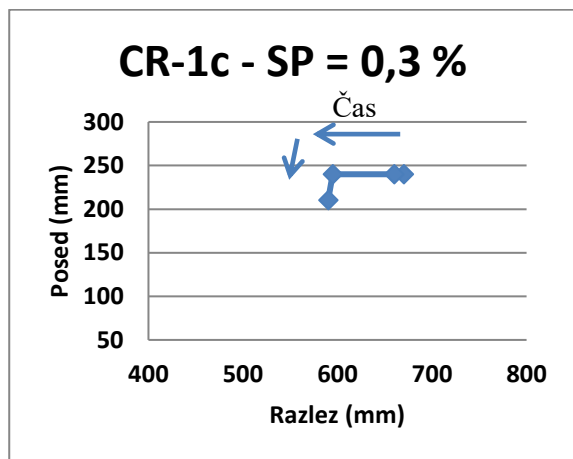
| CR-1c | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|------------------|-----------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Čas v min | 0 | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,3 | 240 | 670 | 14 | 40 |
| 20 | 0,3 | 240 | 660 | 17 | 70 |
| 40 | 0,3 | 240 | 595 | 20 | 118 |
| 60 | 0,3 | 210 | 590 | 27 | 154 |

Preglednica 24 : Rezultati preiskav na betonu CL-1c – vpliv časa

| CL-1c | Delež SP | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|------------------|-----------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Čas v min | 0 | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,3 | 190 | 545 | 26 | 140 |
| 20 | 0,3 | 180 | 490 | 34 | 220 |
| 40 | 0,3 | 160 | 475 | 36 | 289 |
| 60 | 0,3 | 110 | 430 | 42 | 363 |

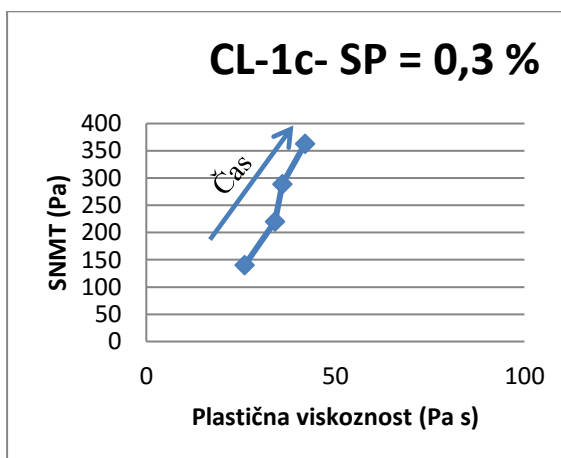
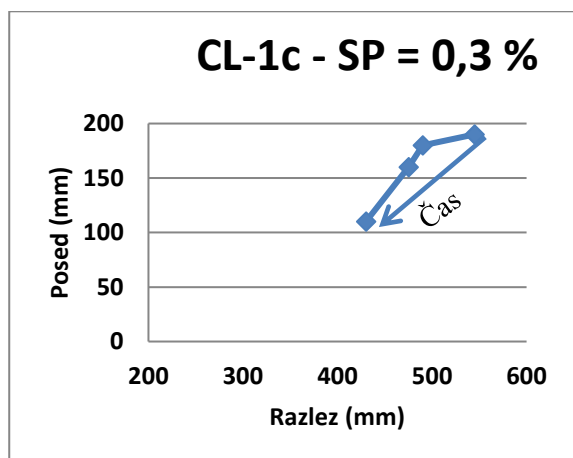
Grafikon 16 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1c

Grafikon 17 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CR-1c



Grafikon 18 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CL-1c

Grafikon 19 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CL-1c



Kot je razvidno iz grafikona 16, pri največjem deležu superplastifikatorja beton CR1c vzdržuje velikost poseda vse do časa 40 minut. Šele po eni uri po zamešanju betona ($t = 60$ minut), posed pade za približno 50 mm. Razlez ima nekoliko drugačno zakonitost: konstanten je do 20 minut po zamešanju, zmanjša se po 40 minutah, potem pa do 60 minut ostaja približno nespremenjen. Obdelavnost pri betonu CL-1c ves čas pada in je manjša kot pri betonu CR-1c. Strižna napetost na meji tečenja in plastična viskoznost pri obeh betonih s časom naraščata. Številčne vrednosti so večje pri mešanici s cementom 2 (CEM I 42,5 R).

Zaradi povečanja količine dodanega superplastifikatorja se obdelavnost obeh mešanic še dodatno poveča, reološka parametra pa sta ob večjem dodatku superplastifikatorja manjša.

6.2 Betonske mešanice z različnimi deleži aeranta

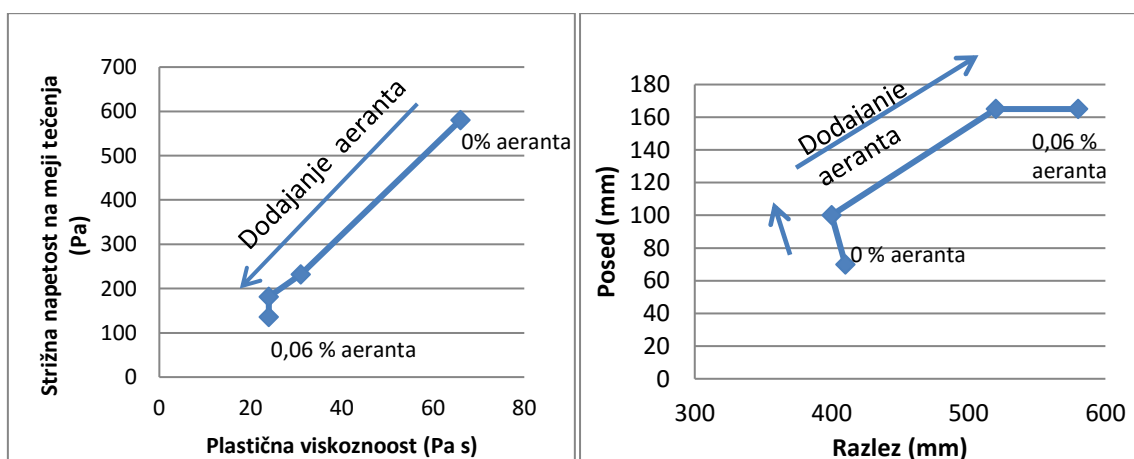
Vpliv količine aeranta smo ugotavljali na skupini betonov z oznakami CRA-1a, CRA-1b in CRA-1c. Osnovna mešanica, ki ni vsebovala aeranta, je bila mešanica CR-1a. Rezultati preiskav za čas $t=0$ min so prikazani v preglednici 26. Vneseni zračni mehurčki so imeli vpliv tako na strižno napetost na meji tečenja kot na plastično viskoznost betona, in tudi na obdelavnost betona. Učinek aeranta do deleža enakega 0,05% je bil nekaj večji v primeru plastične viskoznosti. Tako obnašanje je značilno za betone z veliko količino finih delcev [19]. Naši betoni so betoni z veliko količino finih delcev saj frakciji drobnega agregata (0/2 in 0/4) vsebujeta velik delež praškastih delcev (14% frakcija 0/2 in 13% frakcija 0/4).

Preglednica 25 : Rezultati preiskav betonske mešanice CRA-1 pri času $t = 0$

| Ime mešanice | Delež aeranta | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|--------------|---------------|-------|--------|--------|----------|
| | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| CR-1 | 0 | 70 | 410 | 66 | 580 |
| CRA-1a | 0,04 | 100 | 400 | 31 | 232 |
| CRA-1b | 0,06 | 165 | 580 | 24 | 136 |
| CRA-1c | 0,05 | 165 | 520 | 24 | 181 |

Grafikon 20 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji plastičnosti v odvisnosti od deleža aeranta v času $t = 0$

Grafikon 21 : Posed in razlez v odvisnosti od deleža aeranta v času $t = 0$



Grafikon 20 nam pokaže, da se pri betonu z deležem aeranta 0,05 % ali več spreminja samo strižna napetost na meji tečenja (se zmanjša), plastična viskoznost pa ostane nespremenjena. Pokaže nam tudi velik padec obeh parametrov pri dodatku aeranta, glede na mešanico brez dodatka.

Z večanjem deleža aeranta do 0,05 % se večja tudi posed betona. Povečanje deleža aeranta z 0,05 % na 0,06 % pa na obdelavnost betona, izmerjeno s posedom, ne vpliva več, saj ostane posed skoraj nespremenjen. Se pa poveča razlez betona.

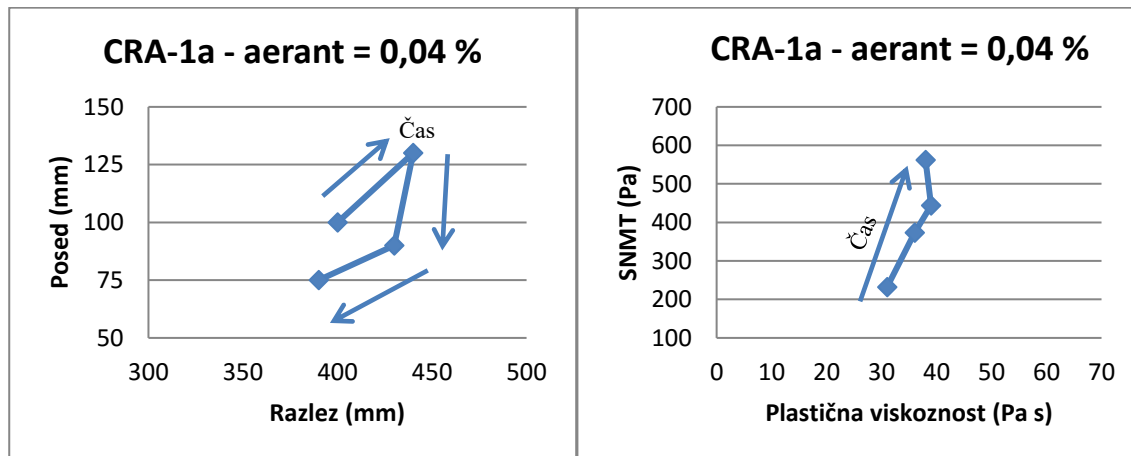
CRA-1a aerant = 0,04%

Preglednica 26 : Rezultati preiskav za beton CRA-1a – vpliv časa

| CRA-1a | Delež aeranta | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|-----------|---------------|-------|--------|--------|----------|
| Čas v min | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,04 | 100 | 400 | 31 | 232 |
| 20 | 0,04 | 130 | 440 | 36 | 373 |
| 40 | 0,04 | 90 | 430 | 39 | 444 |
| 60 | 0,04 | 75 | 390 | 38 | 562 |

Grafikon 22 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1a

Grafikon 23 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1a



Pri mešanici z 0,04 % dodanega aeranta je bila vsebnost zraka enaka 4,1%. Po prvih dvajsetih minutah se obdelavnost betona poveča, saj se povečata tako posed kot razlez betona. Pri večjih časih pa obdelavnost betona pada. Strižna napetost na meji tečenja s časom močno narašča, medtem ko se plastična viskoznost bistveno ne spreminja. Glede na osnovni beton CR-1, ki je brez aeranta, sta se strižna napetost na meji tečenja in plastična viskoznost pri času $t = 0$ min več kot prepolovili. Zmanjšal se je tudi razlez, med tem ko se je posed povečal za 30 mm.

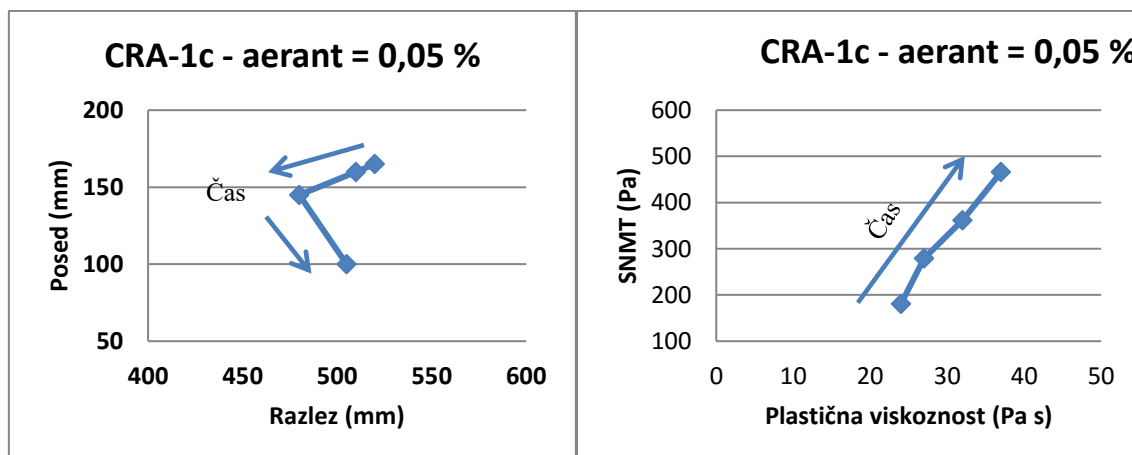
CRA-1c aerant = 0,05%

Preglednica 27 : Rezultati preiskav za beton CRA-1c – vpliv časa

| CRA-1c | Delež aeranta | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|-----------|---------------|-------|--------|--------|----------|
| Čas v min | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,05 | 165 | 520 | 24 | 181 |
| 20 | 0,05 | 160 | 510 | 27 | 279 |
| 40 | 0,05 | 145 | 480 | 32 | 362 |
| 60 | 0,05 | 100 | 505 | 37 | 466 |

Grafikon 24 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1c

Grafikon 25 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1c



Pri mešanici z 0,05 % dodanega aeranta je bila vsebnost zraka enaka 5,6%. Posed s časom konstantno pada, med tem ko razlez pada do $t = 40$ min, nato pa naraste pri $t = 60$ min. Strižna napetost na meji tečenja in plastična viskoznost s časom konstantno naraščata. Glede na mešanico z 0,4 % dodanega aeranta se obdelavnost poveča, reološka parametra pa se zmanjšata.

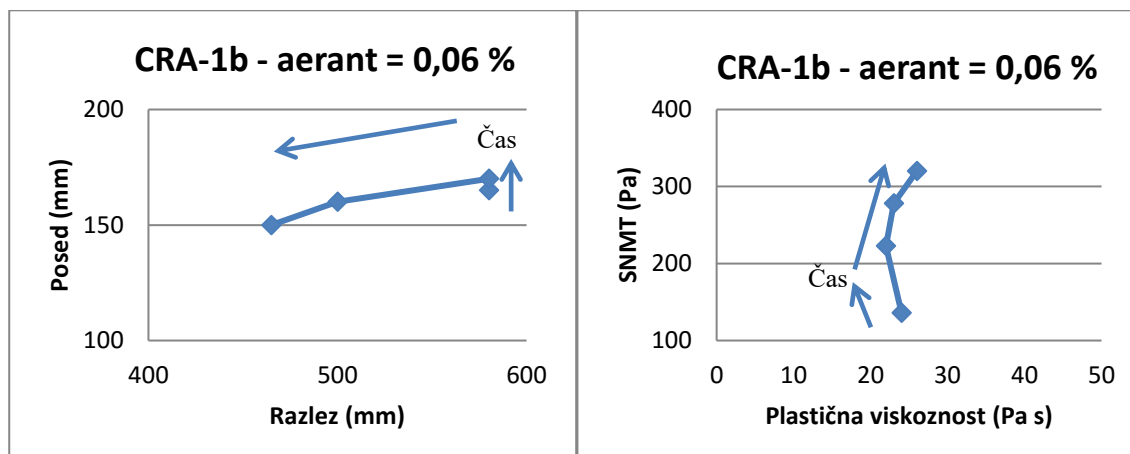
CRA-1b aerant = 0,06%

Preglednica 28 : Rezultati preiskav za beton CRA-1b – vpliv časa

| CRA-1b | Delež aeranta | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|-----------|---------------|-------|--------|--------|----------|
| Čas v min | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,06 | 165 | 580 | 24 | 136 |
| 20 | 0,06 | 170 | 580 | 22 | 223 |
| 40 | 0,06 | 160 | 500 | 23 | 278 |
| 60 | 0,06 | 150 | 465 | 26 | 320 |

Grafikon 26 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1b

Grafikon 27 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CRA-1b



Pri mešanici z 0,06 % dodanega aeranta je bila vsebnost zraka enaka 5,9%. Po prvih dvajsetih minutah se obdelavnost betona poveča, nato pa do konca preiskave pada. Strižna napetost na meji tečenja s časom narašča, plastična viskoznost pa v času 20 minut rahlo pade, potem pa rahlo narašča, vendar v se v splošnem s časom bistveno ne spreminja.

S povečanjem deleža aeranta z 0,05% na 0,06% se plastična viskoznost betona minimalno zmanjša. Enako, kot pri povečanju deleža aeranta z 0,04 % na 0,05 %, se tudi pri povečanju z 0,05 % na 0,06 % zmanjša strižna napetost na meji tečenja. Tovrstno obnašanje aeriranega betona je pričakovano. Tattersall in Banfill (Tattersall in Banfill, 1983) poročata, da se pri vsebnostih zraka v betonu večjih od 5 % spreminja le še napetost na meji tečenja. Z večanjem deleža aeranta do 0,05 % se večja tudi posed betona. Povečanje deleža aeranta z 0,05 % na 0,06 % pa na obdelavnost betona, izmerjeno s posedom, ne vpliva več. Obnašanje poseda je podobno obnašanju plastične viskoznosti. Pričakovali bi, da se pri zmanjšanju napetosti na meji tečenja posed betona poveča. Pri betonu z aerantom pa to ne velja. Zračni mehurčki, ki jih vnesemo z aerantom, nudijo dodatno notranjo oporo betonu (poleg zrn agregata). Zaradi tega se aeriran beton ne posede toliko, kot bi lahko sklepali na podlagi reoloških parametrov.

6.3 Mešanice z različnimi deleži stabilizatorja

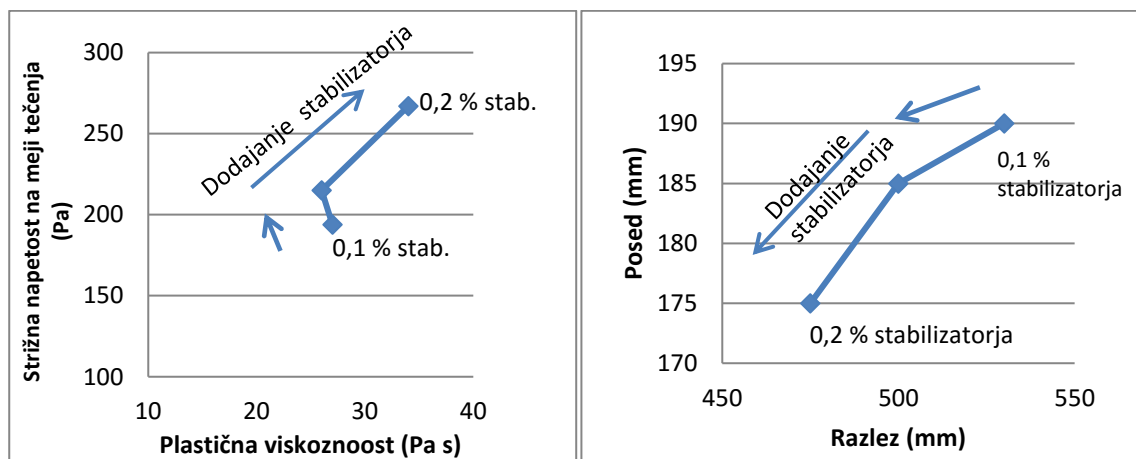
Vpliv stabilizatorja smo raziskovali na betonih CG-1a, CG-1b in CG-1c. Pri teh betonih je bilo vodocementno razmerje 0,62. Betonski mešanici dodamo stabilizator, če želimo zmanjšati mobilnosti vode v svežem betonu in s tem povečati njegovo odpornost proti segregaciji.

Preglednica 29 : Rezultati preiskav CG-1 pri času $t = 0$

| Ime mešanice | Delež stabilizatorja | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|--------------|----------------------|-------|--------|--------|----------|
| | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| CG-1a | 0,1 | 190 | 530 | 27 | 194 |
| CG-1b | 0,15 | 185 | 500 | 26 | 215 |
| CG-1c | 0,2 | 175 | 475 | 34 | 267 |

Grafikon 28 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od deleža stabilizatorja v času $t = 0$

Grafikon 29: Posed in razlez v odvisnosti od deleža stabilizatorja pri času $t = 0$



Kot je razvidno z rezultatov v preglednici 30 in na grafikonih 28 in 29, je uporabljen stabilizator povečal plastično viskoznost betona, za okrog 8 Pa, šele pri povečanju deleža stabilizatorja z 0,15 na 0,20 %. Običajno je razlog, zakaj betonski mešanici dodamo stabilizator, zmanjšanje mobilnosti vode in s tem povečanje odpornosti betona proti segregaciji. Z zmanjšanjem mobilnosti vode pa se poveča viskoznost. Delež stabilizatorja enak 0,15 % tudi ni vplival na strižno napetost na meji tečenja, v primerjavi s tisto pri 0,1 % deležu stabilizatorja. Je bil pa ta parameter bistveno povečan, ko smo delež stabilizatorja

povečali na 0,2 %. Z večanjem deleža stabilizatorja se manjša obdelavnost betona, vendar spremembe poseda niso zelo velike..

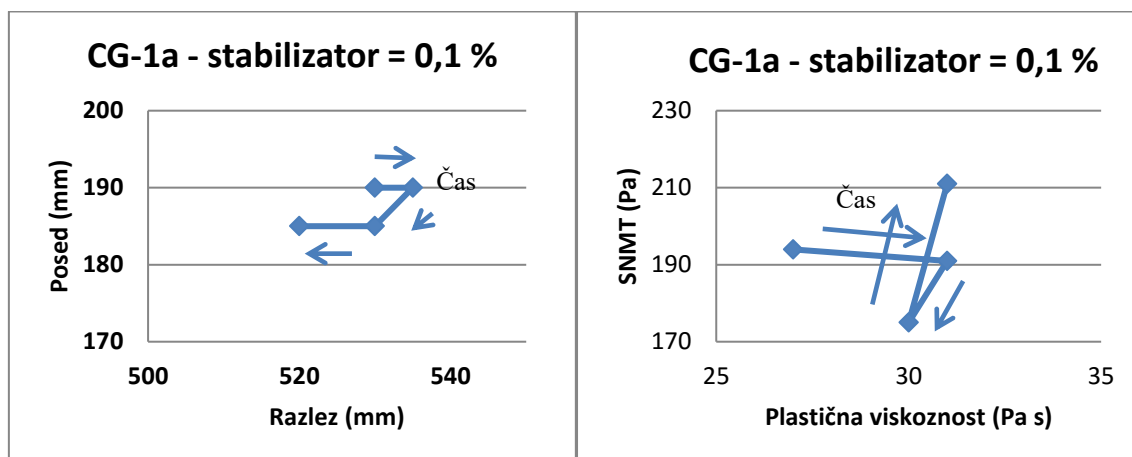
CG-1a stabilizator = 0,1%

Preglednica 30 : Rezultati preiskav za beton CG-1a – vpliv časa

| CG-1a | Delež stabilizatorja | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|-----------|----------------------|-------|--------|--------|----------|
| Čas v min | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,1 | 190 | 530 | 27 | 194 |
| 20 | 0,1 | 190 | 535 | 31 | 191 |
| 40 | 0,1 | 185 | 530 | 30 | 175 |
| 60 | 0,1 | 185 | 520 | 31 | 211 |

Grafikon 30 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1a

Grafikon 31 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1a



Parametri pri mešanici z 0,1% deležem stabilizatorja (preglednica 31 in grafikona 30 in 31) se s časom le malo spreminjajo. Razlez se po 20 minutah poveča nato pa pada. Posed je do 20 minut nespremenjen, potem do 40 minut malo pade in ostane konstanten do 60 minut.

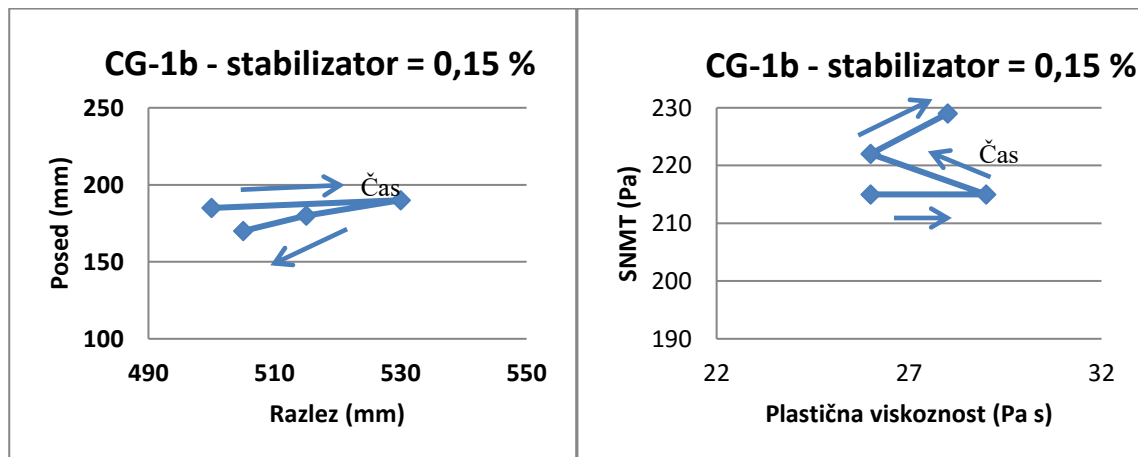
CG-1b stabilizator = 0,15%

Preglednica 31 : Rezultati preiskav za beton CG-1b – vpliv časa

| CG-1b | Delež stabilizatorja | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|-----------|----------------------|-------|--------|--------|----------|
| Čas v min | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,15 | 185 | 500 | 26 | 215 |
| 20 | 0,15 | 190 | 530 | 29 | 215 |
| 40 | 0,15 | 180 | 515 | 26 | 222 |
| 60 | 0,15 | 170 | 505 | 28 | 229 |

Grafikon 32 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1b

Grafikon 33 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1b



S povečanjem dodane količine stabilizatorja na 0,15 % se obdelavnost betonske mešanice zmanjša. Po 20 minutah od zamešanja betona se parametra obdelavnosti povečata, še posebej izrazito razlez. Z večanjem časa do 60 minut po zamešanju posed in razlez padata, vendar so spremembe minimalne. Plastična viskoznost se po 20 minutah najprej poveča, po 40 minutah pade in po 60 minutah spet naraste. V bistvu pa niha okrog konstantne vrednosti pri cca 27 Pa·s. Strižna napetost na meji tečenja pa s časom narašča. Vrednosti so večje kot pri 0,1 % deležu stabilizatorja.

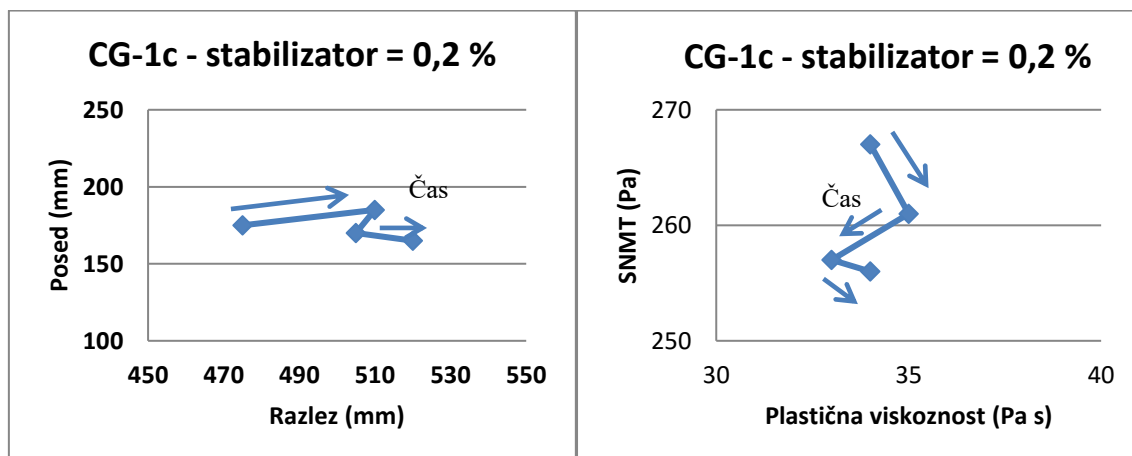
CG-1c stabilizator = 0,2%

Preglednica 32 : Rezultati preiskav za beton CG-1c – vpliv časa

| CG-1c | Delež stabilizator | Posed | Razlez | μ | τ_0 |
|-----------|--------------------|-------|--------|--------|----------|
| Čas v min | % | mm | mm | Pa * s | Pa |
| 0 | 0,2 | 175 | 475 | 34 | 267 |
| 20 | 0,2 | 185 | 510 | 35 | 261 |
| 40 | 0,2 | 170 | 505 | 33 | 257 |
| 60 | 0,2 | 165 | 520 | 34 | 256 |

Grafikon 34 : Posed in razlez v odvisnosti od časa pri mešanici CG-1c

Grafikon 35 : Plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja v odvisnosti od časa pri mešanici CG 1c



Pri povečanju deleža stabilizatorja z 0,15 % na 0,2 % je največji vpliv viden pri plastični viskoznosti, ki se glede na manjši delež dodatka (0,15 %) poveča in niha okrog 34 Pa·s. Poveča se tudi strižna napetost na meji tečenja, ki pa z naraščanjem časa pada. Posed betona se s časom minimalno spreminja, se pa s časom v praviloma večja razlez betona.

7 ZAKLJUČEK

V času raziskav v okviru diplomske naloge sem ugotovil, da je beton zelo zapleten kompozitni material. Kljub letom raziskav je še vedno izziv za strokovnjake in raziskovalce. Tudi zaradi razvoja vedno novih dodatkov betonu in tehnologij.

V sklopu diplomske naloge sem opravljal raziskave na svežih betonskih mešanica. Poudarek je bil na merjenju reoloških lastnosti z reometrom CONTEC VISCOMETROM 5. Vzporedno sem izvajal tudi preiskave poseda in razleza sveže mešanice, pri uporabi aeranta sem meril tudi delež zraka v betonu.

V diplomski nalogi sem preučeval, kako kemijski dodatki vplivajo na reološke lastnosti sveže betonske mešanice, in to takoj po zamešanju betona in v različnih časih po zamešanju betona. Pri raziskavah se je pokazalo, da reometer daje boljše in bolj ponovljive rezultate pri bolj tekočih betonih.

Vpliv vrste in količine izbranih parametrov sestave betona na reološke lastnosti sveže mešanice ni bil vedno enak vplivu, ki so ga za enako sestavino ugotovili tuji raziskovalci. Razlog za to so verjetno predvsem materiali, ki smo jih uporabili za pripravo betonskih mešanic. Uporabili smo lokalne, slovenske materiale, zato so lahko lastnosti naših betonov bistveno drugačne, kot v drugih okoljih, z bistveno drugačnimi osnovnimi materiali. Prva razlika se je pokazala že pri uporabi PCE superplastifikatorja - nismo dobili enakega vpliva, kot ga je ugotovil Wallevik [19]. Le ta namreč ugotavlja, da superplastifikator vpliva predvsem na strižno napetost na meji tečenja, na plastično viskoznost pa skoraj nima vpliva. Pri naših mešanic pa je superplastifikator močno znižal tudi plastično viskoznost in ne le strižno napetost na meji tečenja. Ugotovili smo tudi, da se je učinek superplastifikatorja s časom slabšal.

Vpliv superplastifikatorja smo preučevali na dveh enakih sestavah betona, ki sta se razlikovali le v vrsti cementa. Ugotovili smo, da ima bolj grobo mleti cement nižjo strižno napetost na meji tečenja, kar ugotavljajo tudi tuji raziskovalci. Zračni mehurčki, ki jih vnesemo v svež beton z aerantom, vplivajo tako na strižno napetost na meji tečenja kot na plastično viskoznost. To je značilnost aeriranih betonov z velikim deležem finih delcev [19], kamor spadajo tudi naši betoni. Ugotovili smo tudi, da pri večjih dozacijah aeranta, pri katerih je delež zračnih por večji od 5 %, večanje poroznosti ne vpliva več na plastično viskoznost. Kar se tiče vpliva stabilizatorjev, tuji raziskovalci ugotavljajo [19], da večina stabilizatorjev najprej vpliva na viskoznost, pri večjih deležih stabilizatorja pa se poveča predvsem strižna napetost na meji tečenja. V našem primeru sta se povečala oba reološka parametra, bistvo delovanja stabilizatorja pa vseeno ostaja podobno.

Raziskave na svežih betonih bodo po mojem mnenju vse bolj pridobivale na veljavi, saj v praksi potreba po novih dodatkih betonu vse bolj narašča.

VIRI

- [1] Žarnić, R., 2005. Učbenik na fakulteti za gradbeništvo in geodezijo za predmet Gradiva.
- [2] Dr. Andrija Đureković, 1996. Cement, cementni kompozit i dodaci za beton.
- [3] Černilogar, L., 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. Gradbenik 12/2010 – 01/2011: str. 100
- [4] SIST EN 1008:2002. Voda za pripravo betona
- [5] SIST EN 206-1: 2000. Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja, skladnost
- [6] SIST EN 197 – 1: 2002. Cement – 1. Del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne betone
- [7] SIST EN 12620:2002+A1: 2008. Agregati za beton
- [8] SIST EN 12350-2:2009. Preizkušanje svežega betona- 2. del: Preskus s posedom stožca
- [9] SIST EN 12350-5:2009. Preizkušanje svežega betona- 5. del: Preskus z razlezom
- [10] SIST EN 12350-7:2009. Preizkušanje svežega betona- 7. del: Vsebnost zraka- Metode s pritiskom
- [11] Superplastifikator: <http://www.tkk.si/default.asp?id=3894> (Pridobljeno 8.11.2011)
- [12] Aerant: <http://www.tkk.si/default.asp?id=2743> (Pridobljeno 8.12.2011)
- [13] Stabilizator: <http://www.tkk.si/default.asp?id=2731> (Pridobljeno 25.12.2012)
- Cement:
- [14] http://www.salonit.si/proizvodi_in_storitve/cementi/2011122210551525/
- [15] <http://www.lafarge.si/nasi-izdelki/o-cementu/>
- [16] Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. 2003. Design and Control of Concrete Mixtures
- [17] Zajc, A. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. V: Zajc, A. (ur.). Posebne lastnosti betonov z dodatki : 14. slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, 29. maj, 2007. Ljubljana, IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 1–7
- [18] Koehler, E.P., Fowler, D.W. 2003. Summary of concrete workability methods, Research report ICAR-105-1, Austin, TX, Aggregates Foundation for Technoiogy, Research and Education: 92 str.

- [19] Wallewik, O.H. 2009. Introduction to rheology of fresh concrete, ICI rheocenter course. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219 str.
- [20] Hočevar, A. 2011. Novi materiali, Seminar: Reologija cementnih suspenzij in analiza variance.
- [21] Hočevar, A., Kavčič, F., Bokan Bosiljkov, V., Članek: Zanesljivost reoloških meritev svežih malt in betonov.
- [22] Bokan Bosiljkov, V., 1991. Vpliv nivoja napetosti in kemijskih dodatkov na reologijo betona. Magistrska naloga.
- [23] Hočevar, A. 2013. Reološke lastnosti cementnih kompozitov v svežem stanju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hočevar) : 166 str.
- [24] Gašperič, N. 2013. Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba N. Gašperič): 74 str.
- [25] Andrejka, N. 2012. Vpliv mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba N. Andrejka): 64 str.
- [26] Klepec, J. 2013. Vpliv vodocementnega razmerja in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti svežih cementnih malt. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo, Operativna smer (Samozaložba J. Klepec): 63 str.
- [27] Kodelja, M., 2009. Študija učinkovitosti superplastifikatorjev za zagotavljanje obstojnosti črpanih betonov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo, Komunalna smer (Samozaložba M. Kodelja): 109 str.
- [28] A. Ipavec, 2013. Vpliv sestave cementnega veziva na potek kemijskih reakcij s kloridnimi in sulfatnimi ioni, doktorska disertacija, UL FKKT
- [29] R.C. Mielenz, History of Chemical Admixtures for Concrete, Concrete International, April 1984, strani 40-53
- [30] Slika gramoznice: www.segrap.si/gramoznica (Pridobljeno 20.6.2016)
- [31] Slika kamnoloma: www.peskokop-kepa.si (Pridobljeno 20.6.2016)
- [32] Slika sejanja: <http://www.expertsmind.com/questions/particle-size-distribution-soil-compaction-30129374.aspx> (Pridobljeno 20.6.2016)

[33] Slika stopenj vlažnosti: <http://courses.washington.edu/cm425/aggregate.pdf> (Pridobljeno 20.6.2016)

[34] Khayat, K. H. 1998. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - An overview. Cement & Concrete Composites

[35] Slika porozimetra: <http://www.celab.si/oprema-za-gradbenistvo/ponudba/beton/> (Pridobljeno 20.6.2016)