

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:

Gašperič, N. 2013. Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V.): 74 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Gašperič, N. 2013. Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V.): 74 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

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



UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
ORGANIZACIJSKO
TEHNOLOŠKA SMER

Kandidat:

NEJC GAŠPERIČ

**VPLIV ZRNAVOSTNE SESTAVE AGREGATA IN
VRSTE SUPERPLASTIFIKATORJA NA REOLOŠKE
LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA**

Diplomska naloga št.: 3303/OTS

**INFLUENCE OF AGGREGATE GRAIN SIZE
DISTRIBUTION AND SUPERPLASTICIZER TYPE ON
FRESH CONCRETE RHEOLOGY**

Graduation thesis No.: 3303/OTS

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

prof. dr. Janez Žmavc

Ljubljana, 31. 05. 2013

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Nejc Gašperič izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom: »Vpliv zrnastne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona«.

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

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

(podpis)

Ljubljana, 10. 5. 2013

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	539.411:620.173:691.3(043.2)
Avtor:	Nejc Gašperič
Mentor:	izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Naslov:	Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona
Tip dokumenta:	diplomsko delo
Obseg in oprema:	74 str., 23 pregl., 25 sl., 55 graf.
Ključne besede:	samozgoščevalni beton, polikarboksilatni superplastifikator, polifosfonatni superplastifikator, zrnastostna sestava, vodo-cementno razmerje, reologija, koaksialni reometer, strižna napetost na meji tečenja, plastična viskoznost, razlez s posedom, izotermna kalorimetrija, hidrationska toplota, naraščanje tlačne trdnosti s starostjo

Izveček

Diplomska naloga obravnava preiskave reoloških lastnosti svežega samozgoščevalnega betona ter razvoj hidrationske toplote veziva v korelaciji z naraščanjem tlačne trdnosti. Reološke preiskave so bile opravljene s koaksialnim reometrom ConTec Viscometer 5 ter s standardno in modificirano metodo razleza s posedom. Namen reoloških preiskav je bil raziskati vpliv zrnastostne sestave agregata, vodo-cementnega razmerja ter količine in vrste superplastifikatorja na lastnosti svežih samozgoščevalnih betonskih mešanic. Z vnaprej določenim kombiniranjem parametrov vhodnih komponent betonskih mešanic smo želeli določiti sestavo z najbolj ustreznimi samozgoščevalnimi lastnostmi. V okviru preiskav smo uporabili dve vrsti superplastifikatorja – polikarboksilatni in polifosfonatni superplastifikator. Primerjali smo njun vpliv na lastnosti betona v svežem stanju in na proces strjevanja oz. hidrationske. Z izotermnim kalorimetrom C3 Analysentechnique MC - Cal/100 smo spremljali toplotni tok hidrationske s časom ter skupno količino sproščene hidrationske toplote veziva. Dobljene rezultate smo povezali z rezultati tlačne trdnosti pri določeni starosti betona.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 539.411:620.173:691.3(043.2)
Author: Nejc Gašperič
Supervisor: assoc. Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.
Title: Influence of aggregate grain size distribution and superplasticizer type on fresh concrete rheology
Document type: Graduation Thesis
Scope and tools: 74 p., 23 tab., 25 fig., 55 graph.
Keywords: self-compacting concrete, polycarboxylate ether based superplasticizer, polyphosphonate based superplasticizer, grain size distribution, water-cement ratio, rheology, coaxial rheometer, yield value, plastic viscosity, slump-flow, isothermal calorimetry, heat of hydration, increase of compressive strength with time

Abstract

This thesis presents the investigation of the rheological properties of fresh self-compacting concrete and heat development due to binder hydration. Heat of hydration was also correlated with the increase of compressive strength in concrete. Rheological investigations were performed using a ConTec Viscometer 5 coaxial rheometer and a standard and modified slump-flow test method. The purpose of the investigation was to determine the influence of the aggregate grain size distribution, water-cement ratio and the amount and type of superplasticizer on the properties of fresh self-compacting concrete mixtures. We strived to obtain a concrete mixture with the best self-compacting properties in fresh state by varying the input components according to a predetermined rule (parametric study). In the framework of the study two different types of superplasticizers were used – the polycarboxylate ether based and the polyphosphonate based superplasticizer. A comparison of their effects on the properties of fresh concrete and its hydration and hardening process was made. Using a C3 Analysentechnique MC - Cal/100 isothermal calorimeter the hydration heat flux and the total amount of released hydration heat were observed. The obtained results are shown in relation to the results of compressive strength tests of concrete at a certain age.

ZAHVALA

Za nasvete in pomoč pri nastajanju diplomske naloge se najlepše zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov. Hvala tudi Franciju Čeponu, d.i.g. ter študentu Vitu Gromšu iz Univerze za tehnologijo Brno, ki sta mi pomagala pri laboratorijskih preiskavah. Prav tako se močno zahvaljujem dr. Luki Zevniku s podjetja TKK Srpenica, ki mi je razložil kemijski vidik obravnavane diplomske teme.

Posebna zahvala gre tudi Andražu Hočevanju, ki mi je bil vedno na voljo za vsa moja vprašanja in Davidu Antolincu, ki mi je v zadnjih letih študija tako v dobrih, kot malo slabših trenutkih vedno pomagal najti pravo pot.

Mami, očetu in bratu Mateju pa najlepša hvala za vso podporo in vzpodbudne besede, ne le ob izdelavi diplomske naloge, temveč v obdobju celotnega študija.

KAZALO VSEBINE

ERRATA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 SAMOZGOŠČEVALNI BETON IN NJEGOVE KOMPONENTE.....	2
2.1 Samozgoščevalni beton	2
2.1.1 SCC v svežem stanju	3
2.1.2 SCC v strjenem stanju	4
2.2 Agregat	5
2.2.1 Kakovost agregata	5
2.2.2 Zrnastostna sestava.....	5
2.3 Superplastifikator	6
2.3.1 Hidratacija cementa	7
2.3.2 Delovanje superplastifikatorja.....	8
2.3.3 Učinki in uporaba superplastifikatorja.....	9
3 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA	11
3.1 Klasifikacija in numerični model tekočin.....	11
3.1.1 Newtonska tekočina.....	11
3.1.2 Ne-newtonska tekočina, časovno neodvisna	12
3.1.3 Grafični prikaz: tokovne krivulje, reograf, okno reoloških lastnosti	13
3.2 Reometer.....	14
3.2.1 Elementi in zasnova reometra.....	15
3.2.2 Meritve	15
3.3 Preizkus poseda z razlezom.....	16
3.3.1 Oprema in postopek.....	17
3.3.2 Korelacija z meritvami reometra	17
3.4 Reologija SCC	18
4 EKSPERIMENTALNO DELO.....	19
4.1 Povod in cilj raziskav	19
4.2 Priprave na eksperimentalno delo.....	19

4.3	Uporabljeni materiali.....	24
4.4	Parametrična študija.....	26
4.4.1	Receptura vzorcev.....	26
4.4.2	Mešanje in postopek meritev.....	27
4.4.3	Rezultati meritev z reometrom.....	30
4.4.4	Rezultati mini SF preizkusa.....	38
4.4.5	Analiza segregacije mešanic parametrične študije.....	39
4.5	Študija vpliva vrste superplastifikatorja.....	40
4.5.1	Receptura vzorcev.....	40
4.5.2	Rezultati meritev z reometrom.....	41
4.5.3	Rezultati mini SF preizkusa.....	44
4.5.4	Analiza segregacije mešanic študije vpliva vrste SP.....	44
4.6	Študija razvoja tlačne trdnosti s časom.....	46
4.6.1	Receptura vzorcev.....	47
4.6.2	Mešanje in postopek meritev.....	47
4.6.3	Rezultati meritev z reometrom.....	48
4.6.4	Rezultati standardnega razleza s posedom in mini SF preizkusa.....	50
4.6.5	Spremljanje razvoja tlačne trdnosti s časom.....	50
4.7	Študija razvoja hidrationske toplote.....	52
4.7.1	Izotermna kalorimetrija.....	53
4.7.2	Postopek meritev z izotermnim kalorimetrom.....	53
4.7.3	Rezultati meritev kalorimetra.....	53
5	ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATOV.....	56
5.1	Analiza parametrične študije.....	56
5.1.1	Primerjava reoloških parametrov.....	56
5.1.2	Vpliv sprememb vhodnih sestavin na reološke parametre.....	58
5.2	Analiza vpliva vrste superplastifikatorja.....	63
5.3	Analiza tlačne trdnosti in hidrationske toplote.....	66
5.3.1	Primerjava reoloških parametrov.....	66
5.3.2	Primerjava razvoja tlačne trdnosti po času z vhodnimi sestavninami.....	68
5.3.3	Primerjava razvoja tlačnih trdnosti s sproščeno hidrationsko toploto.....	68
6	ZAKLJUČKI.....	70
	VIRI.....	72

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Shematični prikaz sestave SCC in običajnega betona.....	2
Slika 2.2: Vertikalni prerez betonskega valja v katerem je prisoten pojav segregacije.....	4
Slika 2.3: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm po SIST 1026:2008 ...	6
Slika 2.4: Stopnja sproščanja toplote s časom v procesu hidratacije portland cementa	8
Slika 2.5: Shematičen prikaz delovanja SP	8
Slika 2.6: Shematičen prikaz molekule SP polikarboksilatnega tipa.....	9
Slika 2.7: Vpliv SP na sveže lastnosti betona.....	9
Slika 3.1: Numerični modeli tekočin.....	12
Slika 3.2: Tokovne krivulje za Binghamov in Herschel-Bulkleyev model	13
Slika 3.3: Reograf z okni reoliških lastnosti za SCC.....	14
Slika 3.4: ConTec Viscometer 5 v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju, UL FGG	15
Slika 3.5: Potek meritev momenta glede na hitrost vrtenja	16
Slika 3.6: Razmerje med merjenimi vrednostmi in Binghamovimi parametri	16
Slika 3.7: Primeri tokovnih krivulj normalnega, visokotrdnega in samozgoščevalnega betona	18
Slika 4.1: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/8 mm po SIST 1026:2008 ...	20
Slika 4.2: Uporabljen agregat in apnenčeva moka	25
Slika 4.3: Izbrane vrednosti merilnih parametrov za vse vzorce parametrične študije	27
Slika 4.4: Primer prikaza rezultatov meritev z aplikacijo FRESHwin	28
Slika 4.5: Mini SF preizkus v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju, UL FGG.....	39
Slika 4.6: Kalupi in betonske kocke mešanice PCE 1 po 24 urah od vlitja.....	48
Slika 4.7: Porušitev kock s polikarboksilatnim in polifosfonatnim superplastifikatorjem po obremenitvi v hidravlični stiskalnici, 24 ur po vlitju	51
Slika 5.1: Reograf z okni reoliških lastnosti za SCC.....	58
Slika 5.2: Razlaga sprememb vrednosti na grafikonih 5.2 in 5.3	59
Slika 5.3: Splošen prikaz učinka na referenčno mešanico ob dodajanju vode in SP.....	61
Slika 5.4: Prikaz učinka na naše referenčne mešanice ob dodajanju vode in SP oz. večanju deleža finih delcev	62

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 4.1: Presevki skozi sita za mešanico agregata 0/8 mm po SIST 1026:2008.....	20
Preglednica 4.2: Sejalna analiza apnenčastega drobljenca frakcij 0/2 mm in 0/4 mm.....	20
Preglednica 4.3: Kombinacije frakcij in njihovo odstopanje od zrnastostnih krivulj A8, B8 in C8.....	23
Preglednica 4.4: Masno razmerje mešanice agregata vzorcev parametrične študije.....	23
Preglednica 4.5: Receptura za vzorce parametrične študije z $v/c = 0,5$	26
Preglednica 4.6: Receptura za vzorce parametrične študije z $v/c = 0,55$	26
Preglednica 4.7: Količina dodanega PCE superplastifikatorja.....	26
Preglednica 4.8: Oznake vzorcev parametrične študije.....	27
Preglednica 4.9: Hitrosti vrtenja posode z vzorcem pri meritvi odpora na striženje.....	30
Preglednica 4.10: Mini SF razlezi vzorcev parametrične študije	39
Preglednica 4.11: Oznake 1. serije vzorcev študije vpliva vrste SP.....	40
Preglednica 4.12: Oznake 2. serije vzorcev študije vpliva vrste SP.....	41
Preglednica 4.13: Količina dodanega PPh superplastifikatorja.....	41
Preglednica 4.14: Mini SF razlezi vzorcev študije vpliva SP	44
Preglednica 4.15: Receptura za vzorce študije razvoja tlačne trdnosti s časom.....	47
Preglednica 4.16: Količina in tip SP dodanega vzorcem študije razvoja tlačne trdnosti s časom.....	47
Preglednica 4.17: Oznake vzorcev študije razvoja tlačne trdnosti s časom	47
Preglednica 4.18: Razlezi vzorcev študije razvoja tlačne trdnosti s časom.....	50
Preglednica 4.19: Povprečne tlačne trdnosti f_c pri različnih starostih	51
Preglednica 4.20: Mase sestavin vzorcev študije razvoja hidratacijske toplote	53
Preglednica 5.1: Oznake in reološki parametri vzorcev parametrične študije	56
Preglednica 5.2: Oznake in reološki parametri vzorcev študije vpliva vrste SP	63
Preglednica 5.3: Primerjava reoloških parametrov ref. mešanic z analiziranimi mešanicami	66

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 4.1: Zrnavostna sestava kombinacije apnenčeve moke in drobljenca	24
Grafikon 4.2: Sejalna analiza apnenčastega drobljenca frakcij 0/2 in 0/4.....	24
Grafikon 4.3: Zrnavostna sestava apnenčeve moke	25
Grafikon 4.4: Tokovna krivulja mešanice a.1.1	30
Grafikon 4.5: Tokovna krivulja mešanice a.2.1	31
Grafikon 4.6: Tokovna krivulja mešanice b.1.1	31
Grafikon 4.7: Tokovna krivulja mešanice b.2.1	31
Grafikon 4.8: Tokovna krivulja mešanice c.1.1	32
Grafikon 4.9: Tokovna krivulja mešanice c.2.1	32
Grafikon 4.10: Tokovna krivulja mešanice a.1.2	32
Grafikon 4.11: Tokovna krivulja mešanice a.2.2	33
Grafikon 4.12: Tokovna krivulja mešanice b.1.2	33
Grafikon 4.13: Tokovna krivulja mešanice b.2.2	33
Grafikon 4.14: Tokovna krivulja mešanice c.1.2	34
Grafikon 4.15: Tokovna krivulja mešanice c.2.2	34
Grafikon 4.16: Tokovna krivulja mešanice a.1.3	34
Grafikon 4.17: Tokovna krivulja mešanice a.2.3	35
Grafikon 4.18: Tokovna krivulja mešanice b.1.3	35
Grafikon 4.19: Tokovna krivulja mešanice b.2.3	35
Grafikon 4.20: Tokovna krivulja mešanice c.1.3	36
Grafikon 4.21: Tokovna krivulja mešanice c.2.3	36
Grafikon 4.22: Tokovna krivulja mešanice a.1.4	36
Grafikon 4.23: Tokovna krivulja mešanice a.2.4	37
Grafikon 4.24: Tokovna krivulja mešanice b.1.4	37
Grafikon 4.25: Tokovna krivulja mešanice b.2.4	37
Grafikon 4.26: Tokovna krivulja mešanice c.1.4	38
Grafikon 4.27: Tokovna krivulja mešanice c.2.4	38
Grafikon 4.28: Tokovna krivulja mešanice d.1.1	41
Grafikon 4.29: Tokovna krivulja mešanice d.2.1	42
Grafikon 4.30: Tokovna krivulja mešanice d.3.1	42
Grafikon 4.31: Tokovna krivulja mešanice d.4.1	42
Grafikon 4.32: Tokovna krivulja mešanice d.1.2	43
Grafikon 4.33: Tokovna krivulja mešanice d.2.2	43
Grafikon 4.34: Tokovna krivulja mešanice d.2.3	43
Grafikon 4.35: Tokovna krivulja mešanice d.2.4	44
Grafikon 4.36: Reograf τ_0 – mini SF obeh serij vzorcev študije vpliva vrste SP	46
Grafikon 4.37: Tokovna krivulja mešanice PCE 1	49
Grafikon 4.38: Tokovna krivulja mešanice PCE 2	49
Grafikon 4.39: Tokovna krivulja mešanice PPh 1	49
Grafikon 4.40: Tokovna krivulja mešanice PPh 2	50
Grafikon 4.41: Razvoj tlačne trdnosti f_c s časom	52
Grafikon 4.42: Primerjava tlačne trdnosti f_c vseh mešanic pri različnih starostih.....	52
Grafikon 4.43: Celoten toplotni tok hidratacije izmerjen z izotermnim kalorimetrom	54
Grafikon 4.44: Toplotni tok hidratacije in hidratacijska toplota vzorcev	54
Grafikon 5.1: Reološki parametri vzorcev parametrične študije	57

Grafikon 5.2: Reografi $\tau_0 - \mu_1$ vseh vzorcev parametrične študije	59
Grafikon 5.3: Reograf $\tau_0 - \mu_2$ vseh vzorcev parametrične študije	60
Grafikon 5.4: Reološki parametri vzorcev študije vpliva vrste SP	63
Grafikon 5.5: Primerjava plastičnih viskoznosti μ_1 in μ_2	64
Grafikon 5.6: Primerjava razleza pri mini SF preizkusu	65
Grafikon 5.7: Primerjava strižnih napetosti na meji tečenja τ_0	65
Grafikon 5.8: Primerjava reoloških parametrov analiziranih mešanic	67
Grafikon 5.9: Razvoj tlačne trdnosti s časom	68
Grafikon 5.10: Primerjava razvoja tlačne trdnosti s sproščeno hidrationsko toploto	69
Grafikon 5.11: Linearna regresija rezultatov tlačne trdnosti in hidrationske toplote	69

1 UVOD

Sredi 18. stoletja je britanski inženir John Smeaton prvič po propadu rimske civilizacije iznašel hidravlični cement. To je slabih 70 let kasneje privedlo do odkritja Portlandskega cementa, ki je vse do danes najpogosteje uporabljena vrsta veziva za pripravo betona. Seveda pa je od takrat, kot vsa druga področja tudi znanost in tehnologija betona močno napredovala. Tako sodobni časi zahtevajo nove materiale, nove tehnologije ali modifikacijo klasičnih gradiv. Z razvojem naprednih betonov in tehnologije njihove vgradnje je beton postal kompleksna suspenzija, čigar lastnosti so posledica vpliva vseh njegovih sestavin. Časi "klasičnega" betona sestavljenega samo iz vode, cementa in agregata so preteklost.

Eden izmed množice teh t.i. naprednih betonov je samozgoščevalni beton. Ta vrsta betonske mešanice ima takšno sposobnost tečenja, da v svojem svežem stanju prehaja skozi relativno majhne odprtine, zapolni opaž, oblije armaturo in se zgosti brez kakršnekoli zunanje energije. Takšne lastnosti so, med drugim, posledica uporabe ustreznega agregata in specifične vrste kemijskih dodatkov – superplastifikatorjev.

V koraku z razvojem takih inovativnih betonov vse bolj narašča tudi potreba po novih in predvsem bolj učinkovitih preizkusnih metodah. Med njih sodijo tudi meritve še relativno neraziskanih reoloških lastnosti svežega betona. Uporaba opreme imenovane reometer ali viskometer, razvite z namenom raziskav na tem področju, s katerim posredno merimo strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala, nam omogoča razlago kako posamezne sestavine betonske mešanice vplivajo na njene reološke lastnosti v svežem stanju.

Ta diplomska naloga je smiselno nadaljevanje raziskav reoloških lastnosti sveže betonske mešanice pod mentorstvom prof. dr. Violete Bokan-Bosiljkov. Diplomsko delo izhaja iz zaključkov avtorjev predhodnih diplomskih nalog, ki so se prav tako ukvarjali s preiskavami reoloških lastnosti svežih betonov in malt z uporabo reometra. Eden od teh zaključkov je, da "reometer ponuja boljše možnost analize lastnosti svežega betona kot standardni metodi posepa in razleza, vendar ima prav tako svoje omejitve. ... Pokazalo se je, da reometer daje boljše rezultate pri mešanicah z nižjo strižno napetostjo na meji tečenja in pri bolj tekočih mešanicah. Od tod sklep, da je njegova uporaba bolj smiselna v preučevanju in kontroli SCC ter lahkogradljivih betonov (Andrejka, 2012, str. 62)."

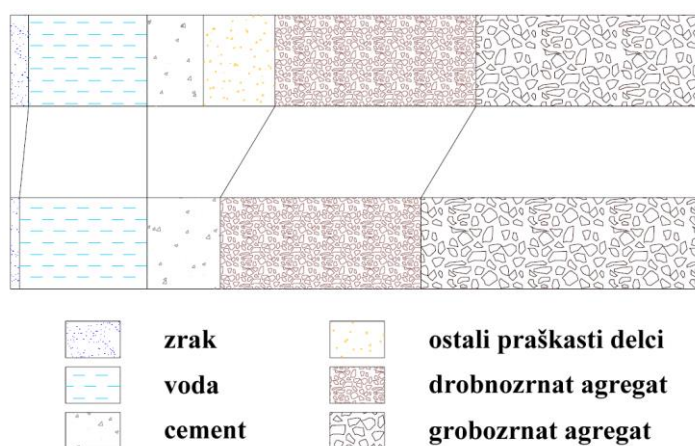
Od tu ideja za raziskave na področju lastnosti svežih mešanic samozgoščevalnih betonov. Povod je vprašanje kako, ob kar najbolj ekonomični spremembi recepture, izboljšati reološke lastnosti samozgoščevalnih betonov, hkrati pa s tem ne poslabšati njegovih mehanskih lastnosti. Tako so v diplomsko nalogo, ki je posledica nekaj mesečnega dela v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju, UL FGG, vključeni vplivi spremembe zrnastostne sestave agregata, vplivi zaradi spremembe vodo-cementnega razmerja, vrste in količine superplastifikatorja ter naraščanje tlačne trdnosti s časom in njena povezava s sproščeno hidratacijsko toploto. Poleg že uveljavljenega polikarboksilatnega smo imeli na voljo tudi novejši superplastifikator na bazi polifosfonatnih polimerov, ki je sicer še v fazi razvoja in se v praksi zaenkrat ne uporablja. Opazili smo, da ta nekoliko drugače vpliva na lastnosti svežega in strjenega betona kot polikarboksilatni superplastifikatorji.

2 SAMOZGOŠČEVALNI BETON IN NJEGOVE KOMPONENTE

2.1 Samozgoščevalni beton

Za izvedbo bolj nosilnih armiranobetonskih konstrukcij je potrebna uporaba visoko-trdnih betonov z gostejšim armiranjem. Izkazalo se je, da se pri tem pojavi problem izključujoče se narave. Izvedba gosto armiranih betonskih elementov namreč zahteva bolj tekoče sveže mešanice, te pa imajo v strjenem stanju praviloma slabše mehanske karakteristike. Problem postane še bolj kompleksen pri vgradnji visoko-trdnih betonov ob uporabi vibratorjev za konsolidacijo svežega betona na velikih višinah modernih stavb. Razvoj superplastifikatorjev polikarboksilatnega tipa je omogočil pripravo visoko obdelavne in obenem močno kohezivne betonske mešanice, ki je danes znana pod imenom samozgoščevalni beton oz. SCC¹ (Mehta, Monteiro, 2006).

SCC je inovativen beton, ki pri vgradnji ne potrebuje vibracij, kar bistveno poveča hitrost betoniranja, zmanjša emisije hrupa, stroške, potrebo po delovni sili in posledično poveča produktivnost. V svojem svežem stanju je, samo zaradi delovanja lastne teže in sposobnosti tečenja, sposoben popolnoma zapolniti opaž poljubne oblike, pri tem tesno oblitati nameščeno armaturo, se odzračiti in znivelirati, ne da bi pri tem segregiral (Murthy et al., 2012). Takšne lastnosti mu daje specifična sestava, (*Slika 2.1*) in dodatek zmogljivega superplastifikatorja.



Slika 2.1: Shematični prikaz sestave SCC (zgoraj) in običajnega betona (spodaj) (Duh, 2008)

Z omejitvijo količine grobozrnatega agregata zmanjšamo količino trkov med agregatnimi zrnji. Posledično se s tem poveča tudi količina paste v betonski mešanici, kar ob dodatku superplastifikatorja in znižanju v/c razmerja poveča obdelavnost mešanice (Duh, 2008). Obdelavnost lahko definiramo kot lastnost svežega betona ali malte, ki določa enostavnost mešanja, vgrajevanja, zgoščevanja ter površinske obdelave in kot rezultat daje homogeno stanje strjenega betona. V splošnem obdelavnost ni odvisna le od sestave betona, temveč tudi od namena njegove uporabe. Zelo suha in na videz slabo obdelavna betonska mešanica ima lahko namreč ravno pravo obdelavnost za specifičen način vgradnje in namen uporabe (Hočevnar, Kavčič, 2010).

¹ SCC – ang. "self-consolidating concrete", "self-compacting concrete"

2.1.1 SCC v svežem stanju

V svežem stanju ima SCC sposobnost tečenja in deformiranja tako veliko, da so samo zaradi delovanja njegove lastne teže izpolnjene tri bistvene zahteve glede obdelavnosti (Koehler, Fowler, 2007; Duh, 2008):

- sposobnost zapolnjevanja,
- sposobnost prehajanja,
- odpornost na segregacijo.

Sposobnost zapolnjevanja betonske mešanice je določena s sposobnostjo in hitrostjo deformiranja sveže betonske mešanice. Sposobnost deformiranja določa, kako daleč od mesta praznjenja, izključno kot posledica delovanja lastne teže, lahko beton steče. Hitrost deformiranja pa, kako hitro se to zgodi. S pravo količino superplastifikatorja in uravnoveženim razmerjem med vodo in praškastimi delci je zagotovljena dobra sposobnost deformiranja. Dobra sposobnost zapolnjevanja pa z majhnim trenjem med trdnimi delci, kar je posledica povečanja deleža paste na račun zmanjšanja grobozrnatega agregata.

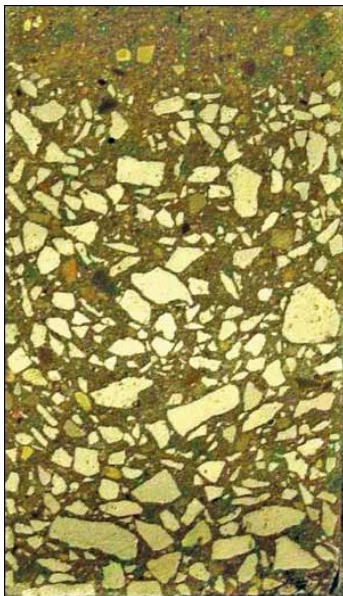
Sposobnost prehajanja je sposobnost sveže betonske mešanice, da prehaja med ovirami (ozke odprtine v opažu, ozki predeli med gosto nameščeno armaturo) brez blokiranja zaradi nakopičenja agregatnih zrn. Dobra sposobnost prehajanja je dosežena z visoko kohezivnostjo mešanice in ustreznim razmerjem med odprtino (odprtina opaža ali armaturnega koša) ter količine in velikosti grobozrnatega agregata (manjša maksimalna velikost zrn agregata in manjši delež le-teh).

Segregacija je definirana kot ločitev sestavnih komponent sveže betonske mešanice na tak način, da le-te niso več enakomerno porazdeljene. Pod pojem segregacije nekateri viri uvrščajo tudi pojav izcejanja vode². To je pojav, ko se nekaj zamešane vode dvigne na površino sveže vgrajenega betona (Mehta, Monteiro, 2006). V nadaljevanju se termin segregacija nanaša izključno na pojav, pri katerem trdni delci, navadno večja agregatna zrna potonejo na dno, na vrhu pa se začne nabirati cementna malta ali pasta in ne na pojav izcejanja vode. Vzroki za segregacijo so neustrezno razmerje vhodnih sestavin (razlike v količini, velikosti, gostoti, obliki agregatnih zrn, pretirani uporabi kemijskih dodatkov, neustreznega v/c, ...), nepravilno mešanje ali preveč tekoča sveža mešanica. Zaradi nehomogenega razporeda sestavin se ob hidrataciji in sušenju zgornji del bolj krči, kar privede do poškodb v obliki mikrorazpok. Posledice so oslABLJENE mehanske lastnosti strjenega betona in manjša odpornost na delovanje agresivnih vplivov okolja, to je manjša obstojnost betona. Odpornost na segregacijo je torej sposobnost suspenzije delcev, da obdrži svojo homogenost med mešanjem, transportom in vgrajevanjem.

Do danes je bilo predlaganih kar nekaj empiričnih preizkusov s katerimi naj bi bilo moč preveriti ali betonska mešanica segregira. Vendar smo prvi EN standard s tega področja dobili šele leta 2010, kot del skupine standardov za preiskave svežih SCC betonov (SIST EN 12350–11: Preskušanje svežega betona – 11. del: Samozgoščevalni beton - Preskus segregacije s sitom). Ta standardizirana preskusna metoda se v praksi uporablja le redko, tako se pri določanju segregacije še vedno zanašamo na izkušnje in občutek – vizualna ocena in fizičen dotik sveže mešanice. Izrazita segregacija SCC je enostavno opazna ob izvedbi standardnega preizkusa razleza s posedom. Izrazito viden obroč cementne paste na robu razlezenega vzorca betona ali nekoliko večja količina agregata nabranega v

² izcejanje vode – ang. "bleeding"

središču sta jasna indikatorja, da sveža betonska mešanica segregira. Seveda, pa je sistem ocene, ki temelji na vizualnem pregledu zelo subjektiven. Najbolje je, da ga opravi izkušen strokovnjak (D'Ambrosia, Lange, 2007).



Slika 2.2: Vertikalni prerez betonskega valja v katerem je prisoten pojav segregacije (D'Ambrosia, Lange, 2007)

Pri SCC v svežem stanju se soočimo še z enim perečim problemom – robustnostjo. Izmed vseh omenjenih lastnosti je robustnost še najbolj nedefinirana, a hkrati izredno pomembna. Robustnost sveže mešanice nam kljub nihanju količin in kvalitete vhodnih komponent zagotavlja njene sprejemljive lastnosti. (Zevnik, 2012). Reološke lastnosti robustnega svežega betona se pri majhnih spremembah sestavin tako ne bi smele bistveno spremeniti. V primerjavi z običajnimi betoni so SCC mešanice veliko manj robustne (D'Ambrosia, Lange, 2007).

2.1.2 SCC v strjenem stanju

Zaradi večje količine praškastih delcev in samozgoščevalnih lastnosti lahko pri SCC pričakujemo bolj homogeno mikrostrukturo. Ta lastnost betonske matrice se običajno odraža v izboljšanih karakteristikah strjenega betona (Duh, 2008). V določeni meri so lastnosti strjenega SCC posledica vodo-cementnega razmerja. SCC ima nižji v/c ter hkrati višjo vsebnost cementne paste kot običajni beton. Ker je tlačna trdnost v grobem funkcija v/c je iz tega mogoče pričakovati, da SCC razvije večjo tlačno trdnost. Hkrati pa je potrebno v obzir vzeti krčenje betona med sušenjem, kar je glavni vzrok za pojav razpok pri zgodnjih starostih. Da se temu izognemo in tako zagotovimo dolgoročno obstojnost, je smoterno upoštevati določene omejitve glede v/c (D'Ambrosia, Lange, 2007). Prav tako SCC betoni praviloma izkazujejo večjo tlačno trdnost kot običajni vibrirani betoni z enakim v/c . Vibriranje namreč oslabi stično območje med cementnim kamnom in večjimi agregatnimi zrnji in tako vpliva na zmanjšanje tlačne trdnosti betona (Duh, 2008).

2.2 Agregat

Agregat je sipek material, navadno sestavljen iz kamnitih zrn različnih velikosti. Primarno je definiran z mineralno sestavo surovine iz katere ga pridobimo in sekundarno s tipom proizvodnega procesa. Zavzema večino prostornine betonske mešanice in je (z izjemo vode) najcenejša komponenta v betonu. Očitno je, da komponenta, ki zavzema tako velik delež pomembno vpliva na lastnosti tako sveže kot strjene betonske mešanice.

2.2.1 Kakovost agregata

Prodnat agregat, aluvialnega izvora, zaradi svojih zaobljenih robov omogoča lažje vgrajevanje betona, s tem manjšo porabo vode in posledično manjše v/c razmerje. Vendar ima tudi slabe lastnosti. Ker je zelo nehomogen in je njegovo mineraloško sestavo težko kontrolirati, ta predstavlja večjo nevarnost za pojav nezaželenih kemijskih reakcij. Te lahko povzročajo dodatne notranje napetosti, posledično nastanek razpok in postopno razpadanja betona. Danes se v proizvodnji betona večinoma uporablja drobljenec, ta je veliko bolj homogen kot prod. Poleg mineraloško petrografske sestave agregata je izrednega pomena tudi prisotnosti snovi, ki bi lahko kakorkoli vplivale na hidratacijo cementa in strjevanje betona ter na njegove mehanske lastnosti in obstojnost. Agregat, ki ga uporabimo za pripravo betonske mešanice, mora biti čist in s kemijskega vidika kar čim bolj inerten. Problem lahko predstavljajo razne nečistoče in ogranske primesi (humozni delci, masti, ...). Te zaradi svoje kislosti zmanjšajo alkalnost cementne paste, ki je nujna za nemoten proces hidratacije cementa. Prisotnost soli je nevarna predvsem zaradi korozije jeklene armature AB elementov, po drugi strani pa pospešuje proces vezanja cementa, kar lahko v določenih primerih predstavlja problem (Žarnić, 2005).

2.2.2 Zrnastostna sestava

Pri izdelavi betona za sodobno gradnjo se danes skoraj izključno uporablja frakcionirani agregat. To je agregat, ki je na voljo v obliki določenga števila frakcij, pri čemer so te pridobljene s postopkom industrijskega sejanja in eventuelne korekcije sestave glede na namen uporabe (Muravljov, 1991). Torej je za beton ustreznih mehanskih lastnosti, konsistence ter drugih lastnosti v svežem stanju potrebna ustrežna zrnastostna sestava agregata. V splošnem ustrezno granuliran agregat enakomerno zapolnjuje celoten prostor in zmanjša možnost nastanka segregacije sveže betonske mešanice.

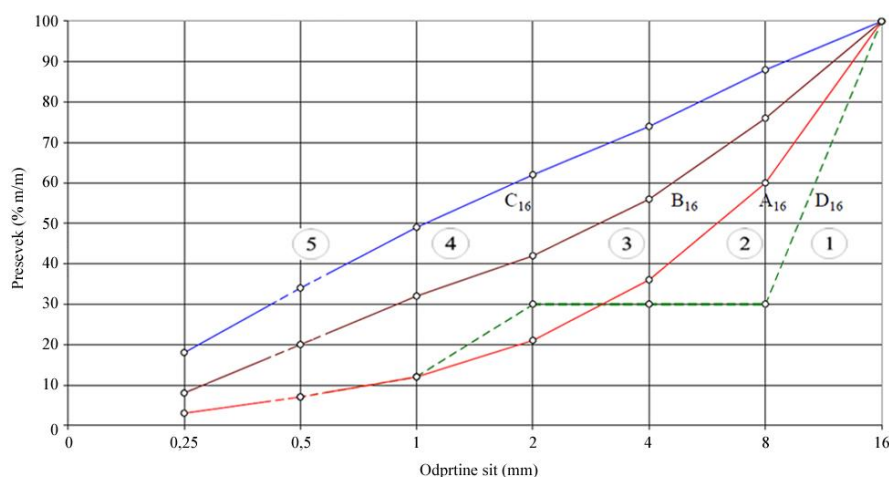
Navadno so v uporabi naslednje osnovne frakcije agregata: 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm, 16/32 mm, 32/63 mm in 63/125 mm, včasih tudi njihove medfrakcije. Kljub tej delitvi vsaka od frakcij vsebuje določen delež podmernih in nadmernih zrn (Muravljov, 1991). Ena izmed mnogih drugih možnih delitev agregata glede na zrnastost je naslednja:

- praškasti delci agregata velikosti $< 0,125$ mm,
- droben agregat ali pesek, ki vsebuje zrna do 4 mm,
- grob agregat, ki vsebuje zrna večja od 4 mm.

Namenoma so tu posebej izpostavljeni praškasti delci agregata, ki jih priporočene mejne krivulje zrnastosti mešanice agregata po standardu SIST 1026:2008 ne obravavajo. Le-te se namreč končajo z najmanjšim delcem 0,25 mm. Standard praškaste delce obravnava v sklopu pod imenom "Fini delci":

"Beton naj za doseganje ustrezne obdelavnosti v svežem stanju in goste strukture strjenega betona vsebuje določeno količino finih delcev, ki jih prispevajo cement, morebitni mineralni dodatki in delci agregata < 0,125 mm. Zadostna količina finih delcev je zlasti pomembna pri dolgih transportnih poteh v cevovodih, pri tankostenskih in gsto armiranih konstruktivnih elementih ter za neprepusten beton (SIST 1026:2008, str. 20)."

Kljub temu, da praškasti delci agregata v mejnih krivuljah niso specifično definirani (njihova zrnovostna sestava ni priporočena) so vsekakor prisotni kot podmerna zrna frakcij. V določenih primerih so lahko dodatni praškasti materiali že v osnovi sestavni del cementa, vendar jih pri betonih kot je SCC, zaradi njihovega ugodnega učinka, dodamo posebej (Flatt et al., 2004; Duh, 2008). Pod pojmom dodatni praškasti delci agregata si tu predstavljamo inerten fin polnilni material, znan tudi pod imeni "filer" oz. "moka". Tak material dobimo z mletjem kamnine ali z odpraševanjem frakcij drobljenega agregata. Obstajajo tudi reaktivni praškasti delci (mikrosilika, elektrofilterski pepel, ...), katerih vpliv ni del raziskave v okviru te diplomske naloge.



Slika 2.3: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm po SIST 1026:2008

V Sloveniji se najpogosteje uporablja apnenčasti drobljeni agregat. Najdostopnejši polnilni material je tako apnenčeva moka (Duh, 2008). Ko želimo beton z večjim deležem cementne paste so apnenčeva moka in ostali polnilni materiali izredno uporabni, saj z njimi dosežemo večji delež paste v betonu.

Z vsem tem v mislih je mogoče sklepati, da je izbira celotne (vključno z delci manjšimi od 0,125 mm) granulacije agregata ena izmed pomembnih karakteristik sestave recepture SCC. Z modifikacijami standardnih mejnih krivulj zrnivosti lahko tvorimo posebne vrste betona. Tako lahko z izpuščanjem določene frakcije dosežemo npr. boljšo vgradljivost betona. In čeprav ekonomski vidik sicer ostaja pomemben, zrn agregata ne smatramo več le kot polnilo, ki zmanjša ceno vhodnih surovin (Žarnić, 2005).

2.3 Superplastifikator

Dandanes receptura betonske mešanice pogosto vključuje razne kemijske dodatke. To so proizvodi, ki v zelo majhnih količinah močno vplivajo na lastnosti tako svežega kot strjenega betona (SIST EN 934-2:2009). Vsak dodatek ima svoj namen, zato je ob njihovi uporabi potrebno upoštevati navodila

in opombe proizvajalca ali pa sami opravimo preizkuse s katerimi ugotovimo njihov vpliv na lastnosti betona.

Plastifikatorji (P) in superplastifikatorji (SP) so v standardu SIST EN 934–2:2009, ki jih obravnava, definirani kot "dodatki, ki v dani mešanici betona omogočajo zmanjšanje zamesne vode, ne da bi s tem vplivali na njeno konsistenco ali pa dani betonski mešanici, brez povečanja količine zamesne vode, povečajo posed/razlez oz. oboje hkrati (SIST EN 934–2:2009, str. 5 in 6)."

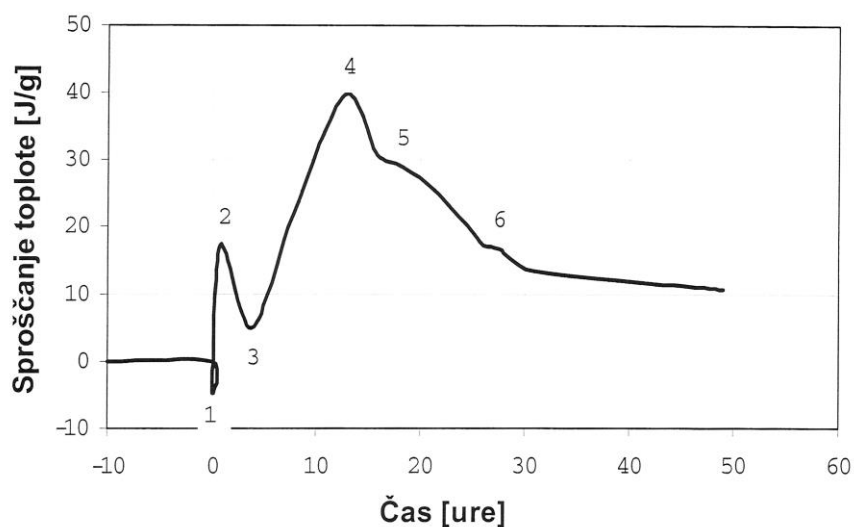
Plastifikatorji (večinoma naravnega izvora) in superplastifikatorji (sintetični polimeri) so torej tista vrsta kemijskih dodatkov, ki je namenjena redukciji vode. Starejše vrste superplastifikatorjev, naftalenskega in melaminskega tipa zmanjšajo potrebo po vodi za 5-25%. Superplastifikatorji novejših generacij, na osnovi polikarboksilatnih polimerov, imajo veliko močnejši učinek, saj zmanjšajo potrebo po vodi za 15-40% (Černilogar, 2010).

2.3.1 Hidratacija cementa

Portland cement je značilno silikatno hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo – hidrataciji veže, se strdi in tvori trden cementni kamen (Žarnić, 2005). Proces hidratacije portland cementa je kompleksna serija kemijskih reakcij med cementnimi minerali in vodo, ki poteka od samega zamešanja pa tudi do enega leta in več. Kljub takšni kinetiki hidratacije se več kot polovica celotne hidratacije odvije v prvih 48 urah od zamešanja cementa in vode (Zevnik, 2010).

Kemijski dodatki, ki jih dodamo v fazi mešanja, pomembno vplivajo na sam potek hidratacije. V različnih stopnjah jo lahko pospešujejo ali zavlačujejo. Delovanje SP, ki bolj ali manj zavlačuje začetni in končni čas vezanja, je tako neposredno povezano s procesom hidratacije cementa (Zevnik, 2010). Poleg tega je posledica uprabe SP bolj popolna hidratacija cementa, kar izboljša mehanske karakteristike betona kot sta zgodnja in končna tlačna trdnost.

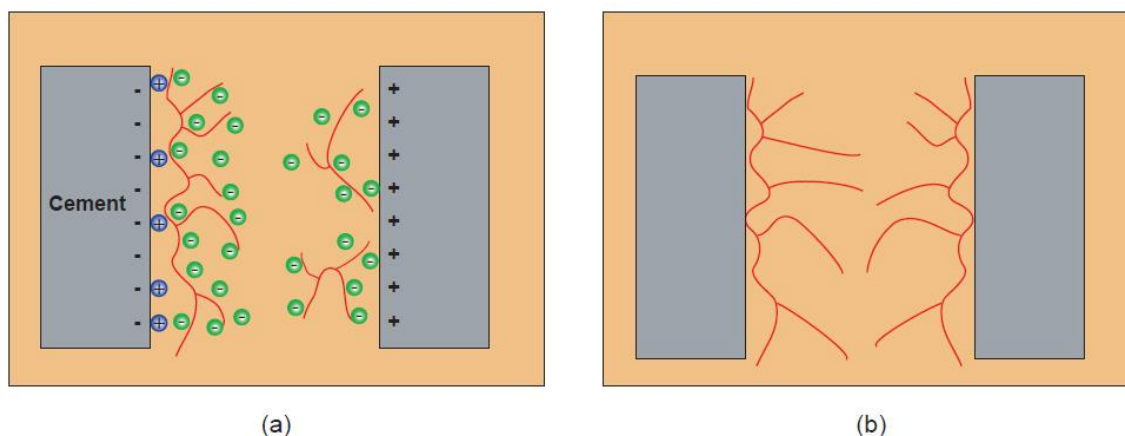
Portland cement je v stanju visoke energijske reaktivnosti, kar je posledica proizvodnega procesa pri visokih temperaturah. Ko med procesom hidratacije reagira z vodo preide v stabilno nizko energijsko stanje. Reakcijo spremlja sproščanje energije v obliki toplote, torej eksotermična reakcija. V različnih pogojih je ta pojav koristen (nizke zunanje temperature pri betoniranju pozimi), spet v drugih predstavlja oviro (betoniranje masivnih betonskih elementov) (Mehta, Monteiro, 2006). V določeni meri lahko ta eksotermični pojav kontroliramo z uporabo SP. **Slika 2.4** prikazuje tipičen diagram stopnje sproščanja toplote s časom v procesu hidratacije portland cementa. Strm začetni skok (točka 2) imenujemo pred-indukcijsko obdobje, ki traja nekaj deset minut. Zmanjšanje stopnje sproščene toplote (točka 3) predstavlja indukcijsko obdobje, to je obdobje relativnega mirovanja, ki traja nekaj ur. Ponovna rast stopnje sproščanja toplote (do točke 4) pri večini portland cementov nastopi med 3. in 20. uro procesa hidratacije. Ta del se imenuje obdobje pospešene hidratacije. Ko doseže vrh nastopi obdobje pojemjoče hidratacije (od točke 4 naprej). Hitrost reakcije se upočasnjuje, pri čemer lahko nastopi ponovna tvorba entringita (točka 5). Ob nadaljnjem padanju hitrosti reakcije pa je možen nastop pretvorbe entringita v monosulfat. (Kavčič, 2000; Žarnić, 2005).



Slika 2.4: Stopnja sproščanja toplote s časom v procesu hidratacije portland cementsa (Kavčič, 2000)

2.3.2 Delovanje superplastifikatorja

Superplastifikatorji so površinsko aktivne snovi, ki delujejo kot disperganti. V samo reakcijo ne vstopajo, imajo pa pomemben vpliv na hidratacijo. SP se adsorbira na površino cementnih zrn in jih tako obda z ovojem. To pri SP naftalenskega in melaminskega tipa povzroča, da delci, zaradi elektrostatskega odboja silijo stran drug od drugega. V primeru polikarboksilatnih SP je mehanizem delovanja podoben, le, da tu SP povzroči sterični (prostorski) ali elektro-sterični odboj. Zaradi disperzije cementnih delcev je potreba po vodi nižja (Zevnik, 2010).



Slika 2.5: Shematičen prikaz delovanja SP: a) elektrostatski odboj; b) sterični oz. elektro-sterični odboj (Mehta, Monteiro, 2006)

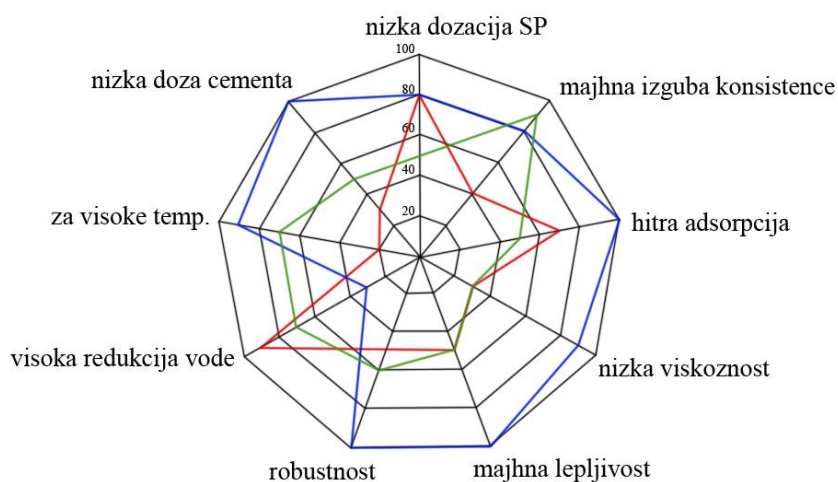
Predvsem za novejšje SP je značilno, da adsorpcija poteka postopno in dlje časa. Obdelavnost betonske mešanice je s tem občutno podaljšana (Černilogar, 2010). Ovoj SP, ki obda posamezno cementno zrno je v primerjavi z zrnom zelo majhen in nima učinka, da bi se z njim velikost cementnih zrn znatno povečala.



Slika 2.6: Shematičen prikaz molekule SP polikarboksilatnega tipa (Zvenik, 2010)

2.3.3 Učinki in uporaba superplastifikatorja

Nekateri izmed učinkov SP na sveže lastnosti betona so enostavno merljivi. Spet druge je mogoče zaznati z dobrim opazovanjem in občutkom za beton. Na *sliki 2.7* so prikazani glavni vplivi SP. Večina teh lastnosti je med seboj odvisna, vednar sta glavna parametra nedvomno v/c razmerje in količina zamešanega SP (Zevnik, 2012).



Slika 2.7: Vpliv SP na sveže lastnosti betona (Zevnik, 2012)

Z manjšo količino zamesne vode povečamo trdnost strjenega betona, hkrati pa je cementni kamen manj porozen, manjša je stopnja krčenja in s tem količina razpok. Posledično so ti betoni bolj odporni na prodor agresivnih snovi, kar izboljša njihovo obstojnost. Da zagotovimo ustrezno obdelavnost in ostale samozgoščevalne lastnosti moramo ob zmanjšanju vode povečati količino SP. Seveda pa se je pri tem potrebno zavedati, da pri pretirani ali napačni uporabi SP hitro pride do nezaželenih učinkov. Betoni pripravljene z novejšimi SP so zaenkrat manj robustni in precej bolj občutljivi na spremembe v njihovi sestavi. Lahko se zgodi, da se učinki delovanja SP na lastnosti betona razlikujejo že samo pri različnih šaržah, sicer iste vrste in proizvajalca cementa. Zato je smiselno, da vplive SP polikarboksilatnega tipa preverimo s predhodnimi preizkusi na betonu izbrane sestave, s

komponentami, ki bodo uporabljene v konkretnem primeru in pri pogojih, ki bodo čim bolj podobni pogojem v praksi.

Superplastifikatorji so torej dodatki, ki omogočajo, da sveži betonski mešanici izboljšamo njene lastnosti tako v svežem (boljše zgoščevanje, bolj tekoča konsistenca, ...) kot v strjenem (trdnost, obstojnost, ...) stanju. Njihova uporaba v svetu strmo narašča, saj je obvezna pri pripravi SCC in enostavnejši pripravi transportnih ter vodoneprepustnih betonov. Prav tako lahko z njihovo uporabo zagotovimo počasnejši padec obdelavanosti pri višjih temperaturah, z določenimi dodatki izboljšajo učinkovitost pospešil strjevanja pri zimskem betoniranju in kompenzirajo padec trdnosti pri aeriranih betonih. Vse to je le nekaj primerov izmed pestrega nabora uporabe SP v moderni tehnologiji priprave betona (Černilogar, 2010).

3 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA

3.1 Klasifikacija in numerični model tekočin

Reologija kot veda preučuje tok oz. tečenje in deformiranje tako tekočih kot elastičnih snovi. Obravnava povezavo med silo, deformacijo in časom. Ena od podskupin reologije je viskometrija. Ta se ukvarja s povezavo med napetostjo in hitrostjo deformiranja. Viskoznost, eden izmed osnovnih parametrov viskometrije, je definirana kot upor proti tečenju oz. upor tekočine proti deformaciji. Hkrati pa lahko viskoznost opišemo kot notranje trenje v tekočini. Ta je posledica medsebojnega delovanja sosednjih tekočinskih plasti, ki se med tečenjem različno hitro gibljejo (Zupančič Valant, 2007; Wallevik, 2009).

Raznovrstne tekočine različnih sestav se pri enakih obremenitvah lahko obnašajo popolnoma drugače. Reologija obravnava štiri glavne skupine v katere razvrstimo tekočine glede na njihovo obnašanje, ko so podvžene strižni obremenitvi:

- newtonska tekočina,
- časovno neodvisna ne-newtonska tekočina,
- časovno odvisna ne-newtonska tekočina,
- visko-elastična tekočina.

Betoni in malte v svojem svežem stanju spadajo med ne-newtonske tekočine. V okviru te diplomske naloge obravnavam čas samo v procesu strjevanja in hidratacije, ne pa tudi kot parameter, ki vpliva na reološko obnašanje svežih mešanic. Tako bo nadaljevanje tega poglavja namenjeno predvsem skupini časovno neodvisnih ne-newtonskih tekočin. Ostale skupine so enostavno in razumljivo predstavljene v publikaciji O.H. Wallevika (2009).

Za numerični opis reoloških lastnosti tekočin so v uporabi naslednji osnovni parametri:

- strižna napetost τ [Pa],
- strižna napetost na meji tečenja τ_0 [Pa],
- strižna hitrost $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] (definirana kot razmerje med nastalo deformacijo in časom, ki je zanj potreben),
- viskoznost η oz. funkcija viskoznosti $\eta(\dot{\gamma})$ [Pa · s],
- plastična viskoznost μ [Pa · s].

3.1.1 Newtonska tekočina

Numerični model newtonske tekočine je najenostavnejši opis obnašanja toka neke tekočine. Za Newtonske tekočine velja, da je viskoznost η konstantna, torej ni funkcija strižne hitrosti.

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

Prav tako je lastnost vsake newtonske tekočine, da se njen tok pojavi že pri najmanjši strižni napetosti.

3.1.2 Ne-newtonska tekočina, časovno neodvisna

Za časovno neodvisne ne-newtonske tekočine velja, da viskoznost η ni snovna konstanta, temveč funkcija strižne hitrosti $\dot{\gamma}$, ki deluje na tekočino. Vendar hkrati čas strižne obremenitve nima nobene vloge v smislu funkcije viskoznosti $\eta(\dot{\gamma})$.

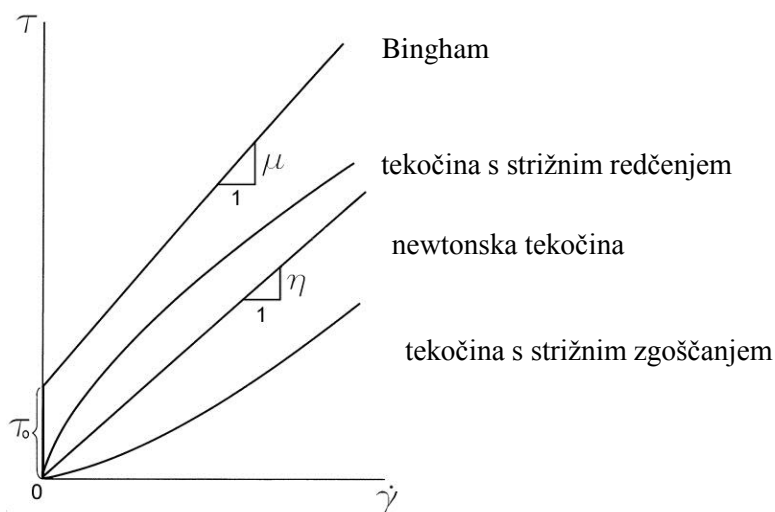
$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}$$

Glede na to ali se z večanjem strižne hitrosti $\dot{\gamma}$ viskoznost tekočine večja ali manjša ločimo naslednji vrsti ne-newtonskih tekočin:

- tekočine s strižnim redčenjem³ – njihova viskoznost se z večanjem strižne hitrosti zmanjšuje,
- tekočine s strižnim zgoščanjem⁴ – viskoznost se jim z večanjem strižne hitrosti povečuje.

Med ne-newtonske, časovno neodvisne tekočine uvrščamo tudi tiste snovi, katere se, dokler strižna napetost ne doseže določene vrednosti, obnašajo kot trdne snovi. Da te tekočine stečejo, potrebujejo neko začetno napetost, ki jo imenujemo napetost na meji tečenja τ_0 . Tovrstne tekočine so znane tudi pod imenom visko-plastične tekočine. Numerično se jih najlažje opiše z enostavnim Binghamovim modelom. Pri takšnih tekočinah se, potem ko je napetost na meji tečenja presežena, podobno kot pri newtonskih tekočinah, vzpostavi linearna odvisnost med strižno napetostjo in strižno hitrostjo. To razmerje je pri Binghamovem modelu znano kot plastična viskoznost μ (Wallevik, 2009).

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

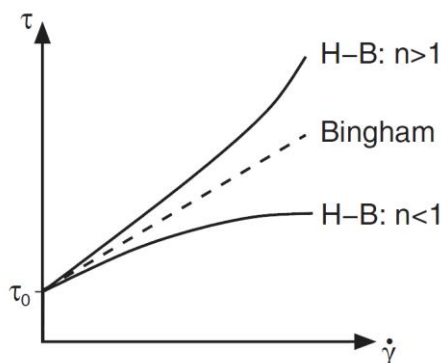


Slika 3.1: Numerični modeli tekočin

³ tekočine s strižnim redčenjem – ang. "shear rate thinning fluids"

⁴ tekočine s strižnim zgoščanjem – ang. "shear rate thickening fluids"

Binghamov model v splošnem zelo dobro opiše obnašanje cementnih suspenzij, kot so običajni betoni in malte. Seveda pa obstajajo tudi drugi numerični modeli tekočin, eden izmed njih je npr. Herschel-Bulkleyev model, s katerim je mogoče bolj natančno opisati reološke lastnosti bolj kompleksnih cementnih suspenzij. Herschel-Bulkleyev model zajame tako pojav strižne napetosti na meji tečenja, kot tudi pojav strižnega redčenja oz. zgoščanja tekočine (Tattersall, Banfill, 1983).



Slika 3.2: Tokovne krivulje za Binghamov in Herschel-Bulkleyev model (Wallevik, 2011)

Na *sliki 3.2* poleg krivulj Herschel-Bulkleyevega modela opazimo še en reološki parameter – n ⁵, ta predstavlja eksponentno brezdimenzijsko vrednost v primeru potenčnega obnašanje tekočine⁶. Poenostavljeno: tekočine s strižnim redčenjem imajo $n < 1$, tiste s strižnim zgoščanjem $n > 1$, pri tekočinah z linearno τ - $\dot{\gamma}$ zvezo (Bingham, Newtonska tekočina) pa je $n = 1$ (Zupančič Valant, 2007; Wallevik, 2011).

3.1.3 Grafični prikaz: tokovne krivulje, reograf, okno reoloških lastnosti

S kombinacijo reoloških numeričnih modelov in eksperimentalnih meritev je mogoče priti do koristnih praktičnih povezav na področju lastnosti svežega betona. Te so najbolj razumljive in najuporabnejše, če jih predstavimo grafično. Krivulje, ki ponazarjajo obnašanje tekočin z zvezo med strižno hitrostjo $\dot{\gamma}$ in strižno napetostjo τ imenujemo tokovne krivulje⁷ (Zupančič Valant, 2007; Wallevik, 2011). Tokovne krivulje za različne modele tekočin so prikazane na *slikah 3.1* in *3.2*.

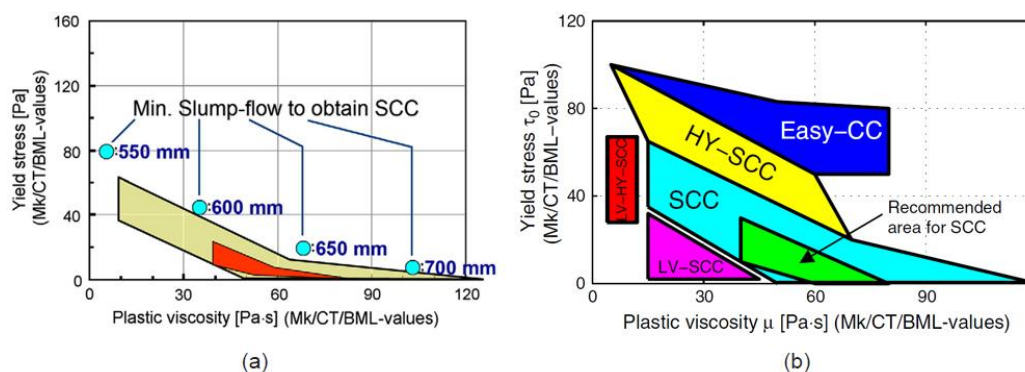
V praksi je prisoten še nekoliko drugačen, a izjemno uporaben, grafičen prikaz – reograf, kjer je na abscisni osi predstavljena plastična viskoznost μ , na ordinati pa strižna napetost na meji tečenja τ_0 . Namesto tokovnih krivulj tu vrednosti predstavljajo točke vrednosti in/ali dvo dimenzionalna površina imenovana okno reoloških lastnosti⁸. Z njegovo uporabo lahko hitro najdemo pravi ukrep, da svežemu betonu zagotovimo željeno obdelavnost. Določeno okno reoloških lastnosti pripada posamezni vrsti betona, tako jih je na enem samem reografu mogoče prikazati več hkrati (Wallevik, 2011).

⁵ n – ang. "flow behaviour index" / "power law exponent"

⁶ potenčno obnašanje tekočine – ang. "power law fluid"

⁷ tokovna krivulja – ang. "flow curves"

⁸ okno reoloških lastnosti – ang. "workability box"



Slika 3.3: Reograf z okni reoliških lastnosti za SCC: a) starejši reograf;
b) novejši, predlagani reograf, ki vključuje več tipov SCC (Wallevik, 2011)

Tokovne krivulje in reografi predstavljajo primerno orodje za primerjavo obnašanja različnih vrst tekočin. Hkrati pa je z njimi mogoče na enostaven in sistematičen način prikazati spremembe reološkega obnašanja cementnih suspenzij ob variiranju njihovih vhodnih sestavin.

3.2 Reometer

Že na začetku velja poudariti, da standardov, ki se nanašajo na področje reologije cementnih suspenzij ni. Vsaj ne v smislu, ko želimo preizkušnemu vzorcu določiti neke numerične vrednosti parametrov kot sta npr. viskoznost ali plastična viskoznost. Danes so v praksi še vedno široko uporabljene več desetletij stare empirične metode, s katerimi se določa okvirna obdelavnost svežih betonskih mešanic. Neprimernost teh metod se še posebej pokaže pri uporabi različnih kemijskih in mineralnih dodatkov, s katerimi medsebojen vpliv sestavin betona postane še bolj zapleten. Tako je na gradbišču še vedno najbolje zaupati izkušnemu strokovnjaku z večletno prakso na področju betoniranja. Le-ta lahko hitro oceni ali je beton primeren za vgradnjo, ali ima pravo konsistenco, ali morda segregira, itd. Vendar se teh subjektivnih ocen, pa naj bodo še tako dobre, ne da opisati z ekzaktnimi vrednostmi.

Od tod povod za razvoj opreme in metod s katerimi bi lahko dobili bolj znanstveno oceno lastnosti svežega betona, ki temelji na fizikalnih zakonih. Od tod povod za razvoj in uporabo reometra. Osnovna ideja je, da bi z njim, posredno ali neposredno, izmerili strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala. Ker pa reometri različnih proizvajalcev sledijo različnim modelom strižnega deformiranja tekočin, rezultati meritev, opravljenih z različno opremo, niso vedno primerljivi (Wallevik, 2011). Poleg tega je bil problem, s katerim so bili soočeni inženirji na gradbišču, ta, da na komercialnem trgu ni bilo na voljo zanesljivega, a hkrati majhnega in hitrega reometra.

Z razvojem novejših, boljših, tudi cenovno bolj ugodnih reometrov se je povečalo tudi število raziskav na področju reologije cementnih suspenzij. Rezultati tovrstnih preiskav nam omogočajo do zdaj najboljšo kontrolo kakovosti vhodnih materialov, procesov in končnih produktov. Z njimi si je moč pomagati pri dimenzioniranju opreme v procesu vgradnje betona (npr. črpalk), pri določanju vpliva posameznih komponent na lastnosti svežega betona, ter pri preučevanju vpliva novih dodatkov.

Eksperimentalni del, ki zadeva reologijo, te diplomske naloge je bil opravljen na reometru ConTec Viscometer 5. Ta v testnem vzorcu povzroča strižne deformacije po principu krožnega toka med dvema koncentričnima cilindroma, ki je zaradi praktične izvedljivosti in ustreznosti rezultatov najpogosteje uporabljen model v viskometriji. Kljub temu, ima tudi ta model svoje pomankljivosti.

ConTec Viscometer 5 jih upošteva in po zaslugi svoje zasnove tudi delno odpravi. Vseeno pa naprava ni vsemogočna, pri vsaki meritvi je potreben tehten razmislek ali so dobljeni rezultati realni in ne posledica kakršnekoli eksperimentalne in/ali instrumentalne napake v meritvi (Wallevik, 2006).

3.2.1 Elementi in zasnova reometra

Reometer ConTec Viscometer 5 je dosledno predstavljen v publikaciji prof.dr. O.H. Wallevika (2009), vseeno pa je v nadaljevanju na kratko opisana njegova zasnova in delovanje. Glavna enota reometra je sestavljena iz:

- merilna glava (A),
- notranji (B) in zunanji (C) valj,
- rotacijski disk (D) s pogonskim motorjem.



Slika 3.4: ConTec Viscometer 5 v Konstruktivno prometnem laboratoriju, UL FGG (Štupar, 2012)

Naprava deluje tako, da pogonski motor vrti posodo z vzorcem (zunanji valj), medtem pa senzor v zgornjem delu notranjega valja v povezavi z merilno glavo meri upor, ki ga merjena tekočina povzroča. Meritve se v realnem času beležijo na računalniku s programsko opremo FRESHwin, ki upošteva Binghamov model tekočine.

3.2.2 Meritve

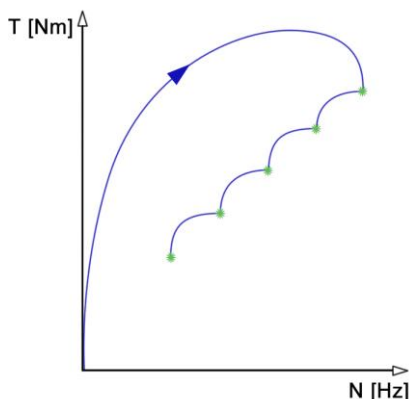
Osnovni reološki konstanti vzorca, torej strižna napetost na meji tečenja τ_0 in plastična viskoznost μ , nista določeni neposredno. Rezultati meritev reometra so predstavljeni z momentno – hitrostnim diagramom in podani v obliki:

$$T = G + H \cdot N$$

Kjer je T merjena vrednost momenta (upora proti striženju) stacionarnega notranjega valja. G predstavlja moment potreben za začetek gibanja tekočine v vzorcu (moment na meji tečenja). H je mera za odpornost sveže mešanice proti naraščajoči hitrosti gibanja (koeficient viskoznosti), N pa

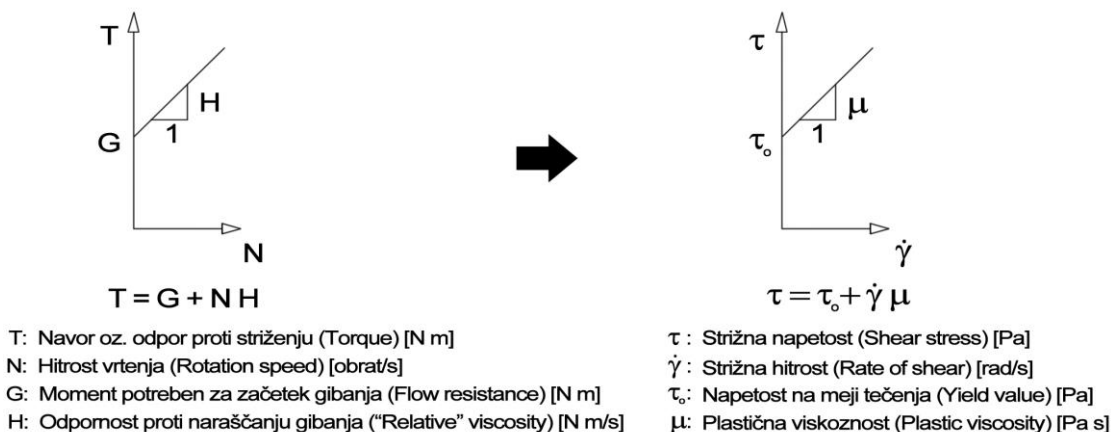
frekvenca vrtenja zunanega valja (posode z vzorcem) (Tattersall, Banfill, 1983; Wallevik, 2009; Hočevar, Kavčič, 2010).

Za cementne suspenzije z grobimi delci, kot sta sveža malta in beton, je bilo ugotovljeno, da je meritve najprimerneje izvajati s spreminjanjem hitrosti po korakih in ne zvezno. Razlog za to najdemo v pojavu, da je za vzpostavitev ravnotežja pri vsaki hitrosti striženja vzorca potrebno nekaj časa. Ker je ta čas krajši, če spreminjamo hitrost striženja od večje proti manjši, se z reometrom najprej izvede meritev pri največji strižni hitrosti, ki se nato postopoma zmanjšuje. Z merjenjem od največje do najmanjše hitrosti vrtenja dobimo t.i. padajočo krivuljo⁹.



Slika 3.5: Potek meritev momenta glede na hitrost vrtenja (Wallevik, 2009)

Z metodo linearne regresije reometru pripadajoča aplikacija FRESHwin določi konstanti G in H . Od tod se z Reiner-Rivlinovo enačbo izračuna τ_0 in μ (Wallevik, 2009).



Slika 3.6: Razmerje med merjenimi vrednostmi in Binghamovimi parametri (Wallevik, 2009)

3.3 Preizkus poseda z razlezom

Gradbišča, kjer so naprave kot je viskometer oz. reometer v vsakdanji uporabi niso pogosta. Skoraj nemogoče pa je najti gradbišče, kjer se betonira brez pripomočkov za izvajanje preizkusov poseda oz.

⁹ padajoča krivulja – ang. "downward curve"

razleza. Razširjenost uporabe takih preizkusnih metod je posledica njihove enostavnosti. Eno izmed njih, ki se uporablja v povezavi z SCC betoni, imenujemo standardni test razleza s posedom¹⁰.

Preizkus razleza s posedom je natančno opredeljen v standardu SIST EN 12350–8:2010, smatran je kot naslednik preizkusa s posedom stožca, ki je opisan v SIST EN 12350–2:2009. Metoda je učinkovita in enostavna, z njo hitro ocenimo ali je sveža mešanica stabilna in ali ima ustrezno sposobnost zapolnjevanja.

3.3.1 Oprema in postopek

Oprema za standardni test razleza s posedom je enaka opremi preizkusa s posedom stožca. Na sredino horizontalne gladke kovinske podlage minimalnih dimenzij 900 mm · 900 mm položimo Abramsov stožec. To je prisekan votel stožec iz gladke kovine in predpisanih dimenzij: višina 300 ± 2 mm, spodnji notranji premer 200 ± 2 mm, zgornji notranji premer 100 ± 2 mm. Stožec čvrsto zadržimo na mestu in napolnimo s svežim betonom. Zaradi večje samozgoščevalne lastnosti SCC betona stožca ni potrebno polniti v plasteh in dodatno zgostiti z jekleno palico. Ko stožec dvignemo se vzorec močno posede in razleze. Tečenje se ustavi, ko je strižna napetost, ki je posledica gravitacije, manjša od napetosti na meji tečenja. Rezultat preizkusa je povprečje med največjim premerom razleza in premerom pravokotno na največjega.

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

Predvsem iz racionalnih razlogov so bile na začetku raziskave zamesne količine betonov relativno majhne. V teh primerih smo se poslužili t.i. "mini slump-flow" metode. Preizkus "mini slump-flow" je analogen navadnemu preizkusu razleza s posedom s to razliko, da so vse dimenzije opreme zmanjšane na polovico. Stožec ima tako naslednje dimenzije: višina 150 ± 1 mm, spodnji notranji premer 100 ± 1 mm, zgornji notranji premer 50 ± 1 mm. Tudi kovinska podlaga na kateri se vzorec razleze je lahko manjša. Postopek same izvedbe je enak postopku testa razleza s posedom. Z uporabo manjšega stožca smo prihranili kar precejšen del materiala in energije, hkrati pa ravno tako dobili željene rezultate.

Pri izvajanju zgornjih meritev se nismo strogo držali predpisov standarda glede velikosti horizontalne podlage. Pri izvajanju "navadnega" in "mini" testa razleza s posedom smo kot podlago uporabili kar kovinsko ploščo dimenzij 700 mm · 700 mm. Razlog za to je, da so bili tovrstni preizkusi lahko hitrejši in enostavnejši, saj smo tako lahko za oba testa uporabljali isto podlago. V primeru, da je razlez presegel površino podlage je bila dimenzija razleza ocenjena subjektivno.

3.3.2 Korelacija z meritvami reometra

Kot že omenjeno je razširjenost uporabe preprostih meritev, kot je preizkus razleza s posedom, posledica njihove enostavnosti. Ko pa je naš cilj kar se da ustrezno določiti reološko obnašanje svežih betonov postanejo rezultati, sicer manj priročnih, a tehnološko naprednih reometrov nepograjšljivi. Iz tega je očitno, da je potrebno najti dobro povezavo med rezultati enega in drugega.

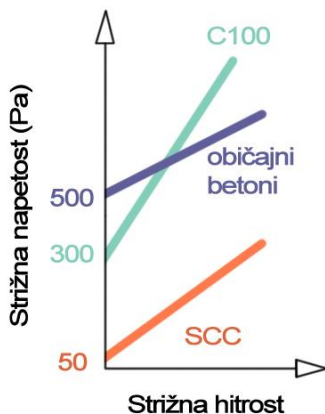
¹⁰ test razleza s posedom – ang. "slump flow test"

Ta problem je daleč od enostavnega. Rezultat razleza s posedom je ena sama vrednost, medtem ko so numerični modeli svežih cementnih suspenzij odvisni od večih parametrov. Tako lahko dve mešanici z različnima τ_0 in μ dosežeta enak razlez (Wallevik, 2006). Bolj kot je mešanica tekoča večjo vlogo ima plastična viskoznost. Pravzaprav je pri SCC pomembno razmerje med plastično viskoznostjo in napetostjo na meji tečenja. Ko to razmerje preseže 10 postanejo empirične metode, tudi razlez s posedom, nezanesljive za oceno primerne obdelavnosti betona (Wallevik, 2009).

Korelacija med razlezom in osnovnimi Binghamovi parametri, ki jih izmerimo z reometrom je mogoča, vendar temelji na statistični empirični osnovi in je hkrati močno odvisna od sestavin in vrste betona (Wallevik, 2006). Vseeno pa v nadaljevanju med rezultati reometra in razleza s posedom poizkušamo poiskati vzporednice.

3.4 Reologija SCC

Tečenje in reologija samozoščevalnih betonov se precej razlikuje od reologije navadnih betonov. Sveži SCC ima veliko nižjo napetost na meji tečenja kot običajni betoni, vrednosti viskoznosti (naklon tokovne krivulje) pa so v splošnem lahko v zelo velikem razponu – glej *sliki 3.3* in *3.7*.



Slika 3.7: Primeri tokovnih krivulj normalnega, visokotrdnega in samozoščevalnega betona (Wallevik, 2009)

Najbolj ugodno razmerje μ in τ_0 je na *sliki 3.3 (a)* označeno z rdeče obarvanim oknom reoloških lastnosti.

Direktni rezultati meritev reometra ConTec Viscometer 5 temeljijo na predpostavki, da se testirani vzorci SCC pri vseh strižnih hitrostih obnašajo kot Binghamov model. Sodeč po mnogih dokumentiranih raziskavah lahko ugotovimo, da ta predpostavka ni vedno pravilna, zato je potrebna premišljena analiza rezultatov in korekcija modela, če se Binghamov model izkaže kot neprimeren. Vsekakor pa je reometer, do sedaj, najbolj primerno orodje za preverjanje kakovosti oz. ustreznosti SCC v smislu stabilnosti in robustnosti, hkrati pa tudi iz vidika zagotavljanja njegove ekonomičnosti (Wallevik, 2009).

4 EKSPERIMENTALNO DELO

4.1 Povod in cilj raziskav

Do nedavnega so se raziskave na področju betona osredotočale predvsem na izboljšanje njegovih lastnosti v strjenem stanju. Vzoporedno z razvojem naprednih betonov in tehnologije njihove vgradnje je naraslo tudi število preiskav, ki zadevajo obsežno in kompleksno področje reologije cementnih suspenzij. Na tem področju Fakulteta za gradeništvo in geodezijo nikakor ne zaostaja. V preteklem letu so diplomanti in ostali raziskovalci, na Katedri za preizkušanje materialov in konstrukcij, v sklopu svojih raziskovalnih nalog, izvedli številne preiskave z uporabo reometra ConTec Viscometer 5. Ta je, po kalibriranju (Štupar, 2012), omogočil študijo vplivov spremembe vodo-cementnega razmerja in posameznih sestavin, med njimi tudi mineralnih in kemijskih dodatkov, na reološke lastnosti svežega betona (Andrejka, 2012). Zaključek, da reometer daje dobre rezultate pri bolj tekočih mešanicah z nižjo strižno napetostjo na meji tečenja, je vzpodbudil idejo o njegovi uporabi v raziskavah lastnosti SCC betonov.

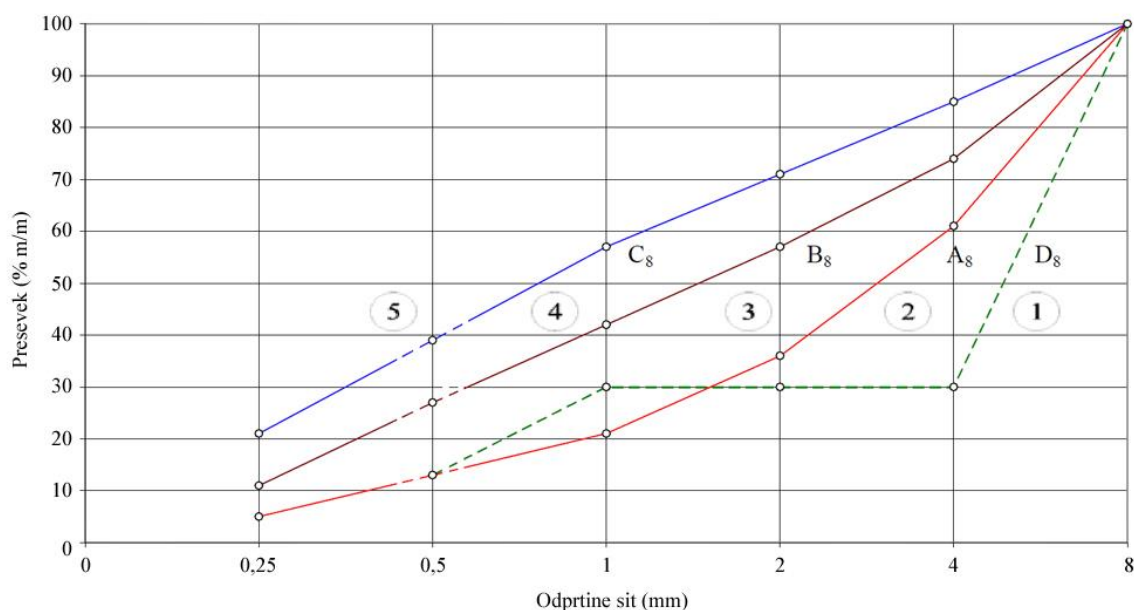
SCC je moderna vrsta betona, O.H. Wallevik (2009) ga imenuje kot "beton nove generacije", a se ob enem sprašuje ali je gradbena stroka nanj že pripravljena. Bistvo tega vprašanja razumemo kot iskanje rešitve problema kako kar najbolj ekonomično izdelati robusten SCC željenih reoloških karakteristik, a hkrati s tem ohraniti primerne mehanske in ostale lastnosti betona.

Sprva naj bi diplomska naloga obsegala le spremembe reoloških lastnosti SCC, ki so posledica variiranja zrnastostne sestave agregata in v/c razmerja. Kmalu po začetku eksperimentalnega dela se je izkazalo, da ima pomemben vpliv tudi vrsta uporabljenega superplastifikatorja. Na podlagi tega je bilo dogovorjeno, da bo opravljena parametrična študija vpliva zrnastostne sestave agregata, v/c razmerja in količine SP na lastnosti svežega in strjenega SCC. Na koncu smo na nekaj izbranih vzorcih uporabili še novo vrsto SP, ki je trenutno še v fazi razvoja. Poleg reologije smo spremljali tudi naraščanje tlačne trdnosti izbranih vzorcev. Na koncu so bile, z izotermnim kalorimetrom, opravljene časovne meritve razvoja hidratacijske toplote cementa izbranih vzorcev SCC. Razvoj toplote je neposredno povezan s časovnim prirastom tlačne trdnosti betona.

4.2 Priprave na eksperimentalno delo

Primerna granulometrijska sestava agregata omogoča izdelavo svežega betona ustreznih plastičnih lastnosti in strjenega betona zahtevanih mehanskih karakteristik. Praznine med posameznimi zrni se pri ustrezni sestavi pravilno zapolnijo z manjšimi zrni vse do najmanjših delcev. Kot že omenjeno, standardi priporočajo meje za zrnastostno sestavo agregata v obliki mejnih krivulj (Žarnić, 2005).

Pred začetkom eksperimentalnega dela v laboratoriju je bilo potrebno pripraviti zrnastostno sestavo mešanic. Za osnovo smo vzeli v standardu SIST 1026:2008 podane krivulje zrnastosti za mešanico agregata 0/8 mm. Z metodo najmanjših kvadratov smo agregat, ki je bil na voljo, kar najbolj približali zrnastostni sestavi, ki jo podaja standard.



Slika 4.1: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/8 mm po SIST 1026:2008

Mejne krivulje	Presevky [%] skozi sита [mm]					
	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0
A ₈	5	13	21	36	61	100
B ₈	11	27	42	57	74	100
C ₈	21	39	57	71	85	100

Preglednica 4.1: Presevky skozi sита za mešanico agregata 0/8 mm po SIST 1026:2008

Sejanje apnenčastega drobljenca frakcij 0/2 mm in 0/4 mm je bilo opravljeno dvakrat, nato pa določeno povprečje obeh sejalnih analiz. V **preglednici 4.2** lahko opazimo, da ima vsaka frakcija določen delež nadmernih zrn. Vseeno pa je ta tako majehn, da je potrebno frakcijo 4/8 mm dodati posebej.

Sito [mm]	0/2 mm [%]			0/4 mm [%]		
	1. sejanje	2. sejanje	povprečje	1. sejanje	2. sejanje	povprečje
0,125	12,70	12,49	12,60	9,39	5,90	7,65
0,25	23,70	23,50	23,60	18,43	17,80	18,12
0,5	40,40	40,22	40,31	30,20	31,50	30,85
1	68,70	68,54	68,62	55,46	58,70	57,08
2	92,10	92,04	92,07	82,42	85,30	83,86
4	100,00	100,00	100,00	99,83	99,90	99,87
8				100,00	100,00	100,00

Preglednica 4.2: Sejalna analiza apnenčastega drobljenca frakcij 0/2 mm in 0/4 mm

Kot izhodišče smo vzeli presevke na krivuljah A₈, B₈ ali C₈ do, vključno, velikosti odprtine sita 4 mm. Z metodo najmanjših kvadratov je nato določeno tako razmerje frakcij 0/2 mm in 0/4 mm, da je odstopanje od krivulj, priporočenih s standardom, največje oz. najmanjše. Tako je v **preglednici 4.3** drugi, peti in osmi stolpec, kjer je navedeno razmerje med frakcijama, pomnožen z ustrežno utežjo, glede na izbrano krivuljo: A₈ z 0,61; B₈ z 0,74; C₈ z 0,85 (glej **preglednico 4.1**). Odstopanje od zrnovostnih krivulj je prikazano v stolpcih "kvadrat razlike". Posamezno odstopanje je kvadrirana razlika presevka določenega s krivuljo in dejanskim presevkom agregata sestavljenim iz frakcij 0/2 mm in 0/4 mm. Spodaj je še vsota kvadratov razlike za posamezno razmerje frakcij.

Iz **preglednice 4.3** je razvidno, da v primerih krivulj A₈ in B₈ dobimo največja (obarvana rumeno) in najmanjša (obarvana zeleno) odstopanja v vseh primerih takrat, ko agregat frakcij 0/2 mm in 0/4 mm ne kombiniramo. Minimalno odstopanje vidimo pri izključni uporabi frakcije 0/4 mm in maksimalno pri izključni uporabi 0/2 mm. Ko primerjamo dejansko zrnovostno sestavo presejanega agregata s krivuljo C₈ pa maksimalno odstopanje dobimo pri ravno obratnem deležu, torej 0 % frakcije 0/2 mm in 100 % 4/8 mm. Malo bolj se celotna stvar zakomplicira pri minimalnem odstopanju agregata, ki nam je bil na voljo, od standardne krivulje C₈. Ta se pojavi pri kombinaciji 90 % frakcije 0/2 mm in 10 % frakcije 0/4 mm. Vendar se vsota kvadratov razlike, torej odstopanje od krivulje priporočene s standardom, od odstopanja pri kombinaciji 100 % 0/2 mm in 0 % 0/4 mm razlikuje minimalno. Tako zaradi enostavnejšega doziranja frakcij agregata v mešalec brez hude vesti vzamemo kar slednjo kombinacijo (v **preglednici 4.3** obarvana modro).

Sito [mm]	0% 0/2 100% 0/4	A8	kvadrat razlike	0% 0/2 100% 0/4	B8	kvadrat razlike	0% 0/2 100% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	4,66			5,66			6,50		
0,25	11,05	5	37	13,41	11	6	15,40	21	31
0,5	18,82	13	34	22,83	27	17	26,22	39	163
1	34,82	21	191	42,24	42	0	48,52	57	72
2	51,15	36	230	62,06	57	26	71,28	71	0
4	60,92	61	0	73,90	74	0	84,89	85	0
8	100,00	100	Σ 491	100,00	100	Σ 49	100,00	100	Σ 267
Sito [mm]	10% 0/2 90% 0/4	A8	kvadrat razlike	10% 0/2 90% 0/4	B8	kvadrat razlike	10% 0/2 90% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	4,97			6,02			6,92		
0,25	11,38	5	41	13,81	11	8	15,86	21	26
0,5	19,40	13	41	23,53	27	12	27,03	39	143
1	35,52	21	211	43,09	42	1	49,50	57	56
2	51,66	36	245	62,66	57	32	71,98	71	1
4	60,93	61	0	73,91	74	0	84,90	85	0
8	100,00	100	Σ 538	100,00	100	Σ 53	100,00	100	Σ 227
Sito [mm]	20% 0/2 80% 0/4	A8	kvadrat razlike	20% 0/2 80% 0/4	B8	kvadrat razlike	20% 0/2 80% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	5,27			6,39			7,34		
0,25	11,72	5	45	14,22	11	10	16,33	21	22
0,5	19,97	13	49	24,23	27	8	27,83	39	125
1	36,23	21	232	43,95	42	4	50,48	57	43
2	52,16	36	261	63,27	57	39	72,68	71	3
4	60,93	61	0	73,92	74	0	84,91	85	0
8	100,00	100	Σ 587	100,00	100	Σ 61	100,00	100	Σ 192

Preglednica 4.3 se nadaljuje na strani 22.

Sito [mm]	30% 0/2 70% 0/4	A8	kvadrat razlike	30% 0/2 70% 0/4	B8	kvadrat razlike	30% 0/2 70% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	5,57			6,76			7,76		
0,25	12,05	5	50	14,62	11	13	16,80	21	18
0,5	20,55	13	57	24,93	27	4	28,63	39	107
1	36,93	21	254	44,80	42	8	51,46	57	31
2	52,66	36	277	63,88	57	47	73,37	71	6
4	60,94	61	0	73,93	74	0	84,92	85	0
8	100,00	100	∑ 638	100,00	100	∑ 73	100,00	100	∑ 161
Sito [mm]	40% 0/2 60% 0/4	A8	kvadrat razlike	40% 0/2 60% 0/4	B8	kvadrat razlike	40% 0/2 60% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	5,87			7,12			8,18		
0,25	12,39	5	55	15,03	11	16	17,26	21	14
0,5	21,13	13	66	25,63	27	2	29,44	39	91
1	37,63	21	277	45,66	42	13	52,44	57	21
2	53,16	36	294	64,49	57	56	74,07	71	9
4	60,95	61	0	73,94	74	0	84,93	85	0
8	100,00	100	∑ 692	100,00	100	∑ 88	100,00	100	∑ 136
Sito [mm]	50% 0/2 50% 0/4	A8	kvadrat razlike	50% 0/2 50% 0/4	B8	kvadrat razlike	50% 0/2 50% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	6,17			7,49			8,60		
0,25	12,72	5	60	15,43	11	20	17,73	21	11
0,5	21,70	13	76	26,33	27	0	30,24	39	77
1	38,34	21	301	46,51	42	20	53,42	57	13
2	53,66	36	312	65,09	57	66	74,77	71	14
4	60,96	61	0	73,95	74	0	84,94	85	0
8	100,00	100	∑ 748	100,00	100	∑ 106	100,00	100	∑ 114
Sito [mm]	60% 0/2 40% 0/4	A8	kvadrat razlike	60% 0/2 40% 0/4	B8	kvadrat razlike	60% 0/2 40% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	6,48			7,86			9,02		
0,25	13,06	5	65	15,84	11	23	18,20	21	8
0,5	22,28	13	86	27,03	27	0	31,05	39	63
1	39,04	21	326	47,36	42	29	54,40	57	7
2	54,16	36	330	65,70	57	76	75,47	71	20
4	60,97	61	0	73,96	74	0	84,95	85	0
8	100,00	100	∑ 806	100,00	100	∑ 128	100,00	100	∑ 98
Sito [mm]	70% 0/2 30% 0/4	A8	kvadrat razlike	70% 0/2 30% 0/4	B8	kvadrat razlike	70% 0/2 30% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	6,78			8,22			9,44		
0,25	13,39	5	70	16,25	11	28	18,66	21	5
0,5	22,86	13	97	27,73	27	1	31,85	39	51
1	39,75	21	351	48,22	42	39	55,38	57	3
2	54,66	36	348	66,31	57	87	76,17	71	27
4	60,98	61	0	73,97	74	0	84,97	85	0
8	100,00	100	∑ 867	100,00	100	∑ 153	100,00	100	∑ 86
Sito [mm]	80% 0/2 20% 0/4	A8	kvadrat razlike	80% 0/2 20% 0/4	B8	kvadrat razlike	80% 0/2 20% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	7,08			8,59			9,86		
0,25	13,73	5	76	16,65	11	32	19,13	21	4
0,5	23,43	13	109	28,43	27	2	32,66	39	40
1	40,45	21	378	49,07	42	50	56,37	57	0
2	55,16	36	367	66,92	57	98	76,86	71	34
4	60,98	61	0	73,98	74	0	84,98	85	0
8	100,00	100	∑ 931	100,00	100	∑ 182	100,00	100	∑ 79

Pregledica 4.3 se nadaljuje na strani 23.

Sito [mm]	90% 0/2 10% 0/4	A8	kvadrat razlike	90% 0/2 10% 0/4	B8	kvadrat razlike	90% 0/2 10% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	7,38			8,95			10,29		
0,25	14,06	5	82	17,06	11	37	19,59	21	2
0,5	24,01	13	121	29,13	27	5	33,46	39	31
1	41,15	21	406	49,92	42	63	57,35	57	0
2	55,66	36	387	67,52	57	111	77,56	71	43
4	60,99	61	0	73,99	74	0	84,99	85	0
8	100,00	100	Σ 996	100,00	100	Σ 215	100,00	100	Σ 76
Sito [mm]	100% 0/2 0% 0/4	A8	kvadrat razlike	100% 0/2 0% 0/4	B8	kvadrat razlike	100% 0/2 0% 0/4	C8	kvadrat razlike
0,125	7,68			9,32			10,71		
0,25	14,40	5	88	17,46	11	42	20,06	21	1
0,5	24,59	13	134	29,83	27	8	34,26	39	22
1	41,86	21	435	50,78	42	77	58,33	57	2
2	56,16	36	407	68,13	57	124	78,26	71	53
4	61,00	61	0	74,00	74	0	85,00	85	0
8	100,00	100	Σ 1064	100,00	100	Σ 251	100,00	100	Σ 78

Preglednica 4.3: Kombinacije frakcij 0/2 mm in 0/4 mm in njihovo odstopanje od zrnastostnih krivulj A8, B8 in C8

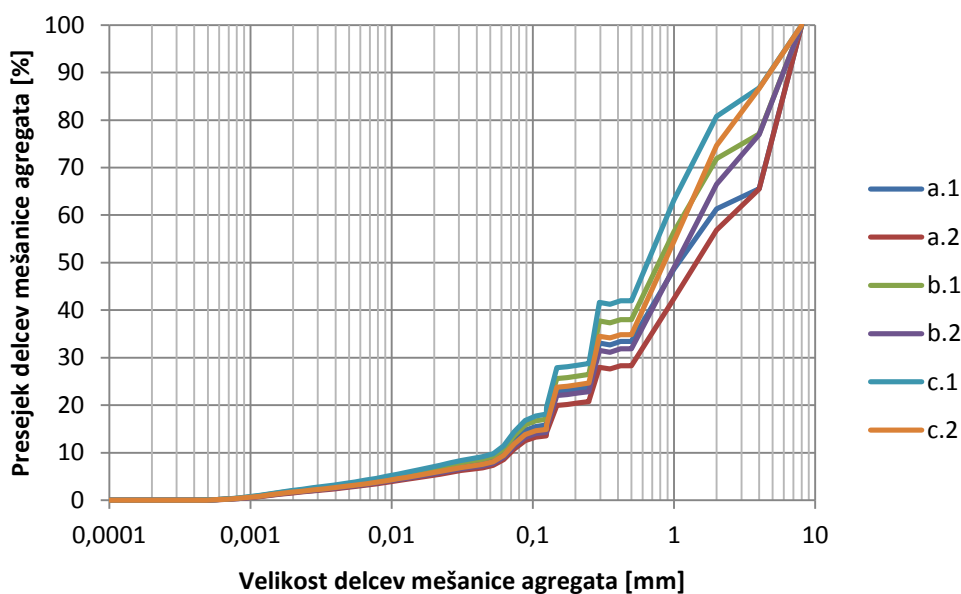
Oboje, največje in najmanjše odstopanje smo obravnavali z namenom, da ugotovimo kaj se zgodi, ne le ko se najbolj približamo priporočenim zrnastostnim krivuljam, temveč tudi kakšni so rezultati, ko je razmerje frakcij agregata od njih kar se da različno.

Na podlagi tega so določene mešanice agregata vzorcev parametrične študije. Dodana jim je še apnenčeva moka, za katero se je v predhodnih raziskavah pokazalo, da je primerna za izdelavo SCC in, kot omenjeno, še frakcija 4/8 mm, v količini kot narekujejo zrnastostne krivulje standarda. Sejalna analiza apnenčeve moke je bila predhodno opravljena z lasersko mokro analizo.

Krivulja/Oznaka	Delež frakcije		
	0/2 mm	0/4 mm	4/8 mm
A8			
a.1	61%	0%	39%
a.2	0%	61%	39%
B8			
b.1	74%	0%	26%
b.2	0%	74%	26%
C8			
c.1	85%	0%	15%
c.2	0%	85%	15%

Preglednica 4.4: Masno razmerje mešanice agregata vzorcev parametrične študije (brez apnenčeve moke)

Celotne zrnastostne sestave kombinacije apnenčeve moke z različnimi deleži frakcij apnenčevega drobljenca so prikazane na *grafikonu 4.1*. Glede na rezultate laserske mokre analize so velikosti delcev apnenčeve moke približno od 0,0004 mm (0,4 mikronov) do 0,42 mm (420 mikronov) – *grafikonu 4.3* v naslednjem poglavju. Najmanjše uporabljeno sito pri sejalni analizi apnenčevega drobljenca je 0,125 mm. Pod to vrednostjo smo privzeli enak delež velikosti zrn kot pri analizi apnenčeve moke, saj tako drobljenec, kot moka izhajata iz istega kamnoloma in separacije.



Grafikon 4.1: Zrnovostna sestava kombinacije apnenčeve moke in drobljenca

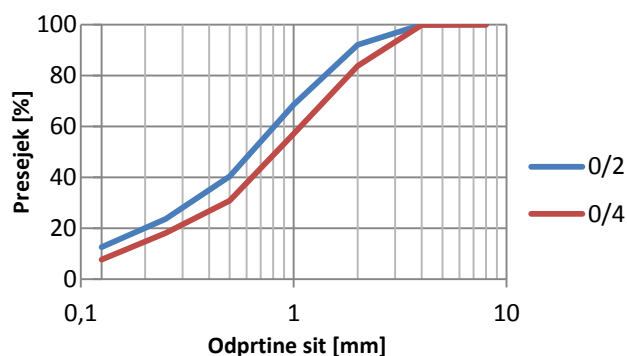
4.3 Uporabljeni materiali

Za izdelavo SCC se, z dodatkom polnilnih materialov in SP, uporabljajo enaki materiali kot za običajne betonske mešanice.

V sklopu laboratorijskih raziskav predstavljenih v tem diplomskem delu smo uporabili čisti portlandski cement CEM I 42,5 R. Prostorninska masa cementa brez por in votlin je $3,01 \text{ kg/m}^3$.

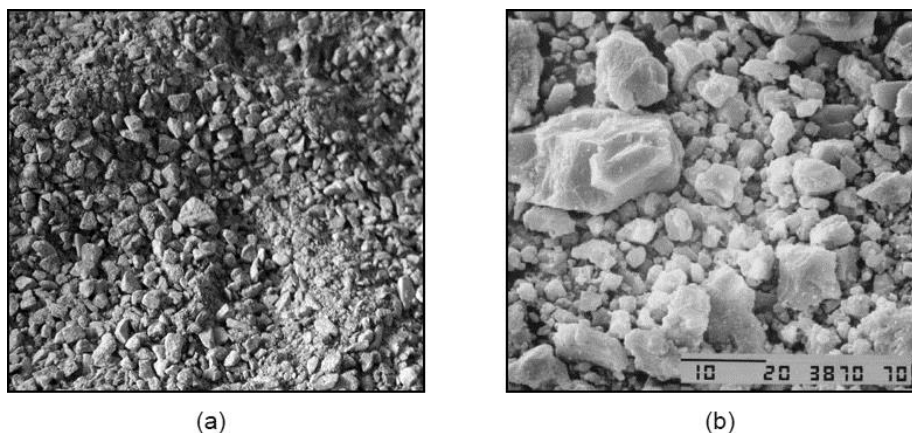
Uporabljena voda je bila odvzeta iz ljubljanskega vodovodnega omrežja in je, glede na standard SIST EN 1008:2003, ni potrebno dodatno preizkusiti.

Uporabljen agregat je apnenčast drobljenec frakcij 0/2 mm, 0/4 mm in 4/8 mm ter prostorninske mase zrn $2,70 \text{ kg/m}^3$.

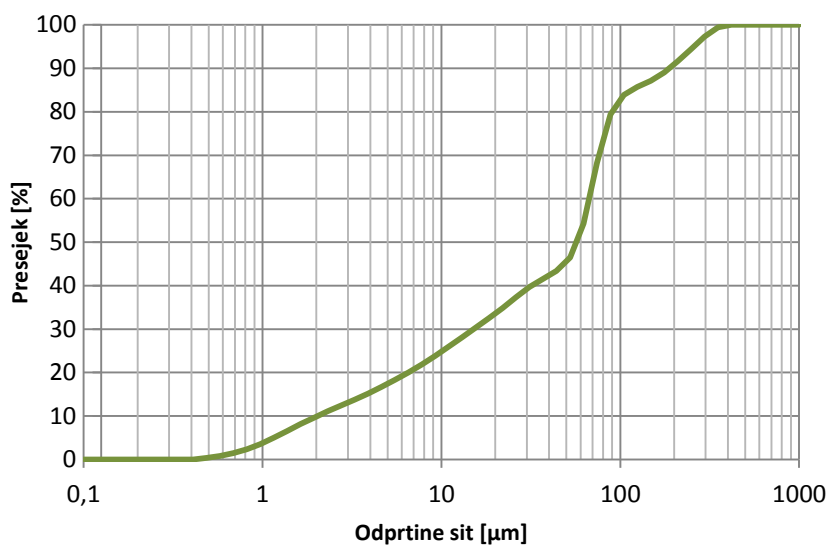


Grafikon 4.2: Sejalna analiza apnenčastega drobljenca frakcij 0/2 in 0/4

Kot omenjeno, so bili pri pripravi vseh vzorcev uporabljeni dodatni praškasti delci agregata - apnenčeva moka. Ta ima prostorninsko maso $2,75 \text{ kg/m}^3$. Oblika delcev moke je na mikro nivoju podobna obliki večjih frakcij uporabljenega agregata, torej so delci ostrorobe oblike.



Slika 4.2: Uporabljen agregat in apnenčeva moka: a) frakcija 0/4 mm;
b) apnenčeva moka pod optičnim mikroskopom (Duh, 2008)



Grafikon 4.3: Zrnastostna sestava apnenčeve moke

Uporabljeni sta bili dve vrsti superplastifikatorja. Ena, na osnovi polikarboksilatnih polimerov – v nadaljevanju označen tudi z oznako PCE¹¹, tujega proizvajalca in druga, polifosfonatnega tipa – v nadaljevanju označen tudi z oznako PPh¹², ki je proizvod slovenskega podjetja. Medtem, ko je prva vrsta SP že uveljavljena, je druga povsem nov proizvod, ki še niti ni dostopen na trgu kemijskih dodatkov. Enega ali drugega se, v količini nekaj promilov, doda glede na maso praškastih delcev mešanice, torej glede na vsoto mase cementa in apnenčeve moke.

¹¹ PCE – ang. "polycarboxylate ether"

¹² PPh – ang. "polyphosphonate"

4.4 Parametrična študija

Začetna preiskava obsega 24 vzorcev SCC, pri katerih smo parametrično spreminjali zrnovostno sestavo, v/c ter količino SP. Pri vseh 24 vzorcih smo uporabili SP polikarboksilatnega tipa.

4.4.1 Receptura vzorcev

Izhodiščna receptura z v/c = 0,5 za 4 litre sveže mešanice je prikazana v *preglednici 4.5*.

Komponenta	[kg]
cement CEM I 42,5 R	1,67
apnenčeva moka	0,80
voda	0,84
agregat	6,04

Preglednica 4.5: Receptura za vzorce parametrične študije z v/c = 0,5

Fracije agregata so bile dodane v razmerju mas tako kot je prikazano v *preglednici 4.4*. Prvim 6 vzorcem smo, poleg osnovnih komponent iz *preglednice 4.5*, dodali še SP polikarboksilatnega tipa v količini 0,7% glede na skupno maso cementa in apnenčeve moke.

V nadaljevanju smo ostalim vzorcem parametrično spreminjali dodatek SP in v/c. Naslednji seriji 6 vzorcev smo najprej povečali količino SP na 0,8% skupne mase praškastih delcev mešanice.

Pri spremembi v/c je potrebno ohraniti volumen mešanice, tako se malenkost spremeni vhodna količina mas cementa in vode. V/c smo iz prejšnjih 0,5 povečali na 0,55. Nova osnovna receptura je prikazana v *preglednici 4.6*.

Komponenta	[kg]
cement CEM I 42,5 R	1,60
apnenčeva moka	0,80
voda	0,88
agregat	6,04

Preglednica 4.6: Receptura za vzorce parametrične študije z v/c = 0,55

Ob spremembi v/c se minimalno spremeni tudi količina dodanega SP, ki je vezana na maso cementa in apnenčeve moke. Mase v vseh kombinacijah v/c in odstotka SP glede na maso finih delcev so prikazane v *preglednici 4.7*.

Masa dodanega PCE superplastifikatorja			
v/c = 0,5	v/c = 0,5	v/c = 0,55	v/c = 0,55
SP = 0,7%	SP = 0,8%	SP = 0,7%	SP = 0,8%
17,29 g	19,76 g	16,80 g	19,20 g

Preglednica 4.7: Količina dodanega PCE superplastifikatorja

Tako imamo 4 serije po 6 vzorcev. Njihove parametrične spremembe in oznake so zaradi boljše preglednosti povzete v *preglednici 4.8*. Oznake so analogne tistim v *preglednici 4.4*, s tem, da je dodana še številka serije, ki določa v/c in količino SP.

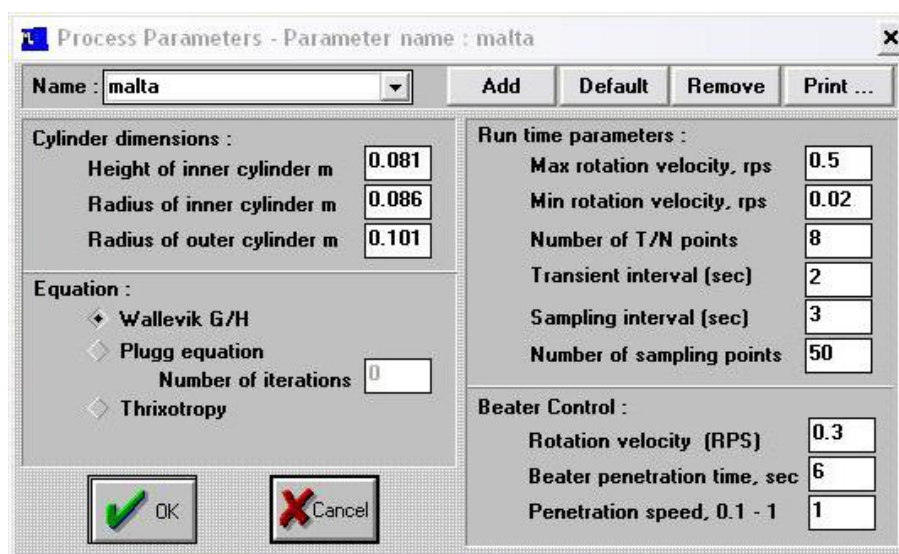
Delež frakcije			v/c = 0,5	v/c = 0,5	v/c = 0,55	v/c = 0,55
0/2 mm	0/4 mm	4/8 mm	SP = 0,7%	SP = 0,8%	SP = 0,7%	SP = 0,8%
61%	0%	39%	a.1.1	a.1.2	a.1.3	a.1.4
0%	61%	39%	a.2.1	a.2.2	a.2.3	a.2.4
74%	0%	26%	b.1.1	b.1.2	b.1.3	b.1.4
0%	74%	26%	b.2.1	b.2.2	b.2.3	b.2.4
85%	0%	15%	c.1.1	c.1.2	c.1.3	c.1.4
0%	85%	15%	c.2.1	c.2.2	c.2.3	c.2.4

Preglednica 4.8: Oznake vzorcev parametrične študije

4.4.2 Mešanje in postopek meritev

Vseh 24 vzorcev smo zamešali v modificiranem standardnem mešalcu za malte (SIST EN 196–1:2005), z modificirano mešalno posodo in lopatico. Posoda ima, glede na standardno posodo, povečano prostornino, lopatica pa je prilagojena novim dimenzijam posode. Volumen posode, ki znaša približno 4 litre je prilagojen delu z večjimi vzorci in valjasti posodi reometra namenjeni prvenstveno za preiskave malt. Pri mešanju se mešalna lopatica obrača okrog svoje lastne osi ter hkrati še planetarno okoli pogonske osi. Mešalec ima dve različni nastavitvi hitrosti mešanja. Za tehtanje mase vhodnih sestavin vzorcev zamešanih v tem mešalcu smo uporabili tehtnico z natančnostjo ± 2 grama. Pri tehtanju SP je bila uporabljena bolj natančna tehtnica in sicer z natančnostjo ± 0,01 grama.

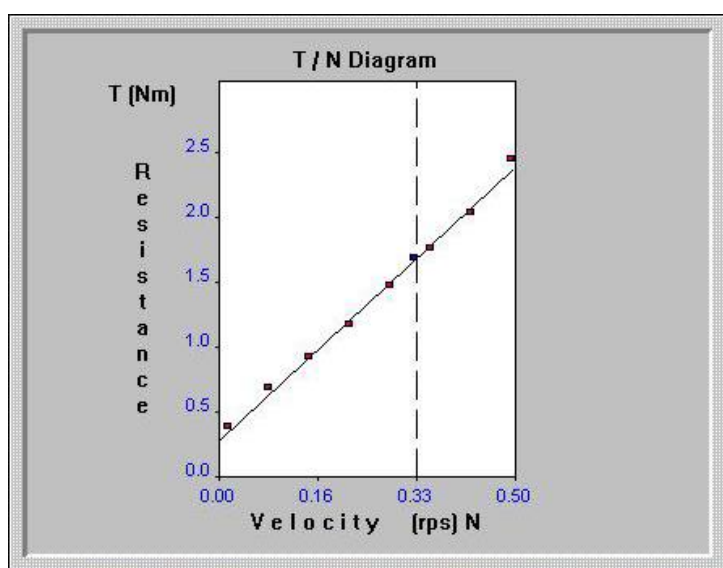
Že pred mešanjem na računalniku, ki je povezan z reometrom zaženemo aplikacijo FRESHwin, ki skrbi za prikaz podatkov in vnos merilnih nastavitvev.



Slika 4.3: Izbrane vrednosti merilnih parametrov za vse vzorce parametrične študije

Postopek mešanja je sledeč: V ovlaženo mešalno posodo stresemo celotno količino cementa in apnenčeve moke. Posodo postavimo v mešalec in na njem nastavimo 1. hitrost mešanja. V prvih 30 sekundah dodamo celotno količino zamesne vode in SP, v naslednjih 30 sekundah dodamo ves agregat, zadnjih 30 sekund mešalec prosto meša v 2. hitrosti. Sledi 60 sekundna prekinitev mešanja, namenjena temu, da očistimo lopatico in morebitne delce sveže mešanice, ki so se prilepili na stene posode, vrnemo na sredino. V vseh obravnavanih primerih naših vzorcev to ni bilo potrebno, njihova konsistenca je bila namreč taka, da je celotna količina vzorcev ostala v sredini posode. Naslednjih 60 sekund mešalec zaženemo v 2. hitrosti.

Merilno posodo reometra oz. njegov zunanji valj do označene višine (Štupar, 2012) napolnimo s svežim vzorcem iz mešalca. Še preden začnemo reometerske meritve z dotikom in vizualno ocenimo ali mešanica segregira. Reometer nato izvede avtomatiziran proces meritev z nezveznim spreminjanjem hitrosti, zabeleži rezultate in jih grafično predstavi (glej *sliko 4.4*) z rdeče obarvanimi točkami na diagramu odpora vzorca na striženje T v odvisnosti od hitrosti vrtenja zunanjega valja N . Glede na te točke je podana linearna regresijska premica¹³, ki ponazarja kako se moment na notranji cilindar povečuje z večanjem hitrosti. Ko so določene vse T/N točke reometer preveri segregacijo vzorca tako, da posodo ponovno zavrti s hitrostjo, ki je na *sliki 4.4* označena z navpično črtkano črto. Izmerjen odpor je označen z modro točko. Če se ta nahaja v območju $\pm 20\%$ okoli regresijske premice preizkušana mešanica, glede na meritve reometra, ne segregira (Wallevik, 2009).



Slika 4.4: Primer prikaza rezultatov meritev z aplikacijo FRESHwin

Na koncu meritev sta določeni konstanti G in H ter posredno, preko Reiner-Rivlinove enačbe, osnovna Binghamova parametra. Vendar je tu potrebna pazljivost. Parametra τ_0 in μ sta, glede na aplikacijo FRESHwin, izračunana za idealen Binghamov model tekočine, torej samo za en naklon regresijske premice. To je vredno, če lahko s to premico dobro zajamemo vse T/N točke. Mešanice preizkušene v sklopu parametrične študije tega diplomskega dela pa pogosto izkazujejo obnašanje strižno zgoščanje. Izkaže se, da lahko izmerjene T/N točke v tem primeru zelo dobro zajamemo z dvema linearnima regresijskima premicama. Tako je strižna napetost na meji tečenja τ_0 določena tam kjer nižja oz. leva regresijska premica seka ordinatno os, plastično viskoznost μ pa izračunamo za naklon vsake premice posebej.

¹³ regresijska premica – ang. "trendline"

Osnovna Reiner-Rivlinova enačba ima sledečo obliko (Wallevik, 2009):

$$\Omega = \frac{T}{4\pi \cdot h \cdot \mu} \cdot \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{r_0}{r_i} \right)$$

Kjer je:

Ω : kotna hitrost zunanlega valja oz. posode (rad/s),

T : moment izmerjen na notranjem valju (N·m),

h : višina notranjega valja v vzorcu (m),

r_i : polmer notranjega valja (m),

r_0 : polmer zunanlega valja (m).

Višina notranjega valja v vzorcu je razdalja od najnižje točke notranjega valja do najvišje točke vzorca v posodi. S to dimenzijo je definirana višina rotirajoče se mešanice, ki deluje na notranji valj (Štupar, 2012).

Povezava med hitrostjo vrtenja N in kotno hitrostjo Ω zunanlega valja je enostavna:

$$\Omega = 2\pi \cdot N$$

Osnovno Reiner-Rivlinovo enačbo je mogoče pretvoriti v dve ločeni enačbi za izračun posameznega reološkega parametra τ_0 in μ (Wallevik, 2009):

$$\tau_0 = G \cdot \left[\frac{1/r_i^2 - 1/r_0^2}{4\pi \cdot \ln(r_0/r_i)} \cdot \frac{1}{h} \right]$$

$$\mu = H \cdot \left[\frac{1/r_i^2 - 1/r_0^2}{8\pi^2} \cdot \frac{1}{h} \right]$$

B. Štupar (2012) je v svoji diplomski nalogi izmeril polmer zunanlega ($r_i = 101,6$ mm) in notranjega ($r_0 = 86,2$ mm) valja ter določil najprimernejšo višino vzorca ($h = 81$ mm) za reometerske meritve na maltah in betonih z največjim zrnem 8 mm. Ob upoštevanju teh parametrov poenostavimo zgornji enačbi:

$$\tau_0[Pa] = G[N m] \cdot 225,366[m^{-3}]$$

$$\mu[Pa s] = H[N m s] \cdot 5,896[m^{-3}]$$

Ker je za raziskave betona značilen precejšen raztros rezultatov so bile za boljšo kvaliteto le-teh na vsakem vzorcu opravljene tri reometerske meritve in nato upoštevano povprečje. Med vsako od meritev na istem vzorcu smo mešanico v posodi reometra premešali z jekleno ukrivljeno palico, da so se večja zrna agregata, ki bi se morda nabrala ob robu posode, ponovno enakomerno razporedila po cementni pasti, tako smo preprečili možen vpliv nehomogene sestave vzorca zaradi pojava imenovanega migracija delcev (Wallevik, 2009). Premešanje je bilo izvedeno po celotnem obsegu posode.

Po končani meritvi reometra vzorec v posodi dobro premešamo in izvedemo "mini slump-flow" preizkus (glej *poglavje 3.3*). V nadaljevanju bomo uporabili okrajšavo mini SF preizkus. Le-tega za vsak vzorec opravimo samo enkrat.

4.4.3 Rezultati meritev z reometrom

Na grafikonih, ki sledijo, je prikazanih osem (rdečih) regresijskih T/N točk ter dodatna (modra) točka za kontrolo segregacije. Izmerjene odpornosti na striženje T so navedene poleg posameznih točk, hitrosti vrtenja posode N pri katerih so bile te odpornosti izmerjene pa, zaradi preglednosti, ne. Le-te so pri vseh meritvah enake in si od najmanjše do največje sledijo takole:

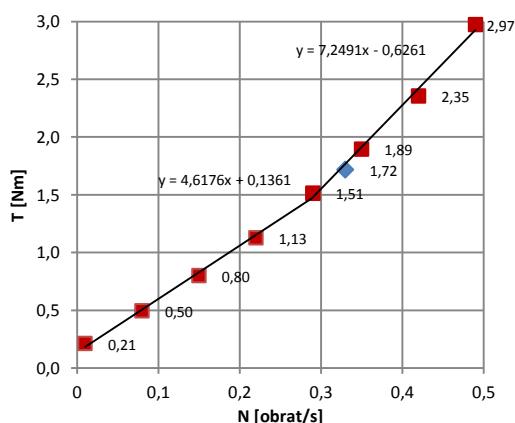
T/N točka	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	kontrola segregacije
Hitrost N [obrat/s]	0,01	0,08	0,15	0,22	0,29	0,35	0,42	0,49	0,33

Preglednica 4.9: Hitrosti vrtenja posode z vzorcem pri meritvi odpora na striženje

Prvih 5 točk (1., 2., 3., 4., 5.) zajamemo z eno – levo regresijsko premico, zadnje 4 (5., 6., 7., 8.) pa z drugo – desno regresijsko premico. Moment na meji tečenja G določimo tam, kjer leva regresijska premica seka ordinatno os. Koeficient viskoznosti H predstavlja naklon ene in druge regresijske premice, tako dobimo za en vzorec dve vrednosti H . Tak pristop se izkaže za dokaj dobro inženirsko aproksimacijo realnega obnašanja tekočine s strižnim zgoščanjem. Komentarji poleg grafikonov in reoloških parametrom so subjektivno opažene lastnosti svežih vzorcev med preiskavo.

vzorec a.1.1

G	0,136 N·m
H_1	4,618 N·m·s
H_2	7,249 N·m·s
τ_0	30,672 Pa
μ_1	27,224 Pa·s
μ_2	42,739 Pa·s
mini SF	295 mm

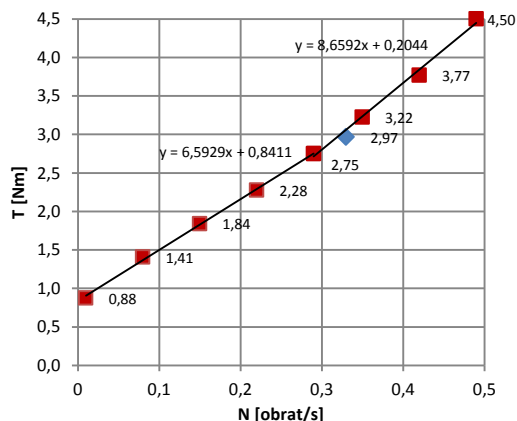


Grafikon 4.4: Tokovna krivulja mešanice a.1.1

vzorec a.2.1

G	0,841 N·m
H₁	6,593 N·m·s
H₂	8,659 N·m·s
τ₀	189,555 Pa
μ₁	38,870 Pa·s
μ₂	51,053 Pa·s
mini SF	/

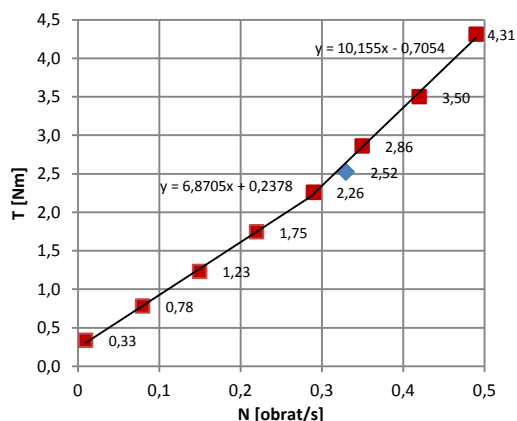
Zelo viskozna mešanica. Po končanem reometerskem preizkusu precej materiala vzorca ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.



Grafikon 4.5: Tokovna krivulja mešanice a.2.1

vzorec b.1.1

G	0,238 N·m
H₁	6,871 N·m·s
H₂	10,155 N·m·s
τ₀	53,592 Pa
μ₁	40,507 Pa·s
μ₂	59,871 Pa·s
mini SF	235 mm

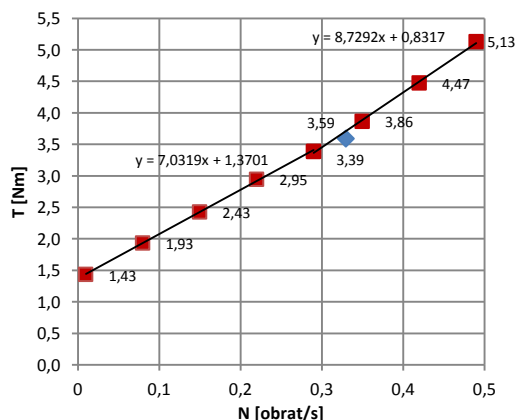


Grafikon 4.6: Tokovna krivulja mešanice b.1.1

vzorec b.2.1

G	1,370 N·m
H₁	7,032 N·m·s
H₂	8,729 N·m·s
τ₀	308,774 Pa
μ₁	41,458 Pa·s
μ₂	51,465 Pa·s
mini SF	/

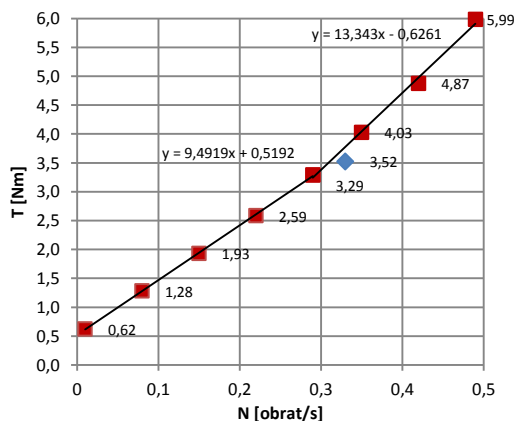
Zelo viskozna mešanica. Po končanem reometerskem preizkusu precej materiala vzorca ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.



Grafikon 4.7: Tokovna krivulja mešanice b.2.1

vzorec c.1.1

G	0,519 N·m
H₁	9,492 N·m·s
H₂	13,343 N·m·s
τ₀	117,010 Pa
μ₁	55,962 Pa·s
μ₂	78,667 Pa·s
mini SF	170 mm

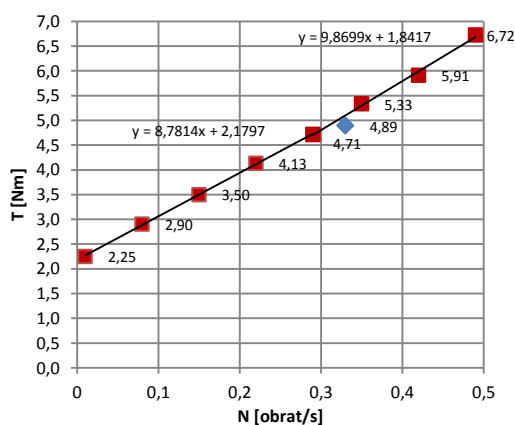


Grafikon 4.8: Tokovna krivulja mešanice c.1.1

vzorec c.2.1

G	2,180 N·m
H₁	8,781 N·m·s
H₂	9,870 N·m·s
τ₀	491,230 Pa
μ₁	51,773 Pa·s
μ₂	58,191 Pa·s
mini SF	/

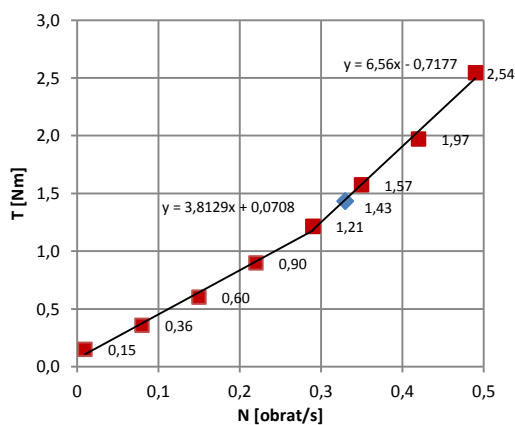
Zelo viskozna mešanica. Po končanem reometerskem preizkusu precej materiala vzorca ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.



Grafikon 4.9: Tokovna krivulja mešanice c.2.1

vzorec a.1.2

G	0,071 N·m
H₁	3,813 N·m·s
H₂	6,560 N·m·s
τ₀	15,956 Pa
μ₁	22,480 Pa·s
μ₂	38,676 Pa·s
mini SF	300 mm

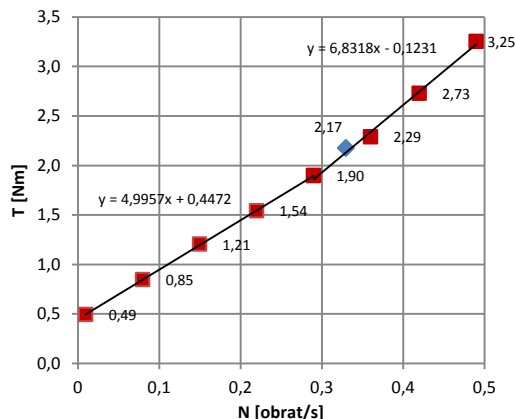


Grafikon 4.10: Tokovna krivulja mešanice a.1.2

vzorec a.2.2

G	0,447 N·m
H₁	4,996 N·m·s
H₂	6,832 N·m·s
τ₀	100,784 Pa
μ₁	29,453 Pa·s
μ₂	40,279 Pa·s
mini SF	180 mm

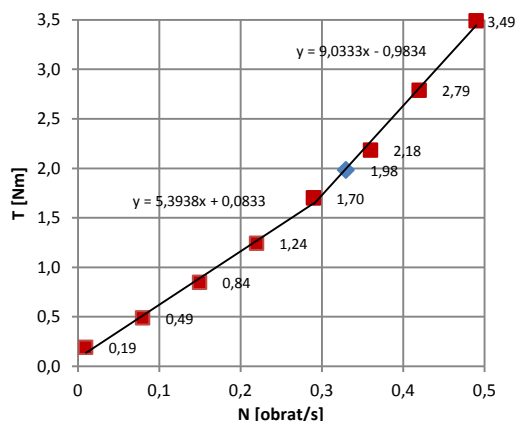
Dokaj viskozna mešanica. Po končanem reometerskem preizkusu precej materiala vzorca ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.



Grafikon 4.11: Tokovna krivulja mešanice a.2.2

vzorec b.1.2

G	0,083 N·m
H₁	5,394 N·m·s
H₂	9,033 N·m·s
τ₀	18,773 Pa
μ₁	31,801 Pa·s
μ₂	53,258 Pa·s
mini SF	270 mm

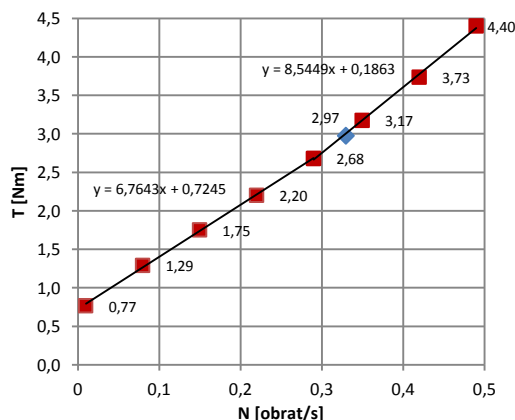


Grafikon 4.12: Tokovna krivulja mešanice b.1.2

vzorec b.2.2

G	0,725 N·m
H₁	6,764 N·m·s
H₂	8,545 N·m·s
τ₀	163,278 Pa
μ₁	39,881 Pa·s
μ₂	50,379 Pa·s
mini SF	/

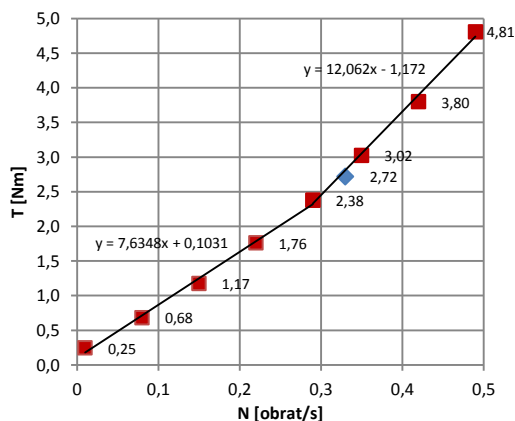
Dokaj viskozna mešanica. Po končanem reometerskem preizkusu nekaj materiala vzorca ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.



Grafikon 4.13: Tokovna krivulja mešanice b.2.2

vzorec c.1.2

G	0,103 N·m
H₁	7,635 N·m·s
H₂	12,062 N·m·s
τ₀	23,235 Pa
μ₁	45,013 Pa·s
μ₂	71,115 Pa·s
mini SF	250 mm

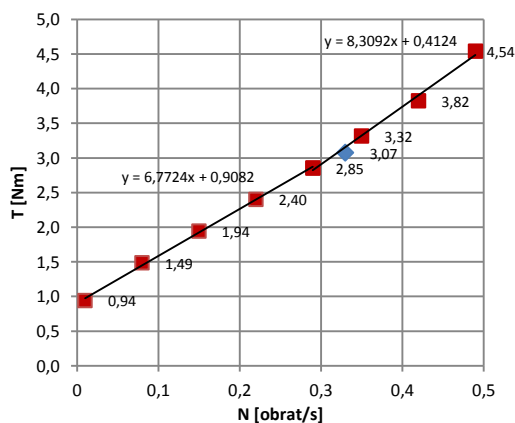


Grafikon 4.14: Tokovna krivulja mešanice c.1.2

vzorec c.2.2

G	0,908 N·m
H₁	6,772 N·m·s
H₂	8,309 N·m·s
τ₀	204,677 Pa
μ₁	39,928 Pa·s
μ₂	48,989 Pa·s
mini SF	/

Dokaj viskozna mešanica. Po končanem reometerskem preizkusu nekaj materiala vzorca ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.

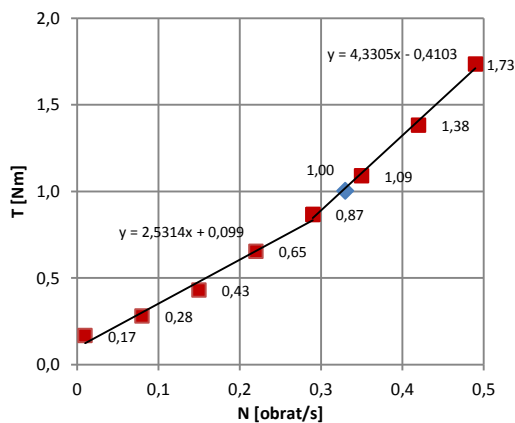


Grafikon 4.15: Tokovna krivulja mešanice c.2.2

vzorec a.1.3

G	0,099 N·m
H₁	2,531 N·m·s
H₂	4,331 N·m·s
τ₀	22,311 Pa
μ₁	14,925 Pa·s
μ₂	25,532 Pa·s
mini SF	345 mm

Rahlo segregira.

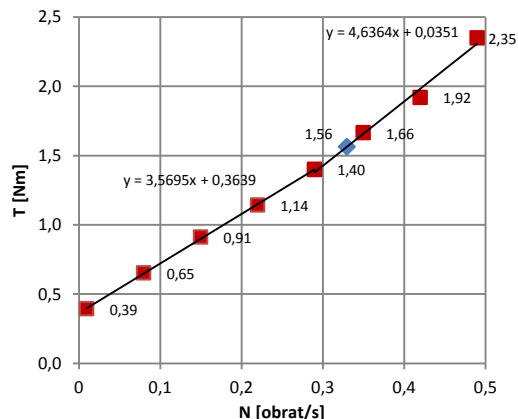


Grafikon 4.16: Tokovna krivulja mešanice a.1.3

vzorec a.2.3

G	0,364 N·m
H₁	3,570 N·m·s
H₂	4,636 N·m·s
τ₀	82,011 Pa
μ₁	21,045 Pa·s
μ₂	27,335 Pa·s
mini SF	218 mm

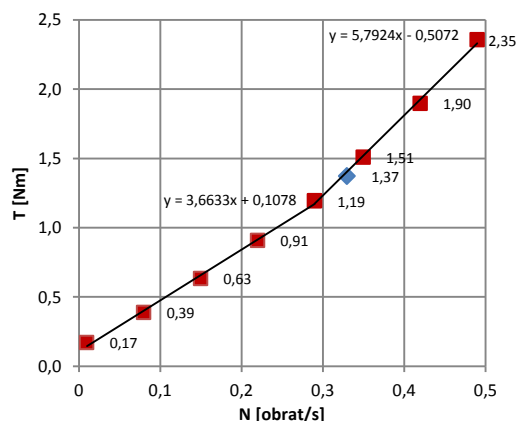
Material vzorca minimalno ostaja na notranjem valju reometra, počasi se sam od sebe odlepi.



Grafikon 4.17: Tokovna krivulja mešanice a.2.3

vzorec b.1.3

G	0,108 N·m
H₁	3,663 N·m·s
H₂	5,792 N·m·s
τ₀	24,294 Pa
μ₁	21,598 Pa·s
μ₂	34,151 Pa·s
mini SF	310 mm

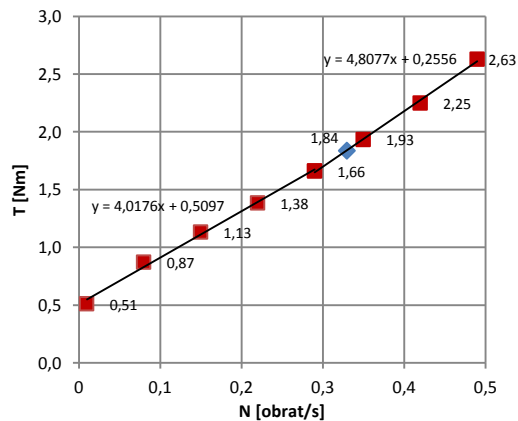


Grafikon 4.18: Tokovna krivulja mešanice b.1.3

vzorec b.2.3

G	0,510 N·m
H₁	4,018 N·m·s
H₂	4,808 N·m·s
τ₀	114,869 Pa
μ₁	23,687 Pa·s
μ₂	28,345 Pa·s
mini SF	168 mm

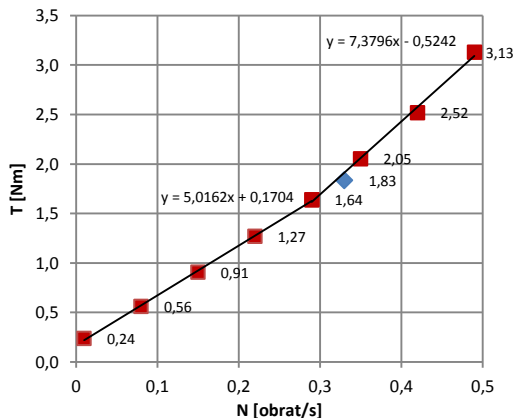
Material vzorca minimalno ostaja na notranjem valju reometra, počasi se sam od sebe odlepi.



Grafikon 4.19: Tokovna krivulja mešanice b.2.3

vzorec c.1.3

G	0,170 N·m
H₁	5,016 N·m·s
H₂	7,380 N·m·s
τ₀	38,402 Pa
μ₁	29,574 Pa·s
μ₂	43,508 Pa·s
mini SF	250 mm

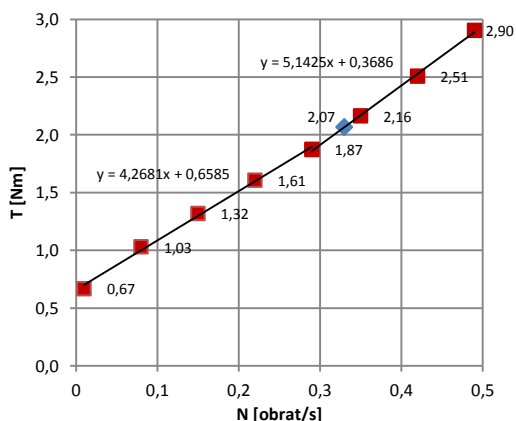


Grafikon 4.20: Tokovna krivulja mešanice c.1.3

vzorec c.2.3

G	0,659 N·m
H₁	4,268 N·m·s
H₂	5,143 N·m·s
τ₀	148,403 Pa
μ₁	25,164 Pa·s
μ₂	30,319 Pa·s
mini SF	/

Material vzorca minimalno ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.

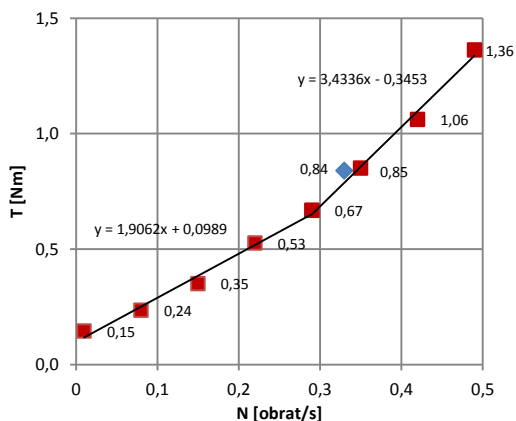


Grafikon 4.21: Tokovna krivulja mešanice c.2.3

vzorec a.1.4

G	0,099 N·m
H₁	1,906 N·m·s
H₂	3,434 N·m·s
τ₀	22,289 Pa
μ₁	11,238 Pa·s
μ₂	20,244 Pa·s
mini SF	370 mm

Segregira.

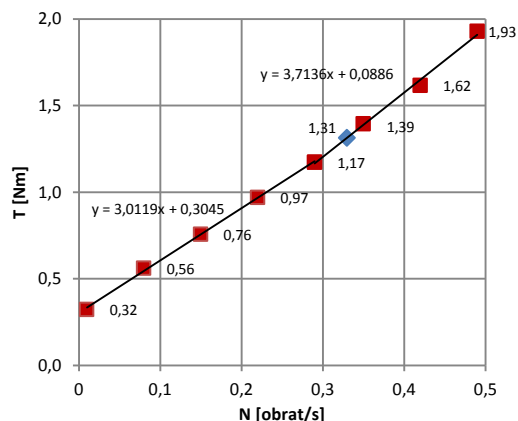


Grafikon 4.22: Tokovna krivulja mešanice a.1.4

vzorec a.2.4

G	0,305 N·m
H₁	3,012 N·m·s
H₂	3,714 N·m·s
τ₀	68,624 Pa
μ₁	17,757 Pa·s
μ₂	21,894 Pa·s
mini SF	235 mm

Material vzorca minimalno ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.

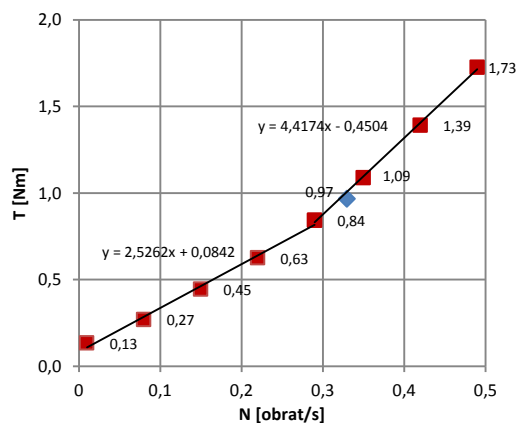


Grafikon 4.23: Tokovna krivulja mešanice a.2.4

vzorec b.1.4

G	0,084 N·m
H₁	2,526 N·m·s
H₂	4,417 N·m·s
τ₀	18,976 Pa
μ₁	14,894 Pa·s
μ₂	26,044 Pa·s
mini SF	335 mm

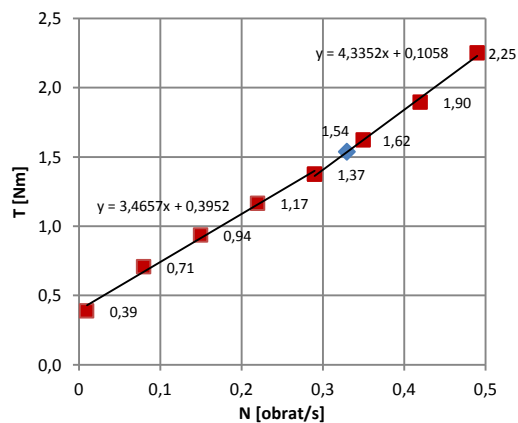
Rahlo segregira.



Grafikon 4.24: Tokovna krivulja mešanice b.1.4

vzorec b.2.4

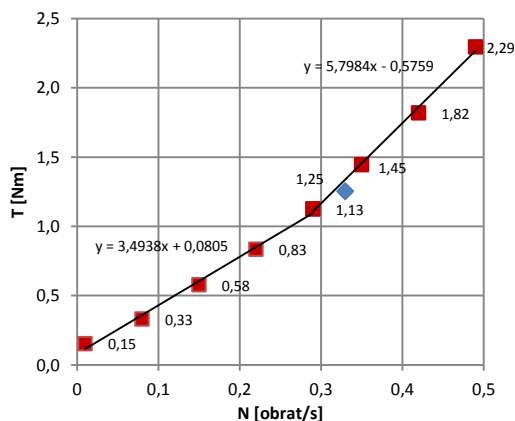
G	0,395 N·m
H₁	3,466 N·m·s
H₂	4,335 N·m·s
τ₀	89,065 Pa
μ₁	20,433 Pa·s
μ₂	25,559 Pa·s
mini SF	180 mm



Grafikon 4.25: Tokovna krivulja mešanice b.2.4

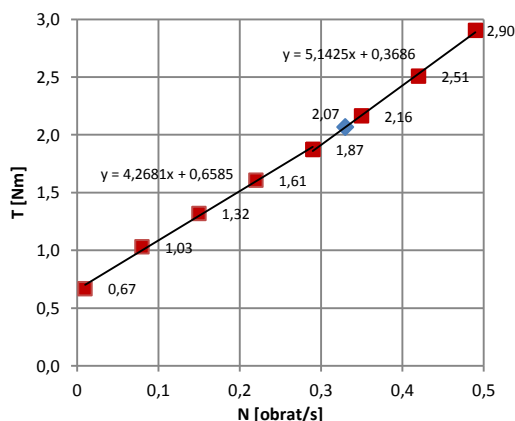
vzorec c.1.4

G	0,081 N·m
H₁	3,494 N·m·s
H₂	5,798 N·m·s
τ₀	18,142 Pa
μ₁	20,599 Pa·s
μ₂	34,186 Pa·s
mini SF	315 mm

**Grafikon 4.26: Tokovna krivulja mešanice c.1.4****vzorec c.2.4**

G	0,646 N·m
H₁	4,576 N·m·s
H₂	5,695 N·m·s
τ₀	145,541 Pa
μ₁	26,977 Pa·s
μ₂	33,578 Pa·s
mini SF	/

Material vzorca minimalno ostaja na notranjem valju reometra. Mini SF preizkus je neizvedljiv.

**Grafikon 4.27: Tokovna krivulja mešanice c.2.4****4.4.4 Rezultati mini SF preizkusa**

V *preglednici 4.10* so prikazani razlezi mini SF preizkusa vseh 24 vzorcev parametrične študije. Na podlagi tega smo, za nadaljnje raziskave, izbrali 4 mešanice – obarvane zeleno, katerih razlez je bil najbližji vrednosti 30 cm s pogojem, da ne kažejo znakov segregacije. Z rumeno sta obarvana vzorca, ki sta rahlo segregirala, z rdečo pa vzorec pri katerem je bila segregacija izrazito vidna. Pri vzorcih kjer izmerjena vrednost razleza ni podana, meritve mini SF preizkusa, zaradi konsistence mešanice, ni bilo mogoče izvesti.



Slika 4.5: Mini SF preizkus v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju, UL FGG

Delež frakcije [mm]			v/c = 0,5 SP = 0,7%		v/c = 0,5 SP = 0,8%		v/c = 0,55 SP = 0,7%		v/c = 0,55 SP = 0,8%	
0/2	0/4	4/8	Razlez [mm] pri "mini-slump" preizkusu							
61%	0%	39%	295 (a.1.1)	300 (a.1.2)	345 (a.1.3)	370 (a.1.4)				
0%	61%	39%	/ (a.2.1)	180 (a.2.2)	218 (a.2.3)	235 (a.2.4)				
74%	0%	26%	235 (b.1.1)	270 (b.1.2)	310 (b.1.3)	335 (b.1.4)				
0%	74%	26%	/ (b.2.1)	/ (b.2.2)	168 (b.2.3)	180 (b.2.4)				
85%	0%	15%	170 (c.1.1)	250 (c.1.2)	250 (c.1.3)	315 (c.1.4)				
0%	85%	15%	/ (c.2.1)	/ (c.2.2)	/ (c.2.3)	/ (c.2.4)				

Preglednica 4.10: Mini SF razlezi vzorcev parametrične študije

4.4.5 Analiza segregacije mešanic parametrične študije

Če tri mešanice, pri katerih smo opazili znake segregacije primerjamo z rezultati preizkusa segregacije, ki nam jih poda reometer opazimo, da je segregacijska točka vzorca a.1.4 (*grafikon 4.22*) dejansko precej oddaljena od desne regresijske premice s katero jo primerjamo. Tudi vrednosti obeh plastični viskoznosti, μ_1 in μ_2 , sta pri a.1.4 najnižji med vsemi obravnavanimi mešanicami. Segregacijski točki pri a.1.3 (*grafikon 4.16*) in b.1.4 (*grafikon 4.24*) nista tako izrazito oddaljeni od pripadajočih regresijskih premic, segregacijska točka a.1.3 pravzaprav skoraj leži na premici. Vendar je, sodeč po relativno velikem razlezu pri mini SF preizkusu (*preglednica 4.10*), naša subjektivna opazka rahle segregacije na mestu.

Ob nadaljnem opazovanju segregacijskih točk, ki jih poda reometer zasledimo zanimiv pojav. Kar nekaj mešanic s 15 % frakcije 4/8 mm, predvsem c.1.1 (*grafikon 4.8*) in c.2.1 (*grafikon 4.9*), pa tudi c.1.2 (*grafikon 4.14*), c.2.2 (*grafikon 4.15*), c.1.3 (*grafikon 4.20*) in c.1.4 (*grafikon 4.26*) ima segregacijsko točko bolj oddaljeno od pripadajoče regresijske premice kot ostale mešanice. Vendar med samim postopkom meritev nismo opazili, da bi segregirale. Nasprotno, poleg tega, da so njihove

plastične viskoznosti relativno visoke, pri nekaterih izmed njih sploh ni bilo mogoče izvesti mini SF preizkusa.

Na tem mestu velja omeniti, da sam, pred eksperimentalnem delom v sklopu diplomske naloge, nisem imel dosti stika in izkušenj s pojavom segregacije v betonu. Na tem področju sta mi na pomoč priskočila Vit Gromeš, študent z Brna na Češkem, ki je bil tu na izmenjavi in se že več mesecev ukvarjal z reologijo svežega betona, ter Franci Čepon, izkušen sodelavec Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij. Tako smo segregacijske točke, ki jih poda reometer, sicer vzeli v razmislek, vendar se vseeno odločili, da zaupamo našemu subjektivnemu občutku za svež beton. Torej smo se odločili, da je mešanica c.1.4 primerna za nadaljne raziskave, kljub temu, da meritve segregacije reometra kažejo drugače.

4.5 Študija vpliva vrste superplastifikatorja

Pri štirih mešanicah, ki smo jih iz nabora vzorcev parametrične študije izbrali za nadaljne preiskave, spremenimo vrsto in povečamo količino superplastifikatorja. V parametrični študiji smo uporabili SP izključno polikarboksilatnega tipa, mešanice predstavljene v nadaljevanju pa vsebujejo SP na osnovi polifosfonatnih polimerov.

4.5.1 Receptura vzorcev

Priporočila proizvajalca in dosedanje izkušnje kažejo, da je polifosfonatni SP (PPh) v primerjavi s polikarboksilatnim SP (PCE) najboljše dodati v razmerju:

$$\frac{PPh}{PCE} = \frac{3}{2}$$

Receptura za 4 litre sveže mešanice je tako, z izjemo količine dodanega SP, enaka kot pri vzorcih parametrične študije. Mase vhodnih sestavin pri $v/c = 0,5$ so podane v **preglednici 4.5**, za $v/c = 0,55$ pa v **preglednici 4.6**. Oznake prvega sklopa vzorcev s polifosfonatnim SP so navedene v **preglednici 4.11**.

Delež frakcije [mm]			$v/c = 0,5$	$v/c = 0,5$	$v/c = 0,55$	$v/c = 0,55$
0/2	0/4	4/8	SP = 1,05%	SP = 1,2%	SP = 1,05%	SP = 1,2%
61%	0%	39%	d.1.1	d.2.1		
74%	0%	26%			d.3.1	
85%	0%	15%				d.4.1

Preglednica 4.11: Oznake 1. serije vzorcev študije vpliva vrste SP

V drugi seriji smo vsem štirim mešanici povečali količino SP za 0,15 %.

Delež frakcije [mm]			v/c = 0,5	v/c = 0,5	v/c = 0,55	v/c = 0,55
0/2	0/4	4/8	SP = 1,2%	SP = 1,35%	SP = 1,2%	SP = 1,35%
61%	0%	39%	d.1.2	d.2.2		
74%	0%	26%			d.3.2	
85%	0%	15%				d.4.2

Preglednica 4.12: Oznake 2. serije vzorcev študije vpliva vrste SP

Zaradi preglednosti so mase dodanega SP glede na v/c ter na odstotek mase finih delcev (cementa in apnenčeve moke) podane v *preglednici 4.13*.

Masa dodanega PPh superplastifikatorja					
v/c = 0,5	v/c = 0,5	v/c = 0,5	v/c = 0,55	v/c = 0,55	v/c = 0,55
SP = 1,05%	SP = 1,2%	SP = 1,35%	SP = 1,05%	SP = 1,2%	SP = 1,35%
25,94 g	29,60 g	33,35 g	25,20 g	28,80 g	32,40 g

Preglednica 4.13: Količina dodanega PPh superplastifikatorja

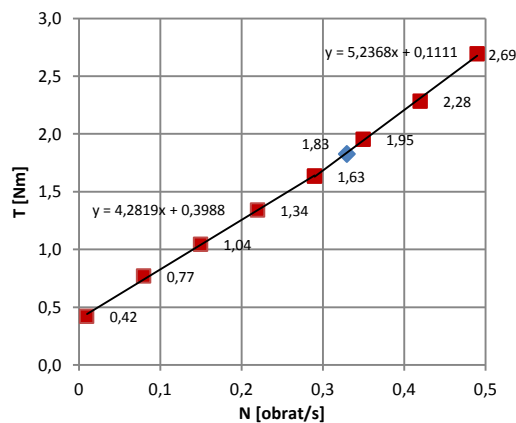
Mešanje, meritve z reometrom ter mini SF preizkus so izvedeni na enak način kot pri parametrični študiji (glej *poglavje 4.4.2*).

4.5.2 Rezultati meritev z reometrom

Komentarji in rezultati dobljeni z reometrom pri vzorcih študije vpliva vrste SP so analogni tistim s katerimi smo prikazali meritve parametrične študije (glej *poglavje 4.4.3*).

vzorec d.1.1

G	0,399 N·m
H₁	4,282 N·m·s
H₂	5,237 N·m·s
τ₀	89,876 Pa
μ₁	25,245 Pa·s
μ₂	30,875 Pa·s
mini SF	215 mm

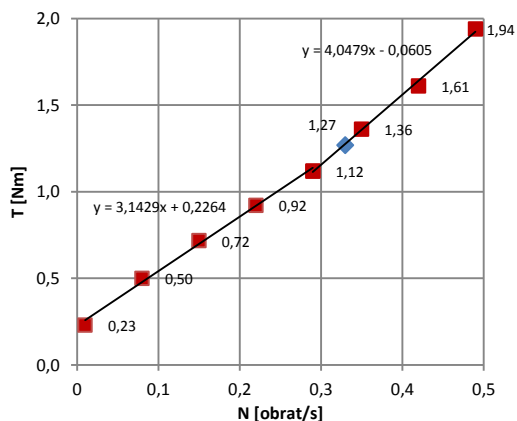


Grafikon 4.28: Tokovna krivulja mešanice d.1.1

vzorec d.2.1

G	0,226 N·m
H₁	3,143 N·m·s
H₂	4,048 N·m·s
τ₀	51,023 Pa
μ₁	18,530 Pa·s
μ₂	23,865 Pa·s
mini SF	250 mm

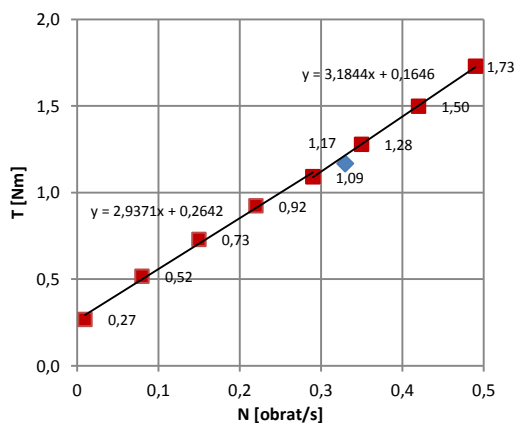
Rahlo segregira.



Grafikon 4.29: Tokovna krivulja mešanice d.2.1

vzorec d.3.1

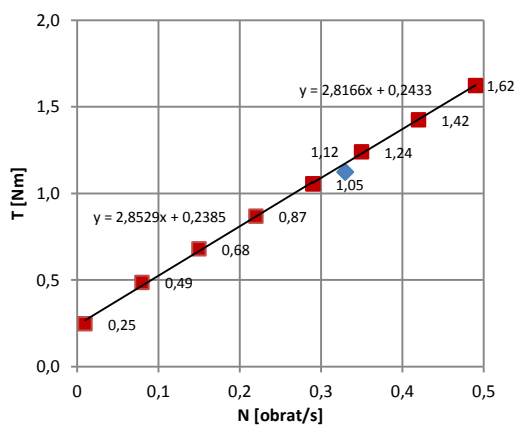
G	0,264 N·m
H₁	2,937 N·m·s
H₂	3,184 N·m·s
τ₀	59,542 Pa
μ₁	17,316 Pa·s
μ₂	18,774 Pa·s
mini SF	270 mm



Grafikon 4.30: Tokovna krivulja mešanice d.3.1

vzorec d.4.1

G	0,239 N·m
H₁	2,853 N·m·s
H₂	2,817 N·m·s
τ₀	53,750 Pa
μ₁	16,820 Pa·s
μ₂	16,606 Pa·s
mini SF	285 mm

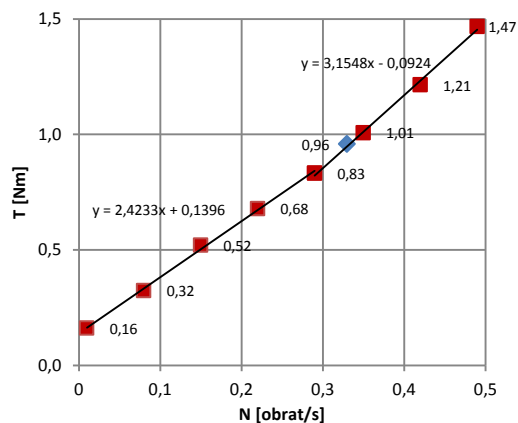


Grafikon 4.31: Tokovna krivulja mešanice d.4.1

vzorec d.1.2

G	0,140 N·m
H₁	2,423 N·m·s
H₂	3,155 N·m·s
τ₀	31,461 Pa
μ₁	14,287 Pa·s
μ₂	18,600 Pa·s
mini SF	260 mm

Rahlo segregira.

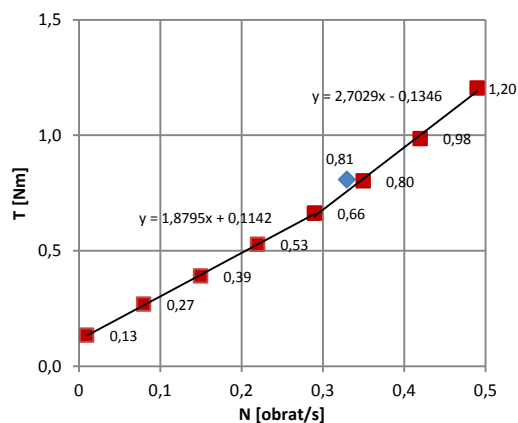


Grafikon 4.32: Tokovna krivulja mešanice d.1.2

vzorec d.2.2

G	0,114 N·m
H₁	1,880 N·m·s
H₂	2,703 N·m·s
τ₀	25,737 Pa
μ₁	11,081 Pa·s
μ₂	15,936 Pa·s
mini SF	323 mm

Rahlo segregira.

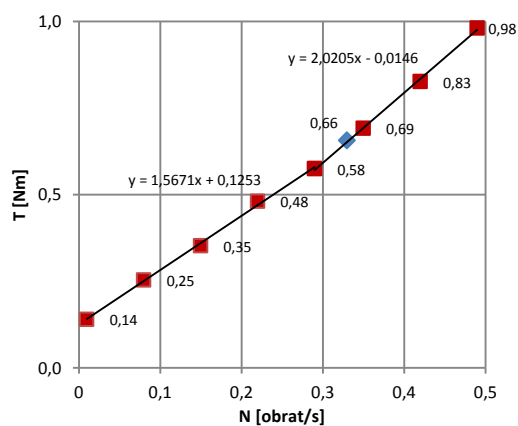


Grafikon 4.33: Tokovna krivulja mešanice d.2.2

vzorec d.2.3

G	0,125 N·m
H₁	1,577 N·m·s
H₂	2,021 N·m·s
τ₀	28,238 Pa
μ₁	9,298 Pa·s
μ₂	11,912 Pa·s
mini SF	333 mm

V posodi (zunanjem valju) reometra močno segregira, pri mini SF preizkusu pa je mešanica vzorca veliko bolj stabilna.

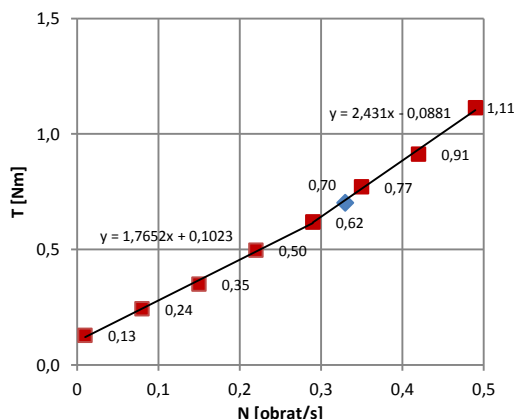


Grafikon 4.34: Tokovna krivulja mešanice d.2.3

vzorec d.2.4

G	0,102 N·m
H₁	1,765 N·m·s
H₂	2,431 N·m·s
τ₀	23,055 Pa
μ₁	10,407 Pa·s
μ₂	14,333 Pa·s
mini SF	325 mm

V posodi (zunanjem valju) reometra močno segregira, pri mini SF preizkusu pa je mešanica vzorca veliko bolj stabilna.



Grafikon 4.35: Tokovna krivulja mešanice d.2.4

4.5.3 Rezultati mini SF preizkusa

V *preglednici 4.14* so navedeni razlezi mini SF preizkusa vseh 8 vzorcev študije vpliva SP. Z rumeno so obarvani vzorci, ki rahlo segregirajo. Dva od teh vzorcev (d.2.1 in d.1.2) imata enako recepturo, kar je posledica povečanja količine SP za 0,15 % pri celotni 2. seriji. Prvi vzorec 2. Serije tako ustreza recepturi drugega vzorca 1. serije. V/c in razmerje frakcij agregata sta pri obeh enaka. Z rdečo sta označena vzorca, pri katerih smo zaznali posebno segregacijo, ki je opisana v nadaljevanju.

Delež frakcije [mm]			v/c = 0,5 SP = 1,05%	v/c = 0,5 SP = 1,2%	v/c = 0,5 SP = 1,35%	v/c = 0,55 SP = 1,05%	v/c = 0,55 SP = 1,2%	v/c = 0,55 SP = 1,35%
0/2	0/4	4/8	Razlez [mm] pri "mini-slump" preizkusu					
61%	0%	39%	215 (d.1.1)	250 (d.2.1) 260 (d.1.2)	323 (d.2.2)			
74%	0%	26%				270 (d.3.1)	333 (d.3.2)	
85%	0%	15%					285 (d.4.1)	325 (d.4.2)

Preglednica 4.14: Mini SF razlezi vzorcev študije vpliva SP

4.5.4 Analiza segregacije mešanic študije vpliva vrste SP

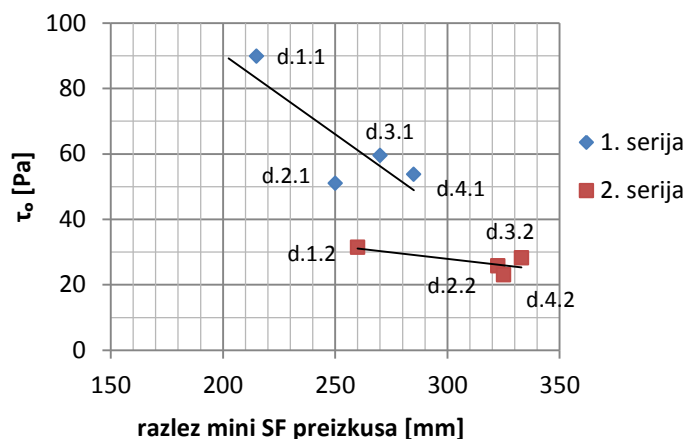
Segregacijske točke, ki jih poda reometer, vseh osmih mešanic ležijo na ali tik ob pripadajoči desni regresijski premici. Vendar se njihov položaj skoraj v nobenem od primerov ne ujema z našimi subjektivnimi ocenami segregacije. V kar treh primerih (d.2.1, d.2.3 in d.2.4), ko segregacijske točke ležijo najbližje regresijski premici smo mi, ravno nasprotno, zaznali segregacijo. Ker je SP na osnovi polifosfonatnih polimerov relativno nov dodatek in je njegov učinek, v primerjavi z že dobro uveljavljenimi polikarboksilatnimi SP, težje napovedati smo prišli do zaključka, da obstaja možnost neustrezne ocene reometra pri njegovi uporabi. Tako smo se zopet raje zanesli na našo subjektivno oceno segregacije.

Pri mešanicah d.2.1 in d.1.2 opazimo znake rahle segregacije. Tudi mini SF preizkus poda skoraj enako vrednost razleza. Oboje je v skladu z dejstvom, da imata mešanici na papriju enako recepturo. Vendar, ko primerjamo njuni tokovni krivulji in vse pripadajoče reološke parametre opazimo med njima velike razlike. Vzorec d.2.1 (**grafikon 4.29**) izkazuje tako pri levi, kot desni regresijski premici za približno 28 % večji naklon kot vzorec d.1.2 (**grafikon 4.32**) oz. za 28 % večjo vrednost plastične viskoznosti. Še večja razlika, kar 40 %, se pojavi pri primerjavi njunih strižnih napetosti na meji tečenja.

Pri d.3.2 in d.4.2 zaznamo drugačno segregacijo, kot pri vseh mešanicah do sedaj. Namreč, ko sveže zamešan beton vlijemo v posodo (zunanji valj) reometra je z dotikom moč zaznati močno segregacijo. Ko pa, po opravljenih meritvah reometra, na istem vzorcu opravimo mini SF preizkus opazimo, da mešanica veliko manj segregira. Možen razlog za to je, da so se večja zrna agregata potopila na dno posode in jih pri odvzemanju materiala za potrebe mini SF preizkusa nismo zajeli. Količina materiala potrebnega za mini SF preizkus znaša približno polovico volumna zunanjega valja, tako je povsem možno, da jih, zamešane v cementni, pasti nismo opazili.

Tudi d.2.2 kaže znake segregacije. Torej vsi vzorci 2. serije, kjer smo povečali količino dodanega SP segregirajo. Nižje vrednosti reoloških parametrov so pričakovane, vendar je tu še en zelo pomemben dejavnik, s katerim si lahko razložimo tako veliko razliko τ_0 in μ pri d.2.1 in d.1.2. Pred začetkom mešanja 2. serije vzorcev za študijo vpliva vrste SP smo odprli novo pošiljko apnenčeve moke in cementa, sicer istega proizvajalca in kvalitete. V **poglavju 2.3.3** smo omenili, da se lahko učinki SP na lastnosti betona razlikujejo že samo pri različnih šaržah. Povsem verjetno je, da razlog za vse navedene nepojasnjene rezultate tiči tu. Ta zaključek podpira tudi dejstvo, da je naklon leve regresijske premice vzorca d.2.1 manjši od tistega pri vzorcu d.1.2 (razmerje μ_1 enega in drugega vzorca) za enako razmerje kot pri obeh desnih regresijskih premicah (razmerje μ_2 obeh vzorcev). Hkrati pa lahko dve mešanici z različnima τ_0 in μ dosežeta enak oz. podoben mini SF razlez (glej **poglavje 3.3.2**).

Zato smo se odločili, da z **grafikonom 4.36** pokažemo reograf strižne napetosti na meji tečenja in mini SF razleza s pripadajočima regresijskima premicama ločeno za 1. in 2. serijo vzorcev. Vzorci, ki ne segregirajo (d.1.1, d.3.1 in d.4.1) ležijo skoraj na isti premici. Vzorci 2. serije z veliko količino SP so nabrani na kupu desno spodaj. Iz tega sklepamo, da ko je presežena tista mejna količina dodanega SP, ki povzroči segregacijo τ_0 doseže svoj minimum, mini SF razlez pa svoj maksimum. Slednje je verjetno povezano z omejeno količino sveže betonske mešanice v mini SF stožcu. Vrednosti mešanic d.2.1 in d.1.2 so nekaj čisto posebnega in se ne ujemajo z ostalimi. O tem zakaj je tako lahko le ugibamo. Za boljše razumevanje pojava segregacije pri uporabi polifosfonatnega SP bi bilo potrebno večje število vzorcev in bolj kontrolirani pogoji (vsi vhodni materiali z ene šarže).



Grafikon 4.36: Reograf τ_0 – mini SF obeh serij vzorcev študije vpliva vrste SP

Za nadaljne preiskave v sklopu študije razvoja tlačne trdnosti s časom je bilo potrebno izbrati dva vzorca s polifosfonatnim SP. Izbrali smo d.3.1 in d.4.1, saj noben od njiju ne segregira ter imata v splošnem dokaj ustrezne reološke parametre.

4.6 Študija razvoja tlačne trdnosti s časom

Za študijo razvoja tlačne trdnosti s časom smo, izmed vseh 32 mešanic preizkušenih v prejšnjih dveh študijah, izbrali 4 takšne, ki imajo mini SF razlez kar najbližje 30 cm ter so kar se da stabilne, torej ne segregirajo. Za določitev segregacije se pri izbiri teh 4 mešanic, kot že omenjeno, nismo zanašali na meritve reometra, temveč smo znake segregacije ocenjevali z dotikom in vizualno.

Za reference so izbrani recepti sledečih mešanic: b.1.3, c.1.4, d.3.1 in d.4.1. Torej dve mešanici z dodatkom polikarboksilatnega in dve z dodatkom polifosfonatnega superplastifikatorja.

Za določitev tlačne trdnosti po 1 dnevu, 3 dnevih, 7 dnevih in 28 dnevih potrebujemo za vsako mešanico po 12 kock, katerih stranica je 15 cm, kar znaša približno $0,0405 \text{ m}^3$ oz. 40,5 litrov svežega betona. Vzeli smo okoli 10 % rezerve, da se ne bi pripetilo, da bi sveže betonske mešanice zmanjkalo, preden bi napolnili vseh 12 kalupov. Tako je končna količina betona zamešanega v mešalcu za beton znašala približno 45 litrov.

Razmerje vhodnih sestavin 4 mešanic obravnavanih v sklopu študije naraščanja tlačnih trdnosti je tako enako razmerju sestavin 4 izbranih mešanic iz prejšnjih dveh študij, le, da smo tokrat uporabili večji mešalec in približno enajstkrat večjo količino vhodnih materialov

4.6.1 Receptura vzorcev

Vse 4 mešanice imajo $v/c = 0,55$, tako da so vhodne sestavine, z izjemo SP, za vse v enakem razmerju. Mase sestavin za 45 litrov sveže mešanice so prikazane v *preglednici 4.15*.

Komponenta	[kg]
cement CEM I 42,5 R	18,00
apnenčeva moka	9,00
voda	9,90
agregat	67,95

Preglednica 4.15: Receptura za vzorce študije razvoja tlačne trdnosti s časom

Količina in vrsta SP dodanega posamezni mešanici je prikazana v *preglednici 4.16*.

Količina in tip dodanega superplastifikatorja			
PCE	PCE	PPh	PPh
$v/c = 0,55$	$v/c = 0,55$	$v/c = 0,55$	$v/c = 0,55$
SP = 0,7%	SP = 0,8%	SP = 1,05%	SP = 1,2%
189,0 g	216,0 g	283,5 g	324,0 g

Preglednica 4.16: Količina in tip SP dodanega vzorcem študije razvoja tlačne trdnosti s časom

Vsakemu od 4 vzorcev smo, glede na vrsto SP, določili oznako s katero bo definiran v nadaljevanju. Zaradi preglednosti je referenčna mešanica, razmerje frakcij, v/c ter količina in vrsta SP skupaj z oznako povzeta v *preglednici 4.17*.

Referenčna mešanica:	b.1.3	c.1.4	d.3.1	d.4.1
Tip superplastifikatorja:	Polikarboksilaten SP		Polifosfonaten SP	
Delež frakcije [mm]	$v/c = 0,55$	$v/c = 0,55$	$v/c = 0,55$	$v/c = 0,55$
0/2 0/4 4/8	SP = 0,7%	SP = 0,8%	SP = 1,05%	SP = 1,2%
74% 0% 26%	PCE 1		PPh 1	
85% 0% 15%	PCE 2		PPh 2	

Preglednica 4.17: Oznake vzorcev študije razvoja tlačne trdnosti s časom

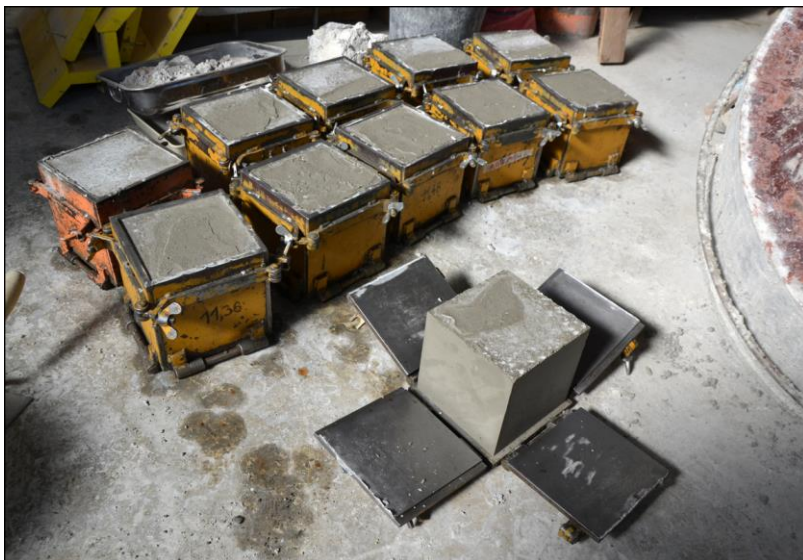
4.6.2 Mešanje in postopek meritev

Očitno je, da je mešalec za malte s posodo volumna cca 4 litre, ki smo ga uporabljali do sedaj, premajhen za potrebno količino betona. Za zamešanje dovolj velike količine vzorca uporabimo večji protitočni mešalec kapacitete 50 litrov. Za tehtanje mase vhodnih sestavin vzorcev zamešanih v tem mešalcu smo uporabili tehtnico z natančnostjo ± 20 gramov. Pri tehtanju SP je bila uporabljena bolj natančna tehtnica in sicer z natančnostjo $\pm 0,01$ grama.

Postopek mešanja je sledeč: boben mešalca predhodno navlažimo, nato vanj stresemo grobo frakcijo agregata, cement, apnenčevo moko ter frakcijo 0/2, vse v navedenem zaporedju. Sledi minuta suhega

mešanja, nakar dodamo vodo in SP, med tem mešalca ne ustavljamo. Ko so vse sestavine betona v bobnu mešamo vsaj še 3 minute. Preden smo dodali vodo in SP je bil za potrebe študije razvoja hidratacijske toplote (v nadaljevanju – glej *poglavje 4.7*) odvzet vzorec suhe mešanice, za katero smo predpostavili, da je homogena.

Meritve z reometrom so enake tistim, ki smo jih izvedli na prejšnjih vzorcih (glej *poglavje 4.4.2*). Zaradi večje količine sveže mešanice, ki nam je bila na voljo, smo lahko poleg mini SF preizkusa opravili še standardni preizkus razleza s posedom (glej *poglavje 3.3*). Večino zamešanega materiala smo nato vlili v 12 standardnih kalupov v obliki kocke s stranico 15 cm.



Slika 4.6: Kalupi in betonske kocke mešanice PCE 1 po 24 urah od vlitja

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost na osno tlačno obremenitev. Preizkusna metoda je podana v standardu SIST EN 12390-3:2009. Ta predpisuje način določanja tlačne trdnosti betonskih preizkušancev, ki so pripravljene v skladu s standardom SIST EN 12390-2:2009. Preizkušanci se v hidravlični stiskalnici, ki izpolnjuje zahteve standarda SIST EN 12390-4:2001, obremenjujejo do porušitve.

Na stiskalnici očistimo naležne površine in preizkušanec postavimo na sredino spodnje tlačne ploskve tako, da bo obremenjen pravokotno na smer vgrajevanja. Silo nanašamo enakomerno, s hitrostjo obremenjevanja med 0,2 MPa/s in 1,0 MPa/s. Nanašanje sile do porušitve mora biti nesunkovito in enakomerno. Izbrana hitrost obremenjevanja pa se lahko spreminja za največ 10%. Po koncu preiskave zabeležimo porušno silo in preverimo vrsto porušitve, ki je lahko pravilna ali nepravilna. Tlačno trdnost preizkušanca f_c izračunamo po spodaj navedeni enačbi glede na porušno silo F in površino prečnega prereza kocke A_C na katerega je delovala tlačna sila.

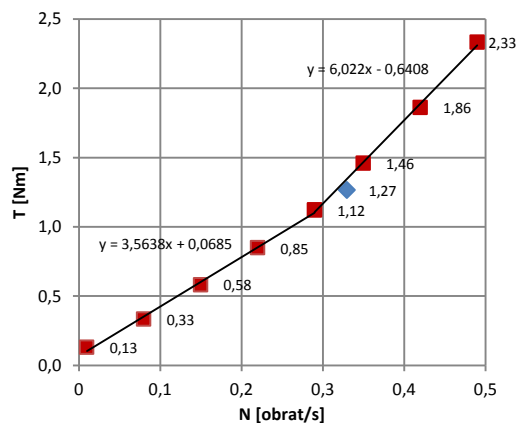
$$f_c = F/A_C$$

4.6.3 Rezultati meritev z reometrom

Komentarji in rezultati dobljeni z reometrom pri vzorcih študije razvoja tlačne trdnosti s časom so analogni tistim s katerimi smo prikazali meritve parametrične študije in študije vpliva vrste SP.

vzorec PCE 1

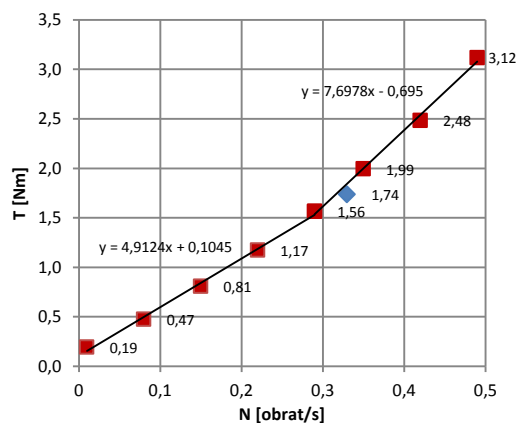
G	0,069 N·m
H₁	3,564 N·m·s
H₂	6,022 N·m·s
τ₀	15,438 Pa
μ₁	21,011 Pa·s
μ₂	35,504 Pa·s
mini SF	320 mm
SF	800 mm



Grafikon 4.37: Tokovna krivulja mešanice PCE 1

vzorec PCE 2

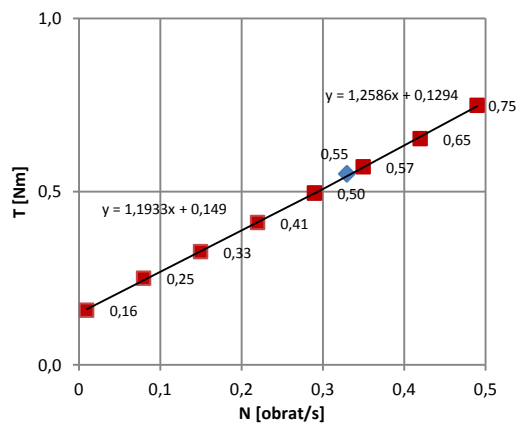
G	0,105 N·m
H₁	4,912 N·m·s
H₂	7,698 N·m·s
τ₀	23,551 Pa
μ₁	28,962 Pa·s
μ₂	45,384 Pa·s
mini SF	270 mm
SF	695 mm



Grafikon 4.38: Tokovna krivulja mešanice PCE 2

vzorec PPh 1

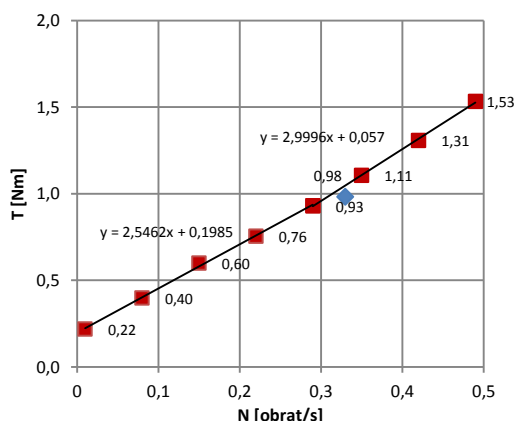
G	0,149 N·m
H₁	1,193 N·m·s
H₂	1,259 N·m·s
τ₀	33,580 Pa
μ₁	7,035 Pa·s
μ₂	7,420 Pa·s
mini SF	315 mm
SF	840 mm



Grafikon 4.39: Tokovna krivulja mešanice PPh 1

vzorec PPh 2

G	0,199 N·m
H₁	2,546 N·m·s
H₂	3,000 N·m·s
τ₀	44,735 Pa
μ₁	15,012 Pa·s
μ₂	17,685 Pa·s
mini SF	295 mm
SF	850 mm



Grafikon 4.40: Tokovna krivulja mešanice PPh 2

4.6.4 Rezultati standardnega razleza s posedom in mini SF preizkusa

V *preglednici 4.18* so prikazani razlezi mini SF preizkusa in standardnega preizkusa razleza s posedom. Pričakovano, nobena od mešanic ni segregirala. Kot že omenjeno, smo pri preizkusu razleza s posedom kot podlago uporabili kovinsko ploščo dimenzij 700 mm · 700 mm. Premer razleza je kar pri treh vzorcih presegel robove plošče, tako nam ni ostalo drugega kot, da podamo njegovo subjektivno oceno. Med izvajanjem preizkusov smo opazili, da vzorec betona pri obeh mešanicah s polifosfonatnim SP steče hitreje kot pri tistih s polikarboksilatnim SP.

			v/c = 0,55 SP = 0,7%	v/c = 0,55 SP = 0,8%	v/c = 0,55 SP = 1,05%	v/c = 0,55 SP = 1,2%
Delež frakcije [mm]			PCE 1	PCE 2	PPh 1	PPh 2
0/2	0/4	4/8	Razlez [mm] pri mini SF preizkusu			
74%	0%	26%	320		315	
85%	0%	15%	270		295	
0/2	0/4	4/8	Razlez [mm] pri standardnem "slump flow" preizkusu			
74%	0%	26%	800		840	
85%	0%	15%	695		850	

Preglednica 4.18: Razlezi vzorcev študije razvoja tlačne trdnosti s časom

4.6.5 Spremljanje razvoja tlačne trdnosti s časom

Pri spremljanju prirasta tlačnih trdnosti s časom je že na samem začetku preiskave prišlo do zanimivega pojava. Prvi dve seriji, vliti iz mešanice z dodatkom polikarboksilatnega SP, smo brez problema razkalupili in obremenili do porušitve po enem dnevu. Ob razkalupljenju kock, ki so bile vlite iz mešanice z dodatkom polifosfonatnega SP pa je nastopila težava. Namreč, kocke pri starosti približno 24 ur so sicer držale svojo obliko, vendar niso imele nobene prave trdnosti. Prvi razkalupljen preizkušanec nam je dobesedno razpadel v rokah. Pri ostalih dveh smo bili bolj pazljivi in uspelo nam

ju je v enem kosu namestiti v hidravlično stiskalnico, vendar je bila sila porušitve izjemno nizka. Znašala je komaj 25 kN oz. če preračunamo je tlačna trdnost znašala samo 1,1 MPa. Velja omeniti, da tudi to ni nek objektivni rezultat, saj pri tako nizkih trdnostih hidravlična stiskalnica ni natančna. Tudi oblika porušitve, prikazana na *sliki 4.7*, kaže na to, da se je proces strjevanja cementne paste po 24 urah komaj pričel. Glede na vse to, smo se odločili, da drugo serijo kock z polifosfonatnim SP razaklupimo in obremenimo šele po dveh dneh od vlitja. Po 48 urah od vlitja so imeli preizkušanci že veliko večjo tlačno trdnost. Izmerili smo povprečno porušno silo 497,5 kN, kar znaša 22,6 MPa.



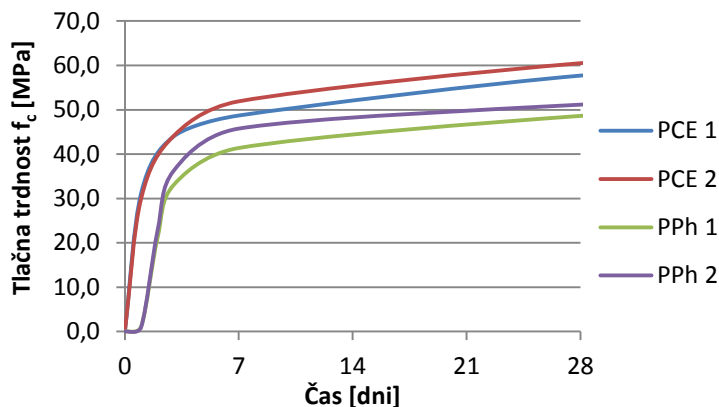
Slika 4.7: Porušitev kock s polikarboksilatnim (levo) in polifosfonatnim (desno) superplastifikatorjem po obremenitvi v hidravlični stiskalnici, 24 ur po vlitju

Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti treh kock, preračunane v MPa ter določene za vsak časovni interval in mešanico posebej, so prikazane v *preglednici 4.19*. Vrednosti pri starosti 1 dan pri obeh mešanicah s polifosfonatnim SP namenoma nismo navedli. Takšen beton je po 24 urah še tako nepovezan, da lahko smatramo, da ima zanemarljivo tlačno trdnost. Prav tako v preglednici nismo navedli tlačne trdnosti po 48 urah, saj imamo te vredosti le za serijo PPh 2.

Starost	Tlačna trdnost f_c [MPa]			
	PCE 1	PCE 2	PPh 1	PPh 2
1 dan	31,2	30,0	/	/
3 dni	44,0	44,1	33,0	36,2
7 dni	48,7	51,9	41,4	45,8
28 dni	57,7	60,5	48,6	51,1

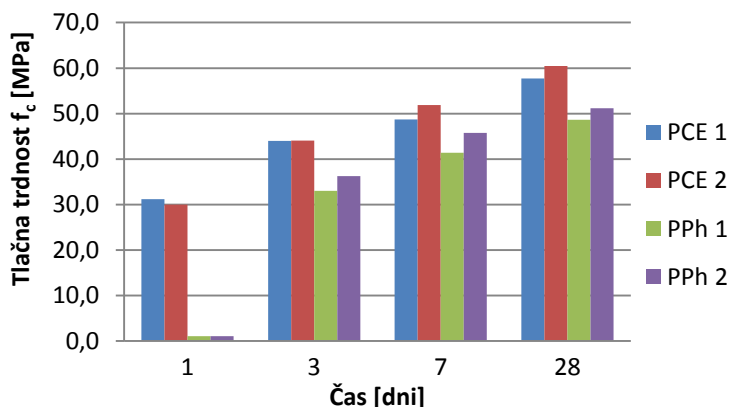
Preglednica 4.19: Povprečne tlačne trdnosti f_c pri različnih starostih

Na **grafikonu 4.41**, kjer je prikazana tlačna trdnost v odvisnosti od časa smo, z namenom prikazati kar najbolj realen potek njenega razvoja, uporabili vse znane vrednosti, tudi te, ki jih v **preglednici 4.19** nismo navedli.



Grafikon 4.41: Razvoj tlačne trdnosti f_c s časom

Grafičen prikaz tlačnih trdnosti vseh obravnavanih mešanic pri različnih starostih je ponazorjen z **grafikonom 4.42**.



Grafikon 4.42: Primerjava tlačne trdnosti f_c vseh mešanic pri različnih starostih

4.7 Študija razvoja hidrationske toplote

V sklopu eksperimentalnih meritev smo med drugim spremljali tudi razvoj toplote procesa hidrationske veziva štirih mešanic SCC obravnavanih v študiji razvoja tlačne trdnosti s časom. Hidrationska cementa je eksotermični proces, kar pomeni, da jo spremlja sproščanje toplote. Meritve tega procesa so bile izvedene z izotermnim kalorimetrom, torej pri konstantni temperaturi. Neposredni rezultat meritev je toplotni tok hidrationske, ki nam omogoča študijo vpliva kemijske sestave cementa, kemijskih dodatkov in temperature na hidrationsko. Interpretacija kalorimetričnih krivulj nam med drugim poda informacije o obdelavnosti in prirastu tlačne trdnosti betonske mešanice s časom. Ko poznamo potek toplotnega toka in razvoj hidrationske toplote lahko dokaj zanesljivo predvidimo potek strjevanja betona.

4.7.1 Izotermna kalorimetrija

Pojem kalorimetrija je definiran kot merjenje količine toplote. Z različnimi metodami kalorimetrije navadno obravnavamo procese, kjer se toplota sprošča ali porabi. Ločimo dva tipa kalorimetrije: izotermno in adiabatno. Pri slednji imamo zaprt sistem, toplota se z okolico ne izmenjuje, temperatura opazovanega sistema se torej spreminja. Kot že ime nakazuje, pa je pri izotermni kalorimetriji temperatura sistema konstantna in merimo sproščeno toploto opazovane reakcije.

Metoda nam omogoča ponovljive in primerljive meritve, kar je idealno za preučevanje vpliva toplote na stopnjo hidratacije. Z integracijo toplotnega toka po času je mogoče določiti tudi celotno sproščeno toploto pri določeni fazi hidratacije. Tako lahko z ustreznimi korelacijami, predvsem v zgodnjih fazah hidratacije, ocenimo prirast tlačne trdnosti betona (Zevnik, 2010).

4.7.2 Postopek meritev z izotermnim kalorimetrom

Homogenim suhim mešanicom, ki smo jih odvzeli pri študiji razvoja tlačne trdnosti, dodamo vodo in SP v taki količini, da vse sestavine ostanejo v enakem razmerju. Sveže vzorce stevamo in za vsakega izračunamo količino vsebujočega cementa, saj v nadaljevanju rezultate meritev normiramo na maso cementa.

Ime vzorca:	PCE 1	PCE 1	PPh 1	PPh 2
masa celotnega vzorca [g]:	27,10	27,15	29,67	27,45
suha mešanica [g]:	24,54	24,59	26,87	24,86
fini delci [g]:	6,98	6,99	7,64	7,07
cement [g]:	4,65	4,66	5,09	4,71
apnenčeva moka [g]:	2,33	2,33	2,55	2,36
voda [g]:	2,56	2,56	2,80	2,59
Tip dodanega SP:	Polikarboksilatni SP		Polifosfonatni SP	
delež SP [%]:	0,7	0,8	1,05	1,2
masa SP [g]:	0,0488	0,0558	0,0733	0,0837

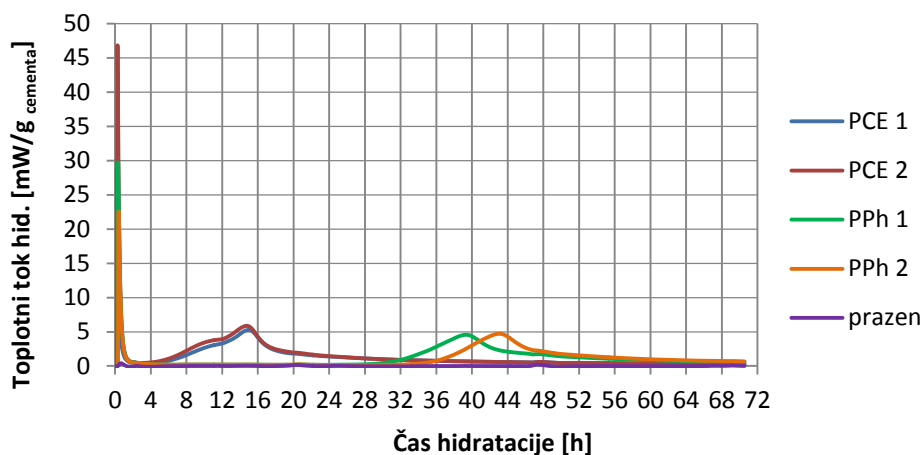
Preglednica 4.20: Mase sestavin vzorcev študije razvoja hidratacijske toplote

Vzorci smo vstavili v kalorimeter, nastavili konstantno temperaturo 20°C in trajanje meritev na dobrih 70 ur. Uporabljen je bil izoltermni kalorimeter MC - Cal/100 podjetja C3 Analysentechnique. Temperaturno območje instrumenta je med 5 in 90°C, toplotna stabilnost termostata je $\pm 0,02\text{K}$, stabilnost signala pa ± 2 mikro-watta. Preiskave so potekale v podjetju TKK Srpenica.

4.7.3 Rezultati meritev kalorimetra

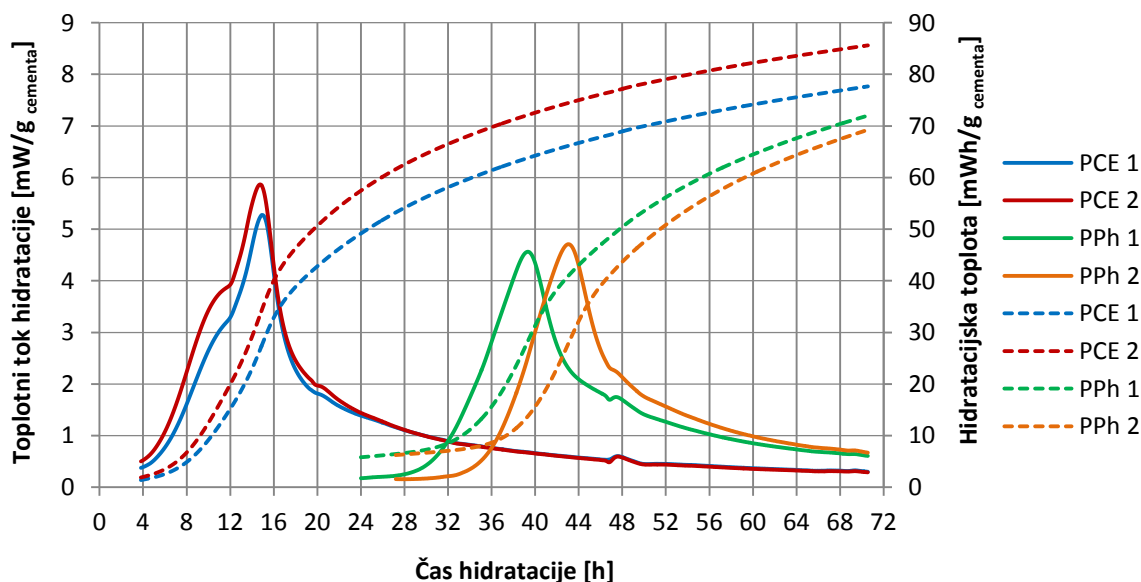
Kalorimeter opravi meritve toplotnega toka hidratacije vsakih 60 sekund, tako je podatkov v 70 urah preveč, da bi jih prikazali s preglednico. Rezultati celotne meritve vseh štirih vzorcev in dodatnega praznega kanala so lepo vidni na *grafikonu 4.43*. Krivulje toplotnega toka smo normirali na maso cementa v posameznem vzorcu, namenoma smo pustili prikazan prvi vrh oz. pred-indukcijsko

obdobje, ki nastopi v prvi uri procesa hidratacije. S tem smo želeli prikazati burnost reakcije takoj po njenem začetku.



Grafikon 4.43: Celoten toplotni tok hidratacije izmerjen z izotermnim kalorimetrom

Prvi vrh toplotnega toka hidratacije za nas ni relevanten, zato smo *grafikon 4.44* oblikovali tako, da so tisti vrhovi, ki nas zanimajo boljše vidni. S črtkanimi črtami je ponazorjena celotna sproščena hidratacijska toplota, izračunana z numerično integracijo toplotnega toka po času. Zaradi velikega toplotnega toka, ki je prisoten na začetku smo omenjeno integracijo začeli po času ene ure od začetka meritev. Vse vrednosti so normirane na gram cementa v vzorcu.



Grafikon 4.44: Toplotni tok hidratacije in hidratacijska toplota vzorcev

Najbolj opazen je velik zakasnitven učinek polifosfonatnega SP. Čeprav je vrh toplotnega toka hidratacije pri PPh 2 v primerjavi s PPh 1, se pravi ob večji dozi SP, malenkost višji, je za PPh 2 učinek zakasnitve procesa hidratacije še večji. Višji vrh toplotnega toka PPh 2 bi lahko bil posledica zrnovostne sestave. PPh 2 ima namreč v primerjavi s PPh 1 večji delež drobnih in finih delcev agregata. Zrnovostna sestava ima po vsej verjetnosti vpliv tudi na višji vrh toplotnega toka hidratacije

PCE 2 v primerjavi s PCE 1. Pri uporabi polikarboksilatnega SP ni prišlo do nikakršnega zavlačevalnega vpliva. Bolj intenzivni toplotni tok PCE mešanic se začne približno 4 ure po pripravi vzorcev. Hidratacija nato, sicer z različno amplitudo, potekata v odvisnosti od časa skoraj identično. Za obe PPh mešanici se opazno povečanje toplotnega začne šele po 32 oz. 26 urah od zamešanja. Tako je razumljivo, da po 24 urah preizkus tlačne trdnosti ni bil mogoč.

5 ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATOV

Analizo eksperimentalnih rezultatov smo razdelili na 3 dele. Torej, en za vsako eksperimentalno študijo. Združili smo le razvoj tlačne trdnosti in hidratacijske toplote, saj sta ti študiji močno povezani ena z drugo.

5.1 Analiza parametrične študije

Zaradi boljše preglednosti na tem mestu še enkrat navajamo preglednico oznak parametrične študije. V njej so lepo vidne razlike med posameznimi mešanici. Pri vseh je bil uporabljen polikarboksilatni SP.

Delež frakcije			v/c = 0,5	v/c = 0,5	v/c = 0,55	v/c = 0,55
0/2 mm	0/4 mm	4/8 mm	SP = 0,7%	SP = 0,8%	SP = 0,7%	SP = 0,8%
61%	0%	39%	a.1.1	a.1.2	a.1.3	a.1.4
0%	61%	39%	a.2.1	a.2.2	a.2.3	a.2.4
74%	0%	26%	b.1.1	b.1.2	b.1.3	b.1.4
0%	74%	26%	b.2.1	b.2.2	b.2.3	b.2.4
85%	0%	15%	c.1.1	c.1.2	c.1.3	c.1.4
0%	85%	15%	c.2.1	c.2.2	c.2.3	c.2.4

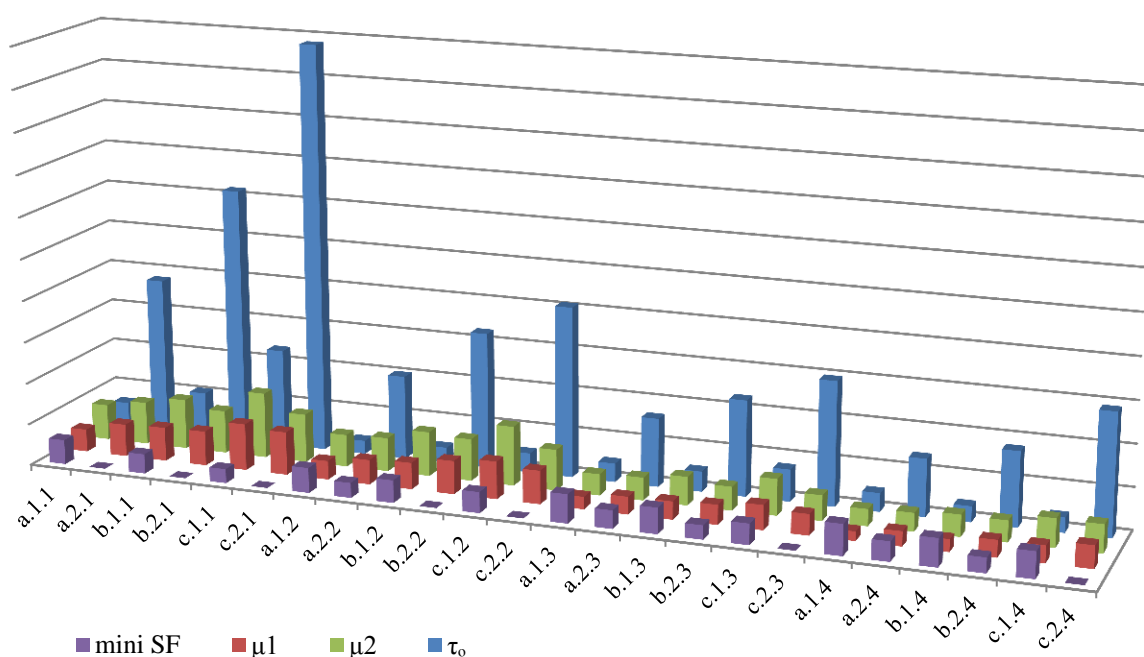
Mešanica:	a.1.1	a.1.2	a.1.3	a.1.4	a.2.1	a.2.2	a.2.3	a.2.4
τ_0 [Pa]	30,672	15,956	22,311	22,289	189,555	100,784	82,011	68,624
μ_1 [Pa·s]	27,224	22,480	14,925	11,238	38,870	29,453	21,045	17,757
μ_2 [Pa·s]	42,739	38,676	25,532	20,244	51,053	40,279	27,335	21,894
mini SF [mm]	295	300	345	370	/	180	218	235
Mešanica:	b.1.1	b.1.2	b.1.3	b.1.4	b.2.1	b.2.2	b.2.3	b.2.4
τ_0 [Pa]	53,592	18,773	24,294	18,976	308,774	163,278	114,869	89,065
μ_1 [Pa·s]	40,507	31,801	21,598	14,894	41,458	39,881	23,687	20,433
μ_2 [Pa·s]	59,871	53,258	34,151	26,044	51,465	50,379	28,345	25,559
mini SF [mm]	235	270	310	335	/	/	168	180
Mešanica:	c.1.1	c.1.2	c.1.3	c.1.4	c.2.1	c.2.2	c.2.3	c.2.4
τ_0 [Pa]	117,010	23,235	38,402	18,142	491,230	204,677	148,403	145,541
μ_1 [Pa·s]	55,962	45,013	29,574	20,599	51,773	39,928	25,164	26,977
μ_2 [Pa·s]	78,667	71,115	43,508	34,186	58,191	48,989	30,319	33,578
mini SF [mm]	170	250	250	315	/	/	/	/

Preglednica 5.1: Oznake in reološki parametri vzorcev parametrične študije

5.1.1 Primerjava reoloških parametrov

Vrednosti vseh štirih reoloških parametrov vsakega vzorca so grafično ponazorjene z *grafikom 5.1*. V oči kar bodejo višje vrednosti strižne napetosti na meji tečenja τ_0 pri vseh mešanicah s frakcijo agregata 0/4 mm, še posebej tiste z v/c = 0,5 in najmanjšo količino SP. Vrednosti τ_0 se večajo z

manjšanjem deleža frakcije 4/8 mm. Izjema so le a.1.4, b.1.4 in c.1.4, torej mešanice s frakcijama 0/2 mm in 4/8 mm, v/c = 0,55 in SP = 0,8 %, kjer se τ_0 s padanjem deleža grobe frakcije malenkost zmanjša. Najmanjšo vrednost τ_0 opazimo pri mešanici a.1.2, drugo najmanjšo pa pri c.1.4. Obe ti mešanici smo obravnavali tudi v nadaljevanju diplomske naloge.



Grafikon 5.1: Reološki parametri vzorcev parametrične študije

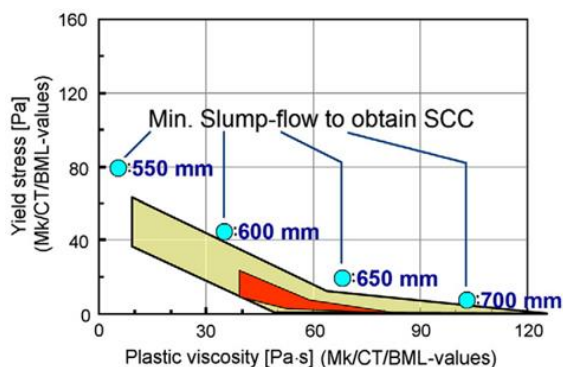
Z izračunom v **preglednici 4.3** smo pokazali, da je pri agregatu, ki je bil na voljo, najmanjše odstopanje zrnastostne sestave od standardnih mejnih zrnastostnih krivulj A_8 in B_8 doseženo, ko uporabimo samo frakciji 0/2 mm in 4/8 mm. Ravno nasprotno, pa je pri uporabi teh dveh frakcij oz. 0 % frakcije 0/4 mm, odstopanje od krivulje C_8 največje. Izkaže se, da maksimalna in minimalna odstopanja od standardnih zrnastostnih krivulj nimajo tako pomembne vloge z vidika primerne strižne napetosti na meji tečenja τ_0 za SCC. Strokovna literatura (Wallevik 2009; Wallevik 2011) navaja neko ohlapno maksimalno vrednost napetosti na meji tečenja za SCC. Ta maksimalna vrednost je sicer odvisna od plastične viskoznosti mešanice (glej **slika 3.3** oz. **slika 5.1**). Pri zelo nizkih μ se ta priporočena maksimalna vrednost τ_0 giblje nekje okrog 50 do 60 Pa·s. Iz **preglednice 5.1** je razvidno, da vse mešanice z 0 % frakcije 0/2 mm (desna stran preglednice) temu kriteriju ne zadoščajo. Torej je pri projektiranju SCC bolj pomembno zagotoviti dovolj veliko količino drobnega agregata kot pa čim boljše ujemanje z referenčno (optimalno) zrnastostno krivuljo.

Precejšnje razlike med vrednostimi leve (μ_1) in desne (μ_2) plastične viskoznosti, torej naklona leve in desne regresijske premice v tokovnih krivuljah vzorcev parametrične študije (glej **poglavje 4.4.3**) kažejo na strižno zgoščevanje tekočine. Z drugimi besedami, obravnave sveže betonske mešanice najbolj ustrezajo Herschel-Bulkleyevemu modelu tekočin. Skoraj vse od 24 mešanic se obnašajo kot

tekočine s strižnim zgoščanjem, torej se jim viskoznost z večanjem strižne hitrosti povečuje. Izjema sta mešanici b.2.3 in a.2.4, katerih absolutna razlika med μ_1 in μ_2 je manjša od 5 Pa·s, relativni pa približno 16 % (b.2.3) in 20% (a.2.4). Ti dve mešanici bi lahko obravnavali po enostavnem Binghamovem modelu tekočine.

5.1.2 Vpliv sprememb vhodnih sestavin na reološke parametre

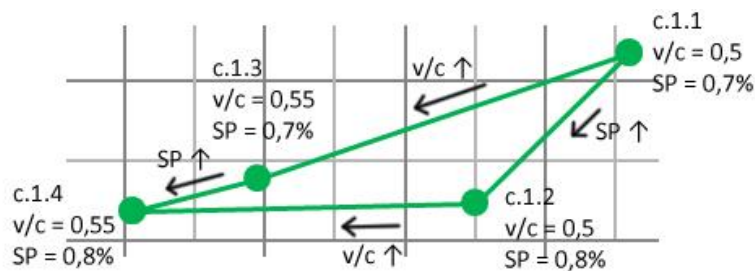
Vpliv sprememb vhodnih sestavin na reološke parametre smo pravzaprav obravnavali že v prejšnjem poglavju, vendar smo tam med seboj primerjali vrednosti posameznih mešanic posebej. Tokrat iščemo povezavo med reološkimi parametri pri postopnem spreminjanju v/c ter količine SP pri različnih zrnovostnih sestavah. V nadaljevanju se večkrat sklicujemo na vrednosti *slike 3.3*, zato jo je smotno, vsaj njen levi del, tu navesti še enkrat.



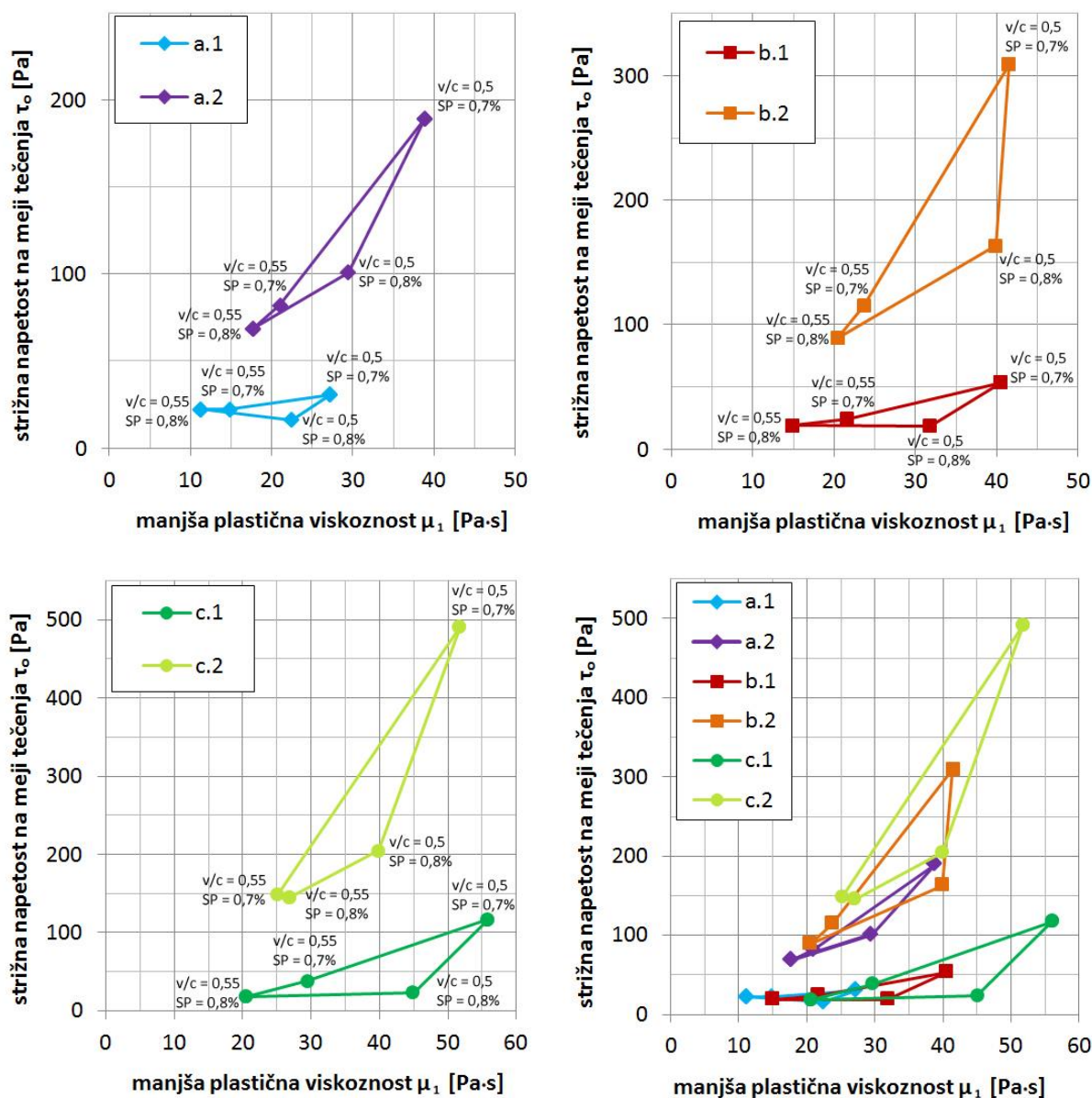
Slika 5.1: Reograf z okni reoliških lastnosti za SCC (Wallevik, 2011)

Vsaki mešanici smo predpisali dve plastični viskoznosti μ . Tisto pri nižjih strižnih hitrostih, ki smo jo poimenovali leva plastična viskoznost μ_1 in tisto pri višjih hitrostih, ki smo jo poimenovali desna plastična viskoznost μ_2 . Za primer vzemimo mini SF preizkus ali standardni preizkus razleza s posedom. Takoj ko stožec napolnjen s svežim betonom dvignemo, mešanica zaradi delovanja težnosti steče relativno hitro, torej z večjo strižno hitrostjo. Tu nastopa desna plastična viskoznost μ_2 . Samo trenutek kasneje, se njegov tok umiri in s tem zmanjša strižna hitrost. Takrat se svež beton obnaša v skladu z njegovo levo plastično viskoznostjo μ_1 . Bistvo omembe tega enostavnega primera, ki ga lahko prenesemo na veliko bolj zapletene postopke betoniranja je, da sta tako μ_1 kot μ_2 pomembni. Zaradi preglednosti ju v nadaljevanju z reografi (*grafikona 5.2* in *5.3*) prikazemo ločeno.

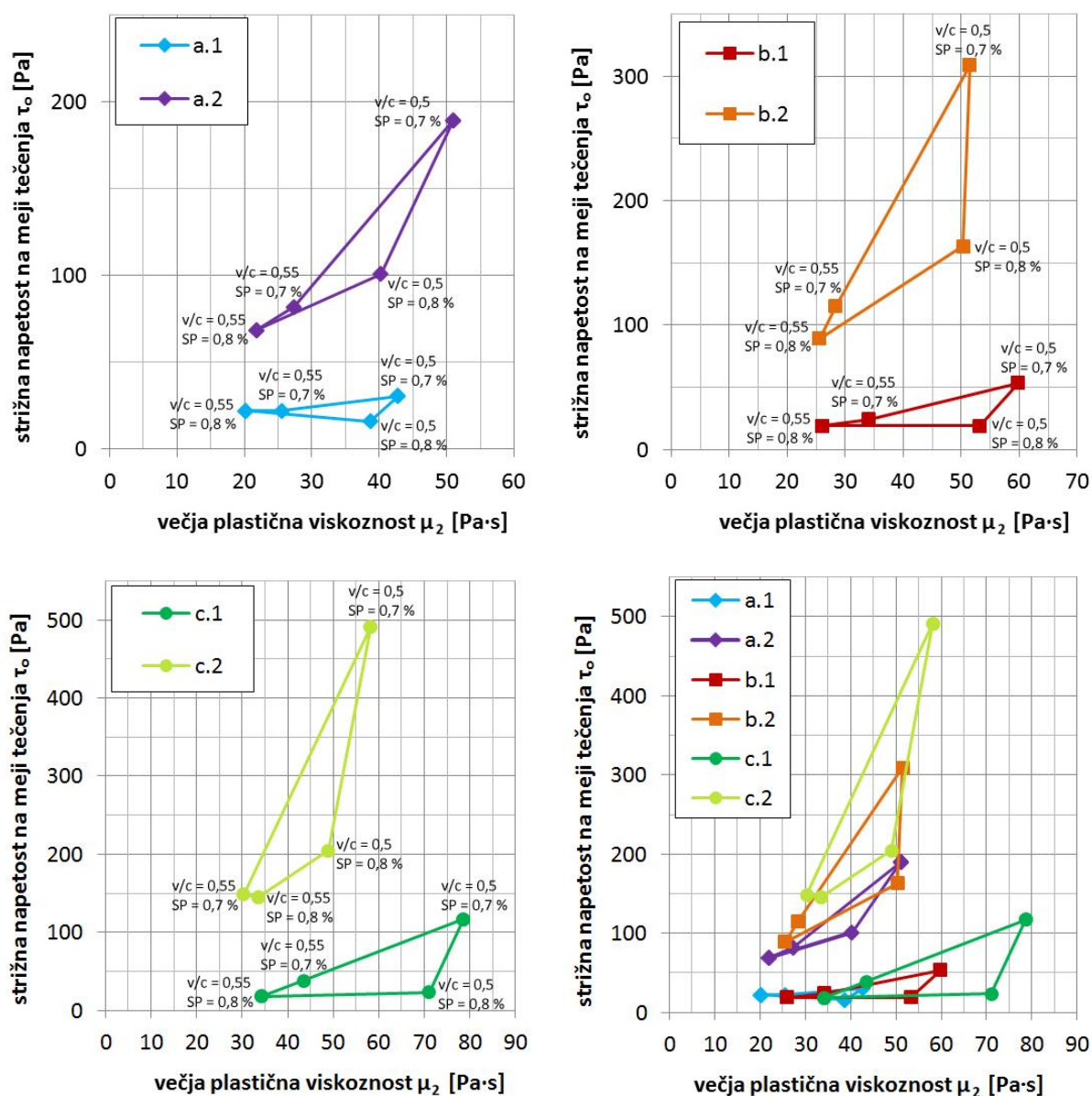
Oznake v legendi obeh reografov ustrezajo oznakam iz *preglednice 4.4*, torej različnim razmerjem frakcij mešanic opazovanih v parametrični študiji. Začetni vzorci mešanic z v/c = 0,5 in SP = 0,7 %, npr. c.1.1, predstavljajo najbolj desne točke posamezne barve. Ena izmed dveh točk, katera je neposredno povezana s točko c.1.1 je c.1.2, kjer je v/c še vedno 0,5, poveča pa se SP. Druga izmed točk, ki je neposredno povezana s točko c.1.1, ki predstavlja začetno mešanico in je c.1.3. Tu se ohrani odstotek SP na maso finih delcev in poveča v/c. Že omenjena zadnja točka posamezne barve pa označuje vzorec z v/c = 0,55 in SP = 0,8 %. Grafična razlaga točk na *grafikonih 5.2* in *5.3* ter povezav med njimi je prikazana na spodnji sliki.



Slika 5.2: Razlaga sprememb vrednosti na grafikonih 5.2 in 5.3



Grafikon 5.2: Reografi $\tau_o - \mu_1$ vseh vzorcev parametrične študije

Grafikon 5.3: Reograf $\tau_0 - \mu_2$ vseh vzorcev parametrične študije

Reografi $\tau_0 - \mu_1$ in $\tau_0 - \mu_2$ so si podobni, kar kaže, da se pri večanju v/c in količine SP plastične viskoznosti vseh vzorcev povečajo v precej podobnem razmerju. Vrednosti točk a.1 in a.2, ki pripadajo različnim plastičnim viskoznostim so si skoraj enake, le bolj (a.1) oz. manj (a.2) zamaknjene. Sklepamo, da se pri mešanich z več grobega agregata, ob enakih spremembah v/c in SP, tako μ_1 , kot μ_2 približno enako zmanjšata.

Ob povečanju SP z 0,7 % na 0,8 % pride do upada strižne napetosti na meji tečenja. Večja kot je τ_0 začetnih vzorcev, večji je upad. Povečanje SP vpliva tudi na plastično viskoznost. Zmanjšanje μ_2 pri b.2 je ob spremembi SP skoraj nezatno. Sveže mešanice postanejo bolj "mokre".

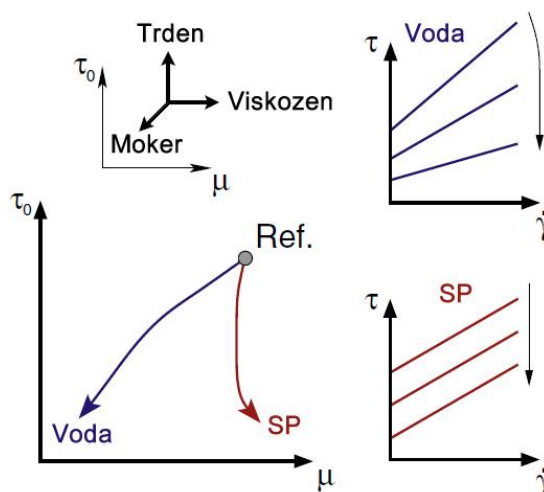
Ko povečamo količino vode pričakovano pride tako do zmanjšanja plastične viskoznosti, kot tudi napetosti na meji tečenja. Pri vseh mešanich brez frakcije 0/2 mm je padec začetno velike τ_0 še toliko večji. Z a.1, b.1 in c.1 že ob povečanju samo ene komponente, torej ali vode ali SP, pademo v ustrezne

meje reoloških parametrov, glede na priporočene vrednosti reoloških parametrov za SCC prikazane na *sliki 5.1*. Opazimo tudi, da pri vseh vzorcih brez frakcije 2/4 mm ob hkratnem povečanju SP in v/c τ_0 pade pod priporočeno vrednost. Pri vzorcih z 0 % 0/2 mm pri povečanju SP in vode sicer bolj približamo priporočeni τ_0 , vendar je ta še vedno previsoka. Samo v primeru a.2.4 bi lahko rekli, da mešanica ustreza mejnim kriterijem za SCC beton.

Primerjajmo še spremembe, če mešanici, katerim smo že povečali v/c dodamo še več SP. To povečanje ne z vidika τ_0 , ne z vidika μ ne predstavlja niti približno tako velikega učinka kot samo začetna sprememba v/c. Nasprotno pa, če točke vzorcev, katerim smo povečali samo SP povežemo s točkami, ki imajo večji delež SP in večji v/c vidimo, da imajo slednje precej manjšo plastično viskoznost. V primeru a.1, ki nima vmesnih delcev agregata velikosti 2/4 mm, hkrati pa ima največji deleže frakcije 4/8 mm je τ_0 , pri zadnji točki a.1.4 glede na a.1.2, celo malenkost višja. Tovrstno obnašanje ni v skladu z našimi pričakovanji. Je pa res, da je bila pri tej mešanici (a.1.4) ocenjena močna segregacija, kar je lahko razlog za izmerjene vrednosti. Pri mešanici c.2 z 0 % 0/2 mm in najmanjšim deležem frakcije 4/8 mm pa ob povezavi c.2.3 proti c.2.4 opazimo malenkostno zvišanje μ . Verjetno tu pride do zasičenosti mešanice SP, saj je tudi sprememba τ_0 zanemarljivo majhna.

Količina in zrnastostna sestava agregata prav tako močno vpliva na reološke lastnosti svežih mešanic. V splošnem veljajo ugotovitve, ki smo jih navedli v prejšnjem poglavju, da se z večanjem deleža finih delcev in manjših zrn agregata lažje približamo lastnostim, ki so potrebne za dober SCC.

Brata Wallevik (2009; 2011) v svojih publikacijah večkrat omenjata vpliv sprememb vhodnih sestavin. Kakšni so, glede na njune ugotovitve, splošni učinki dodajanja vode in SP na τ_0 in μ je prikazano s *sliko 5.3*. V našem primeru ta "pravila" ne veljajo popolnoma. Učinek dodatne vode se sicer zelo dobro sklada z našimi eksperimentalnimi rezultati. Učinek večanja količine SP pa se je pri naših meritvah izkazal za drugačnega kot je prikazan na reografu *slike 5.3*, kjer SP zmanjšuje strižno napetost na meji tečenja, plastična viskoznost pa ostane bolj ali manj nespremenjena oz. se celo malenkost poveča. Glede na naše rezultate večanje SP kvječemu zmanjšuje plastično viskoznost.

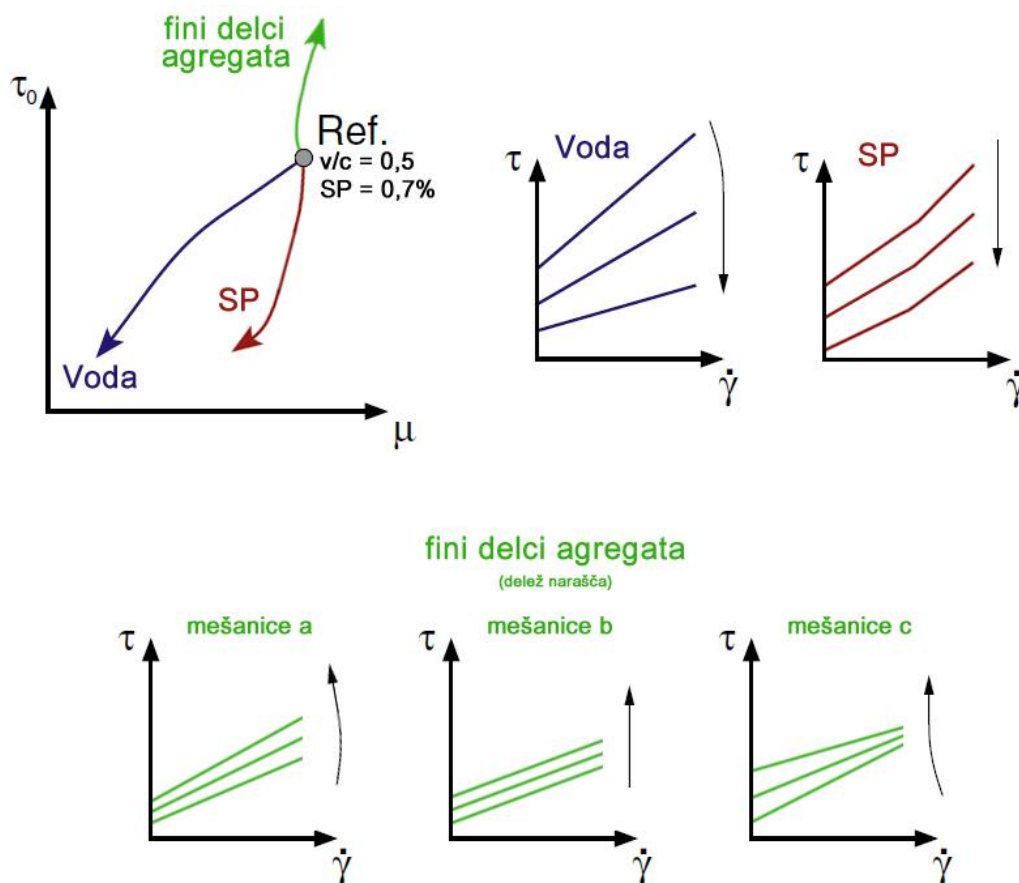


Slika 5.3: Splošen prikaz učinka na referenčno mešanico ob dodajanju vode in SP (Wallevik, 2011)

Seveda je vse skupaj močno odvisno od vrste uporabljenega SP in ostalih vhodnih sestavin. Naj še enkrat omenimo, da smo v parametrični študiji uporabili izključno polikarboksilaten SP, ki trenutno spada med najpogosteje uporabljene vrste SP, medtem, ko je na *sliki 5.3* lahko prikazan učinek SP

drugačne vrste. Hkrati na oseh reografa s *slike 5.3* ni podana skala. Tako bi lahko imela referenčna točka pravzaprav kakršnekoli vrednosti na τ_0 in μ .

Raztros rezultatov preiskav betona je relativno velik, večji kot pri večini drugih konstrukcijskih gradbenih materialih, npr. jeklu. To se še toliko bolj pokaže na relativno novem in nestandardiziranem področju kot je reologija svežega betona. Vseeno pa glede na rezultate naših meritev v sklopu parametrične študije podajamo alternantivo Wallevikovemu prikazu učinkov večanja količine vode in PCE SP.



Slika 5.4: Prikaz učinka na naše referenčne mešanice ob dodajanju vode in SP oz. večanju deleža finih delcev

Dodali smo še puščico in simbolične tokovne krivulje za primer naraščanja finih in drobnih delcev agregata glede na rezultate pri različnih razmerjih frakcij agregata. Seveda je obnašanje pri večanju finih delcev odvisno od njihove vrste in kakovosti. V Sloveniji imamo drugačeno kamninsko sestavo kot npr. na Islandiji ali Danski. Apnenci pri nas so zelo čisti in nekaj unikatnega. Naj še enkrat poudarimo, da so reograf in tokovne krivulje na *sliki 5.4* vezane na zelo majhno število vzorcev in rezultatov.

5.2 Analiza vpliva vrste superplastifikatorja

Zaradi boljše preglednosti na tem mestu še enkrat navajamo preglednico oznak študije vpliva vrste SP ter oznake referenčnih mešanic zanje.. Pri vseh je bil uporabljen polifosfonatni SP. Kot že omenjeno sta recepturi vzorcev d.2.1 in d.1.2 slučajno enaki, kar je posledica ideje tekom preiskav, da povečamo količino SP za 0,15 %.

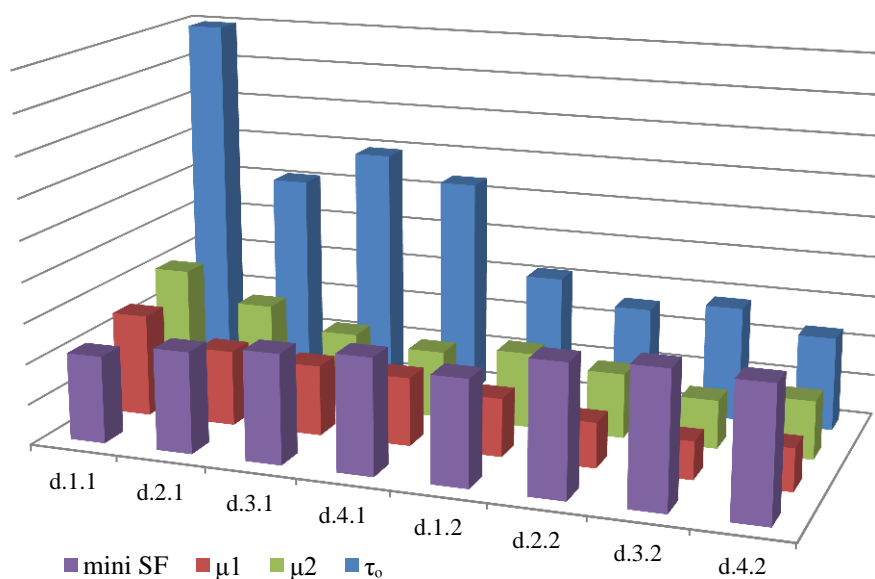
Delež frakcije [mm]			v/c = 0,5	v/c = 0,5	v/c = 0,5	v/c = 0,55	v/c = 0,55	v/c = 0,55
0/2	0/4	4/8	SP = 1,05%	SP = 1,2%	SP = 1,35%	SP = 1,05%	SP = 1,2%	SP = 1,35%
61%	0%	39%	d.1.1	d.2.1, d.1.2	d.2.2			
74%	0%	26%				d.3.1	d.3.2	
85%	0%	15%					d.4.1	d.4.2

Parametrična študija (referenca)	a.1.1	a.1.2	b.1.3	c.1.4
Študija vpliva vrste superplastifikatorja	d.1.1	d.2.1	d.3.1	d.4.1
	d.1.2	d.2.2	d.3.2	d.4.2

Mešanica:	d.1.1	d.2.1	d.3.1	d.4.1	d.1.2	d.2.2	d.3.2	d.4.2
τ_0 [Pa]	89,876	51,023	59,542	53,750	31,461	25,737	28,238	23,055
μ_1 [Pa·s]	25,245	18,530	17,316	16,820	14,287	11,081	9,298	10,407
μ_2 [Pa·s]	30,875	23,865	18,774	16,606	18,600	15,936	11,912	14,333
mini SF [mm]	215	250	270	285	260	323	333	325

Preglednica 5.2: Oznake in reološki parametri vzorcev študije vpliva vrste SP

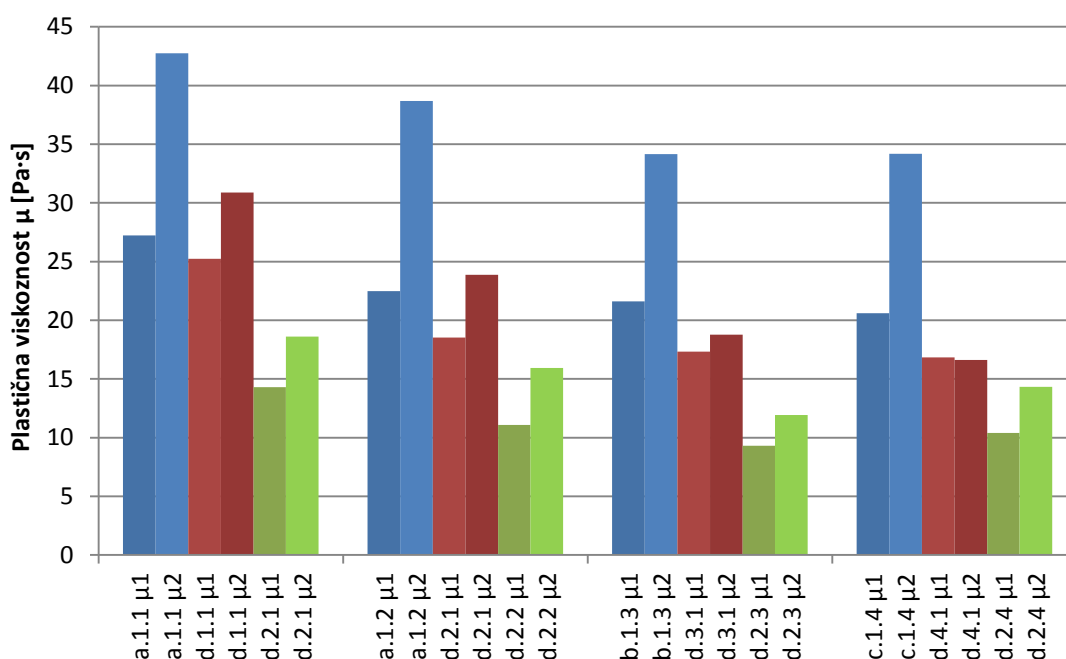
Vrednosti vseh štirih reoloških parametrov vsakega vzorca so prikazane na *grafikonou 5.4*.



Grafikon 5.4: Reološki parametri vzorcev študije vpliva vrste SP

Če za trenutek pozabimo, da so razlike med njihovimi izmerjenimi vrednostmi verjetno delno posledica uporabe različnih šarž cementa ter apnenčeve moke (glej *poglavje 4.5.4*) in obe seriji obravnavamo posebej, lahko opazimo, da je strižna napetost na meji tečenja τ_0 pri d.2.1 ($v/c = 0,5$; SP = 1,2 %) nekoliko manjša od d.3.1 ($v/c = 0,55$; SP = 1,05 %). Enako velja za τ_0 pri d.2.2 ($v/c = 0,5$; SP = 1,35 %), ki je malenkost manjša od tiste pri d.3.2 ($v/c = 0,55$; SP = 1,2 %). Lahko sklepamo, da kljub večjemu v/c razmerju ter večjemu deležu drobnega agregata na zmanjšanje τ_0 še vedno najmočnejše vpliva količina dodanega SP.

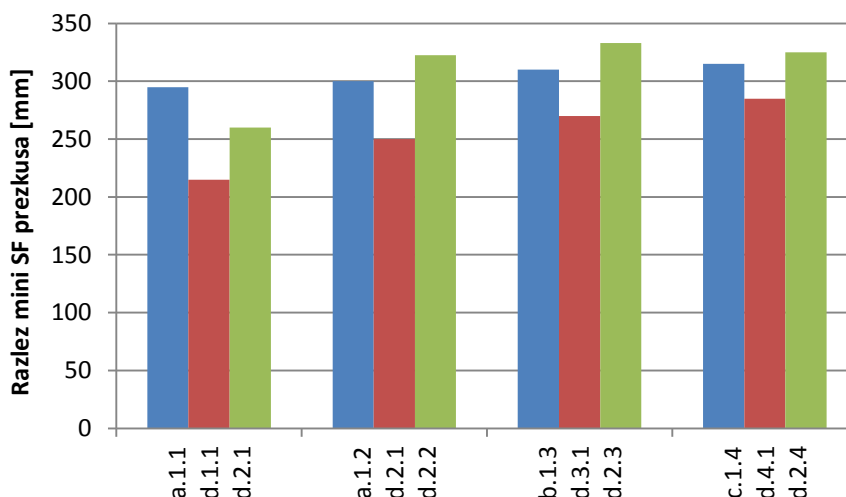
Glede na komentar oz. napoved proizvajalca, da pri naraščanju strižne hitrosti mešanice z dodatkom polifosfonatnega SP ne izkazujejo velikega zgoščanja ali redčenja bi bilo tokovne krivulje mogoče modelirati z eno samo regresijsko premico, torej kot Binghamov model tekočine. Vendar smo, kot omenjeno, izmerjene vrednosti v vseh primerih razdelili tako, da imamo za vsak vzorec dve plastični viskoznosti, torej levo μ_1 in desno μ_2 . Razlika med njima je pri vseh osmih mešanicah res manjša od večine razlik plastičnih viskoznosti parametrične študije, kjer smo opazovali mešanice s polikarboksilatnim SP. Največji absolutni razliki $\mu_2 - \mu_1$, edini nad 5 Pa·s, zabeležimo pri d.1.1 in d.2.1. Pri d.3.1 in d.4.1 pa opazimo najmanjši razliki. Še več, pri d.4.1 opazimo, da je razlika negativna, torej je μ_1 za malenkost večja od μ_2 . Ta minimalen pojav strižnega redčenja je lahko posledica večje količine drobnih zrn agregata in finih delcev v mešanici. Še najboljše so razlike plastičnih viskoznosti vidne na *grafikonu 5.5*, kjer so hkrati navedene tudi viskoznosti referenčnih mešanic iz parametrične študije. Te so označene z modro barvo, vzorci 1. serije s polifosfonatnim SP z rdečo in z zeleno tisti iz 2. serije.



Grafikon 5.5: Primerjava plastičnih viskoznosti μ_1 in μ_2

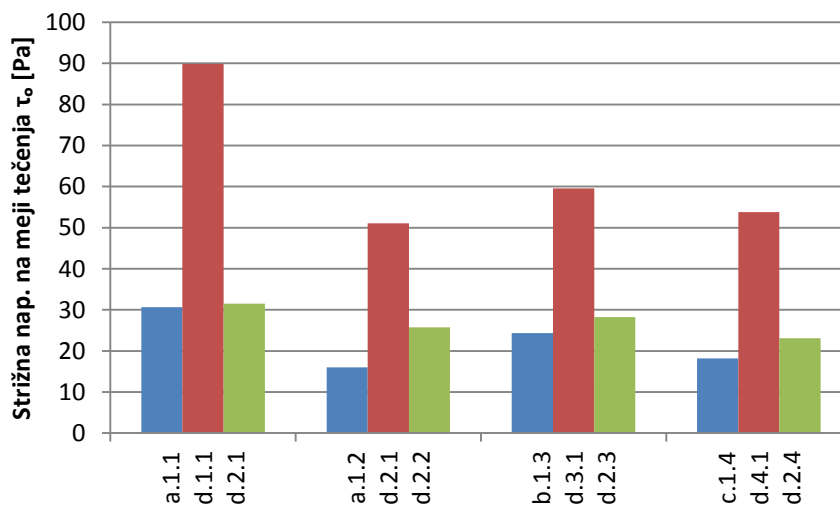
Pri vseh referenčnih mešanicah je plastična viskoznost μ_2 pri višjih hitrostih striženja za okoli 35 do 40 % večja od μ_1 . Pri mešanicah s polifosfonatnim SP se relativna razlika obeh plastičnih viskoznosti giblje med 20 in 30 %, izjema sta d.3.1 s približno 8 % in d.4.1 z razliko malo več kot 1 % razlike.

Na **grafikonu 5.6** primerjamo premer mini SF razleza. Ta se pri vseh referenčnih mešanicah (modri stolpci) giblje okrog vrednosti 300 mm. Pri mešanicah 1. serije s primerljivo korigirano količino polifosfonatnega SP (rdeči stolpci) velikost razleza 300 mm ni dosežena v nobenem primeru. Razlike glede na mini SF razlez referenčnih mešanic so pri večjem v/c, večji količini SP in večjem deležu drobnega agregata manjše. 2. serija vzorcev (zeleni stolpci), kjer je količina SP večja, ima že na začetku, pri d.2.1, premer razleza bližje svoji referenčni mešanici iz parametrične študije. V ostalih treh vzorcih pa kombinacija večje količine SP in vode povzroči tako nizke plastične viskoznosti, da so razlezi preko 300 mm, poleg tega pa nastopi tudi segregacija sveže mešanice.



Grafikon 5.6: Primerjava razleza pri mini SF preizkusu

Primerjava strižne napetosti na meji tečenja τ_0 mešanic pri katerih spremenimo le vrsto in količino SP razkrije zanimivo lastnost novega SP. Na **grafikonu 5.7** izstopajo vrednosti τ_0 rdeče barve, ki pripadajo 1. seriji mešanic s polifosfonatnim SP. Vse so vsaj še enkrat višje od modro obarvanih stolpcev, ki predstavljajo τ_0 osnovnih mešanic parametrične študije. Tudi zeleno obarvane vrednosti 2. serije polifosfonatnega SP so vse malenkost večje od modrih in to kljub temu, da je bilo pri njih dodano za skoraj 70 % več SP kot pri referenčnih mešanicah.



Grafikon 5.7: Primerjava strižnih napetosti na meji tečenja τ_0

Iz teh primerjav pridemo do zaključka, da je SP na osnovi polikarboksilatnih polimerov bolj učinkovit pri zmanjševanju napetosti na meji tečenja, polifosfonatni SP pa se izkaže za bolj uporabnega, ko želimo mešanici zmanjšati plastično viskoznost. Osredotočimo se na d.3.1 in d.4.1. Glede na njihovi referenčni mešanici imata veliko večje vrednosti τ_0 , a hkrati primerljive velikost mini SF razleza. Tudi plastične viskoznosti so primerno nizke, glede na razmeroma visoke strižne napetosti na meji tečenja (glej *slika 5.1*). Smatramo, da mešanici ustrezata pogojem dobrega SCC.

5.3 Analiza tlačne trdnosti in hidratacijske toplote

Zaradi boljše preglednosti na tem mestu še enkrat navajamo preglednico oznak študije razvoja tlačne trdnosti in hidratacijske toplote s časom.

Referenčna mešanica:			b.1.3	c.1.4	d.3.1	d.4.1
Tip superplastifikatorja:			Polikarboksilaten SP		Polifosfonaten SP	
Delež frakcije [mm]			v/c = 0,55	v/c = 0,55	v/c = 0,55	v/c = 0,55
0/2	0/4	4/8	SP = 0,7%	SP = 0,8%	SP = 1,05%	SP = 1,2%
74%	0%	26%	PCE 1		PPh 1	
85%	0%	15%	PCE 2		PPh 2	

5.3.1 Primerjava reoloških parametrov

Za potrebe študije razvoja tlačne trdnosti s časom smo, kot omenjeno, vzeli 4 referenčne mešanice, ki so izkazovale lastnosti primerne za izdelavo dobrega SCC. V prejšnjih dveh študijah smo potrebovali le manjšo količino teh mešanic, za izdelavo 12 preizkušancev v obliki kock s stranico približno 15 cm pa je bilo potrebno zamešati približno enajstkrat večjo količino betona. Iz izkušenj vemo, da imajo betoni, ki jih zamešamo v majhnih (npr. v standardnem mešalcu za malte – *poglavje 4.4.2*), srednjih (npr. standardni protitočni mešalec – *poglavje 4.6.2*) ali velikih (npr. betonarna) količinah, po sicer enakem receptu, lahko različne lastnosti.

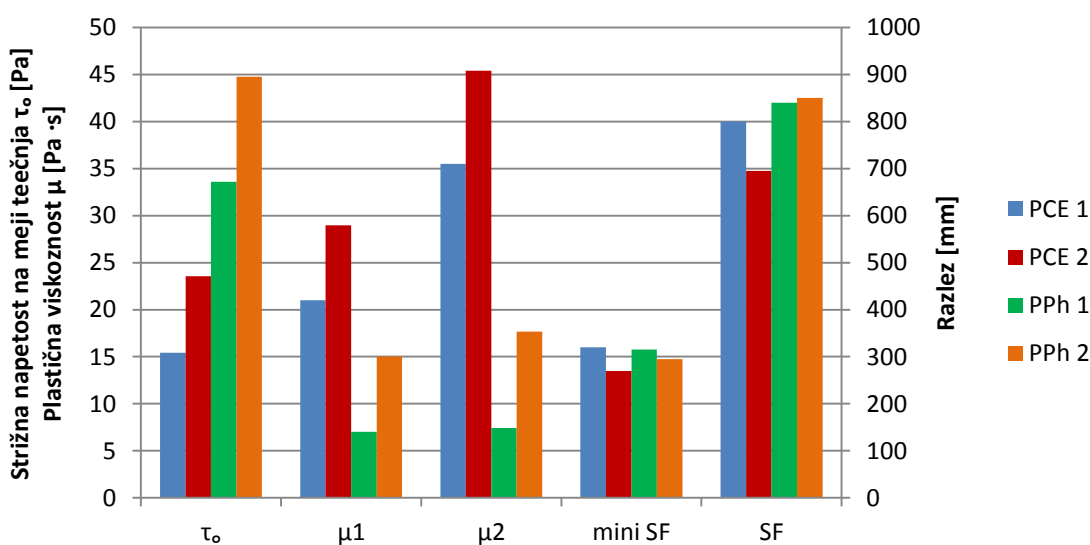
V *preglednici 5.3*, zaradi lažje primerjave, na enem mestu zberemo vse reološke parametre referenčnih mešanic in mešanic obravnavanih v študiji tlačne trdnosti in hidratacijske toplote.

Mešanica:	b.1.3	c.1.4	d.3.1	d.4.1
τ_0 [Pa]	24,294	18,142	59,542	53,750
μ_1 [Pa·s]	21,598	20,599	17,316	16,820
μ_2 [Pa·s]	34,151	34,186	18,774	16,606
mini SF [mm]	310	315	270	285
Mešanica:	PCE 1	PCE 2	PPh 1	PPh 2
τ_0 [Pa]	15,438	23,551	33,580	44,735
μ_1 [Pa·s]	21,011	28,962	7,035	15,012
μ_2 [Pa·s]	35,504	45,384	7,420	17,685
mini SF [mm]	320	270	315	295
SF [mm]	800	695	840	850

Preglednica 5.3: Primerjava reoloških parametrov ref. mešanic z analiziranimi mešanicami

Razlike so precejšnje. Tako pri mešanica s polikarboksilatnim SP, kot pri tistih dveh s polifosfonatnim SP se pokaže nerazumljiv pojav. Mešanici, ki sta prej izkazovali višje vrednosti τ_0 in μ imata sedaj ti vrednosti nižje in obratno. Velja omentiti, da so bili ti vzorci izdelani iz druge šarže apnenčeve moke in cementa kot njihove referenčne mešanice (za bolj obširen opis problema glej **poglavje 4.5.4**). Na našo srečo nobena od obravnavanih mešanic ni segregirala. Še več, njihove izmerjene reološke lastnosti so bile še za odtenek bolj ugodne z vidika SCC betonov. Prišli smo do zaključka, da v sklopu te diplomske naloge nima smisla iskati razlogov in povezav zakaj in kako pride do teh razlik.

Poglejmo torej reološke lastnosti štirih mešanic, ki so predstavljene na **grafikonu 5.8**. Razlike med rezultati vzorcev s polikarboksilatnim in polifosfonatnim SP ne razkrijejo nič novega. Mešanici s PCE imata nižji τ_0 od mešanic s PPh, mešanici s PPh pa nižji μ od mešanic s PCE.



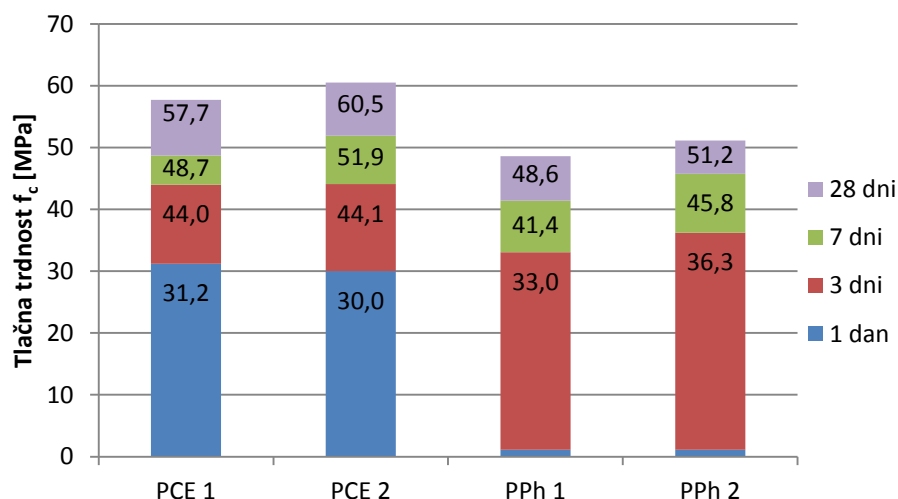
Grafikon 5.8: Primerjava reoloških parametrov analiziranih mešanic

Primerjamo rezultate mešanice s SP iste vrste. PCE 2, ki ima sicer več finega in drobnega agregata, vendar večji delež SP izkazuje večjo τ_0 kot PCE 1. Iz tega lahko zaključimo, da je učinek finih in drobnih delcev agregata na τ_0 tudi tu večji kot učinek zamešanja z večjo količino SP.

Ko pa med seboj primerjamo rezultate mešanic s polifosfonatnim SP naletimo na nekaj nepričakovanega. PPh 2, ki ima več finega in drobnega agregata in večjo količino SP izkazuje večjo μ kot PPh 1 z manj SP in večjim deležem grobe frakcije. Če pogledamo plastične viskoznosti referenčnih mešanic d.3.1 in d.4.1 na **grafikonu 5.5**, sta ti skoraj enaki, d.4.1 pravzaprav malenkost nižja. Pojav se ne sklada z našim znanjem o superplastifikatorjih. Tako polikarboksilatni kot tudi polifosfonatni SP na kemijskem nivoju delujejo, ne le na cement, temveč na vse fine delce. Tako bi morala biti plastična viskoznost PPh 2 v primerjavi s PPh 1 vsaj enaka, če ne že manjša. Je pa res, da s SP polifosfonatnega tipa še ni veliko izkušenj, zato je čisto mogoče, da je pri PPh 2 prevladal vpliv večjega deleža finih delcev in drobnih zrn agregata nad vplivom povečanega deleža SP.

5.3.2 Primerjava razvoja tlačne trdnosti po času z vhodnimi sestavinami

Vse vhodne sestavine z izjemo superplastifikatorja so enake. Le-ta pa ima, kot že vemo, na razvoj tlačne trdnosti velik vpliv. Na **grafikonu 5.9** v oči kar bode izjemno nizka zgodnja trdnost preizkušancev s polifosfonatnim SP. Kot omenjeno, smo jih po 24 urah le s težavo razkalupili, kaj šele, da bi izmerili kakšno konkretno tlačno trdnost. Vrednosti vzorcev z enakimi SP so si tako podobne, da jih na tem mestu ne bomo primerjali. Numerična primerjava prirasta tlačnih trdnosti mešanic z različnim SP pa je smiselna šele po treh dneh. Pri starosti 3 dni je tlačna trdnost PPh preizkušancev približno 20 do 25 % nižja od tistih s PCE. Po 7 dneh se te razlike zmanjšajo na približno 12 do 15 % in po 28 dneh, v obeh primerih, na 15 %. Tako časovni razvoj, kot tudi "končna" tlačna trdnost po 28 dneh je z uporabo PPh nižja v primerjavi s PCE. Pri obeh pa očitno velja pravilo, da več SP kot dodamo večja bo tlačna trdnost. V zmernih mejah seveda. Skrajno vrednost, koliko SP je še ustrezno dodati za maksimalen učinek povečanja tlačne trdnosti verjetno določa meja segregacije.

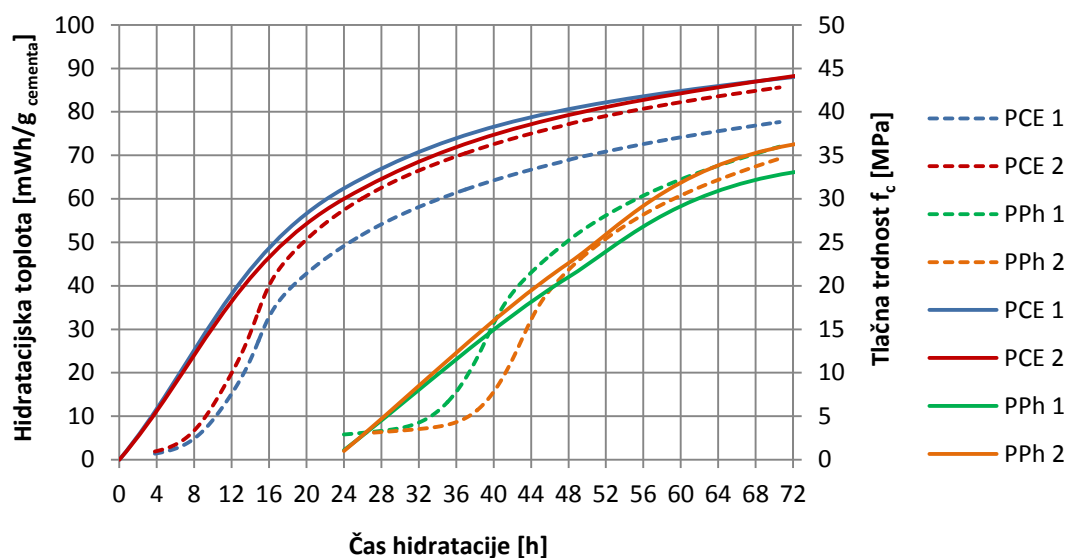


Grafikon 5.9: Razvoj tlačne trdnosti s časom

5.3.3 Primerjava razvoja tlačnih trdnosti s sproščeno hidratacijsko toploto

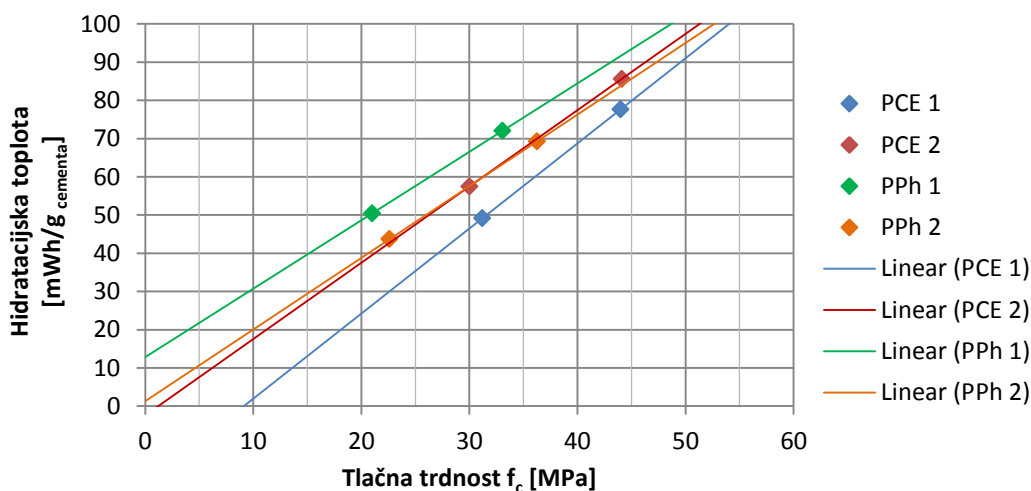
Primerjava na **grafikonu 5.10** razkrije, da je mogoče z informacijo o skupni količini sproščene toplote pri določeni starosti betona (črtkane črte), dokaj natančno napovedati kolikšna bo tlačna trdnost (polne črte) pri tej starosti. Predvsem je to uporabno pri zgodnjih starostih betona. Pri hidrataciji PCE 2, z več SP in večjem deležem finih delcev kot pri PCE 1 se sprosti več hidratacijske toplote, a je prirast tlačne trdnosti s časom vseeno za malenkost manjši. To je v nasprotju z ugotovitvijo, da imajo mešanice z več finimi delci višje zgodnje tlačne trdnosti (Duh, 2008). V našem primeru je nižja tlačna trdnost verjetno slučajna ali pa posledica nenatančne meritve in niti ni tako pomembna, saj je potek prirasta ene in druge trdnosti zelo podoben. Pri PPh 2 pa je vsota sproščene toplote pri določeni starosti le navidezno manjša od tiste zabeležene pri hidrataciji PPh 1. Dejansko je le zamaknjena, saj je večja količina polifosfonatnega SP povzročila, da obdobje pospešene hidratacije nastopi približno 4 ure kasneje. Če bi jih postavili v isto izhodišče, bi videli, da črtkana krivulja PPh 2 poteka nad črtkano krivuljo PPh 1. Temu ustreza tudi večja tlačna trdnost PPh 2. Tudi tlačne trdnosti po 28 dneh obeh mešanic z več SP sta višji. To sicer ni prikazano na **grafikonu 5.10**, saj se ta konča z meritvami

kalorimetra (po 72 urah). Vseeno pa je razlog za višje vrednosti "končnih" tlačnih trdnosti mešanic PCE 2 in PPh 2 bolj popolna hidratacija cementa, ki jo zagotovi uporaba obeh tipov SP.



Grafikon 5.10: Primerjava razvoja tlačne trdnosti s sproščeno hidratacijsko toploto

Ker imamo za vsako od štirih mešanic izmerjeni le dve vrednosti tlačne trdnosti, ki ju lahko povežemo s hidratacijsko toploto, nam ne ostane drugega kot da na *grafikonu 5.11* določimo linearene regresijske premice in jih primerjamo med seboj. Očitno sta linearna trenda PCE 1 in PPh 1 napačna. Prvi ima tlačno trdnost skoraj 10 MPa pri 0 mWh sproščene hidratacijske toplote. Drugi pa, ravno obratno, trdnost 0 MPa pri skoraj 15 mWh sproščene toplote. Toliko bolj sta zanimiva PCE 2 in PPh 2, ki sta si v resnici kar presenetljivo podobna. Regresijski premici obeh gresta približno skozi koordinatno izhodišče, kar ustreza dejstvu, da se tlačna trdnost veča s stopnjo hidratacije, torej celotne do takrat sproščene toplote. Opazimo tudi, da je naklon trenda PCE 2 malce bolj strm kot naklon PPh 2. To ustreza nekoliko večji tlačni trdnosti mešanic s polikarboksilatnim SP po 28 dneh. Za kaj bolj natančno določitev trendov prirasta tlačne trdnosti v povezavi s sproščeno hidratacijsko toploto bi potrebovali precej več meritev v manjših časovnih razmakih.



Grafikon 5.11: Linearna regresija rezultatov tlačne trdnosti in hidratacijske toplote

6 ZAKLJUČKI

Raziskave v sklopu te diplomske naloge so pokazale, da je za razvoj betona kot gradbenega materiala potrebno znanje s področij kemije, reologije, gradbeništva ter drugih strok. Da lahko razložimo obnašanje svežega in lastnostni strjenega betona moramo to znanje združiti.

Ko smo združili rezultate vseh obravnavanih študij, smo prišli do sledečih zaključkov:

- Za ustrezno plastičnost sveže SCC mešanice moramo omejiti količino grobozrnatega agregata, znižati v/c in dodati ustrezno količino SP. S tem se sicer zniža tudi napetost na meji tečenja, kar lahko povzroči segregacijo betonske mešanice.
- Viskoznost paste v betonu povečamo z zadostno količino praškastih delcev.
- Posledica prevelikega deleža grobega agregata je tako visoka strižna napetost na meji tečenja sveže mešanice, da ne ustreza kriterijem za SCC.
- Betonske mešanice s PCE superplastifikatorjem in veliko količino finih delcev bolj kot Binghamovemu modelu tekočine sledijo Herschel-Bulkleyjevemu modelu.
- V primeru betonov s PCE superplastifikatorjem in maksimalnim zrnom 8 mm ob izpustitvi frakcije 2/4 mm zagotovimo boljšo obdelavnost.
- Tako polikarboksilatni, kot tudi polifosfonatni superplastifikator delujeta na vse fine delce v suspenziji, torej ne le na cement, ampak tudi na apnenčevo moko in drobna zrna agregata.
- Zdi se, da PCE superplastifikatorji na fine apnenčeve delce, ki so na voljo v Sloveniji delujejo nekoliko drugače kot na tiste, ki so na voljo drugje. Pri nas imamo na razpolago zelo čiste apnenece.
- Preko toplotnega toka hidratacije oz. poteka sproščene hidratacijske toplote lahko napovemo prirast tlačne trdnosti betona s časom.

Mešanice z dodatkom superplastifikatorja na osnovi polifosfonatnih polimerov:

- Prav tako kot pri betonih z ostalimi vrstami superplastifikatorjev za bolj ustrezen učinek delovanja potrebujejo večji delež finih delcev in drobnih zrn agregata.
- Reološko gledano sledijo Binghamovemu modelu tekočine.
- Izkazujejo večjo stabilnost in odpornost na segregacijo.
- Izkazujejo večjo robustnost pri spremembi vhodnih komponent.
- Za približno enako stopnjo obdelavnosti je potrebno, v primerjavi s polikarboksilatnim SP, dodati okrog 50 % več polifosfonatnega SP. Ugotovitev se sklada s priporočilom proizvajalca. Ob količini večji od priporočene začne sveža mešanica segregirati.
- Razlez pri standardnem preizkusu razleza s posedom mešanice s polifosfonatnim SP je lahko nekoliko manjši ali večji od razleza primerjalne mešanice s polikarboksilatnim SP. Hkrati pa je hitrost razprostiranja svežega betona pri polifosfonatnem SP bistveno večja. Prav tako mešanice s polifosfonatnim SP niso tako lepljive (kohezivne).
- Izjemen zavlačevalni vpliv na vezanje in strjevanje sveže cementne suspenzije. Naša ocena je, da bi bilo vgrajevanje mogoče tudi do 8 ur po zamešanju.

- 24 ur po zamešanju beton sicer drži obliko (je v trdnem agregatnem stanju), vendar je izjemno drobljiv. Ima zanemarljivo trdnost.
- Nižja tlačna trdnost betona po 28 dneh v primerjavi s primerjalnim betonom izdelanim polikarboksilatnim superplastifikatorjem.

Kljub vsem tem ugotovitvam nam je veliko učinkov polifosfonatnega superplastifikatorja še vedno neznanka. Med samim eksperimentalnim delom in kasnejšo analizo smo prišli do nekaj zanimivih ugotovitev. Vendar so se hkrati z njimi pojavila tudi nova vprašanja.

Predlagane ideje za nadaljnje raziskovalno delo:

- Spremljanje upada obdelavnosti s časom pri uporabi polifosfonatnega superplastifikatorja.
- Zakaj in do kakšnih razlik pride, ko zamešamo različne količine betona po enaki recepturi.
- Ugotoviti ali je vpliv superplastifikatorjev mogoče napovedati tudi pri uporabi betonom ekvivalentnih malt.
- Primerjava reoloških lastnosti SCC betonov iz drobljenca in agregata aluvialnega izvora, ob tem, da se drugi parametri recepture ne razlikujejo.

VIRI

Andrejka, N. 2012. Vpliv minerlnih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba N. Andrejka): 64 str.

Duh, D. 2008. Samozgoščevalni in vibrirani betoni z apnenčevo moko. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo (samozaložba D. Duh): 200 str.

Kavčič, F. 2000. Hidratacija cementa v betonu pri adiabatih razmerah. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo (samozaložba F. Kavčič): 95 str.

Koehler, E., Fowler, D. 2007. ICAR Mixture Proportioning Procedure for Self-Consolidating Concrete. ICAR Project 108: Aggregates In Self-Consolidating Concrete. Austin, University of Texas at Austin: 21 str.

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. 2006. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Third Edition. New York, McGraw-Hill: 659 str.

Muravljov, M. 1991. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, Građevinska knjiga Beograd: 451 str.

Štupar, B. 2012. Vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti malt. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba B. Štupar): 66 str.

Tattersall, G.H., Banfill, P.F.G. The Rheology of Fresh Concrete. Boston, London, Melbourne, Pitman Advanced Publishing Program: 368 str.

Zupančič Valant, A. 2007. Uvod v reologijo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo: 98 str.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 351 str.

Wallevik, O.H. 2009. Introduction to Rheology of Fresh Concrete. ICI rheocenter course. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219 str.

Standardi

SIST 1026:2008. Beton – 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206–1. = Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity – Rules for the implementation of SIST EN 206–1. CEN.

SIST EN 934–2:2009. Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso – 2. del: Kemijski dodatki za beton – Definicije, zahteve, skladnost, označevanje in obeleževanje. = Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling. CEN.

SIST EN 12350–2:2009. Preskušanje svežega betona – 2. del: Preskus s posedom stožca. = Testing fresh concrete – Part 2: Slump-test. CEN.

SIST EN 12350–8:2010. Preskušanje svežega betona – 8. del: Samozgoščevalni beton - Preskus razleza s posedom. = Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test. CEN.

SIST EN 12350–11:2010. Preskušanje svežega betona – 11. del: Samozgoščevalni beton - Preskus segregacije s sitom. = Testing fresh concrete – Part 11: Self-compacting concrete - Sieve segregation test. CEN.

SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona - Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona. = Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. CEN.

SIST EN 196–1:2005. Metode preskušanja cementa – 1. del: Določanje trdnosti. = Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. CEN.

SIST EN 12390–2:2009. Preskušanje strjenega betona – 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti. = Testing hardened concrete – Part 2: Making and curing specimens for strength tests. CEN.

SIST EN 12390–3:2009. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev. = Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. CEN.

SIST EN 12390–4:2001. Preskušanje strjenega betona – 4. del: Tlačna trdnost - Specifikacija za stiskalnice. = Testing hardened concrete – Part 4: Compressive strength - Specification for testing machines. CEN.

Ostali viri

D'Ambrosia, M., Lange, D. 2007. Self-Consolidating Concrete: The Good, The Bad, and the Ugly. Structure magazine. January 2007: 48–50.

<http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=475> (pridobljeno 20. 1. 2013)

Černilogar, L. 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. Gradbenik 12/2010 – 01/2011: 100–103.

http://www.tkk.si/filelib/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf (pridobljeno 28. 1. 2013)

Flatt, R. J., Martys, N. S., Bergström, L. 2004. The Rheology of Cementitious Materials. Materials Research Society (MRS Bulletin), May 2004, Vol. 29, No. 5: 314–318.

<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build04/PDF/b04003.pdf> (pridobljeno 4. 3. 2013)

Hočevar, A., Kavčič, F. 2010. Določanje lastnosti svežega lahko vgradljivega in samozgoščevalnega betona. Tehnični informator SCT, št. 77, 12/10. Ljubljana, SCT d.d.: 53–58.

Murthy, K., Rao, N., Reddy, R., Reddy, M. 2012. Mix Design Procedure for Self Compacting Concrete. ISOR Journal of Engineering, September 2012, Vol. 2, Iss. 9: 33–41

[http://www.iosrjen.org/Papers/vol2_issue9%20\(part-3\)/E0293341.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol2_issue9%20(part-3)/E0293341.pdf) (pridobljeno 4. 2. 2013)

Zevnik, L. 2010. Uporaba izotermne kalorimetrije za določitev poteka hidratacije cementa. Zbornik referatov. Konferenca. Beton 21. stoletja. Lipica, Slovenija, 25. – 26. marec, 2010. Ljubljana, Združenje za beton Slovenije: str. 27-39.

Zevnik, L. 2012. Superplastifikatorji iz družine hiperplast - teorija. Zbornik. 10. Srečanje TKK Srpenica. Bovec, 5. oktober 2012. Srpenica ob Soči, Proizvodnja Kemičnih izdelkov: loč. pag.

Wallevik, J.E. 2006. Relationship between the Bingham parameters and slump. Cement and Concrete Research, July 2006, Vol. 36, Iss. 7: 1214–1221.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884606000615> (pridobljeno 22. 2. 2013)

Wallevik, O.H., Wallevik J.E. 2011. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. Cement and Concrete Research, December 2011, Vol. 41, Iss. 12: 1279–1288.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461100010X> (pridobljeno 24. 2. 2013)