

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



DOKTORSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM III. STOPNJE  
GRAJENO OKOLJE

Kandidat:

**ANDRAŽ HOČEVAR, univ. dipl. inž. grad.**

**REOLOŠKE LASTNOSTI CEMENTNIH KOMPOZITOV V  
SVEŽEM STANJU**

Doktorska disertacija št. 7/GO

**RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENTITIOUS  
COMPOSITES IN FRESH STATE**

Doctoral thesis No. 7/GO

Temo doktorske disertacije je odobrila Komisija za doktorski študij Univerze v Ljubljani  
na 20. redni seji, dne 21. septembra 2011.

Za mentorico je bil imenovana izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov.

Ljubljana, 20. december 2013

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
gradbeništvo in  
geodezijo



**Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:**

- izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov,
- doc. dr. Marjan Tušar, UM FG,
- prof. dr. Matjaž Četina,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 20. redni seji, 20. aprila 2011.

**Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:**

- prof. dr. Roko Žarnić,
- izr. prof. dr. Zvonko Jagličić,
- prof. dr. Goran Turk,
- doc. dr. Marjan Tušar, Kemijski inštitut,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 2. redni seji, 26. junija 2013.

**Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:**

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, mentorica,
- prof. dr. Roko Žarnić,
- izr. prof. dr. Zvonko Jagličić,
- prof. dr. Goran Turk,
- doc. dr. Marjan Tušar, Kemijski inštitut,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 4. redni seji, 23. oktobra 2013.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*

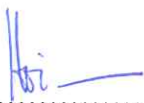


## IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **Andraž Hočevar** izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom:  
**REOLOŠKE LASTNOSTI CEMENTNIH KOMPOZITOV V SVEŽEM STANJU.**

Izjavljam, da je elektronska različica disertacije enaka tiskani različici, in dovoljujem njeno objavo v digitalnem repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 20. december 2013

  
.....  
(podpis)

## **STRAN ZA POPRAVKE**

<b>Stran z napako</b>	<b>Vrstica z napako</b>	<b>Namesto</b>	<b>Naj bo</b>



**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

UDK:	691.3:691.53/54:620.173(043.3)
Avtor:	Andraž Hočevar, univ.dipl.inž.grad.
Mentor:	izr.prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Naslov:	Reološke lastnosti cementnih kompozitov v svežem stanju
Tip dokumenta:	Doktorska disertacija
Obseg in oprema:	165 str., 73 pregl., 100 sl., 46 en., 9 pril.
Ključne besede:	Reologija, sveži beton, sveža malta, ICAR reometer, ConTec Viscometer 5, čas, ANOVA, CEM

**Izvleček**

Doktorska disertacija obravnava pojem reologije svežih cementnih kompozitov. Na območju Slovenije se še nihče ni ukvarjal s temo reologije svežih cementnih kompozitov s poudarkom na betonih. Zaradi tega je naloga zastavljena bolj splošno. Obravnava osnovne zakonitosti reologije svežih cementnih kompozitov in se nato usmeri tudi v bolj specifično temo. V nalogi so tako izdelani reografi za uporabo s slovenskimi materiali. Prav tako so preverjene osnovne zakonitosti reologije. Vključeni so tudi materiali, ki niso najpogosteje uporabljeni kot ena od sestavin betona, razen kot del cementa. Mešanice betona so razdeljene v dve skupini, in sicer: običajni betoni in samozgoščevalni (SCC) betoni. Malte so formulirane na podlagi mešanic betonov z uporabo metode betonu ekvivalentne malte (metoda CEM). Meritve so bile izvedene z dvema različnima reometroma, in sicer reometrom ICAR Rheometer ter reometrom ConTec Viscometer 5. Izvedenih je bilo več primerjav. Najprej smo izvedli primerjavo med reometroma za različne vrste betona in malt. Reometra sicer kažeta dokaj različne rezultate, vendar na enak način spremljata spremembe v sestavi mešanice. Primerjavo med betonom in malto smo izvedli z vpeljavo metode vrednotenja, ki je poimenovana "pričakovan razlez malte". Ta metoda je učinkovita za uporabo z običajnimi betoni. Preverjen je tudi pojav časovnega spreminjanja reoloških lastnosti betona in njemu ekvivalentne malte. Večinoma je obnašanje primerljivo. To je dobro ovrednoteno s pomočjo normaliziranja rezultatov. Primerjave so podkrepjene s statistično analizo, ki zajema tudi metodo ANOVA.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

UDC: 691.3:691.53/54:620.173(043.3)  
Author: Andraž Hočevar, univ.dipl.inž.grad.  
Supervisor: assoc. prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D.  
Title: Rheological properties of cement composites in fresh state  
Document type: Ph. D. Thesis  
Notes: 165 p., 73 tab., 100 fig., 46 eq., 9 ann.  
Key words: Rheology, fresh concrete, fresh mortar, ICAR rheometer, ConTec Viscometer 5, time, ANOVA, CEM

### Abstract

Doctoral dissertation discusses the concept of the rheology of fresh cement based composites. On the territory of Slovenia, no one has dealt with the topic of rheology of fresh cement based composites with an emphasis on concrete. For this reason, the task is based more generally. Dissertation discusses the basic principles of the rheology of fresh cement composites and is then directed in a more specific topic. Rheographs for use with Slovenian materials are established. Basic principles of rheology are examined. Also included are materials which are not most commonly used as the constituents of concrete, except as part of the cement. Concrete mixtures were divided into two groups, namely: normal concrete and self compacting concrete (SCC). Mortars are formulated on the basis of concrete mixtures using the concrete equivalent (CEM) method. Measurements were performed with two different rheometers, namely rheometer ICAR Rheometer and rheometer Contec Viscometer 5. Several comparisons were made. First a comparison between the rheometers for different types of concrete and mortars was made. The two rheometers show quite different results but they monitor changes in the composition of the mixture in the same way. A comparison between concrete and mortar was made with the introduction of evaluation method, which is called "expected flow of mortar". This method is effective for use in normal concrete. Also time behavior of rheological properties of concrete and its equivalent mortar is checked. In most cases the behavior is comparable. It is well evaluated using the normalization of the results. Comparisons are supported by statistical analysis, which also includes method ANOVA.

## ZAHVALA

Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada.

Iskrena hvala mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov, ki mi je vedno z veseljem svetovala in prisluhnila. Brez njene pomoči pri organizaciji eksperimentalnega dela ne bi šlo. Za potrebe preiskav mi je tudi odstopila reometer ConTec Viscometer 5.

Hvala mag. Franciju Kavčiču z Inštituta za gradbene materiale IGMAT d.d., ki mi je omogočil študij na inštitutu IGMAT d.d. in me pri tem podpiral. Hvala tudi Miranu Kepicu z inštituta IGMAT d.d. za strokovno pomoč. Za podporo se zahvaljujem tudi direktorju inštituta IGMAT d.d. Janezu Prosenu.

Hvala podjetjem LAFARGE cement d.o.o., SALONIT Anhovo d.d., TKK Srpenica d.d., Primorje d.d. in Montana d.o.o., ki so mi za potrebe študija odstopili materiale.

Eksperimentalno delo ne bi bilo izvedljivo brez pomoči študentov, ki so pomagali pri eksperimentalnem delu. Nejc Andrejka, Bojan Kresal, Blaž Hren, Jože Klepec, Uroš Erdani, Grega Merlin, Danijel Benko, Jože Maver in Nejc Gašperič na tem mestu se vam iskreno zahvaljujem za vašo pomoč in dobro voljo.

Tudi brez sodelavcev na fakulteti bi bilo mnogo težje. Še posebej se zahvaljujem Petri za vse vzpodbudne besede in Franciju za vso pomoč pri eksperimentalnem delu. Najlepša hvala za vso pomoč tudi sodelavcem na inštitutu IGMAT d.d., ki so me vedno znali nasmejati.

Hvala vsem prijateljem, ki so me vzpodbujali, in vsem drugim, ki so mi kakorkoli pomagali, a jih tukaj nisem omenil.

Seveda ne bi šlo brez vzpodbude mojih staršev, ki sta mi bila vedno v zgled in sta mi nudila pomoč pri vseh življenjskih izzivih, ki so mi prišli nasproti. Hvala tudi moji sestri, brez katere to delo ne bi izgledalo, kakor izgleda.

Najlepša hvala moji Aleši in najinemu Matevžu, ki sta me razumela in stala ob strani, ki sta me prenašala in sta me tudi znala potegniti stran od dela, me nasmejati in sprostiti. Hvala.

## KAZALO VSEBINE

<b>Stran za popravke</b>	<b>I</b>
<b>Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček</b>	<b>II</b>
<b>Bibliographic – documentalistic information</b>	<b>III</b>
<b>Zahvala</b>	<b>IV</b>
<b>Kazalo vsebine</b>	<b>V</b>
<b>Kazalo preglednic</b>	<b>VIII</b>
<b>Kazalo slik</b>	<b>XI</b>
<b>List of tables</b>	<b>XIV</b>
<b>List of figures</b>	<b>XVII</b>
<b>Kratice</b>	<b>XX</b>
<b>Slovar reoloških izrazov</b>	<b>XXI</b>
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
1.1 Splošno	1
1.2 Namen in cilji	3
1.3 Struktura disertacije	4
<b>2 SPLOŠNO O CEMENTNIH KOMPOZITIH</b>	<b>6</b>
2.1 Uvod	6
2.2 Osnovne sestavine cementnih kompozitov	6
2.2.1 Uvod	6
2.2.2 Cement	6
2.2.3 Agregat	7
2.2.4 Kemijski dodatki	8
2.2.5 Mineralni dodatki	10
2.3 Sveži cementni kompoziti in njihova obdelavnost	11
2.3.1 Principi meritev	11
2.3.2 Opis nekaterih preskusov	13
<b>3 REOLOGIJA SVEŽIH CEMENTNIH KOMPOZITOV</b>	<b>16</b>
3.1 Sveži cementni kompozit – tekočina	16
3.1.1 Opis tekočine	17
3.1.2 Konstitutivne enačbe za tok tekočine	17
3.1.3 Vrste tekočin	18
3.1.4 Modeli za opis tekočin	20
3.1.5 Viskoznost	21
3.1.6 Napetost na meji tečenja	24
3.2 Reološke meritve tekočin in merilna oprema	25
3.2.1 Uvod	25
3.2.2 Reometri	25
3.2.3 Koaksialni valjasti reometri	26
3.2.4 Posebnosti in napake koaksialnih valjastih reometrov	31
3.3 Merilna oprema za merjenje reoloških lastnosti svežih cementnih kompozitov	35
3.3.1 Koaksialni valjasti reometri	36
3.3.2 Reometri z vzporednimi ploščami	39
3.3.3 Mešalni reometri z rotorjem	41
<b>4 PREGLED LITERATURE S PODROČJA REOLOŠKIH PREISKAV IN ANALIZ REZULTATOV TEH PREISKAV</b>	<b>46</b>
4.1 Primerjava reometrov	46
4.2 Primerjava med betonom in malto	48

4.3	Primerjava med reološkimi lastnostmi betonov in malt s standardnimi metodami obdelavnosti	50
4.4	Vpliv posameznih sestavin na reologijo betonov	51
4.4.1	Vpliv vode	52
4.4.2	Cement	53
4.4.3	Aerant	53
4.4.4	Plastifikator in superplastifikator	54
4.4.5	Stabilizator	54
4.4.6	Mikro silika	55
4.4.7	Žlindra	55
4.4.8	Tuf	56
4.4.9	Kameni agregat	56
4.5	Pregled uporabljenih statističnih metod	58
<b>5</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL</b>	<b>59</b>
5.1	Uvod	59
5.2	Materiali	59
5.2.1	Cement	59
5.2.2	Agregat	60
5.2.3	Mineralni dodatki	62
5.2.4	Kemijski dodatki	64
5.3	Projektirane mešanice	65
5.3.1	Beton	65
5.3.2	Malta in metoda CEM	67
5.3.3	Vrednotenje metode CEM	70
5.4	Meritve obdelavnosti	72
5.5	Reološke meritve	75
5.6	Postopki meritev	76
5.6.1	Mešanje betona in malte	77
5.6.2	Meritve	77
5.7	Umerjanje s silikonskim oljem	78
5.7.1	Silikonsko olje	78
5.7.2	Meritve plastične viskoznosti silikonskega olja v veliki posodi ICAR Rheometer	81
5.7.3	Meritve plastične viskoznosti silikonskega olja v mali posodi ICAR Rheometer	82
5.7.4	Meritve plastične viskoznosti silikonskega olja v reometru ConTec Viscometer 5	82
5.7.5	Primerjava rezultatov viskoznosti pridobljenih na različnih napravah	83
5.7.6	Ponovljivost meritev viskoznosti silikonskega olja z reometrom ICAR Rheometer	84
<b>6</b>	<b>REZULTATI MERITEV IN ANALIZ</b>	<b>86</b>
6.1	Rezultati meritev reoloških lastnosti betonov	86
6.1.1	Običajni betoni	86
6.1.2	Malte ekvivalentne običajnemu betonu (CEM)	89
6.1.3	Betoni SCC	92
6.1.4	Malte SCC CEM	93
6.2	Primerjava reometrov	95
6.2.1	Običajni betoni	97
6.2.2	Malte ekvivalentne običajnemu betonu (malte CEM)	101
6.2.3	Betoni SCC	105
6.2.4	Malte SCC CEM	111
6.3	Primerjava med betonom in njemu ekvivalentno malto	118
6.3.1	Običajni beton in malta	119
6.3.2	Beton SCC in malta SCC CEM	123
6.4	Primerjava rezultatov reoloških meritev z rezultati meritev obdelavnosti	126
6.4.1	Običajni betoni	127
6.4.2	Običajne malte	128

6.4.3	Beton SCC	130
6.4.4	Malte SCC	131
6.5	Vpliv količine posameznih sestavin na reologijo svežega betona	133
6.5.1	Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja	134
6.5.2	Vpliv količine aeranta	135
6.5.3	Vpliv vodocementnega razmerja	136
6.5.4	Vpliv stabilizatorja	136
6.5.5	Vpliv zamenjave cementa z mikro siliko	137
6.5.6	Vpliv zamenjave cementa z žlindro	138
6.5.7	Vpliv zamenjave cementa s tufom	139
6.5.8	Vpliv vrste superplastifikatorja	140
6.5.9	Vpliv zmanjšanja količine kamene moke in povečanja količine stabilizatorja	141
6.6	Povezava med časovnim spreminjanjem reoloških parametrov svežih betonov in njim ekvivalentnih malt	142
<b>7</b>	<b>DISKUSIJA</b>	<b>149</b>
7.1	Primerjava reometrov	149
7.2	Primerjava med betonom in njemu ekvivalentno malto	151
7.3	Primerjava reoloških meritev z meritvami obdelavnostmi	152
7.4	Vpliv količine posameznih sestavin na reologijo svežega betona	153
7.5	Časovno spreminjanje reoloških parametrov svežih betonov in njim ekvivalentnih malt	154
<b>8</b>	<b>PRISPEVKI DISERTACIJE IN PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO</b>	<b>156</b>
8.1	Prispevki disertacije	156
8.2	Priporočila za nadaljnje delo	158
<b>VIRI</b>		<b>159</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Razredi preskusov obdelavnosti svežega betona (Koehler in Fowler, 2003).	12
Preglednica 2: NIST kategorizacija preskusov obdelavnosti svežega betona (Hackley in Ferraris, 2001).	13
Preglednica 3: Karakteristike cementov.	60
Preglednica 4: Presevki vseh frakcij v %.	62
Preglednica 5: Gostote in specifične površine mineralnih dodatkov.	64
Preglednica 6: Kemijski dodatki.	65
Preglednica 7: Sestava mešanic običajnega betona.	66
Preglednica 8: Sestava mešanic betona SCC.	67
Preglednica 9: Sestava mešanic malt CEM.	68
Preglednica 10: Sestava mešanic malt CEM.	69
Preglednica 11: Izračun specifične površine frakcije 0/2 mm.	69
Preglednica 12: Pregled različnih pristopov za vrednotenje metode CEM na podlagi metod obdelavnosti.	71
Preglednica 13: Viskoznost silikonskega olja ob različnih temperaturah.	81
Preglednica 14: Rezultati meritev viskoznosti silikonskega olja v veliki posodi ICAR Rheometer.	82
Preglednica 15: Rezultati meritev viskoznosti silikonskega olja v mali posodi ICAR Rheometer.	82
Preglednica 16: Preglednica ANOVA za meritve v veliki posodi.	84
Preglednica 17: Preglednica ANOVA za meritve v mali posodi.	84
Preglednica 18: Rezultati vseh meritev viskoznosti silikonskega olja v veliki posodi.	85
Preglednica 19: Rezultati vseh meritev viskoznosti silikonskega olja v mali posodi.	85
Preglednica 20: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za običajne betone v času 0 minut.	88
Preglednica 21: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev malt CEM za običajne betone, čas 0 min.	91
Preglednica 22: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za betone SCC, čas 0 minut.	92
Preglednica 23: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za malte SCC CEM, čas 0 minut.	95
Preglednica 24: Vpliv števila ponovitev na koeficient determinacije med reometroma, običajni betoni.	98
Preglednica 25: Preglednica ANOVA za dva faktorja, običajni betoni, spremenljivka $\tau_0$ .	99
Preglednica 26: Preglednica ANOVA za dva faktorja, običajni betoni, spremenljivka $\mu$ .	99
Preglednica 27: Rezultati ANOVA, običajni betoni, reometer ConTec, spremenljivka $\tau_0$ .	100
Preglednica 28: Rezultati ANOVA, običajni betoni, reometer ICAR, spremenljivka $\tau_0$ .	100
Preglednica 29: Rezultati ANOVA, običajni betoni, reometer ConTec, spremenljivka $\mu$ .	100
Preglednica 30: Rezultati ANOVA, običajni betoni, reometer ICAR, spremenljivka $\mu$ .	100
Preglednica 31: Preglednica ANOVA za dva faktorja, običajni betoni, umerjeni rezultati, spremenljivka $\tau_0$ .	101

---

Preglednica 32: Preglednica ANOVA za dva faktorja, običajni betoni, umerjeni rezultati, spremenljivka $\mu$ .	101
Preglednica 33: Vpliv števila ponovitev na koeficient determinacije med reometroma, običajne malte CEM.	102
Preglednica 34: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte CEM, spremenljivka $\tau_0$ .	103
Preglednica 35: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte CEM, spremenljivka $\mu$ .	103
Preglednica 36: Rezultati ANOVA, malte CEM, reometer ConTec, spremenljivka $\tau_0$ .	104
Preglednica 37: Rezultati ANOVA, malte CEM, reometer ICAR, spremenljivka $\tau_0$ .	104
Preglednica 38: Rezultati ANOVA, malte CEM, reometer ConTec, spremenljivka $\mu$ .	104
Preglednica 39: Rezultati ANOVA, malte CEM, reometer ICAR, spremenljivka $\mu$ .	104
Preglednica 40: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte CEM, umerjeni rezultati, spremenljivka $\tau_0$ .	105
Preglednica 41: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte CEM, umerjeni rezultati, spremenljivka $\mu$ .	105
Preglednica 42: Vpliv števila ponovitev na koeficient determinacije med reometroma, betoni SCC.	106
Preglednica 43: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC, spremenljivka $\tau_0$ .	107
Preglednica 44: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC, spremenljivka $\mu$ .	107
Preglednica 45: Rezultati ANOVA, betoni SCC, reometer ConTec, spremenljivka $\tau_0$ .	108
Preglednica 46: Rezultati ANOVA, betoni SCC, reometer ICAR, spremenljivka $\tau_0$ .	108
Preglednica 47: Rezultati ANOVA, betoni SCC, reometer ConTec, spremenljivka $\mu$ .	108
Preglednica 48: Rezultati ANOVA, betoni SCC, reometer ICAR, spremenljivka $\mu$ .	108
Preglednica 49: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC brez SCCR1, spremenljivka $\tau_0$ .	109
Preglednica 50: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC brez SCCR1, spremenljivka $\mu$ .	109
Preglednica 51: Rezultati ANOVA, betoni SCC brez SCCR1, reometer ConTec, spremenljivka $\tau_0$ .	110
Preglednica 52: Rezultati ANOVA, betoni SCC brez SCCR1, reometer ICAR, spremenljivka $\tau_0$ .	110
Preglednica 53: Rezultati ANOVA, betoni SCC brez SCCR1, reometer ConTec, spremenljivka $\mu$ .	110
Preglednica 54: Rezultati ANOVA, betoni SCC brez SCCR1, reometer ICAR, spremenljivka $\mu$ .	110
Preglednica 55: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC brez SCCR1, umerjeni rezultati, spremenljivka $\tau_0$ .	111
Preglednica 56: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC brez SCCR1, umerjeni rezultati, spremenljivka $\mu$ .	111
Preglednica 57: Vpliv števila ponovitev na koeficient determinacije med reometroma, malte SCC CEM.	112
Preglednica 58: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, spremenljivka $\tau_0$ .	113
Preglednica 59: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, spremenljivka $\mu$ .	113
Preglednica 60: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ConTec, spremenljivka $\tau_0$ .	114
Preglednica 61: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ICAR, spremenljivka $\tau_0$ .	114
Preglednica 62: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ConTec, spremenljivka $\mu$ .	114
Preglednica 63: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ICAR, spremenljivka $\mu$ .	114



---

Preglednica 64: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, umerjeni rezultati, spremenljivka $\mu$ .	115
Preglednica 65: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, popravljene rezultati, spremenljivka $\tau_0$ .	116
Preglednica 66: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, popravljene rezultati, spremenljivka $\mu$ .	116
Preglednica 67: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ConTec, popravljene rezultati, spremenljivka $\tau_0$ .	117
Preglednica 68: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ICAR, popravljene rezultati, spremenljivka $\mu$ .	117
Preglednica 69: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, popravljene in umerjene rezultati, spremenljivka $\tau_0$ .	118
Preglednica 70: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, popravljene in umerjene rezultati, spremenljivka $\mu$ .	118
Preglednica 71: Razlezi betona in malte CEM, ter razlika do pričakovanega razleza malte CEM.	121
Preglednica 72: Vpliv izločanja mešanic na korelacijo med betonom in malto CEM.	122
Preglednica 73: Razlezi s posedom betona SCC in malte SCC CEM, ter razlika do pričakovanega razleza s posedom malte SCC CEM.	125

## KAZALO SLIK

Slika 1:	Hookov zakon za primer striga.	17
Slika 2:	Modeli za opis različnih vrst obnašanja tekočin (Koehler in Fowler, 2004).	19
Slika 3:	Skica modela koaksialnih valjev.	27
Slika 4:	Pogled z vrha na model koaksialnih valjev.	28
Slika 5:	Deformacija elementa tekočine.	29
Slika 6:	Tok Binghamovske tekočine v koaksialnem valjastem reometru. Na levi strani je primer brez mrtvega območja, na desni je primer z mrtvim območjem (Koehler in Fowler, 2004).	33
Slika 7:	BML Viscometer 3 (levo) (Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003) in ConTec Viscometer 5 (desno).	37
Slika 8:	CEMAGREF – IMG reometer (Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003).	38
Slika 9:	Schleibinger Viscomat NT (levo), nastavek v obliki košare (sredina), nastavek koaksialnih valjev (desno) (Schleibinger, 2013b).	39
Slika 10:	BTRHEOM reometer z vzporednimi ploščami (Ferraris in Brower, 2001).	40
Slika 11:	Sistem Coplete 5 dveh vzporednih plošč (Wallevik, 2009a; Wallevik, 2009b).	40
Slika 12:	ICAR Rheometer (foto: osebni arhiv).	41
Slika 13:	Tattersall Two-point reometer, levo naprava, desno mešalo (Tattersall in Banfill, 1983).	42
Slika 14:	IBB reometer, desno prenosna verzija (Ferraris in Brower, 2001).	43
Slika 15:	ConTec Rheometer-4SCC (Wallevik, 2009b).	43
Slika 16:	ConTec Rheomixer, desno mešalo (ConTec, 2013).	44
Slika 17:	BT SCC Rheometer for fresh concrete, verzija eBT2 (Schleibinger, 2013a).	44
Slika 18:	Reometer FCT – 101 (FCT-101, 2013).	45
Slika 19:	"Reograf" – $\tau_0/\mu$ diagram (Wallevik, 2009b).	52
Slika 20:	Vpliv vode na vrednosti $\tau_0/\mu$ (Wallevik, 2009b).	52
Slika 21:	Vpliv količine cementa na vrednosti $\tau_0/\mu$ (Wallevik, 2009b).	53
Slika 22:	Vpliv aeranta na vrednosti $\tau_0/\mu$ (Wallevik, 2009b).	53
Slika 23:	Vpliv plastifikatorja na vrednosti $\tau_0/\mu$ (Wallevik, 2009b).	54
Slika 24:	Vpliv stabilizatorja in mikro silike na vrednosti $\tau_0/\mu$ (Wallevik, 2009b).	55
Slika 25:	Vpliv oblike agregata na vrednosti $\tau_0/\mu$ (Wallevik, 2009b).	57
Slika 26:	Vpliv zrnastostne krivulje peska na vrednosti $\tau_0/\mu$ (Wallevik, 2009b).	57
Slika 27:	Sejalne krivulje agregata za običajne betone.	61
Slika 28:	Sejalne krivulje za betone SCC.	61
Slika 29:	Mikro silika.	62
Slika 30:	Mleta granulirana plavžna žindra.	63
Slika 31:	Zeolitni tuf.	63
Slika 32:	Kamena moka.	64
Slika 33:	Oprema za preskus poseda ( <a href="http://www.alibaba.com">http://www.alibaba.com</a> ).	73

Slika 34: Oprema za preskus razleza ( <a href="http://www.reliancelab.co.za/concrete-flow-table/">http://www.reliancelab.co.za/concrete-flow-table/</a> ).	73
Slika 35: Oprema za preskus razleza malte ( <a href="http://www.matest.com">http://www.matest.com</a> ).	74
Slika 36: Primer meritve in postopka obdelave rezultatov za beton SCC s pojavom strižne zgoščanja.	76
Slika 37: Reometer Anton Paar MCR ( <a href="http://www.anton-paar.com">www.anton-paar.com</a> )	79
Slika 38: Reološki parametri silikonskega olja v odvisnosti od strižne hitrosti, velik razpon strižnih hitrosti.	80
Slika 39: Reološki parametri silikonskega olja v odvisnosti od strižne hitrosti, manjši razpon strižnih hitrosti.	80
Slika 40: Viskoznost silikonskega olja v odvisnosti od temperature.	81
Slika 41: Primerjava rezultatov meritev viskoznosti silikonskega olja.	83
Slika 42: Strižne napetosti na meji tečenja in posed običajnih betonov, čas 0 min.	87
Slika 43: Plastične viskoznosti običajnih betonov, čas 0 min.	87
Slika 44: Korelacija med posedom in razliko med vrednostmi reoloških parametrov izmerjenimi z različnimi reometri.	89
Slika 45: Strižne napetosti na meji tečenja in razlezi malt ekvivalentnih običajnim betonom, čas 0 min.	90
Slika 46: Plastične viskoznosti malt ekvivalentnih običajnim betonom, čas 0 min.	90
Slika 47: Strižne napetosti na meji tečenja in razlez s posedom betonov SCC, čas 0 min.	93
Slika 48: Plastične viskoznosti betonov SCC, čas 0 min.	93
Slika 49: Strižne napetosti na meji tečenja in razlezi malt ekvivalentnih betonov SCC, čas 0 min.	94
Slika 50: Plastične viskoznosti malt ekvivalentnih betonov SCC, čas 0 min.	95
Slika 51: Linearna regresija primerjave strižnih napetosti na meji tečenja za običajne betone.	98
Slika 52: Linearna regresija primerjave plastičnih viskoznosti za običajne betone.	98
Slika 53: Linearna regresija primerjave strižnih napetosti na meji tečenja za običajne malte CEM.	102
Slika 54: Linearna regresija primerjave plastičnih viskoznosti za običajne malte CEM.	102
Slika 55: Linearna regresija primerjave strižnih napetosti na meji tečenja za betone SCC.	106
Slika 56: Linearna regresija primerjave plastičnih viskoznosti za betone SCC.	106
Slika 57: Linearna regresija primerjave strižnih napetosti na meji tečenja za malte SCC CEM.	112
Slika 58: Linearna regresija primerjave plastičnih viskoznosti za malte SCC CEM.	112
Slika 59: Rezultati vrednosti razleza običajnega betona in malt CEM, čas 0 min.	119
Slika 60: Rezultati strižnih napetosti na meji tečenja običajnega betona in malt CEM, čas 0 min.	120
Slika 61: Rezultati plastičnih viskoznosti običajnega betona in malt CEM, čas 0 min.	120
Slika 62: Korelacija strižnih napetosti na meji tečenja betona in malte CEM, pred in po izločitvi mešanic.	122
Slika 63: Korelacija plastičnih viskoznosti betona in malte CEM, pred in po izločitvi mešanic.	123
Slika 64: Rezultati vrednosti razleza s posedom betona SCC in malt SCC CEM, čas 0 min.	124
Slika 65: Rezultati strižnih napetosti na meji tečenja betona SCC in malt SCC CEM, čas 0 min.	124
Slika 66: Rezultati plastičnih viskoznosti betona SCC in malt SCC CEM, čas 0 min.	125

---

Slika 67: Korelacija strižnih napetosti na meji tečenja betona SCC in malte SCC CEM.	126
Slika 68: Korelacija plastičnih viskoznosti na meji tečenja betona SCC in malte SCC CEM.	126
Slika 69: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za običajne betone, ConTec.	127
Slika 70: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za običajne betone, ICAR.	127
Slika 71: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za običajne betone, ConTec.	128
Slika 72: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za običajne betone, ICAR.	128
Slika 73: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za običajne malte, ConTec.	129
Slika 74: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za običajne malte, ICAR.	129
Slika 75: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za običajne malte, ConTec.	130
Slika 76: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za običajne malte, ICAR.	130
Slika 77: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za betone SCC.	131
Slika 78: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za betone SCC.	131
Slika 79: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za malte SCC, ConTec.	132
Slika 80: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za malte SCC, ICAR.	132
Slika 81: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za malte SCC, ConTec.	133
Slika 82: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za malte SCC, ICAR.	133
Slika 83: Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti betona.	134
Slika 84: Vpliv količine aeranta na reološke lastnosti betona.	135
Slika 85: Vpliv vodocementnega razmerja na reološke lastnosti betona.	136
Slika 86: Vpliv količine stabilizatorja na reološke lastnosti betona.	137
Slika 87: Vpliv stopnje zamenjave cementa z mikro siliko na reološke lastnosti betona.	137
Slika 88: Vpliv stopnje zamenjave cementa z žlindro na reološke lastnosti betona.	138
Slika 89: Vpliv stopnje zamenjave cementa s tufom na reološke lastnosti betona.	139
Slika 90: Vpliv vodocementnega razmerja na reološke lastnosti betona.	140
Slika 91: Vpliv vodocementnega razmerja na reološke lastnosti betona.	141
Slika 92: Mešanici CL1C in ML1C, vsebujeta superplastifikator.	143
Slika 93: Mešanici CRA1B in MRA1B, vsebujeta aerant.	143
Slika 94: Mešanici CG1C in MG1C, vsebujeta stabilizator.	144
Slika 95: Mešanici CV1A in MV1A, s spremenjenim V/C razmerjem.	145
Slika 96: Mešanici CZ1B in MZ1B, vsebujeta žlindro.	145
Slika 97: Mešanici CM1B in MM1B, vsebujeta mikro siliko.	146
Slika 98: Mešanici CT1A in MT1A, vsebujeta tuf.	147
Slika 99: Mešanici SCCM4 in SCCMM4, vsebujeta stabilizator.	148
Slika 100: Mešanici SCCR4B in SCCMR4B, vsebujeta superplastifikator.	148

**LIST OF TABLES**

Table 1:	Classes of fresh concrete workability measurement (Koehler in Fowler, 2003).	12
Table 2:	NIST categorization of fresh concrete workability tests (Hackley in Ferraris, 2001).	13
Table 3:	Cement characteristics.	60
Table 4:	Passing through sieves for all fractions in %.	62
Table 5:	Densities and specific surfaces of mineral additives.	64
Table 6:	Chemical admixtures.	65
Table 7:	Proportions of normal concrete mixtures.	66
Table 8:	Proportions of SCC mixtures.	67
Table 9:	Proportions of CEM mortars.	68
Table 10:	Proportions of CEM mortars.	69
Table 11:	Example of calculation of specific surface of fraction 0/2 mm.	69
Table 12:	Review of different principles for evaluation of CEM method on the basis of workability methods.	71
Table 13:	Viscosity of silicon oil at different temperatures.	81
Table 14:	Results of measurements of viscosity of silicon oil in large container of ICAR Rheometer.	82
Table 15:	Results of measurements of viscosity of silicon oil in the small container of ICAR Rheometer.	82
Table 16:	Table ANOVA for measurements in large container.	84
Table 17:	Table ANOVA for measurements in small container.	84
Table 18:	Results of all measurements of viscosity of silicon oil in large container.	85
Table 19:	Results of all measurements of viscosity of silicon oil in small container.	85
Table 20:	Results of workability and rheological measurements of normal concretes at time 0 minutes.	88
Table 21:	Results of workability and rheology of CEM mortars of normal concretes, time 0 min.	91
Table 22:	Results of workability and rheological measurements for SCC, time 0 minutes.	92
Table 23:	Results of workability and rheological measurements for SCC CEM, time 0 minutes.	95
Table 24:	Effect of number of repetitions on coefficient of determination, normal concretes.	98
Table 25:	ANOVA table for two factors, normal concretes, variable $\tau_0$ .	99
Table 26:	ANOVA table for two factors, normal concretes, variable $\mu$ .	99
Table 27:	ANOVA results, normal concretes, rheometer ConTec, variable $\tau_0$ .	100
Table 28:	ANOVA results, normal concretes, rheometer ICAR, variable $\tau_0$ .	100
Table 29:	ANOVA results, normal concretes, rheometer ConTec, variable $\mu$ .	100
Table 30:	ANOVA results, normal concretes, rheometer ICAR, variable $\mu$ .	100
Table 31:	ANOVA table for two factors, normal concretes, calibrated results, variable $\tau_0$ .	101
Table 32:	ANOVA table for two factors, normal concretes, calibrated results, variable $\mu$ .	101
Table 33:	Effect of number of repetitions on coefficient of determination, normal CEM mortars.	102

---

Table 34: ANOVA table for two factors, CEM mortars, variable $\tau_0$ .	103
Table 35: ANOVA table for two factors, CEM mortars, variable $\mu$ .	103
Table 36: ANOVA results, CEM mortars, rheometer ConTec, variable $\tau_0$ .	104
Table 37: ANOVA results, CEM mortars, rheometer ICAR, variable $\tau_0$ .	104
Table 38: ANOVA results, CEM mortars, rheometer ConTec, variable $\mu$ .	104
Table 39: ANOVA results, CEM mortars, rheometer ICAR, variable $\mu$ .	104
Table 40: ANOVA table for two factors, CEM mortars, calibrated results, variable $\tau_0$ .	105
Table 41: ANOVA table for two factors, CEM mortars, calibrated results, variable $\mu$ .	105
Table 42: Effect of number of repetitions on coefficient of determination, SCC concretes.	106
Table 43: ANOVA table for two factors, SCC concretes, variable $\tau_0$ .	107
Table 44: ANOVA table for two factors, SCC concretes, variable $\mu$ .	107
Table 45: ANOVA results, SCC concretes, rheometer ConTec, variable $\tau_0$ .	108
Table 46: ANOVA results, SCC concretes, rheometer ICAR, variable $\tau_0$ .	108
Table 47: ANOVA results, SCC concretes, rheometer ConTec, variable $\mu$ .	108
Table 48: ANOVA results, SCC concretes, rheometer ICAR, variable $\mu$ .	108
Table 49: ANOVA table for two factors, SCC concretes without SCCR1, variable $\tau_0$ .	109
Table 50: ANOVA table for two factors, SCC concretes without SCCR1, variable $\mu$ .	109
Table 51: ANOVA results, SCC concretes without SCCR1, rheometer ConTec, variable $\tau_0$ .	110
Table 52: ANOVA results, SCC concretes without SCCR1, rheometer ICAR, variable $\tau_0$ .	110
Table 53: ANOVA results, SCC concretes without SCCR1, rheometer ConTec, variable $\mu$ .	110
Table 54: ANOVA results, SCC concretes without SCCR1, rheometer ICAR, variable $\mu$ .	110
Table 55: ANOVA table for two factors, SCC concretes without SCCR1, calibrated results, variable $\tau_0$ .	111
Table 56: ANOVA table for two factors, SCC concretes without SCCR1, calibrated results, variable $\mu$ .	111
Table 57: Effect of number of repetitions on coefficient of determination, SCC CEM mortars.	112
Table 58: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, variable $\tau_0$ .	113
Table 59: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, variable $\mu$ .	113
Table 60: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ConTec, variable $\tau_0$ .	114
Table 61: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ICAR, variable $\tau_0$ .	114
Table 62: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ConTec, variable $\mu$ .	114
Table 63: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ICAR, variable $\mu$ .	114
Table 64: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, calibrated results, variable $\mu$ .	115
Table 65: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, corrected results, variable $\tau_0$ .	116
Table 66: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, corrected results, variable $\mu$ .	116
Table 67: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ConTec, corrected results, variable $\tau_0$ .	117
Table 68: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ICAR, corrected results, variable $\mu$ .	117

---

Table 69: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, corrected and calibrated results, variable $\tau_0$ .	118
Table 70: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, corrected and calibrated results, variable $\mu$ .	118
Table 71: Flow spread values of concretes and CEM mortars, and difference to expected flow of CEM.	121
Table 72: Effect of eliminating mixtures on correlation of concrete and CEM mortar.	122
Table 73: Slump flow values of SCC and SCC CEM mortars, and difference to expected slump flow of SCC CEM.	125

## LIST OF FIGURES

Figure 1: Hooke's law for shear.	17
Figure 2: Models to describe different types of fluid behavior (Koehler in Fowler, 2004).	19
Figure 3: Sketch of coaxial cylinders model.	27
Figure 4: Top view of coaxial cylinders model.	28
Figure 5: Deformation of fluid element.	29
Figure 6: Flow of Bingham liquid in coaxial cylinders rheometer. On the left side is example with no dead zone, on the rightside is example with dead zone (Koehler in Fowler, 2004).	33
Figure 7: BML Viscometer 3 (left) (Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003) and ConTec Viscometer 5 (right).	37
Figure 8: CEMAGREF – IMG rheometer(Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003).	38
Figure 9: Schleibinger Viscomat NT (left), basket probe (middle), coaxial cylinders probe (right) (Schleibinger, 2013b).	39
Figure 10: BTRHEOM rheometer with parallel plates (Ferraris in Brower, 2001).	40
Figure 11: System Copleat 5 of two parallel plates (Wallevik, 2009a; Wallevik, 2009b).	40
Figure 12: ICAR Rheometer (photo: personal archive).	41
Figure 13: Tattersall Two-point rheometer, left is apparatus, right is impeller (Tattersall in Banfill, 1983).	42
Figure 14: IBB rheometer, on the right portable version (Ferraris in Brower, 2001).	43
Figure 15: ConTec Rheometer-4SCC (Wallevik, 2009b).	43
Figure 16: ConTec Rheomixer, on the right is impeller (ConTec, 2013).	44
Figure 17: BT SCC Rheometer for fresh concrete, version eBT2 (Schleibinger, 2013a).	44
Figure 18: Rheometer FCT – 101 (FCT-101, 2013).	45
Figure 19: »Reograph« - $\tau_0/\mu$ diagram (Wallevik, 2009b).	52
Figure 20: Effect of water on the $\tau_0/\mu$ values (Wallevik, 2009b).	52
Figure 21: Effect of cement content on the $\tau_0/\mu$ values (Wallevik, 2009b).	53
Figure 22: Effect of air entraining on the $\tau_0/\mu$ values (Wallevik, 2009b).	53
Figure 23: Effect of plasticizer on the $\tau_0/\mu$ values (Wallevik, 2009b).	54
Figure 24: Effect of stabilizers and silica fume on the $\tau_0/\mu$ values (Wallevik, 2009b).	55
Figure 25: Effect of aggregate shape on the $\tau_0/\mu$ values (Wallevik, 2009b).	57
Figure 26: Effect of particle size distribution of sand on the $\tau_0/\mu$ values (Wallevik, 2009b).	57
Figure 27: Aggregate grading for normal concretes.	61
Figure 28: Aggregate grading for SCC.	61
Figure 29: Silica fume.	62
Figure 30: Ground granulated blast furnace slag.	63
Figure 31: Zeolite tuff.	63
Figure 32: Limestone filler.	64



Figure 33: Slump test equipment ( <a href="http://www.alibaba.com">http://www.alibaba.com</a> ).	73
Figure 34: Flow table test equipment ( <a href="http://www.reliancelab.co.za/concrete-flow-table/">http://www.reliancelab.co.za/concrete-flow-table/</a> ).	73
Figure 35: Flow table test for mortar equipment ( <a href="http://www.matest.com">http://www.matest.com</a> ).	74
Figure 36: Example of measurement and data processing for SCC with shear thickening behavior.	76
Figure 37: Rheometer Anton Paar MCR ( <a href="http://www.anton-paar.com">www.anton-paar.com</a> )	79
Figure 38: Rheological parameters of silicon oil in relation to shear rate, large range of shear rates.	80
Figure 39: Rheological parameters of silicon oil in relation to shear rate, smaller range of shear rates.	80
Figure 40: Viscosity of silicon oil dependent on temperature.	81
Figure 41: Comparison of results of viscosity measurements of silicon oil.	83
Figure 42: Yield values and slump values of normal concretes, time 0 min.	87
Figure 43: Plastic viscosities of normal concretes, time 0 min.	87
Figure 44: Correlation between slump values and difference between rheological parameters measured with different rheometers.	89
Figure 45: Yield values and flow values of mortars equivalent to normal concretes, time 0 min.	90
Figure 46: Plastic viscosities of mortars equivalent to normal concretes, time 0 min.	90
Figure 47: Yield values and slump flow values of SCC, time 0 min.	93
Figure 48: Plastic viscosities of SCC concretes, time 0 min.	93
Figure 49: Yield values and slump flow values of mortars equivalent to SCC's, time 0 min.	94
Figure 50: Plastic viscosities of mortars equivalent to SCC's, time 0 min.	95
Figure 51: Linear regression of yield stress comparison for normal concretes.	98
Figure 52: Linear regression of plastic viscosity comparison for normal concretes.	98
Figure 53: Linear regression of yield stress comparison for normal CEM mortars.	102
Figure 54: Linear regression of plastic viscosity comparison for normal CEM mortars.	102
Figure 55: Linear regression of yield stress comparison for SCC concrete.	106
Figure 56: Linear regression of plastic viscosity comparison for SCC concrete.	106
Figure 57: Linear regression of yield stress comparison for SCC CEM mortars.	112
Figure 58: Linear regression of plastic viscosity comparison for SCC CEM mortars.	112
Figure 59: Results of flow values for normal concretes and its CEM mortars, time 0 min.	119
Figure 60: Results of yield stress values for normal concretes and its CEM mortars, time 0 min.	120
Figure 61: Results of plastic viscosity values for normal concretes and its CEM mortars, time 0 min.	120
Figure 62: Correlation of yield stress of concrete and CEM mortar, before and after elimination of mixtures.	122
Figure 63: Correlation of plastic viscosities of concrete and CEM mortar, before and after elimination of mixtures.	123
Figure 64: Results of slump flow values for SCC and its SCC CEM mortars, time 0 min.	124
Figure 65: Results of yield stress values for SCC and its SCC CEM mortars, time 0 min.	124

Figure 66: Results of plastic viscosity values for SCC concretes and its SCC CEM mortars, time 0 min.	125
Figure 67: Correlation of yield stress of SCC and SCC CEM mortar.	126
Figure 68: Correlation of plastic viscosities of SCC and SCC CEM mortar.	126
Figure 69: Correlation between yield stress and workability for normal concretes, ConTec.	127
Figure 70: Correlation between yield stress and workability for normal concretes, ICAR.	127
Figure 71: Correlation between plastic viscosity and workability for normal concretes, ConTec.	128
Figure 72: Correlation between plastic viscosity and workability for normal concretes, ICAR.	128
Figure 73: Correlation between yield stress and workability for normal mortars, ConTec.	129
Figure 74: Correlation between yield stress and workability for normal mortars, ICAR.	129
Figure 75: Correlation between plastic viscosity and workability for normal mortars, ConTec.	130
Figure 76: Correlation between plastic viscosity and workability for normal mortars, ICAR.	130
Figure 77: Correlation between yield stress and workability for SCC.	131
Figure 78: Correlation between plastic viscosity and workability for SCC.	131
Figure 79: Correlation between yield stress and workability for SCC mortars, ConTec.	132
Figure 80: Correlation between yield stress and workability for SCC mortars, ICAR.	132
Figure 81: Correlation between plastic viscosity and workability for SCC mortars, ConTec.	133
Figure 82: Correlation between plastic viscosity and workability for SCC mortars, ICAR.	133
Figure 83: Effect of type of cement and dosage of superplasticizer on concrete rheological properties.	134
Figure 84: Effect of dosage of air entrainer on rheological properties of concrete.	135
Figure 85: Effect of water to cement ratio on rheological properties of concrete.	136
Figure 86: Effect of dosage of stabilizer on rheological properties of concrete.	137
Figure 87: Effect of rate of substitution of cement with silica fume on rheological properties of concrete.	137
Figure 88: Effect of rate of substitution of cement with slag on rheological properties of concrete.	138
Figure 89: Effect of rate of substitution of cement with tuff on rheological properties of concrete.	139
Figure 90: Effect of water to cement ratio on rheological properties of concrete.	140
Figure 91: Effect of water to cement ratio on rheological properties of concrete.	141
Figure 92: Mixtures CL1C and ML1C, containing superplasticizer.	143
Figure 93: Mixtures CRA1B and MRA1B, containing air entrainer.	143
Figure 94: Mixtures CG1C and MG1C, containing stabilizer.	144
Figure 95: Mixtures CV1A and MV1A, with different W/C ratio.	145
Figure 96: Mixtures CZ1B and MZ1B, containing slag.	145
Figure 97: Mixtures CM1B and MM1B, containing silica fume.	146
Figure 98: Mixtures CT1A and MT1A, containing tuff.	147
Figure 99: Mixtures SCCM4 and SCCMM4, containing stabilizer.	148
Figure 100: Mixtures SCCR4B and SCCMR4B, containing superplasticizer.	148

---

**KRATICE**

AE	Aerant (air entrainer)
ANOVA	Analysis of variance (analiza variance)
CEM	Concrete equivalent mortar (betonu ekvivalentna malta)
ICAR	International center for aggregate research
NIST	National Institute of Standards and Technology
povp	Povprečna vrednost (aritmetična sredina)
RILEM	Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux (International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures)
SCC	Self compacting concrete (samozgoščevalni beton)
SIST	Slovenski inštitut za standardizacijo
SNMT	Strižna napetost na meji tečenja
SP	Superplastifikator
ST	Stabilizator
V/C razmerje	Vodocementno razmerje
Visco 5	ConTec Viscometer 5

## SLOVAR REOLOŠKIH IZRAZOV

Slovar je delno povzet iz knjige Zupančič Valantove (Zupančič Valant, 2007) ter iz druge literature uporabljene v disertaciji.

Pojem	Angleški izraz	Opis
Binhamov model	Bingham model	Model za opis reološkega obnašanja betona. Opisuje elastično trdno obnašanje tekočine, dokler ni presežena mejna napetost. Nad strižno napetostjo sta strižna hitrost in strižna napetost linearno povezani.
Deformacija	Deformation	Sprememba oblike ali prostornine ali obeh.
Dilatantnost (Strižno zgoščanje)	Dilatancy (Shear thickening)	V reologiji pomeni strižno odvisno naraščanje viskoznosti z naraščanjem strižne hitrosti.
Model Herschel – Bulkley	Herchel Bulkley model	Model za opis betona, ki se strižno zgošča.
Konsistenca	Consistency	Pojem za lastnost materiala s katero se ta upira spremembi oblike.
Plastična viskoznost	Plastic viscosity	V Binghamovski tekočini je to presežek strižne napetosti nad mejno napetostjo, deljen s strižno hitrostjo.
Posed, razlez, posed z razlezom	Slump, spread, slump flow	Metode obdelavnosti.
Pseudoplastičnost (Strižno redčenje)	Pseudo plasticity (Shear thinning)	Strižno odvisno zmanjševanje viskoznosti z naraščanjem strižne hitrosti.
Reologija	Rheology	Veda, ki preučuje deformacijo in tok snovi.
Reometer	Rheometer	Naprava za merjenje reoloških lastnosti snovi.
Strižna deformacija	Shear strain	Deformacija pod pogoji delovanja striga.
Strižna hitrost	Shear rate	Sprememba hitrosti med dvema valjema. Izrazimo jo s pomočjo gradienta tangencialnih hitrosti tekočine v območju med valjema.
Strižna napetost	Shear stress	Napetost, ki jo v sveži mešanici povzroča vrtenje in mešanje vzorca v posodi reometra.
Strižna napetost na meji tečenja (mejna napetost)	Yield value (Yield stress)	Strižna napetost pri kateri pride do prehoda med elastično in plastično deformacijo in v strižni tok.
Tokovna krivulja	Flow curve	Krivulja, ki opisuje odvisnost med strižno hitrostjo in strižno napetostjo.
Viskoznost	Viscosity	Lastnost snovi, da se pri delovanju striga upira strižni deformaciji in strižni hitrosti. To je kvocient med strižno napetostjo in strižno hitrostjo.

»Ta stran je namenoma prazna«

## 1 UVOD

### 1.1 Splošno

Zaradi dobrih obdelavnih lastnosti v svežem stanju, ki omogočajo praktično neomejeno oblikovanje in visoke tlačne trdnosti, je postal portland cementni beton (v nadaljevanju beton) najpomembnejši material našega časa. Uporablja se za gradnjo premostitvenih objektov, v gradnji cest, v visokogradnji in pri gradnji posebnih objektov, kot so pregrade hidroelektrarn, čistilne naprave, odlagališča radioaktivnih odpadkov in podobno.

Kljub temu, da je beton pogosto in dobro obravnavan v šolah, ter da je vsem dobro znan material, o njem še ne vemo vsega. Na gradbiščih in na betonarnah se še vedno dnevno srečujemo s težavami, povezanimi z betonom, tudi če ne gre za mešanice s posebnimi lastnostmi ali za vpeljavo napredne tehnologije betona v gradbeno prakso. Še večje težave pa lahko pričakujemo pri proizvodnji, transportu in/ali vgradnji posebnih betonov, kot so na primer s polimeri modificirani betoni, lahkovgradljivi betoni, samozgoščevalni betoni ter pri betonih, v katerih del portland cementa nadomestimo z odpadnim materialom iz drugih obratov, kot so elektrofiltrski pepel, mleta granulirana plavžna žlindra in apnenčeva moka, pridobljena z odpraševanjem drobljenega agregata. V prihodnosti pa pričakujemo tudi uporabo veziv, v katerih cementni klinker v večjem delu zamenjujejo predvsem pucolanski materiali, saj taka veziva zmanjšajo škodljive izpuste cementarn v okolje.

Ravno zato so se, po desetletjih osredotočanja na izboljšanje lastnosti betona v strjenem stanju, raziskave na področju betona pred kratkim močno usmerile na področje proizvodnje betonov z natančneje definiranimi lastnostmi v svežem stanju ter načina njihovega transporta in učinkovite vgradnje, z namenom zagotoviti izdelavo trajnih, čim bolj ekološko sprejemljivih in ekonomičnih konstrukcij.

Proizvodnja, rokovanje, vgradnja in zgoščevanje svežega betona močno vplivajo na lastnosti strjenega betona, zaradi česar je potrebno najprej določiti ustrezne lastnosti sveže betonske mešanice in potem doseganje zahtevanih lastnosti preveriti z ustreznimi preskusnimi metodami. Od začetka sodobne uporabe betona so se za preverjanje doseganja zahtevanih lastnosti svežega betona uporabljale različne preskusne metode in postopki za oceno obdelavnosti svežega betona. Najbolj učinkovite med njimi so se ohranile do danes. Novi materiali in tehnologije na področju betona pa seveda spodbujajo razvoj novih preskusnih metod in opreme, bolj zmogljivih in/ali primernih za natančnejše ovrednotenje posebnih lastnosti svežega betona ter za obvladovanje prihajajočih izzivov. Pri samozgoščevalnih betonih so to npr. razlez s posedom, iztekanje iz V-lijaka, preskus z L-zabojem idr. Čeprav so preskusne metode za ovrednotenje obdelavnosti svežih betonov, ki jih uporabljamo v laboratoriju

in/ali na terenu, relativno enostavne, pa je za učinkovito vrednotenje zahtevanih lastnosti betona v svežem stanju velikokrat potrebno uporabiti kombinacijo več preskusnih metod. To velja predvsem za betone s posebnimi lastnostmi v svežem stanju (lahkovgradljivi, samozgoščevalni), ki se jih zaradi mnogih prednosti (hitrejša gradnja, manjša poraba energije, prijaznejše delovno okolje, ...) v praksi vse več uporablja. Zato je želja te metode zamenjati z eno samo, vendar istočasno dovolj učinkovito preskusno metodo. Predvideva se, da bi to lahko bilo merjenje reoloških parametrov sveže betonske mešanice, to je strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti, z reometrom za beton.

Zato je zadnjih nekaj let opaziti intenziven razvoj vede o reoloških lastnostih svežih cementnih kompozitov, od cementnih past do betonov, v okviru katere poteka tudi razvoj preskusne opreme in metod za določitev reoloških parametrov teh suspenzij. Nekatere od preiskav so primerne le za laboratorijsko preizkušanje, druge pa tudi za delo na terenu. Pregled preiskav reoloških lastnosti cementnih kompozitov so podali različni avtorji, npr. (Bartos et al., 2002) ter (Koehler in Fowler, 2003). Laboratorijske preiskave so prvenstveno namenjene razvoju novih betonskih mešanic, določitvi sestave betona in natančnejšemu vrednotenju njihovih lastnosti. Preizkušanje na terenu pa je praviloma namenjeno preverjanju, ali sveža betonska mešanica dosega zahtevane lastnosti pred vgradnjo v opaže ali pred nanašanjem na podlago (brizgani beton).

Reološke preiskave betonov v svetu niso več v začetni fazi, vendar je na tem področju še veliko odprtih vprašanj. Pri betonih gre za kompleksno suspenzijo delcev: delci grobega agregata so razpršeni v malti, malta ima delce drobnega agregata razpršene v pasti, pasta pa cementne in ostale praškaste delce razpršene v vodi. Zato tudi razvoj ustrezne preskusne opreme ni bil enostaven in zdi se, da je šele v zadnjih nekaj letih na trg prišla oprema, ki bi lahko bila široko uporabna za laboratorijske preiskave reoloških lastnosti betonov. Določene izvedbe omogočajo tudi uporabo opreme na terenu, kar je zelo pomembno za praktično obvladovanje novih tehnologij in novih sestav betonov, s katerimi zaenkrat nimamo veliko izkušenj.

Reološke preiskave betonov predstavljajo orodje za izpeljavo bazičnih preiskav lastnosti svežih betonskih mešanic, istočasno pa tudi orodje, s katerim lahko učinkovito preverimo, kateri kemijski dodatki so najbolj kompatibilni z danimi cementi in agregati ter kakšen učinek imajo posamezni kemijski dodatki in spremembe v sestavi betonske mešanice.

Preiskave v okviru doktorske disertacije so potekale z reometroma ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer. Na podlagi rezultatov meritev lahko analiziramo posamezne parametre, ki bolj ali manj vplivajo na lastnosti svežega betona in malte, kot so vnešene zračne pore, vrsta in količina finih delcev (cementa in mineralnih dodatkov), vrsta, količina in/ali kombinacija različnih kemijskih dodatkov, zrnastostna sestava in vrsta agregata, temperatura in podobno. Rezultate tovrstnih meritev najlažje prikažemo na diagramu poimenovanem reograf (Wallevik, 2009b).

## 1.2 Namen in cilji

V okviru preverjanja učinkovitosti delovanja merilne opreme so bile zakonitosti, kako različne spremembe v sestavi betonske mešanice vplivajo na spremembe reoloških parametrov betonske mešanice, ki jih v dostopni literaturi podajajo tuji raziskovalci, preverjene na slovenskih materialih. Pri večini opravljenih preiskav so bili uporabljeni slovenski materiali – kameni agregat, kemijski dodatki, mineralni dodatki in cement. Že nekaj časa namreč opažamo, da se rezultati preiskav betonov iz lokalnih materialov velikokrat bistveno razlikujejo od rezultatov primerljivih preiskav tujih avtorjev, zato določene zakonitosti, tudi splošno sprejete, za naše betone ne veljajo vedno. Vzporedno smo izvajali standardne preiskave obdelavnosti na svežih betonih. Na koncu smo preverili korelacijo med rezultati meritev z metodami obdelavnosti in rezultati meritev reoloških parametrov.

V okviru raziskovalnega dela na doktorskem študiju je bila razvita tudi inovativna oblika posode za merilni sistem ICAR Rheometer, ki jo lahko uporabimo za izvajanje meritev na svežih maltah. Posoda je dimenzionirana tako, da jo lahko uporabljamo z isto osnovno napravo kot za meritve na betonih. Do odločitve za razvoj nove posode je prišlo zaradi ugotovitve, da so meritve na betonih zamudne. Na maltah je namreč možno izvesti večje število meritev. Predpostavili smo, da lahko z ustrezno zasnovanimi maltami enakovredno ovrednotimo vplive posameznih sestavin, kot bi jih na betonskih mešanicah.

ICAR Rheometer, ki smo ga tudi uporabljali pri preiskavah, ni najpogosteje uporabljena naprava za določanje reoloških lastnosti svežih cementnih kompozitov. Preverjena ni niti uporaba naprave z manjšo posodo, namenjeno za meritve na maltah. Prav tako pa v začetni fazi dela z reometri, v našem primeru z ICAR Rheometer in ConTec Viscometer 5, še ne poznamo vseh njihovih omejitev, čeprav določene podajajo proizvajalci opreme, o drugih pa poročajo različni raziskovalci, ki opremo uporabljajo. Zato se na začetku vsekakor postavlja vprašanje o zanesljivosti take naprave in ponovljivosti meritev z njo. Dodatni cilj disertacije je bil zato validacija obeh reometrov in izbranega protokola merjenja reoloških parametrov. Rezultate meritev smo analizirali z uporabo statističnih metod, s katerimi ugotovimo, ali so vplivi različnih parametrov in njihovih interakcij statistično značilni. V ta namen smo uporabili metodo analize variance. Spremljali smo vpliv spremembe posameznega parametra. Rezultati pri vsaki spremembi se morajo dovolj razlikovati od rezultatov pred spremembo. Reometra smo validirali tako za meritve na betonih kot za meritve na maltah.

Glavni cilj disertacije je bil določiti povezavo med časovnim obnašanjem svežega betona in njemu ekvivalentne malte. Pri zasnovi malte smo uporabili metodo CEM (concrete equivalent mortar), ki izhaja iz zahteve po enaki specifični površini zrn agregata v malti CEM, kot je v betonski mešanici, ki jo malta CEM predstavlja (Schwartzentruber in Catherine, 2000). Opravili smo parametrično analizo obnašanja svežih betonov in njim pripadajočih malt CEM, pri čemer so bili vplivni parametri vrsta in



količina cementa, vrsta in količina mineralnega dodatka, vrsta in količina superplastifikatorja in ostalih kemijskih dodatkov ter količina vode v sestavi mešanice. Na podlagi analize rezultatov z ustreznimi računskimi metodami smo poskušali določiti korelacijo med reološkimi lastnostmi betonov in njim pripadajočih malt CEM. Analizo smo opravili na absolutnih rezultatih in na normaliziranih rezultatih. Predpostavili smo, da bo s pomočjo tako dobljenega modela mogoče oceniti spreminjanje lastnosti svežega betona s časom na podlagi rezultatov meritev časovnega spreminjanja istih lastnosti na malti CEM.

Glavna hipoteza doktorske disertacije je: s pomočjo poznavanja časovno odvisnih reoloških lastnosti malte CEM v svežem stanju ter z modelom, ki opiše korelacijo med časovno odvisnimi reološkimi lastnostmi svežega betona in njemu pripadajoče malte CEM, lahko napovemo reološke lastnosti obravnavanega svežega betona in spreminjanje teh lastnosti s časom.

Predvideni prispevki doktorske disertacije k razvoju znanstvenega področja so sledeči:

- Reografi za sveže cementne kompozite iz slovenskih materialov.
- Korelacija med rezultati reoloških meritev z reometroma in rezultati meritev obdelavnosti z uveljavljenimi standardnimi metodami preiskav na svežih betonih iz slovenskih materialov.
- Korelacija med časovnim spreminjanjem reoloških parametrov svežih betonov in njim ekvivalentnih svežih malt (malt CEM).
- Model za napovedovanje reoloških parametrov svežega betona ob upoštevanju reoloških parametrov malte CEM za različne čase, od zamešanja do vgraditve.
- Ponovljivost uporabljene preskusne metode ter reometrov pri meritvah na maltah in betonih.

### 1.3 Struktura disertacije

V uvodu disertacije najprej predstavimo motive za uporabo reologije na področju meritev lastnosti svežih betonov in izpostavimo prednosti reoloških meritev. Nato predstavimo motiv za doktorsko disertacijo in opišemo cilje doktorske disertacije. Sproti tudi na kratko opišemo uporabljene metode, tako za praktični del raziskovalnega dela kot tudi za analizo rezultatov. Zapišemo tudi glavno hipotezo doktorske disertacije in predvidene prispevke doktorske disertacije k razvoju znanstvenega področja.

V 2. poglavju smo najprej nekaj strani posvetili splošnemu opisu cementnih kompozitov in opisu njihovih osnovnih sestavin, ki so v prvi vrsti cement, agregat in voda ter pogosto tudi nekateri kemijski in mineralni dodatki. Poleg osnovnih sestavin smo predstavili še osnovne principe preiskav svežih betonov. Nato smo našteali nekatere preiskave svežega betona, tako standardne kot tudi nestandardne, in nekatere tudi osnovno opisali. Metode, uporabljene v doktorski disertaciji, so podrobneje opisane v poglavju 5.

Nato smo v 3. poglavju podrobno opisali obnašanje svežih cementnih kompozitov in pojem reologije. Na začetku so podane osnovne definicije reologije in teoretična podlaga. Sledi opis modelov reološkega obnašanja materialov in opis reoloških parametrov, viskoznosti in strižne napetosti na meji tečenja. Kasneje klasificiramo beton kot tekočino in podrobno opišemo osnovne reološke modele in reološke lastnosti, značilne za sveže cementne kompozite. Nato opišemo še reološko merilno opremo s poudarkom na koaksialnih valjastih reometrih, ki so najbolj primerni za izvajanje reoloških meritev na svežih cementnih kompozitih. Predstavljene so njihove osnovne zakonitosti in posebnosti.

V 4. poglavju smo podali pregled stanja na obravnavanem področju. Podrobneje je pregledana literatura o primerjavi različnih reometrov, literatura o primerjavah med malto in betonom, literatura o korelaciji reoloških parametrov z rezultati meritev standardnih metod obdelavnosti svežega betona ter literatura o vplivu posameznih sestavin betona na njegove reološke lastnosti. Na koncu poglavja predstavimo statistične metode, uporabljene v doktorski disertaciji; to so linearna regresija, koeficient determinacije in analiza variance.

V naslednjem poglavju (5.) sledi predstavitev eksperimentalnega dela. Predstavljeni so vsi uporabljeni materiali: cementi, agregat, kemijski in mineralni dodatki. Nato podajamo vse mešanice, tako betone kot malte, in podamo razmerja sestavin v njih. Opišemo tudi metodo CEM, ki opisuje račun maltne mešanice, ki je ekvivalentna betonu in sloni na principu ohranjanja enake specifične površine agregata v mešanici. Opišemo tudi vrednotenje metode CEM. Nato opišemo vse uporabljene merilne metode za izvajanje meritev obdelavnosti svežih betonov in malt ter za izvajanje reoloških meritev svežih betonov in malt. V nadaljevanju opišemo postopke meritev z vsemi podrobnostmi: časovni razmak med meritvami, uporabljene metode za posamezno vrsto mešanic, število ponovitev meritev v posamezni mešanici in ostale podrobnosti. Na koncu opišemo še umerjanje reometrov s silikonskim oljem.

Glavni del naloge se nahaja v 6. poglavju, ki je namenjen ureditvi rezultatov meritev v smiselne celote ter njihovi analizi in sintezi. Rezultati meritev so razdeljeni v skupino običajnih betonov in njim ekvivalentnih malt ter v skupino betonov SCC in njim ekvivalentnih malt. Obravnavali smo različne sklope analiz, in sicer: primerjava različnih reometrov, primerjava med malto in betonom, korelacija reoloških parametrov z rezultati meritev standardnih metod obdelavnosti svežega betona ter vpliv posameznih sestavin betona na njegove reološke lastnosti. V tem delu je predstavljen tudi model za napovedovanje reoloških parametrov betona s časom ob upoštevanju reoloških parametrov ekvivalentne malte.

V 7. poglavju poteka diskusija rezultatov, ki je razdeljena na enake sklope, na katere so razdeljeni rezultati v 6. poglavju. 8. poglavje je zaključek, kjer so navedene najpomembnejše ugotovitve, izpostavljeni so prispevki k razvoju znanstvenega področja in podana priporočila za nadaljnje delo.

## **2 SPLOŠNO O CEMENTNIH KOMPOZITIH**

### **2.1 Uvod**

Cementni kompoziti so materiali, v osnovi sestavljeni iz cementa, kamenega agregata in vode ter spadajo v skupino z delci ojačanih kompozitov. Matrico predstavlja mešanica cementa in vode, razpršeno fazo, v tem primeru delce, pa predstavljajo zrna kamenega agregata. V doktorski disertaciji se bomo ukvarjali z betoni in maltami, ki sta cementna kompozita (Callister, 2007). Razlika med njima je naslednja: beton vsebuje tako grobe (zrna, ki pri sejanju ostanejo na situ 4 mm) kot drobne (zrna, ki grejo pri sejanju skozi sito 4 mm) frakcije kamenega agregata, medtem ko malta vsebuje le drobna zrna kamenega agregata. Tako groba kot drobna zrna agregata pomembno vplivajo na lastnosti cementnih kompozitov, v katerih imajo vlogo polnila. Za doseg optimalne trdnosti in obdelavnosti cementnih kompozitov morajo biti njihove sestavine v pravilnem razmerju (Callister, 2007).

### **2.2 Osnovne sestavine cementnih kompozitov**

#### **2.2.1 Uvod**

Poleg že prej omenjenih osnovnih sestavin cementnih kompozitov, cementa, kamenega agregata in vode, lahko cementni kompoziti vsebujejo še razne kemijske in mineralne dodatke, katere bomo opisali v naslednjih poglavjih.

#### **2.2.2 Cement**

Kot je zapisal Collepardi (2010), je cement srce betona. Cement je v osnovi prah, ki zmešan z vodo tvori pasto, ki jo lahko poljubno oblikujemo in se s časom strdi ter prenese velike mehanske obremenitve. Kvaliteta cementne matrice je odvisna predvsem od masnega razmerja med vodo in cementom, ki ga imenujemo vodocementno razmerje. Vendar pa ob konstantnih parametrih malte ali betona vrsta uporabljenega cementa pomembno vpliva na lastnosti mešanice (Collepardi, 2010). Vrst cementov je veliko, zato so definicije in zahteve za cemente zapisane v standardih; pri nas je v veljavi standard SIST EN 197-1:2011.

Cement se proizvaja s sintranjem mineralnih surovin, ki morajo biti v pravilnem razmerju, da iz njih dobljena surovinska moka vsebuje pravilno količino kalcijevih, silicijevih, aluminijevih in železovih oksidov. Glavni surovini sta ponavadi apnenec in glina ali njuna naravna kombinacija lapor, sestavine za korekcijo kemijske sestave surovinske moke pa so lahko žlindra, boksit, železova ruda, piritni ogorki itd., odvisno od vrste klinkerja, ki se proizvaja. S sintranjem iz surovinske moke pridobimo

cementni klinker, ki ga zmeljemo. Cement, ki vsebuje vsaj 95 % klinkerja, imenujemo čisti portlandski cement. Med mletjem lahko klinkerju dodajamo nadomestne cementne materiale, kot so elektrofiltrski pepel, mleta granulirana plavžna žindra, apnenec, mikro silika in pucolani. Tako proizvedemo portlandske cimente z dodatki. Ob večji količini omenjenih dodatkov pa proizvedemo tudi druge vrste cementov. Standard SIST EN 197-1:2011 predvideva 5 osnovnih skupin običajnih cementov ali vsega skupaj 27 vrst običajnih cementov, če upoštevamo še podvrste.

Pri proizvodnji cementa se veliko pozornosti posveča določenim lastnostim cementa, ki kasneje pomembno vplivajo na lastnosti cementnih kompozitov. Pomembne lastnosti so: kemijska sestava, finost mletja, voda za standardno konsistenco, začetek in konec vezanja, hidratacija in tlačna trdnost (Kosmatka et al., 2002). V disertaciji se ukvarjamo s svežimi betoni in maltami, zato nas zanimajo predvsem lastnosti v svežem stanju, kot so na primer obdelavnost mešanice in njene reološke lastnosti. Na obdelavnost cementnih kompozitov imata velik vpliv predvsem kemijska sestava in finost mletja cementa (Koehler in Fowler, 2004). Večja finost mletja cementa eksponentno povečuje reološke lastnosti sveže cementne paste (vom Berg, 1979), kar pa ne drži popolnoma, v kolikor cementi vsebujejo različne klinkerje (Vikan, 2005).

### **2.2.3 Agregat**

Agregat zavzema največji delež prostornine v betonu, in to kar 60 % do 75 % (70 % do 85 % mase) celotne prostornine. Močno vpliva na karakteristike svežega in strjenega betona, na celotno sestavo betona in tudi na ceno betona (Kosmatka et al., 2002). Betonu daje skelet, zato je njegova izbira zelo pomembna. Agregat je večinoma sestavljen iz grobih in drobnih zrn, vsebuje pa tudi praškaste delce. Njegova trdnost in odpornost na zunanje vplive mora biti dovolj velika, da ne poslabša kakovosti betona. Je praviloma najtrša komponenta betona.

Agregat lahko klasificiramo na več načinov. Najbolj osnovna delitev je na podlagi oblike in načina pridobivanja agregata. Naraven prodnat agregat ima zaobljena zrna in ga pridobivamo s kopanjem v rekah, jezerih ali v gramoznih jamah. Drobljen agregat pridobivamo v kamnolomih z razstreljevanjem in mletjem. Ta ima ostre robove in je bolj nepravilnih oblik. Zato je obdelavnost betona, ki vsebuje prodnat agregat, boljša in posledično zahteva manjše vodocementno razmerje.

Naravni prodnat agregat lahko vsebuje relativno veliko organskih snovi in ima bolj nehomogeno mineralno sestavo, zato obstaja večja možnost za škodljive pojave, kot je recimo alkalno silikatna reakcija (Žarnić, 2005). Zato vsak agregat ni primeren za uporabo v betonu. Ustrezati mora določenim kriterijem, kot je na primer vsebnost kloridov, sulfatov, alkalno reaktivne silike, glin in organskih primesi. Prav tako morajo biti agregati zmrzlinško odporni, čisti in trdni (Colleparidi, 2010).

Pridobljen agregat ponavadi meljejo, perejo in sejejo na različne frakcije na mestu pridobivanja v obratih imenovanih separacije. Agregat v betonu je navadno sestavljen iz drobnih in grobih frakcij. Drobne frakcije so pri nas sestavljene iz zrn, manjših od 4 mm. Grobe frakcije so sestavljene iz zrn, ki so večja od 4 mm. Največje zrno agregata v grobi frakciji je ponavadi 16 mm, 22 mm ali 31,5 mm, v redkih primerih pa tudi večje. S sestavljanjem različnih frakcij agregata v določenih deležih ustvarimo skupno zrnastostno sestavo agregata v betonu, ki jo prikažemo v obliki zrnastostne krivulje. Ta krivulja se mora kar najbolj približati idealni želeni krivulji, ki je odvisna od predvidene uporabe projektiranega betona. Idealno krivuljo lahko računamo po enačbah, podanih s strani Fullerja ali Bolomeya (Collepari, 2010), ali pa so podane v obliki standardnih mejnih krivulj (SIST, 2008). Osnovni princip je, da manjši delci zapolnijo praznine med večjimi delci. Tako dosežemo manjšo količino votlin v betonu, katere mora zapolniti cementna pasta, in dosežemo, da ima beton skeletno strukturo. Z vidika obdelavnosti betona ni zaželeno, da je ta skelet popoln. Za doseganje zahtevane obdelavnosti betona morajo biti agregatna zrna dovolj razmaknjena, med njimi pa cementna pasta, da se agregatna zrna lahko gibajo (Collepari, 2010). Pri izbiri zrnastostne sestave agregata in njegove skupne količine moramo biti pozorni predvsem na to, ali želimo imeti bolj ali manj obdelaven beton, kolikšno je največje agregatno zrno itd. Posebej moramo biti pozorni pri betonih SCC, saj imamo tam zahtevo po večji vsebnosti finih delcev in finih frakcij agregata (Koehler in Fowler, 2007).

Pri projektiranju betonskih mešanic je pomembna tudi oblika agregatnih zrn. Paličasta ali ploščata zrna niso zaželena, saj neugodno vplivajo na lastnosti v svežem in strjenem stanju. Pozornost se posveča tudi površinski teksturi zrn agregata, njegovi gostoti, trdnosti in vlažnosti, ki je pomembna že pri projektiranju betona, še bolj pa kasneje, med njegovo proizvodnjo (Kosmatka et al., 2002).

#### **2.2.4 Kemijski dodatki**

Kemijske dodatke uporabljamo, da izboljšamo lastnosti tako svežega kot strjenega betona. Uporabljajo se v relativno majhnih količinah in so večinoma v tekočem agregatnem stanju. Količina kemijskih dodatkov se ponavadi izraža v odstotkih na maso cementa (Collepari, 2010), ali v nekaterih primerih v odstotkih na maso veziva. V tem primeru lahko za vezivo štejemo cement, mineralne dodatke (žlindra, mikro silika, elektrofiltrski pepel itd.) in kameno moko. Razdelimo jih lahko na: pospešila vezanja, zavlačila vezanja, aerante, inhibitorje korozije, inhibitorje alkalno silikatne reakcije, stabilizatorje (dodatek za zadrževanje vode), hidrofobne dodatke, dodatke za zmanjšano krčenje, plastifikatorje in superplastifikatorje (Collepari, 2010). V nadaljevanju bomo opisali le kemijske dodatke, ki so bili uporabljeni v okviru naših preiskav.

*Aeranti* so kemijski dodatki, s katerimi v beton vnesemo mikroskopske zračne mehurčke, kar dosežemo s spremembo površinske napetosti vode. Zračni mehurčki morajo biti pravilne velikosti in

enakomerno razporejeni s pravilnim faktorjem oddaljenosti, ki je odvisen od količine in velikosti mehurčkov. Vneseni zračni mehurčki bistveno vplivajo na povečanje obstojnosti strjenega betona proti ciklom zmrzovanja in tajanja ob prisotnosti talilnih soli (ob ne premajhni in ne preveliki količini mehurčkov). Delno zmanjšajo trdnost strjenega betona, poboljšajo obdelovalnost svežega betona (povečajo plastičnost in zmanjšajo viskoznost), povečajo njegovo stabilnost ali odpornost proti segregaciji večjih zrn agregata in zmanjšajo notranje in površinsko izcejanje vode (Collepari, 2010).

*Stabilizatorji* so dodatki za povečanje stabilnosti sveže betonske mešanice. Poimenujemo jih tudi preprečevalci izpiranja in modifikatorji viskoznosti. Uporabljajo se za zmanjševanje notranjega in površinskega izcejanja vode v svežem betonu, preprečevanje segregacije, preprečevanje izpiranja cementnih delcev ter preprečevanje ločevanja agregatnih delcev in cementne paste. Te pojave opazimo predvsem pri betonih z znižano viskoznostjo, z višjo konsistenco, ali kadar je beton podvržen visokim strižnim hitrostim, ki se pojavljajo med črpanjem in zgoščevanjem. Uporaba stabilizatorjev omogoča proizvodnjo stabilnih, a še vedno zelo tekočih betonov. Delujejo na različnih principih: lahko zvišajo viskoznost vode ali povečajo privlačnosti med cementnimi delci in na tak način povečajo viskoznost ali strižno napetost na meji tečenja svežega betona. Lahko pa so to tudi anorganski materiali z veliko specifično površino, ki povzročajo zadrževanje vode, kot sta recimo mikro silika in elektrofiltrski pepel (Khayat, 1998). Stabilizatorji povzročajo tudi psevdoplastično obnašanje betona. To pomeni relativno visoko viskoznost pri nizkih strižnih hitrostih, kar preprečuje segregacijo agregatnih delcev in relativno nizko viskoznost pri visokih strižnih hitrostih, kar omogoča dobro deformabilnost med črpanjem in vgrajevanjem (Koehler in Fowler, 2004).

S plastifikatorji in superplastifikatorji, ali drugače z dodatki za zmanjševanje potrebe po vodi, pri enaki obdelavnosti svežega betona zmanjšamo vodocementno razmerje, ali pri enakem vodocementnem razmerju povečamo obdelavnost svežega betona. Plastifikatorji zmanjšajo potrebo po vodi do 10 %, superplastifikatorji pa celo do 30 % (Kosmatka et al., 2002). V večjih količinah lahko povzročajo zavlačevalni učinek. Kemijsko gledano so plastifikatorji osnovani na lignosulfonatih in glukonatih. Superplastifikatorji v prvi generaciji so sulfonirani melamin formaldehidi, sulfonirani naftalen formaldehidi in modificirani lignosulfonati. V drugi generaciji superplastifikatorjev, imenovanih tudi hiperplastifikatorji, pa imamo osnovo iz polikarboksilatnih polimerov. V razvoju so tudi polifosfonatni superplastifikatorji. Plastifikatorji in superplastifikatorji delujejo kot disperganti med cementnimi delci. So torej negativno nabiti delci, ki nevtralizirajo elektrostatične privlačne sile med cementnimi delci. Plastifikatorji in prva generacija superplastifikatorjev se adsorbirajo na cementne delce in jim podelijo enak elektrostatični naboj. Druga generacija superplastifikatorjev se ravno tako adsorbira na cementne delce, vendar je združevanje le-teh preprečeno tudi zaradi steričnega prostorskega odboja, kot posledica dolgih polimernih verig (Collepari, 2010; Černilogar, 2010; Zevnik, 2012).

### 2.2.5 Mineralni dodatki

Mineralni dodatki ali nadomestni cementni materiali so v betonu prisotni kot dodatek cementu ali kot delna zamenjava za cement, odvisno od lastnosti materiala in želenega učinka na beton. K lastnostim strjenega betona prispevajo na podlagi hidravlične ali pucolanske aktivnosti. Pucolanska aktivnost pomeni, da dovolj drobno mlet pucolanski material ob prisotnosti vode kemično reagira s kalcijevim hidroksidom, ki je eden od produktov hidratacije cementa, in pri tem tvori C-S-H gel (Kosmatka et al., 2002). Mineralne dodatke uporabljamo za izboljšanje določenih lastnosti betona, na primer obdelavnosti, odpornosti proti prodoru agresivnih snovi iz okolja idr. Med mineralne dodatke štejemo naravne pucolane (tuf, bentonit, kalcinirana glina, metakaolin), žlindro, mikro siliko in elektrofiltrski pepel.

*Tuf* je piroklastična kamnina, ki vsebuje fine delce vulkanskega prahu, minerale in delce lave, izvržene med vulkanskim izbruhom (Smith, 1999). Tuf se, tudi če je fino mlet, ne strjuje pod vodo in torej sam po sebi ni hidravlično vezivo. Vendar se v prisotnosti vode in cementa ter ob primerni (sobni) temperaturi vede kot hidravlično vezivo – poteka pucolanska aktivnost. Za zadostno reakcijo tufa s kalcijevim hidroksidom potrebujemo vsaj 40 % - 50 % cementa v vezivu (Collepari, 2010). Tuf poveča zahtevo po vodi v betonski mešanici, izboljša obdelavnost betona in njegovo stabilnost; betoni s tufom imajo tudi manjšo hidratacijsko toploto kot klinkerski minerali (Kosmatka et al., 2002). Tuf prav tako poveča trdnost betona, saj zmanjša količino zračnih por v betonu in preprečuje škodljivo nabrekanje betona ob alkalno silikatni reakciji (Ahmadi in Shekarchi, 2010).

*Žlindra* (mleta granulirana plavžna žlindra) je nekovinski stranski produkt proizvodnje železa. Uvrščamo jo v skupino železarskih žlinder in ni jeklarska žlindra (Jurjavčič et al., 2013). Žlindra, ki jo uporabljamo v betonih in v pripravi cementov, mora ustrezati zahtevam, podanih v standardu SIST EN 197-1:2011. Vročo žlindro z vodo zelo hitro ohladijo. To jo spremeni v drobne delce (približno velikost agregata frakcije 0/4 mm) steklaste strukture (Kosmatka et al., 2002). S hitrim ohlajanjem preprečimo kristalizacijo in povečamo njeno sposobnost strjevanja. V naslednjem koraku jo moramo fino zmleti, da dosežemo želene učinke. V primerjavi z naravnimi pucolani ima veliko večjo reaktivnost, saj strjuje tudi brez dodatka cementa, čeprav je to počasen proces. Ob dodatku minimalne količine cementa postane popolnoma hidravlično vezivo. Količina zamenjave s cementom je lahko zelo različna, od 6 % do 95 %, vendar je ob večjih količinah prirast tlačne trdnosti majhen, zato žlindra ni primerna za izdelavo betonov z zahtevanimi zgodnjimi visokimi tlačnimi trdnostmi. Po drugi strani žlindra zmanjša hidratacijsko toploto v še večji meri kot tuf (Collepari, 2010). Izboljša se tudi obdelavnost svežega betona, vendar učinek ni tako izrazit kot pri uporabi elektrofiltrskega pepela (Koehler in Fowler, 2004; Spiratos et al., 2003). Z uporabo žlindre, mlete približno enako fino kot

cement, povečamo izcejanje vode v betonu, če pa je žindra mleta bolj fino kot cement, se izcejanje vode zmanjša (Kosmatka et al., 2002).

*Mikro silika* je stranski produkt v proizvodnji silicijevih in ferosilicijevih zlitin. Med proizvodnjo silicija pri zelo visokih temperaturah se v hlapih nahaja silicijev dioksid, ki kondenzira v hladnejšem delu peči. Mikro silika je silicijev dioksid v amorfni obliki. Delci so kroglaste oblike in izredno majhni, približno stokrat manjši od cementnih delcev (Kosmatka et al., 2002). Ti delci so tako majhni, da lahko zapolnijo praznine med cementnimi delci. Vendar ravno ta finost preprečuje uporabo mikro silike v večjih količinah, ker povečuje potrebo po vodi. V praksi jo največ uporabljamo kot mineralni dodatek betonom, kadar potrebujemo vodotesne betone, ki so visoko odporni proti prodoru agresivnih snovi, in betone, visoko odporne proti koroziji zaradi agresivnih snovi, pa tudi v betonih z zahtevano visoko tlačno trdnostjo in v samozgoščevalnih (SCC) betonih (Collepari, 2010). V svežem betonu mikro silika deluje kot stabilizator, saj zmanjšuje mobilnost vode. Do neke mere (približno 5 % zamenjave cementa v betonu) mikro silika znižuje viskoznost sveže mešanice (kljub temu deluje kot stabilizator), vendar ne vpliva na obdelavnost betona. Do tega pojava pride zaradi kroglaste oblike zrn mikro silike, ki delujejo kot mazilo med grobimi zrn cementa. Nad določenim pragom dozacije mikro silike se obdelavnost betona poslabšuje, povečevati se začne tudi viskoznost (Wallevik, 2009b).

## **2.3 Sveži cementni kompoziti in njihova obdelavnost**

### **2.3.1 Principi meritev**

S preiskavami na svežem betonu ugotavljamo predvsem njegovo "obdelavnost" ali v angleščini "workability". Obdelavnost, kot jo opisuje American Concrete Institute, je pravzaprav lastnost svežega betona ali malte, ki določa enostavnost mešanja, vgrajevanja, zgoščevanja in površinske obdelave v homogeno stanje (Koehler in Fowler, 2003). Japanese Association of Concrete Engineers opisuje obdelavnost kot lastnost svežega betona ali malte, ki določa enostavnost in homogenost, s katero lahko material mešamo, vgrajujemo in zgoščujemo zaradi njegove konsistence in homogenosti, ter stopnjo odpora proti ločevanju materialov (Koehler in Fowler, 2003). Obdelavnost pa ni odvisna samo od sestave betona, ampak tudi od namena uporabe betona. Zelo suha mešanica betona, ki ima na videz slabo obdelavnost, mora biti ravno taka za dano uporabo (Koehler in Fowler, 2003).

Z razvojem preskusa poseda betona (v začetku 20. stoletja) so se inženirji šele zavedli pomembnosti vsebnosti vode v betonu za določanje trdnosti betona. Zaradi enostavnosti se je preskus hitro prijel in je še vedno v uporabi, vendar pa je že dolgo znano, da ta preskus ne opiše obdelavnosti do potankosti. Izpeljanih je bilo mnogo poskusov razvoja boljših, bolj kompletnih preskusov. Nekateri so ostali pri poskusih, drugi preskusi pa so se uveljavili v vsakdanji praksi, vendar nobeden še vedno ni opisal



obdelavnosti betona do potankosti (Koehler in Fowler, 2003). Omenjeni preskusi ne opišejo lastnosti tečenja betona, ampak sveži mešanici dodelijo neko številko. Pogosto so preskus poseda, črpnost in enostavnost zgoščevanja slabo korelirani. Še najboljši instrument za določanje lastnosti tečenja je delavec z izkušnjami pri delu z betoni. Ta beton oceni po občutku, kar je dobro, vendar pa take ocene ne moremo posredovati naprej. Tudi taka ocena pa je zelo odvisna od osebe in od dneva do dneva. Beton tako ponavadi opišemo kot moker, gost, viskozen, "župa", koheziven, dober, slab, lepljiv (Wallevik, 2009b). Šele ko so preiskave razkrile, da je beton pravzaprav Binghamovska tekočina, se je uveljavil princip merjenja strižnih napetosti in strižne hitrosti. Preko teh preskusov lahko ovrednotimo napetost na meji tečenja in viskoznost svežega betona (Koehler in Fowler, 2003).

Vso množico preskusov lahko razdelimo v kategorije na več načinov. Tattersall (Koehler in Fowler, 2003) je razdelil preskuse v tri razrede (Preglednica 1). Večina preskusov spada pod razreda II in III.

Preglednica 1: Razredi preskusov obdelavnosti svežega betona (Koehler in Fowler, 2003).

Table 1: Classes of fresh concrete workability measurement (Koehler in Fowler, 2003).

Razred	Opis razreda
<i>Razred I Kvalitativno</i> Obdelavnost, Tečenje, Zgoščevalnost, Črpnost	Uporabno za splošen opis brez kvalificiranja.
<i>Razred II Empirično kvantitavno</i> Posed, Stopnja zgoščevanja, VeBe čas, Razlez	Uporabno za preprost kvantitaven opis obnašanja pod določenimi pogoji in v določenih okoliščinah.
<i>Razred III Temeljno kvantitavno</i> Viskoznost, Mobilnost, Napetost na meji tečenja	Uporabno strogo skladno z definicijami.

Možna razdelitev je tudi na eno-parametrskse preskuse, ki spadajo v razred II Tattersallove razdelitve (stopnja zgoščevanja, posed, razlez, VeBe) in več-parametrskse preskuse, ki spadajo v razred III Tattersallove razdelitve (reometri, modificiran posed). Princip več-parametrskih preskusov je v merjenju strižne napetosti in strižne hitrosti, pri čemer lahko slednjo običajno med preskusom spreminjamo (Koehler in Fowler, 2003). Preskuse lahko razdelimo tudi glede na tip toka betona, ki se ustvari med potekom preskusa. National Institute of Standards and Technology – NIST (Hackley in Ferraris, 2001) je razdelil obstoječe preskuse, ki opisujejo reologijo svežih betonov, v štiri razrede (Preglednica 2). Ta razdelitev je najbolj v skladu s trenutnim razumevanjem reologije in obdelavnosti betona. Vedeti moramo, da metode, primerne za betone z zelo majhno vrednostjo poseda, ne spadajo v nobeno od kategorij iz preglednice 2, vendar nam še vedno lahko povedo marsikatero koristno informacijo (Koehler in Fowler, 2003).

Fowler in Koehler sta v ICAR poročilu (Koehler in Fowler, 2003) opravila razdelitev, ki sloni na razdelitvi iz preglednice 2, vendar je prirejena za samozgoščevalne betone ter malte in cementne paste.

Naštela sta 61 preskusov. Navajata, da je bilo razvitih še mnogo drugih preskusov, vendar le v okviru nekaterih raziskovalnih nalog in nikoli niso zaživel. To velja tudi za mnoge druge, ki sta jih naštela. V RILEM publikaciji (Bartos et al., 2002) so število opisanih preskusov skrčili na 33. Večina naštetih preskusov se ujema v obeh publikacijah.

Preglednica 2: NIST kategorizacija preskusov obdelavnosti svežega betona (Hackley in Ferraris, 2001).

Table 2: NIST categorization of fresh concrete workability tests (Hackley in Ferraris, 2001).

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

### 2.3.2 Opis nekaterih preskusov

V naslednjih točkah so naštet in opisani nekateri preskusi za merjenje obdelavnosti betonov, malt in cementnih past (v nadaljevanju samo paste), pri čemer smo sledili pristopu, uporabljenem v RILEM-ovi publikaciji (Bartos et al., 2002). Za samozgoščevalne (SCC) betone, cementne paste in malte so primerne meritve z reometri, s tem da moramo biti pozorni na velikost merilne opreme, ki mora biti prilagojena maksimalnemu zrnu v materialu, ki ga preiskujemo.

V skupino preskusov z omejenim tokom spadajo Free orifice (Orimet) preskus (iztekanje iz cevi), K-slump preskus in preskus določanja zgoščevalnega faktorja. Preskus določanja zgoščevalnega faktorja je primeren za betone srednje obdelavnosti, v približno enakem območju obdelavnosti, v katerem uporabimo preskus poseda. Faktor je razmerje med maso betona, ki v prostem padu skozi dva lijaka zapolni posodo, in med maso betona, katerega vgradimo v posodo s pomočjo vibracij, tako da dosežemo maksimalno zgoščenost (Bartos et al., 2002).

Skupina preskusov s prostim tokom vsebuje naslednje preskuse: tok skozi stožec in po žlebu (Flow through), Kellyjeva žoga (Kelly ball), preskus površinskega posedanja (Surface settlement), Vicatova igla za paste in preskus poseda (mini posed za malte in paste). Slednji je najbolj znan preskus konsistence betona (SIST EN 12350-2:2009). Stožec napolnimo z betonom v treh plasteh in vsako plast 25-krat prebodemo s standardno jekleno palico. Pri drugi in tretji plasti prodremo tudi v prejšnjo plast. Po končanem vgrajevanju počasi dvignemo stožec in pustimo, da se beton posede. Rezultat preskusa je višinska razlika med najvišjo točko betona in vrhom stožca (Bartos et al., 2002).

Preskusi z vibracijami so stopnja zgoščevanja, VeBe preskus, razlez na stresalni mizi (mini razlez za malte in paste), Razlezenje betona v škatli (LCL Flow), Obrnjen stožec (Inverted cone), kjer beton ob pomoči vibracij potuje iz stožca, in Steber posedanja (Settlement column), kjer primerjamo beton iz zgornjega in spodnjega dela stebra. Stopnja zgoščevanja (SIST EN 12350-4:2009) je uporabna za betone majhne obdelavnosti. Posodo napolnimo z betonom tako, da ga v posodo spuščamo z višine zgornjega roba posode in smo pri tem pozorni, da betona ne zgoščujemo. Beton nato vibriramo do popolne zgoščenosti, dokler se ne neha posedati. Rezultat preskusa je razmerje med višino posode in višino betona v posodi (Bartos et al., 2002).

Rotacijski reometer je naprava, ki meri strižno napetost pri različnih hitrostih striga materiala. Obstajajo različni tipi reometrov za preiskave svežih betonov. Reometri bodo kot glavna tema doktorske disertacije predstavljeni v nadaljevanju.

Slabo obdelavne betone lahko preskušamo s Proctorjevim preskusom, ki se sicer uporablja predvsem pri geomehanskih preiskavah. Proctorjev preskus deluje na principu zgoščevanja materiala z vedno enako energijo (vedno enako število udarcev z vedno enake višine na vedno enako število plasti). Rezultat je gostota materiala, ki je odvisna od količine vode v betonu. S tem preskusom lahko določimo največjo gostoto betona in pripadajočo količino vode v betonu (Bartos et al., 2002). Poznamo še preskus intenzivnega zgoščevanja, kjer beton stiskamo znotraj valja z dvema batoma, katera nagibamo iz smeri gibanja, da povzročamo strižne napetosti. Merimo gostoto betona (Intensive compaction preskus).

Od drugih preskusov bomo navedli samo vizualno oceno betona. Beton opazujemo v mirovanju in med gibanjem. Pozorni smo na izločanje vode iz betona, pojav velike količine cementnega mleka na površini in izgled površine. Pomagamo si lahko tudi z zidarsko žlico, s katero poskušamo ustvariti gladko površino na betonu. Trud, vložen v to, nam pove, ali ima beton dovolj finih delcev ali ne. V kolikor beton nima dovolj finih delcev, ga označimo za grobega ali izrazito enozrnatega in predvidevamo, da je beton nestabilen in podvržen segregaciji (Bartos et al., 2002).

Za beton SCC uporabljamo posebne preskuse, ki pa jih delno lahko razporedimo v enake skupine kot preskuse za normalne betone. Preskusi, ki sodijo v razred preskusov z omejenim tokom, so preskus z L-zabojem, preskus z U-zabojem in iztekanje iz V-lijaka. Z omenjenimi preskusi opazujemo tok betona skozi ozke odprtine in sposobnost betona za zapolnjevanje prostorov med armaturnimi palicami ter za zapolnjevanje majhnih prostorov. Preskusa v razredu preskusov s prostim tokom sta preskus z J-obročem in preskus razleza s posedom. Razlez s posedom je najpreprostejši način preverjanja ustreznosti konsistence svežega betona na gradbišču. Za preskus razleza s posedom uporabljamo enako opremo kot za preskus poseda. Beton zlijemo v prisekan stožec v eni plasti, ki je dodatno ne zgoščujemo. Stožec dvignemo in opazujemo, kako daleč se bo razlezel beton. Rezultat je

povprečje med največjim premerom betona in premerom pravokotno na največji premer. Opcijsko lahko merimo tudi čas, ki je potreben, da se beton razleze do premera 500 mm. Večji kot je razlez, večja je sposobnost zapolnjevanja betona in večji kot je čas do premera 500 mm, večja je viskoznost betona.

### 3 REOLOGIJA SVEŽIH CEMENTNIH KOMPOZITOV

#### 3.1 Sveži cementni kompozit – tekočina

V doktorski disertaciji se torej ukvarjamo s cementnimi kompoziti, bolj natančno z betoni in maltami, in še bolj natančno s svežimi betoni in maltami. Betone in malte lahko označimo kot tekočine, vendar je opis teh materialov zelo kompliciran, saj se obnašajo časovno odvisno in vsebujejo delce različnih velikosti in lastnosti. Beton je kompleksna suspenzija delcev: delci grobega agregata so razpršeni v malti, malta ima delce drobnega agregata razpršene v pasti, pasta pa cementne in ostale praškaste delce razpršene v vodi.

Betoni in malte so torej tekočine; pravzaprav je vse tekočina, kot je rekel že Heraklit, "panta rhei" ali "vse teče", pa naj si bo to tudi navidez nespremenljiv predmet, kot je recimo kocka iz strjenega betona. S pojavi tečenja se ukvarja reologija, katere definicija se glasi: reologija je veda, ki preučuje deformiranje in tečenje snovi, od elastičnih snovi do tekočin. Reologija raziskuje povezave med silo, deformacijo in časom. Podskupina reologije je viskometrija, ki preiskuje povezave med napetostjo in hitrostjo deformiranja. Viskoznost je definirana kot upor proti tečenju oz. upor tekočine proti deformaciji. Če je ta upor velik, bo viskoznost materiala velika. Beseda reologija izhaja iz dveh grških besed. Beseda reo (ρεω) pomeni "teči" in beseda logos (λογος) pomeni "znanost" (Wallevik, 2009b). Strjen in svež beton se seveda obnašata drugače. Strjen beton ima ob kratkotrajnih obremenitvah lastnosti elastičnega telesa, ki se po prenehanju obtežbe povrne v začetno obliko. Ob dolgotrajnih obremenitvah pa tudi strjen beton prikazuje viskoznostne lastnosti. Ta pojav poznamo pod imenom lezenje betona. Sveži beton ima lastnosti viskoplastične tekočine, kar je hibridna lastnost, pri kateri se material pod neko kritično mejo (napetost na meji tečenja) obnaša kot trdno telo in steče, ko je ta meja presežena (Hackley in Ferraris, 2001). Deformacija viskoplastične tekočine se po prenehanju obtežbe ne povrne v začetno stanje. Tekočina so tudi Saturnovi prstani ali morje skupaj z ledenimi gorami, ki plavajo v njem. Ledene gore vsaka zase seveda niso tekočina, vendar ob veliki količini trdnih delcev (ledenih gora, agregatnih zrn) ta sistem lahko opišemo kot tekočino. Tekočino opišemo preko parametra, imenovanega viskoznost, ki je odvisen od medsebojnih interakcij delcev (Wallevik, 2003b). Zaradi te lastnosti pričakujemo, da je sveži beton obdelaven.

V tem poglavju bomo opisali splošne lastnosti tekočin, različne vrste tekočin in matematične modele za opis teh tekočin. Opisali in predstavili bomo tudi splošno reologijo ter bolj podrobno opisali reologijo svežih betonov oziroma kar svežih cementnih kompozitov, začenši z opisom merilne opreme, enačbami, ki se skrivajo v ozadju preračuna v temeljne fizikalne parametre, in vplive sestavin mešanic in zunanjih dejavnikov na reologijo svežih cementnih kompozitov.

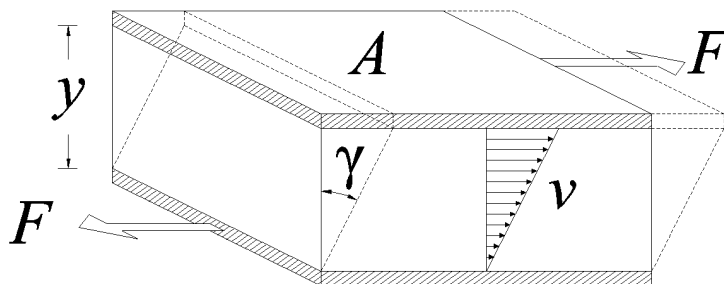
### 3.1.1 Opis tekočine

Skupna lastnost tekočin je, da lahko tečejo, se ne upirajo deformaciji in zavzamejo obliko posode, v kateri se nahajajo. Za razliko od plinov ohranjajo približno enako gostoto in so malo stisljive. Še enkrat bi radi poudarili razliko med idealno togim telesom in idealno tekočino. Togo telo, ko je izpostavljeno napetostim (obtežbi), ne spreminja svoje oblike. Nasprotno idealna tekočina spreminja svojo obliko (teče), ko je izpostavljena napetostim, ne glede na to, kako majhna je ta obtežba. Realno trdno telo se deformira elastično, energija potrebna za deformacijo se ohranja in telo se vrne v prvotno obliko. V primeru, da je sila dovolj velika, se lahko tako telo deformira tudi nepovratno, in pojavi se lezenje materiala (Barnes et al., 1989).

### 3.1.2 Konstitutivne enačbe za tok tekočine

Konstitutivno enačbo (1) za linearno elastično trdno telo (Hookov zakon) v smislu strižnih lastnosti lahko opišemo takole: ko je telo podvrženo strižni sili  $F$ , je strižna napetost  $\tau$  ( $\tau = F/A$ , kjer je  $A$  površina, na katero deluje sila) povezana s strižno deformacijo  $\gamma$  preko strižnega modula  $G$  (Koehler in Fowler, 2004; Tattersall in Banfill, 1983), kot je prikazano na sliki 1:

$$\tau = G \gamma \quad (1)$$



Slika 1: Hookov zakon za primer striga.

Figure 1: Hooke's law for shear.

Enako sliko si lahko predstavljamo za tekočino med dvo-dimenzionalnim gibanjem. V tem primeru strižna napetost ne bi povzročila končne strižne deformacije  $\gamma$ , ampak bi se deformirala, dokler bi obstajala najmanjša možna strižna napetost. Strižna deformacija torej ni odvisna od velikosti strižne napetosti. Hitrost spreminjanja strižne deformacije s časom je odvisna od strižne napetosti in je sorazmerna s strižno napetostjo v primeru enostavne tekočine. Konstitutivna enačba (2) za enostavno tekočino je naslednja:

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

Enačba (2) zelo spominja na Hookov zakon, le da sorazmernostni faktor  $\eta$  sedaj imenujemo koeficient viskoznosti, strižno deformacijo pa je zamenjala hitrost strižne deformacije, ali krajše strižna hitrost  $\dot{\gamma}$ . Predstavljajmo si, da se ena od plošč počasi premika vzporedno glede na drugo ploščo. Med ploščama se v tekočini ustvari laminarni tok. Newtonov zakon pravi, da je strižna napetost sorazmerna s hitrostjo in obratno sorazmerna z razdaljo med ploščama. To zapišemo v enačbi (3):

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

Razmerje  $dv/dy$  je hitrostni gradient (sprememba hitrosti skozi prostor med ploščama) in lahko se dokaže, da je enak strižni hitrosti  $d\gamma/dt$  (Schramm, 2000). Kasneje bomo pokazali, da hitrostni gradient ne drži v vseh primerih. V koaksialnih reometrih je le-ta drugačen v vsaki točki med valjema (Koehler in Fowler, 2004; Tattersall in Banfill, 1983).

Newtonov model zadovoljivo opiše preproste tekočine med stalnim tokom, vendar ne more opisati obnašanja velikega števila drugačnih tekočin. Privzame namreč, da je razmerje med strižno hitrostjo in strižno napetostjo linearno in da tokovna krivulja ali reogram (ang. flow curve) seka os strižne napetosti v izhodišču. Ta pojav je v naravi redek. Veliko tekočin se deformaciji zaradi obtežbe upira. Ko notranje strižne napetosti (povzročene z obtežbo) v tekočini presežejo neko mejno vrednost, se tekočina deformira. To mejno vrednost imenujemo strižna napetost na meji tečenja (ang. yield stress). Take tekočine imenujemo viskoplastične (Koehler in Fowler, 2004). V to skupino spadajo tudi sveži cementni kompoziti. Tako obnašanje opisuje mnogo modelov, med njimi tudi Binghamovski model. Modeli bodo podrobneje opisani v nadaljevanju.

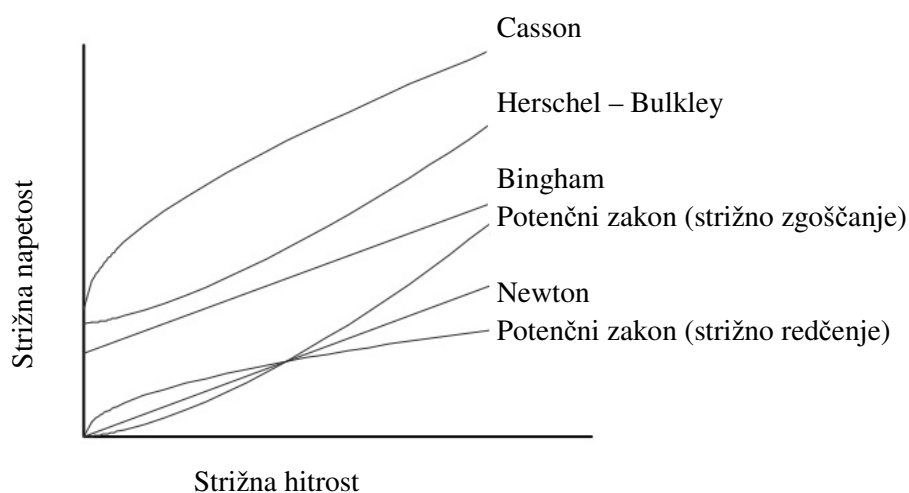
### 3.1.3 Vrste tekočin

Tekočine lahko razvrstimo v štiri glavne skupine (Wallevik, 2009b):

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

V primeru Newtonske tekočine je viskoznost konstantna za vsako strižno hitrost in jo imenujemo dinamična viskoznost (glavni pojmi bodo opisani v naslednjih poglavjih). Newtonske tekočine so predvsem preproste tekočine, eno fazne tekočine ali raztopine z majhnimi molekularnimi masami, npr. voda, gorivo, olje in silikonsko olje, katero se pogosto uporablja tudi za kalibracije (Wallevik, 2009b).

Viskoznost *ne-Newtonske* tekočine, ki je *časovno neodvisna*, je odvisna od strižne hitrosti, kar pomeni, da nima konstantne viskoznosti. Tako viskoznost imenujemo navidezna viskoznost. Obstajajo tri glavne vrste omenjenega obnašanja. Dilatantnost je pojav, ko material s povečanjem strižne hitrosti povečuje viskoznost, to so materiali iz gosto stisnjenih delcev. Dilatantnost kot izraz za opisano obnašanje ni ustrezen, saj ima drugačen pomen, vendar se uporablja v praksi. Sami bomo pojav imenovali strižno zgoščanje (shear thickening). Dilatanten material je striktno rečeno tisti material, ki se mu med strigom poveča prostornina (Hackley in Ferraris, 2001). S tem pojavom se lahko razloži povečanje viskoznosti v visoko koncentrirani suspenziji večjih delcev v tekočini. Delci se med gibanjem pri višjih strižnih hitrostih razmaknejo, tekočina ne zapolni več vsega medsebojnega prostora med delci, zato prihaja do trenja med njimi (Ferguson in Kembrowski, 1991). Pseudoplastičnost je pojav, ko material izgublja viskoznost s povečanjem strižne hitrosti, in ga imenujemo tudi strižno redčenje (shear thinning). Do takega obnašanja pride zaradi orientacije podolgovatih delcev v smeri toka, zaradi raztezanja polimernih verig v smeri toka in njihovega trganja, zaradi deformacije okroglih delcev v eliptične ter zaradi razbijanja delcev, ki so se združili v večje skupine. Tretja vrsta ne-Newtonskega obnašanja je material, kateri ima neko trdnost na meji tečenja. Strižna napetost mora preseči napetost na meji tečenja – šele tedaj material steče. Med tečenjem se ti materiali lahko obnašajo Newtonsko (Binghamovska tekočina), pseudoplastično ali dilatantno (Wallevik, 2009b).



Slika 2: Modeli za opis različnih vrst obnašanja tekočin (Koehler in Fowler, 2004).

Figure 2: Models to describe different types of fluid behavior (Koehler in Fowler, 2004).

Na sliki 2 so prikazane različne vrste obnašanja tekočin z zapisanimi različnimi matematičnimi modeli za opis teh tekočin. Obnašanje materiala na sliki 2 je prikazano s pomočjo tokovnih krivulj, ang. flow curve. Matematični modeli bodo predstavljeni v nadaljevanju.



V primeru *ne-Newtonske*, *časovno odvisne* tekočine je viskoznost odvisna tako od strižne hitrosti kot od časa, ko je tekočina izpostavljena strigu. Material spremeni strukturo med strigom s konstantno strižno hitrostjo, kar vpliva na viskoznost. Obnašanje takih materialov razdelimo v tri skupine: tiksotropičen, reopektičen in anti-tiksotropičen material. Tiksotropičnemu materialu se viskoznost zmanjša pod strižno napetostjo in spet postopno poveča, ko strižno napetost odstranimo. Notranja struktura materiala se med strigom podira, med mirovanjem pa se vzpostavlja nazaj. Med razbijanjem se molekule/delci orientirajo v smeri strižnega toka, kar pomeni manjšo viskoznost. Za tak pojav je potreben čas in se ne zgodi v trenutku. Takšen material je psevdoplastičen in časovno odvisen. Rezultat je zelo odvisen od časa trajanja testa – hitrejši kot je test, višji je rezultat tiksotropije. Tipičen tiksotropičen material je cementna pasta. Razlika z reopeksijo je pri manjših hitrostih striga. Reopektična tekočina hitreje ponovno sestavi svojo strukturo med počasnim strigom kot med mirovanjem, tiksotropična tekočina pa ravno obratno. Primer je mavčna pasta, vendar primerov ni veliko. Anti-tiksotropičen material poveča viskoznost pod strižno napetostjo, saj zgradi strukturo, ki pa se poruši med mirovanjem. Primerov je malo, eden je guma-lateks (Wallevik, 2009b). Izraz *ne-Newtonska* tekočina izhaja iz časov, ko so bile *ne-Newtonske* lastnosti označene kot anomalija. Sedaj je *Newtonska* tekočina sprejeta kot poseben primer bolj splošne kategorije tekočin (Ferguson in Kemblowski, 1991).

*Visko-elastična* tekočina je časovno odvisna, kjer material, podvržen obtežbi, prikazuje tako elastične kot viskozne lastnosti. Pod konstantno napetostjo bo material teklen (lezenje materiala), vendar se del energije shrani v materialu in se sprosti, ko obtežba preneha (Hackley in Ferraris, 2001).

### 3.1.4 Modeli za opis tekočin

Model za opis *Newtonske* tekočine je podan v enačbi (3) in je namenjen idealnim tekočinam. Za vse ostale vrste tekočin uporabljamo drugačne modele za opis njihovega obnašanja. Kot rečeno, mnogo tekočin potrebuje vsaj neko minimalno napetost, da začnejo teči. To napetost imenujemo napetost na meji tečenja. V primeru betona jo lahko zaznamo že v primeru preskusa s posedom. Ko dvignemo stožec, beton steče zaradi napetosti, ki jih povzroča gravitacija. Potem ko višina betona pade, pade tudi napetost, povzročena s strani gravitacije, in ko je ta manjša od napetosti na meji tečenja, beton preneha teči. Najbolj preprost model za opis takih tekočin je Binghamovski model, ki ohranja linearno odvisnost med strižno napetostjo in strižno hitrostjo ter vključuje napetost na meji tečenja, enačba (4).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

V Binghamovskem modelu koeficient viskoznosti  $\eta$  zamenjuje plastična viskoznost  $\mu$ . Razlika med viskoznostima je le ta, da pri računu plastične viskoznosti upoštevamo prirast strižne napetosti nad napetostjo na meji tečenja (Hackley in Ferraris, 2001).

Načinov za opis nelinearne odvisnosti med strižno napetostjo in strižno hitrostjo je več. Najpreprostejši je potenčni zakon (power law), enačba (5), ki ne upošteva napetosti na meji tečenja, a upošteva ukrivljenost tokovne krivulje (Hackley in Ferraris, 2001; Koehler in Fowler, 2004; Macosko, 1994).

$$\tau = a \dot{\gamma}^b \quad (5)$$

Konstanti  $a$  in  $b$  sta lastnost materiala. Če je potenca  $b$  manjša od 1, ta enačba opisuje psevdoplastično obnašanje, v kolikor pa je večja od 1, opisuje dilatantno obnašanje. Če naš material prikazuje neko napetost na meji tečenja in se obnaša nelinearno, je smiselno združiti Binghamovski model in potenčni zakon. Tak model se imenuje Herschel-Bulkley in je predstavljen v enačbi (6):

$$\tau = \tau_0 + a \dot{\gamma}^b \quad (6)$$

V primeru, da je potenca  $b$  enaka 1, nam enačba (6) predstavlja Binghamovski model. Nelinearnost lahko opišemo tudi s Cassonovim modelom, enačba (7):

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \mu^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} \quad (7)$$

V literaturi so objavljeni številni modeli, ki pa so po večini uporabni za zelo specifične aplikacije. Tukaj bom naštel le nekatere (Hackley in Ferraris, 2001; Macosko, 1994): Carreau-Yasuda model, Cross model, Ellis model itd.

### 3.1.5 Viskoznost

Viskoznost (koeficient viskoznosti) je neformalno definirana kot upor tekočine proti tečenju. Podaja mero za notranje trenje tekočin oz. je mera za intenzivnost disipacije energije, ki je potrebna za ohranitev nepovratne deformacije tekočine (Ferguson in Kembrowski, 1991). Formalno je definirana kot razmerje med strižno napetostjo in strižno hitrostjo, enačba (8).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (8)$$

Za Newtonske tekočine velja, da je viskoznost konstanta materiala, ki je enaka za vse strižne hitrosti pri dani temperaturi in zračnem tlaku. V primeru, da se viskoznost spreminja s spreminjajočo se

strižno hitrostjo, potem pripada ne-Newtonskim tekočinam. V praksi se uporablja vrsta različnih izrazov in poddefinicij za viskoznost, ki bodo predstavljeni v tem poglavju. Najbolj pogosto se v betonski industriji uporablja izraz *dinamična* viskoznost, opisana v enačbi (8). Podamo jo v enotah Pa·s. *Kinematična* viskoznost je razmerje med dinamično viskoznostjo in gostoto tekočine, ki jo preiskujemo, enačba (9).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (9)$$

Če uporabimo enačbo za dinamično viskoznost na ne-Newtonski (nelinearni) tekočini, to postane *navidezna* viskoznost in predstavlja naklon premice od koordinatnega izhodišča do obravnavane točke na tokovni krivulji (ta naklon je pri Newtonski tekočini konstanten). Diferenčna viskoznost je definirana kot odvod strižne napetosti po strižni hitrosti, enačba (10). Predstavlja torej naklon tokovne krivulje v izbrani točki.

$$\eta_{diff} = \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \quad (10)$$

*Plastična* viskoznost  $\mu$  je definirana kot limita diference viskoznosti, ko se strižna hitrost približuje neskončnosti, enačba (11).

$$\eta_{pl} = \mu = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \quad (11)$$

Plastična viskoznost je enaka za vse strižne hitrosti v primeru Binghamovskega materiala. V primeru tekočin, ki se obnašajo v skladu s potenčnim zakonom, lahko njihovo tokovno krivuljo razdelimo na dve linearni območji. Zgornji del lahko imenujemo *neskončna strižna* viskoznost, spodnji del (v zelo ozkem pasu strižnih hitrosti, ko se strižna hitrost približuje 0) pa lahko imenujemo viskoznost *ničnega striga*. Uporablja se tudi izraz tekočnost, ki je definiran kot recipročna vrednost viskoznosti, enačba (12).

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (12)$$

Na delce, suspendirane v tekočini, delujejo različne sile, ki vse vplivajo na viskoznost: koloidne sile interakcij med delci, Brownove sile in viskoznostne sile. *Koloidne sile* so lastnost snovi, ki so kontrolirane s strani pojavov, kot je polarizabilnost, in ne s strani viskoznosti. Vsota teh sil je lahko privlačnost ali odboj med delci. Do privlaka prihaja zaradi van der Wallsovih vezi med delci ali zaradi neenakih električnih nabojev na površini delcev. Če je vsota vseh sil privlačna, potem se delci

kosmičijo. Kosmiči se med strigom vrtijo, deformirajo in ob dovolj veliki strižni napetosti tudi razbijajo ter se po koncu striga spet združujejo. Sistemi s kosmiči so ponavadi tiksotropični in imajo strižno napetost na meji tečenja. Do odboja pa prihaja zaradi enakih električnih nabojev na površini delcev ali zaradi steričnega efekta. Zaradi enakih električnih nabojev delci zavzamejo svoja mesta, čimbolj oddaljena eden od drugega. Da tekočina začne teči, moramo delce premakniti iz njihovih ravnotežnih položajev s pomočjo neke sile. Vpliv elektrostatičnih sil je velik, vendar pri višjih strižnih hitrostih izgublja svoj vpliv in pojavi se psevdoplastičnost. Vpliv elektrostatičnih sil ravno tako izgublja svojo moč, če je v tekočino dodan elektrolit, ki tako povzroča velik padec viskoznosti (Barnes et al., 1989; Koehler in Fowler, 2004).

*Brownove* (termalne naključnostne) sile spravljajo delce v neurejeno gibanje zaradi zaletavanja atomov in molekul, ki se z veliko hitrostjo gibajo v tekočini. Delci se radialno porazdelijo in prostorsko orientirajo. Največji vpliv imajo na delce manjše od 1  $\mu\text{m}$ , kjer je vpliv velik. Zaradi tega je vpliv Brownovih sil v betonu majhen ali zanemarljiv (Barnes et al., 1989; Koehler in Fowler, 2004).

*Viskoznostne* sile, ki delujejo na delce, so sorazmerne lokalni razliki hitrosti med delcem in okoliško tekočino. Sprememba viskoznosti okoliške tekočine torej vpliva na viskoznost celotnega sistema.

Razviti so bili različni modeli, ki povezujejo lastnosti suspenzij z viskoznostjo. Povzeti so po delu Koehlerja (Koehler in Fowler, 2004) in so bili razviti za Newtonske suspenzije. Einstein leta 1911 poveže viskoznost suspenzije  $\eta$  z viskoznostjo tekoče faze  $\eta_s$  in volumsko koncentracijo trdnih delcev  $\Phi$ , enačba (13):

$$\eta = \eta_s (1 + 2.5\Phi) \quad (13)$$

Model je osnovan na kroglastih delcih enotne velikosti in je primeren za suspenzije z do 10 % volumsko koncentracijo trdnih delcev. Za upoštevanje interakcij med delci lahko uporabimo višje rede parametra  $\Phi$  (npr.  $\Phi^2$ ). Tak model ni dovolj uporaben za industrijsko rabo in potrebuje modifikacije. Enačba Krieger-Dougherty (14), ki je primerna za koncentrirane suspenzije, temelji na Einsteinovi enačbi ter vključuje lastno viskoznost  $[\eta]$  in maksimalno volumsko koncentracijo trdnih delcev  $\Phi_m$ .

$$\eta = \eta_s \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^{-[\eta]\Phi_m} \quad (14)$$

Maksimalna volumska koncentracija delcev predstavlja volumsko koncentracijo delcev, ko se vsi delci v tri-dimenzionalnem prostoru dotikajo drug drugega. Suspenzija se "zagozdi", tok tekočine je preprečen, viskoznost gre v neskončnost. Maksimalna volumska koncentracija je funkcija vrste

zaklinjanja med delci, oblike delcev in velikostne porazdelitve delcev. Enačbi (13) in (14) se priporočata za cementne paste, ne pa za betone (Barnes et al., 1989; Koehler in Fowler, 2004).

Lastna viskoznost  $[\eta]$  predstavlja doprinos trdnih delcev k viskoznosti suspenzije. Lastna viskoznost je enaka 2,5 (Einsteinova enačba) za okrogle delce in večja za delce drugačnih oblik. Izraz za izračun lastne viskoznosti zapišemo v enačbi (15), (Struble in Sun, 1995):

$$[\eta] = \lim_{\Phi \rightarrow 0} \left( \frac{\frac{\eta}{\eta_s} - 1}{\Phi} \right) \quad (15)$$

Za ne-Newtonske tekočine je bila razvita Teorija Hattori-Izumi ali Teorija stopnje koagulacije (Wallevik, 2003a; Wallevik, 2009b).

### 3.1.6 Napetost na meji tečenja

Pojavlja se vprašanje, ali napetost na meji tečenja obstaja ali ne. Po definiciji Binghamovska tekočina ne bo tekla, dokler ne dosežemo kritične strižne napetosti, ki jo imenujemo strižna napetost na meji tečenja. Ko se delci tri-dimenzionalno zagostijo med seboj, potrebujemo neko silo, s katero razbijemo strukturo, ki nastane. Ta sila je povezana s strižno napetostjo na meji tečenja. Ni dvoma, da le redke tekočine tečejo ob najmanjših napetostih. Bolj koncentrirane tekočine (npr. mast) nam porajajo dvom o obstoju napetosti na meji tečenja. Jasno je, da se take tekočine pod svojo lastno težo ne bodo plosko razlile, ampak bodo ostale v obliki nekega kupčka materiala. Nekatere raziskave kažejo na to, da tudi koncentrirani sistemi tečejo v območju malih napetosti, vendar zelo počasi, saj imajo zelo visoke viskoznosti. Tako počasi, da bi potrebovali več let, da bi lahko vizualno zaznali deformacijo (Barnes et al., 1989). Ko se strižna hitrost približuje ničli, naj bi se tokovna krivulja asimptotično približevala izhodišču osi strižnih napetosti in naj je ne bi sekala. Običajno pa je strižna napetost na meji tečenja definirana kot presečišče ekstrapolacije tokovne krivulje, tvorjene pri višjih strižnih hitrostih, z osjo strižnih napetosti. Za uporabo v praksi je bolj uporabna zadnja definicija (Tattersall in Banfill, 1983).

Z zelo natančno opremo so potrdili, da so viskoznosti pri zelo nizkih strižnih hitrostih zelo visoke, potem pa v neki točki (pri še vedno nizki strižni hitrosti) viskoznosti strmo padejo (Koehler in Fowler, 2004). Ta prehod velja za prehod med elastičnim in plastičnim obnašanjem. Debata o obstoju napetosti na meji tečenja še ni zaključena, obstaja pa splošno mnenje, da je to parameter, določen z modelom (Binghamovski idr.), ki pa ni nujno dejanski parameter samega materiala, ali bolje povedano, ni dovolj točno določen. Obstoj strižne napetosti na meji tečenja je pomemben za posamezne aplikacije in praktične primere. Kar je pomembno, je definicija strižne napetosti na meji tečenja. Tako s strani

predpostavljenega modela kot s strani načina merjenja. Strižna napetost na meji tečenja, merjena med statičnim testom, ko je material na začetku v mirovanju, je ponavadi višja od tiste, ki je merjena med dinamičnim testom tokovne krivulje (Koehler in Fowler, 2004).

## **3.2 Reološke meritve tekočin in merilna oprema**

### **3.2.1 Uvod**

Napravo za merjenje reoloških parametrov imenujemo reometer in je bolj splošna naprava kot viskometer. Viskometer omogoča le merjenje viskoznosti in je primeren za Newtonske tekočine, medtem ko nam reometer omogoča meritve v bolj različnih in razširjenih pogojih (Hackley in Ferraris, 2001). Obstaja več vrst reometrov, ki se razlikujejo glede na geometrijo in na vrste toka tekočine, ki se ustvari med meritvijo. Izbira same vrste reometra je zelo pomembna in je odvisna od naloge, ki si jo zadamo, ter od vrste tekočine (Ferguson in Kembrowski, 1991).

### **3.2.2 Reometri**

Reometre za merjenje lastnosti tekočin lahko razdelimo na dva osnovna tipa: kapilarni in rotacijski. Kapilarni reometri delujejo na principu tečenja tekočine skozi ozko cev kot rezultat hidrostatičnega pritiska ali pritiska, povzročenega z naše strani. Veljajo za najbolj natančen način določanja viskoznosti za Newtonske in nekatere ne-Newtonske tekočine. Ponavadi imajo bolj enostavno zasnovano in so cenejši ter bolj natančni kot rotacijski reometri. Najbolj enostavni so stekleni kapilarni reometri, kjer merimo čas toka tekočine skozi ozko cev znane dolžine. Tekočina teče zaradi lastne teže. Obstajajo tudi iztiskalni kapilarni reometri, ki so primerni tudi za stabilne koncentrirane suspenzije in visoko tekoče betone. Z batom iztiskamo tekočino skozi kapilaro s konstantno hitrostjo. Merimo padeč pritiska skozi kapilaro kot posledico trenja in funkcijo pretoka tekočine (Ferguson in Kembrowski, 1991; Hackley in Ferraris, 2001; Koehler in Fowler, 2004). V praksi so rotacijski reometri bolj primerni za meritve na svežih cementnih kompozitih, zato tukaj zaključujem opis kapilarnih reometrov in ne podajam enačb, ki so v ozadju preračunov in so podane v literaturi, naštetih v tem odstavku.

Pri rotacijskih metodah tekočino neprekinjeno strižemo med dvema površinama, od katerih se ena ali obe vrtita. Prednost takih naprav je, da lahko material strižemo neomejeno dolgo in tako spremljamo prehodna območja ter dosežemo ravnotežno stanje. Omogočajo tudi oscilatorna merjenja. Možna sta dva načina merjenja, in sicer način, kjer merimo strižno hitrost pri kontrolirani strižni napetosti in način, kjer merimo strižno napetost pri kontrolirani strižni hitrosti (Barnes et al., 1989). Ponavadi imamo sicer podatek le o krožni frekvenci, ki pa jo lahko ob dobro definirani geometriji pretvorimo v strižno hitrost (Hackley in Ferraris, 2001). Rotacijske reometre lahko dodatno razdelimo na koaksialne

valjaste reometre, reometre z merilnim sistemom med stožcem in (krožno) ploščo in reometre z merilnim sistemom med dvema vzporednima (krožnima) ploščama (Ferguson in Kembrowski, 1991). Ti merilni sistemi nam omogočajo preračun v absolutne parametre (strižna napetost in strižna hitrost) iz dejansko izmerjenih relativnih parametrov (navor in krožna frekvenca). Ravno tako nam omogočajo izdelavo raznih reometrov z različnimi stopnjami natančnosti, z različnimi nameni uporabe in v različnih cenovnih razredih (Schramm, 2000). Za meritve na svežih cementnih kompozitih največkrat uporabljamo koaksialne valjaste reometre, ki so podrobno opisani v naslednjem poglavju.

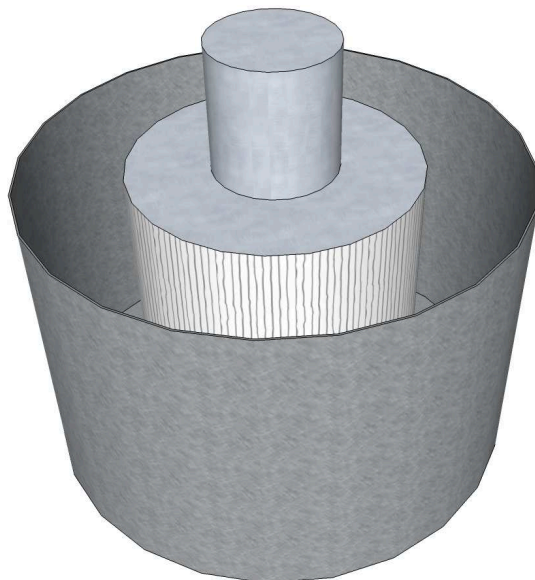
V sistemu med stožcem in ploščo je strižna hitrost skozi cel prerez skoraj enaka, če je kot stožca majhen (stožec ima topi kot). V primeru nizkih viskoznosti so potrebne visoke strižne hitrosti, da lahko dovolj natančno izmerimo navor. Vendar se pod takimi pogoji lahko pojavijo sekundarni tokovi v tekočini, ki lahko prikažejo lažno dilatantno obnašanje. Taka oprema mora biti zelo natančno izdelana, saj že najmanjše napake v izdelavi povzročajo večje napake v meritvah (Barnes et al., 1989). Tak merilni sistem ni primeren za merjenje grobo zrnatih suspenzij, kot je sveži beton, saj se pojavi problem razporeditve agregatnih zrn okrog stožca (Koehler in Fowler, 2004).

Pozorni moramo biti na pojav zdrsa na stenah merilne opreme. Trdni delci (npr. agregat) se navadno zaklinijo med seboj. Ob stenah je ta učinek zmanjšan. Zaradi pomanjkanja trdnih, večjih delcev ob stenah se tam pojavi plast bolj tekočega materiala. Večina tečenja materiala se torej odvija ob stenah. Zaradi tega pojava tok ni razporejen po reometru, kot je predpostavljeno, in rezultati so nerealni. Pojav lahko zmanjšamo z bolj hrapavimi stenami in tako izboljšamo lokalno zaklinjanje trdnih delcev (Koehler in Fowler, 2004).

### 3.2.3 Koaksialni valjasti reometri

Včasih jih imenujemo tudi koncentrični ali isto-središčni reometri (slika 3). Zgodovinsko gledano je to verjetno najbolj uporabljena geometrija za meritve viskoznosti (Ferguson in Kembrowski, 1991). Ponavadi so sestavljeni iz nekaj tipičnih delov: (i) merilno orodje z natančno definirano geometrijo, (ii) motor za vrtenje, s katerim lahko kontroliramo konstanten navor ali krožno frekvenco v širokem območju strižnih napetosti in strižnih hitrosti, (iii) senzorji za merjenje navora in kotnih hitrosti ter (iv) naprava za kontroliranje temperature preskušane materiala in naprave. Zadnja opcija ni pomembna pri merjenju svežih betonov. Geometrija reometra je sestavljena iz dveh valjev, od katerih se notranji, zunanji ali celo oba vrtita. Tekočina, katere lastnosti merimo, se nahaja v obroču med obema valjema. Površine valjev so ponavadi bolj grobe ali opremljene z rebri, da preprečijo zdrs materiala na stenah (Hackley in Ferraris, 2001). Primerni so za meritve manj viskoznih tekočin, saj se pri višjih viskoznostih pojavi problem vnosa zračnih mehurčkov in velikih sil. Geometrijsko poznamo še primera ozkega in širokega razmaka med valjema. V ozkem razmaku se tekočina striže s skoraj

konstantno strižno hitrostjo skozi celoten prerez, kar nam olajša račun. Da bi ta predpostavka veljala, mora biti razmerje med polmerom notranjega in zunanega valja večje od 0,97 (Barnes et al., 1989) oz. po drugi literaturi 0,95 (Ferguson in Kemblowski, 1991).



Slika 3: Skica modela koaksialnih valjev.

Figure 3: Sketch of coaxial cylinders model.

V kolikor upoštevamo nekaj predpostavk, lahko izpeljemo enačbe za račun parametrov, ki nastopajo v konstitutivnih enačbah, npr. v enačbah (3) in (4). Za ta korak potrebujemo torej nekaj predpostavk, geometrijo reometra ter izmerjen navor in krožno frekvenco. V nadaljevanju bodo izpeljane enačbe za Binghamovski model tekočine. Izpeljave za primer Newtonske tekočine lahko najdemo v literaturi (Koehler in Fowler, 2004).

Predpostavke, ki jih upoštevamo, so naslednje (Koehler in Fowler, 2004):

- Upoštevamo le material v obroču med notranjim in zunanjim valjem.
- Kakršnekoli pojave na vrhu ali dnu valjev ali vzorca tekočine zanemarimo.
- Upoštevamo pojav laminarnega toka.
- Vztrajnostne učinke zanemarimo.
- Hitrost materiala na stiku z valjem je enaka hitrosti valja.
- Upoštevamo pravilo širokega razmaka med valjema.

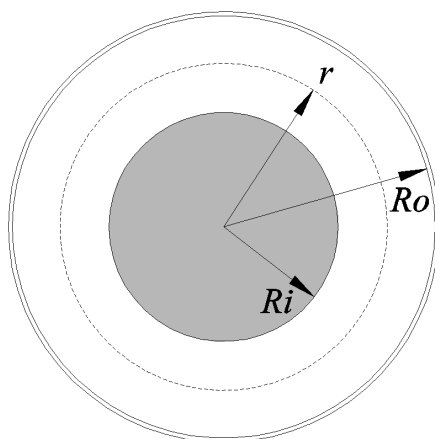


Pri geometriji reometra je potrebno upoštevati naslednje (Koehler in Fowler, 2004; Tattersall in Banfill, 1983; Whorlow, 1992):

- Polmer notranjega valja je označen z  $R_i$ , polmer zunanjega valja je označen z  $R_o$ , poljubni polmer med obema valjema pa je označen z  $r$  (slika 4).
- Eden od valjev (zunanji ali notranji) se vrti.
- Višina valja, na katerem je nameščen merilec navora  $T$ , je označena s  $h$ .
- Kotna hitrost vrtenja valja je označena z  $\omega$ .
- Tok preskušane materiala se bo zgodil v območju večjih strižnih napetosti. Območje je manjše v primeru manjših hitrosti. Preostali del preskušane materiala bo miroval ali se bo premikal kot trden čep, odvisno, iz katerega zornega kota gledamo in kateri (zunanji ali notranji) valj se vrti. Od tu naprej to območje imenujemo območje mirovanja betona. To je posledica strižne napetosti na meji tečenja v materialu. Strižna napetost v območju mirovanja ne presega strižne napetosti na meji tečenja v vsem območju.

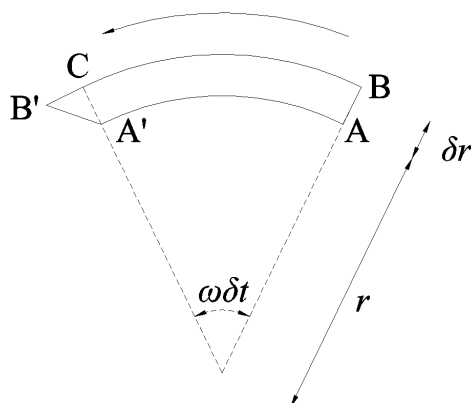
Ker uporabljamo reometer z velikim razmakom med valjema, potrebujemo matematične izraze za izračun strižne hitrosti v poljubni točki med valjema. Strižna hitrost je v mehaniki tekočin pomembna, saj iz nje lahko izrazimo strižno napetost. Izrazimo jo s pomočjo gradienta tangencialnih hitrosti tekočine v območju med valjema. Ker je stanje osno simetrično, nas zanimajo le spremembe v radialni smeri. Ko v zapisu upoštevamo, da je tangencialna hitrost produkt kotne hitrosti in polmera (Koehler in Fowler, 2004), dobimo enačbo (16):

$$\frac{dv}{dr} = \frac{d(r\omega)}{dr} = \omega + r \frac{d\omega}{dr} \quad (16)$$



Slika 4: Pogled z vrha na model koaksialnih valjev.

*Figure 4: Top view of coaxial cylinders model.*



Slika 5: Deformacija elementa tekočine.

Figure 5: Deformation of fluid element.

Iz geometrijskih zvez na sliki 5 (Whorlow, 1992) za tanek sloj fluida sledi, da je  $BB' = (r+\delta r)(\omega+\delta\omega)\delta t$  in  $BC = (r+\delta r)\omega\delta t$ . Strižna deformacija je torej  $\gamma = B'C/CA' = (r+\delta r)\omega\delta t/\delta r$ . V limiti  $\delta r \rightarrow 0$  postane strižna hitrost, enačba (17), enaka:

$$\dot{\gamma} = r \frac{d\omega}{dr} \quad (17)$$

Posledično gradient tangencialnih hitrosti  $dv/dr$ , enačba (18), postane enak:

$$\frac{dv}{dr} = \omega + \dot{\gamma} \quad (18)$$

Iz enačb (17) in (18) sledi, da sta strižna hitrost in gradient tangencialnih hitrosti funkciji polmera. Navor  $T$ , ki se pojavi pri poljubni razdalji med valjema, izračunamo kot produkt ročice in sile, ki deluje na površino navideznega plašča valja pri tem polmeru. To silo izračunamo z integracijo strižnih napetosti po plašču valja oz., ker so napetosti konstante, s preprostim množenjem po enačbi (19) (Koehler in Fowler, 2004; Tattersall in Banfill, 1983). Iz te enačbe lahko preprosto izrazimo strižno napetost, enačba (20):

$$T = r F = r \tau A = r \tau 2 \pi r h = 2 \pi r^2 h \tau \quad (19)$$

$$\tau = \frac{T}{2 \pi r^2 h} \quad (20)$$

Reometri navadno pri posamezni krožni frekvenci merijo navor. Krožno frekvenco podajo s številom obratov v časovni enoti. Navor merijo na notranjem ali zunanem valju. Ta izmerjena navora imata enako absolutno vrednost, a drugačen predznak (Koehler in Fowler, 2004). Z uporabo teh podatkov lahko izračunamo absolutne reološke parametre za Newtonske in Binghamovske tekočine. V doktorski

disertaciji se ukvarjamo z betoni, ki na splošno veljajo za Binghamovske tekočine, zato tu ne bomo prikazali izpeljave za Newtonske tekočine, ki jo lahko najdete v literaturi (Koehler in Fowler, 2004). Prikazana je le izpeljava za Binghamovske tekočine, ki se začne s konstitutivno enačbo (4) za Binghamovske tekočine. Enačbo preuredimo tako, da postavimo strižno hitrost na levo stran in dobimo enačbo (21), v katero vstavimo enačbi (17) in (20) ter dobimo enačbo (22).

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_0}{\mu} \quad (21)$$

$$r \frac{d\omega}{dr} = \frac{T}{2 \pi r^3 h \mu} - \frac{\tau_0}{\mu} \quad (22)$$

Ob predpostavki, da se tok tekočine zgodi le v obroču med valjema, integriramo enačbo (22) v mejah  $\omega = \Omega$  pri  $r = R_i$  in  $\omega = 0$  pri  $r = R_o$ , enačba (23). Kot že rečeno, ni pomembno, kateri valj se vrti, zato meje integriranja ostanejo enake za vse koaksialne reometre.

$$\int_{\Omega}^0 d\omega = \int_{R_i}^{R_o} \left( \frac{T}{2 \pi r^3 h \mu} - \frac{\tau_0}{\mu r} \right) dr \quad (23)$$

Rezultat integriranja je znana Reiner – Rivlinova enačba (24), ki je izraz za premico, katere naklon je izražen s plastično viskoznostjo, višino ter polmeri notranjega in zunanjega valja. Presečišče te premice s koordinatno osjo je izraženo s strižno napetostjo na meji tečenja, viskoznostjo in polmeri obeh valjev (Koehler in Fowler, 2004).

$$\Omega = \frac{T}{4 \pi h \mu} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \ln \left( \frac{R_o}{R_i} \right) \quad (24)$$

V naslednjem koraku iz enačbe (24) izrazimo navor in dobimo enačbo (25):

$$T = \frac{4 \pi \mu h}{\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}} \Omega + \frac{4 \pi \tau_0 h}{\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}} \ln \left( \frac{R_o}{R_i} \right) = H \Omega + G \quad (25)$$

Desni del enačbe (24) je enačba tokovne krivulje, izmerjene na reometru in zapisane kot funkcija kotne hitrosti, kjer je  $H$  naklon premice in  $G$  presečišče premice z ordinato. Reometer ponavadi meri krožno frekvenco in ne kotne hitrosti. Razmerje med kotno hitrostjo in frekvenco je preprosto  $\Omega = 2\pi f$  (Wallevik, 2003b). Iz enačbe (25) lahko preprosto izrazimo enačbi za plastično viskoznost  $\mu$ , enačba (26), in strižno napetost na meji tečenja  $\tau_0$ , enačba (27).

$$\mu = \frac{H \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right)}{4 \pi h} \quad (26)$$

$$\tau_0 = \frac{G \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right)}{4 \pi h \ln \left( \frac{R_o}{R_i} \right)} \quad (27)$$

Če v enačbi (25) kotno hitrost izrazimo s krožno frekvenco ( $\Omega = 2 \pi f$ ), se enačba (26) za viskoznost spremeni v enačbo (28).

$$\mu = \frac{H \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right)}{8 \pi^2 h} \quad (28)$$

### 3.2.4 Posebnosti in napake koaksialnih valjastih reometrov

Na točnost meritev v koaksialnih valjastih reometrih vpliva več dejavnikov. Med izpeljavo enačb smo zanemarili *vplive na dnu in vrhu valjev* (»top and bottom effect«) ter tako predpostavili, da so valji neskončne dolžine (Koehler in Fowler, 2004; Whorlow, 1992). V kolikor je notranji valj potopljen v preskušani material, je očitno, da ta dodatni material nad in pod notranjim valjem povzroča dodatne napetosti na notranji valj. Možno je oceniti ta prispevek k izmerjenemu navoru ali spremeniti obliko notranjega valja, da izničimo ta prispevek (Koehler in Fowler, 2004). Zaradi teh vplivov deluje, kot da ima notranji valj večjo višino, ali da je potopljen globlje (Ferguson in Kembrowski, 1991). Vpliv v delu pod notranjim valjem lahko ocenimo kot tok med dvema ploščama rotacijskega reometra. Lahko pa opremimo spodnji in zgornji del notranjega valja s posebnimi obroči, ki delujejo kot določena »obramba« in izničijo vplive na dnu in na vrhu. To je storil že Couette (Macosko, 1994), po katerem tudi imenujemo sistem koaksialnih valjev, in so kasneje potrdili tudi drugi avtorji (Macosko, 1994). Dodatne rešitve so, da ujamemo zračni mehurček pod notranji valj (ta valj je zaprt, ima dno in ne dopušča prehoda merjenega materiala v svojo notranjost), ali da uporabimo sistem z dvema razmakoma (merjeni material se nahaja le med dvema mirujočima valjema. V vmesni prostor med dvema mirujočima valjema spustimo tretji valj, ki ima ponavadi mrežasto steno, kot je na sliki 9 na sredini).

Predpostavili smo tudi *laminarni tok* preskušane materiala v obroču med valjema, ki se pojavi v smeri vrtenja enega od valjev. V območju višjih kotnih hitrosti se pojavi možnost, da ti laminarni tokovi postanejo neurejeni. Pomembno je, kateri valj se vrtil, zunanji ali notranji. Laminarni tok je bolj

stabilen v primeru vrtenja zunanlega valja zaradi vpliva centrifugalnih sil (Ferguson in Kemblowski, 1991). V primeru vrtenja notranjega valja imajo hitro se premikajoči delci v bližini notranjega valja težnjo po pomikanju navzven v Taylorjevi vrtinčasti obliki (Whorlow, 1992).

Dodatna težava je tudi *zdrs materiala na stenah valjev*, kar se ne sklada s predpostavko, da je hitrost materiala enaka hitrosti vrtenja valjev (Koehler in Fowler, 2004; Whorlow, 1992). Pojav je že opisan v poglavju 3.2.2. Za preprečitev tega pojava se uporabljajo tudi narebrene stene valjev. Rebra naj bodo velika približno toliko, kot je največji delec v tekočini. Efektivni polmeri valjev so v tem primeru spremenjeni za debelino reber (Tattersall in Banfill, 1983). Pomemben pojav je tudi dvig temperature preskušane materiala zaradi notranjega trenja. Reološki parametri materiala so temperaturno odvisni (Ferguson in Kemblowski, 1991; Macosko, 1994).

Pri merjenju reoloških lastnosti suspenzij, kot je beton, se pojavi problem premajhnega prostora med notranjim in zunanjim valjem. V primeru, da suspenzija vsebuje večje delce, ti delci pogosto trčijo med seboj, saj nimajo dovolj prostora za neovirano gibanje. V posebnih primerih lahko večji delci ustvarijo tudi most med zunanjim in notranjim valjem, kar lahko povzroči nihanja v meritvah navora (Wallevik, 2003b). Razmak med notranjim in zunanjim valjem poskušamo zadržati, kar se da majhen, da se približamo geometriji ozkega razmaka in je račun strižnih hitrosti bolj točen.

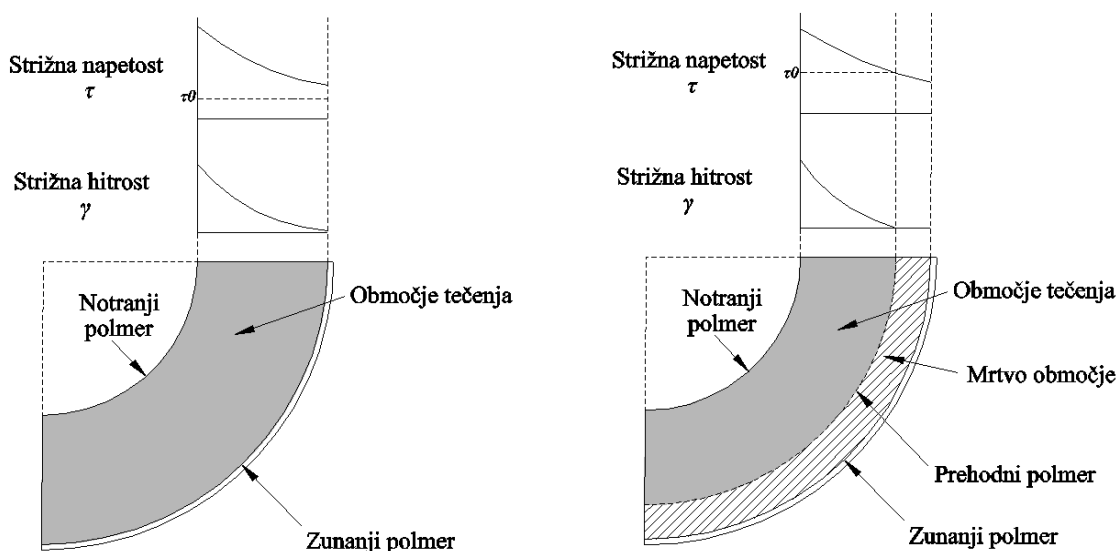
Večji delci se premikajo (ang. *particle migration*) iz območja z visoko v območje z nizko strižno hitrostjo (Barnes et al., 1989). Vendar pojav migracije ni odvisen le od gradienta strižne hitrosti. Odvisen je tudi od procesa stopnje trkov med delci. Podobno kot prej se delci zaradi trkov premikajo iz območja z višjo stopnjo trkov v območje z nižjo stopnjo trkov. Drugi proces imenujemo dilatantni in je odvisen od volumske koncentracije delcev. Razporeditev delcev se spreminja, da dopušča neovirano premikanje delcev drug mimo drugega. To povzroča premikanje matrice iz območja manjših deformacij (nižja strižna hitrost) v območje večjih deformacij in posledično premikanje večjih delcev v nasprotni smeri. Tretji proces se pojavi zaradi problema majhnega razmaka med valjema. Stopnja trkov je tako večja od pričakovane in zato je prvi omenjeni proces premikanja delcev zaradi trkov med njimi močnejši (Wallevik, 2003b).

Omeniti velja tudi Deborahovo število, s katerim opišemo tečenje materiala. Deborahovo število predstavlja razmerje med karakterističnim relaksacijskim časom materiala (npr. dejanskim časom do konca deformiranja med testom obdelavnosti svežega betona) in karakterističnim časom deformacijskega procesa (npr. čas trajanja eksperimenta). Visoka števila predstavljajo obnašanje trdnih teles in nizka števila predstavljajo obnašanje tekočin (Barnes et al., 1989). Takšno karakterizacijo lahko uporabimo tudi za opis betonov. Pri manj obdelavnih betonih z visokim Deborahovim številom je vprašanje, ali lahko uporabimo zakone reologije tekočin, saj taki betoni ne

tečejo pod vplivom lastne teže. Deborahovo število je torej previsoko, da bi take betone merili v običajnih rotacijskih reometrih za betone (Koehler in Fowler, 2004).

Pri reoloških meritvah svežih cementnih kompozitov moramo biti pozorni pri izbiri strižnih hitrosti. Te naj bodo podobne tistim, katerim bo material dejansko podvržen. Strižno hitrost na gradbišču lahko ocenimo z razmerjem med največjo hitrostjo, ko teče čez odprtino, in med velikostjo odprtine. Pričakuje se, da ta ni večja od  $10 \text{ s}^{-1}$  (Koehler in Fowler, 2004; Schramm, 2000).

Zelo pomemben je pojav območja mirovanja betona, ang. dead zone (Koehler in Fowler, 2004), ali območja tečenja trdnega čepa, ang. plug flow (Wallevik, 2003b). V primeru tekočin, ki imajo strižno napetost na meji tečenja, vnesene napetosti morda ne bodo dovolj velike, da bi povzročile tečenje vsega materiala. To povzroča tako imenovano območje mirovanja betona. Izraz tečenje trdnega čepa, ki se tudi uporablja za ta pojav, je lahko narobe razumljen, saj v primeru opisanega pojava material dejansko ne teče, ampak se premika skupaj s posodo (primer vrtenja zunanjšega valja) ali pa se sploh ne premika (primer vrtenja notranjšega valja). Tok Binghamovske tekočine v koaksialnem valjastem reometru je prikazan na sliki 6. Primer velja za reometer, pri katerem se vrti notranji valj. Če je strižna napetost v materialu med valjema večja od strižne napetosti na meji tečenja, potem ne pride do pojava območja mirovanja betona, saj ves material teče (leva stran slike 6). V kolikor temu ni tako, se tako območje pojavi (desna stran slike 6).



Slika 6: Tok Binghamovske tekočine v koaksialnem valjastem reometru. Na levi strani je primer brez mrtvega območja, na desni je primer z mrtvim območjem (Koehler in Fowler, 2004).

Figure 6: Flow of Bingham liquid in coaxial cylinders rheometer. On the left side is example with no dead zone, on the right side is example with dead zone (Koehler in Fowler, 2004).

V primeru, ko ves material teče, velja klasična Reiner-Riwlinova enačba (24), ki pa lahko povzroči večje napake pri izračunu, če se pojavi območje mirovanja betona. Tekočina, ki je v gibanju, se torej

nahaja med notranjim polmerom in prehodnim polmerom. Zato moramo spremeniti meje integriranja v enačbi (23). Pri pogoju za  $\omega = 0$  upoštevamo prehodni polmer, ki ga izrazimo iz enačbe (19). Iz enačbe (19) izrazimo polmer in namesto strižne napetosti v enačbo vstavimo strižno napetost na meji tečenja. To je torej največji polmer, do katerega material še teče. Pri večjih polmerih je napetost manjša in material ne teče. Dobimo torej mejo integriranja pri  $\omega = 0$  je  $r = (T/2\pi h\tau_0)^{1/2}$ . Rezultat integriranja je enačba (29).

$$\Omega = \frac{T}{4\pi h\mu} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{2\pi h\tau_0}{T} \right) - \frac{\tau_0}{2\mu} \ln \left( \frac{T}{2\pi h\tau_0 R_i} \right) \quad (29)$$

Izrazimo lahko tudi enačbo za minimalno kotno hitrost, pri kateri se še ne pojavi območje mirovanja betona. V enačbo (23) vstavimo vrednost za navor, pri katerem se mrtvo območje začne na mestu zunanega valja, ta vrednost je  $T = 2\pi h\tau_0 R_o^2$ . Rezultat je enačba (30):

$$\Omega = \frac{\tau_0}{\mu} \left[ \frac{1}{2} \left( \left( \frac{R_o}{R_i} \right)^2 - 1 \right) - \ln \left( \frac{R_o}{R_i} \right) \right] \quad (30)$$

Iz enačbe (30) je razvidno, da je pojav mrtvega območja odvisen od kotne hitrosti, razmerja med strižno napetostjo na meji tečenja in viskoznostjo ter od razmerja med polmeroma zunanjega in notranjega valja. Mrtvemu območju se lahko izognemo s povečanjem kotne hitrosti (ni zaželeno, ker povečamo možnost za premikanje delcev) ali z zmanjšanjem katerega od ostalih dveh naštetih parametrov ali njune kombinacije. Najboljša rešitev je zmanjšanje razmerja med zunanjim in notranjim polmerom valjev (Koehler in Fowler, 2004).

Ker je napaka zaradi zanemarjanja pojava območja mirovanja betona velika in pomembna, in ker razmerja med polmerom zunanjega in polmerom notranjega valja ne moremo zmanjšati do te mere, da bi se popolnoma izognili pojavu mrtvega območja, moramo ta pojav pravilno upoštevati. Ker je dejanske tokove v reometru nemogoče točno analitično določiti, jih lahko približno ocenimo, da izboljšamo natančnost meritve z reometrom. Poznamo tri metode. Prva se imenuje *izločevanje točk* (upoštevajo jo ConTec Viscometer 5). Princip je sledeč: meritev z reometrom poteka v obliki tokovne krivulje v izbranem območju krožnih frekvenc. Vse točke pri krožnih frekvencah nižjih od tiste kritične, pri kateri se še ne pojavi mrtvo območje, določene z enačbo (30), izločimo. Postopek je iterativen, z vsemi izmerjenimi točkami izračunamo viskoznost in strižno napetost na meji tečenja in preverimo krožne frekvence ter izločimo tiste, ki so nižje od kritične. Ponovno izračunamo viskoznost in strižno napetost s preostalimi točkami ter ponovno določimo kritično krožno frekvenco in preverimo, ali je katera točka pri nižji krožni frekvenci ter jo izločimo. Postopek ponavljamo, dokler obstajajo točke pod kritično vrednostjo. Obstaja nevarnost, da izločimo preveč točk.

Druga metoda se imenuje *samostojna* strižna napetost na meji tečenja. Le-to izmerimo posebej in jo potem uporabimo za izračun viskoznosti. Tu je težava v tem, da moramo izvesti dve različni meritvi in da samostojna meritev strižne napetosti na meji tečenja lahko poda drugačen rezultat kot meritev pri tokovni krivulji.

Tretja metoda je *efektivni obroč*. Tu iterativno določamo strižno napetost na meji tečenja preko enačbe (29) ob predpostavki, da mejo med tečenjem in območjem mirovanja betona lahko pravilno izračunamo. To mejo izračunamo za vsako krožno frekvenco posebej. Postopek je naslednji: predpostavimo vrednosti za strižno napetost na meji tečenja in viskoznost ter izračunamo novo vrednost krožne frekvence. To naredimo pri vsaki točki in izračunamo skupno napako med merjeno in izračunano krožno frekvenco. Vrednosti strižne napetosti na meji tečenja in viskoznosti nato spreminjamo, dokler ne dosežemo minimalne napake med merjeno in izračunano krožno frekvenco. Izračuna se lahko tudi dejanski kritični polmer, do katerega material teče. To storimo z uporabo enačbe  $R_{eff} = (T/2\pi h \tau_0)^{1/2}$ , ki je postavljena za mejo integriranja pri enačbi (29). Pri suspenzijah z večjimi delci se ta meja lahko spreminja zaradi prisotnosti večjih delcev. Upoštevati moramo tudi dejstvo, da je izračunani kritični polmer lahko manjši od velikosti največjega delca, kar pa ni smiselno in taka točka potemtakem ni realna (Koehler in Fowler, 2004).

### 3.3 Merilna oprema za merjenje reoloških lastnosti svežih cementnih kompozitov

Ob vseh omejitvah se pojavi vprašanje, kako izdelati reometer oziroma, kako predelati tradicionalne reometre, da bodo primerni za izvajanje meritev na svežih cementnih kompozitih. Glavna težava je v zagotavljanju nekaj osnovnih predpostavk, ki zagotavljajo rezultate v (osnovnih reoloških) fizikalnih količinah, uporabljenih v enačbah, ki so bile opisane do sedaj. To so napetost, viskoznost in strižna hitrost in ne navor  $G$ , koeficient viskoznosti  $H$  in frekvenca  $f$ . Le na ta način namreč omogočimo neposredno primerjavo reometrov in v prihodnosti mogoče tudi uveljavitev preiskave z reometrom kot standardizirane metode. Večino težav je povezanih z velikostjo delcev, nagnjenostjo k segregaciji večjih delcev in časovnimi lastnostmi. V kolikor se želimo dovolj natančno približati laminarnemu toku v reometru, je zaželena razlika med polmeroma notranjega in zunanjega valja v koncentričnih valjastih reometrih vsaj petkratna vrednost premera največjega delca. Poleg tega naj bo razmerje med polmeroma med 1,0 in 1,1. To narekuje velike velikosti reometrov za relativno majhne največje velikosti delcev (Ferraris, 1999). Reometre, namenjene svežim cementnim kompozitom, večinoma uporabljamo v laboratorijih. Obstaja nekaj reometrov, prirejenih za delo na terenu, vendar so še predragi in premalo robustni za redno delo na terenu (Koehler in Fowler, 2003). Večina reometrov je rotacijskih, vendar obstajajo tudi drugačni. Na Danskem so razvili metodo 4C-Rheometer, ki na podlagi preiskave razleza s posedom in s pomočjo video analize celo izračuna reološke parametre (4C-Rheometer, 2013). Poznamo pa tudi meritve z avtomešalniki (Amziane et al., 2005) ali v mešalcih na



betonarnah. Za oceno reoloških lastnosti lahko uporabimo tudi strižni test za preiskavo zemljin (Koehler in Fowler, 2003). Take vrste reometrov sicer ne omogočajo preračuna v osnovne reološke količine, vendar so kljub temu uporabno orodje za oceno materiala.

Reometri za sveže cementne kompozite so razdeljeni na tri osnovne tipe (Ferraris in Brower, 2001; Koehler in Fowler, 2003):

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

### 3.3.1 Koaksialni valjasti reometri

Koaksialni valjasti reometri delujejo na principu vrtenja zunanjšega ali notranjšega valja, pri čemer drugi valj miruje. Na enem od valjev, ponavadi notranjem, se meri navor. Površini obeh valjev sta narebreni, da preprečujeta zdrs materiala. Najbolj znana sta BML Viscometer 3 (nadomešča ga ConTec Viscometer 5) in CEMAGREF – IMG (Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003). Poglavja 3.3.1, 3.3.2 in 3.3.3 vsa povzemajo pravkar citirano literaturo, zato je v nadaljevanju ne bom več ponavljal. Citiral bom le dodatno literaturo.

*BML Viscometer 3* ali *ConTec Viscometer 5* (slika 7), ki je prvega nadomestil, je tipični predstavnik koaksialnih valjastih reometrov. Vrti se zunanji valj, na notranjem valju, ki miruje, se meri navor. Opremljen je z rebri, ki preprečujejo zdrs materiala po stenah. Notranji valj je sestavljen iz treh delov: spodnji in zgornji del ter obroč. Namen spodnjega dela je, da odpravi ali vsaj zelo zmanjša učinke na dnu (»bottom effect«). Obroč na vrhu je namenjen predvsem temu, da zagotavlja konstantno višino, kjer merimo navor. Odpravlja tudi negativne učinke na vrhu (»top effect«), ki pa so manj pomembni od učinkov na dnu. Na ta način zagotavljamo dvo-dimenzionalni strig materiala med valjema. Meritev poteka po korakih od višje proti nižji hitrosti. Program v ozadju z uporabo enačbe (29) tudi izračuna kotno hitrost, pod katero se pojavlja mrtvo območje. Kasneje lahko ročno odstranimo točke z nižjo kotno hitrostjo in ponovno izračunamo reološke parametre. Aparat omogoča tudi kalibracijo z zunanjim merilcem navora in tahometrom ter s komercialno dostopnimi materiali z znanimi in stabilnimi reološkimi lastnostmi, kot so različna olja. Zaradi svoje velikosti je primeren le za delo v laboratoriju in ni prenosljiv. Izvedba preiskave s tem reometrom je popolnoma avtomatizirana in kontrolirana preko računalniškega programa. Reometer omogoča uporabo notranjih in zunanjih valjev različnih velikosti, v odvisnosti od največjega zrna trdnih delcev v suspenziji. Na ta način lahko z isto osnovno opremo merimo tako malte kot betone (do največjega zrna 22 mm). Reometer pa ni primeren za merjenje reoloških parametrov cementnih past. Isti proizvajalec izdeluje tudi aparate *Viscometer 4* in *Viscometer 6*. Oba delujeta na povsem enakem principu kot *Viscometer 5* in tudi izgledata podobno,

le da uporabljata manjše notranje in zunanje valje. Viscometer 4 je prilagojen predvsem za meritve malt, Viscometer 6 pa za meritve cementnih past.



Slika 7: BML Viscometer 3 (levo) (Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003) in ConTec Viscometer 5 (desno).

Figure 7: BML Viscometer 3 (left) (Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003) and ConTec Viscometer 5 (right).

*CEMAGREF – IMG* je velik reometer (slika 8), ki je bil zasnovan za meritve reoloških parametrov blatnih tokov, a se uporablja tudi za meritve betonov. Reometer je nameščen na prikolico in je torej prenosen. Obstaja le en prototip. Količina vzorca betona v tem reometru je velika in znaša približno 500 l. Zunanji valj je opremljen z navpičnimi rebri, notranji valj pa je opremljen s kovinsko mrežo. Ta dva ukrepa preprečujeta zdrs materiala. Velikost naprave je ugodna zaradi relativno velikih dimenzij glede na največje zrno betona. Tudi zaradi tega je aparat primeren za meritve betonov z velikimi agregatnimi zrnji. Žal ne ustreza popolnoma pogoju za Couettovo geometrijo, saj je razmerje med zunanjim in notranjim valjem preveliko. Zaradi tega se pričakuje pojav mrtvega območja, obseg katerega je potrebno ročno izmeriti. Meritev poteka po korakih od največje do najmanjše hitrosti. Rezultat je tokovna krivulja, na podlagi katere lahko izračunamo Binghamovske parametre materiala.



Slika 8: CEMAGREF – IMG reometer (Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003).

*Figure 8: CEMAGREF – IMG rheometer (Bartos et al., 2002; Ferraris in Brower, 2001, 2004; Koehler in Fowler, 2003).*

*Schleibinger Viscomat NT* (slika 9) je reometer primeren za meritve na pastah in maltah (Schleibinger, 2013b). Meritve potekajo po želji uporabnika, krožne frekvence pa je možno poljubno nastaviti. Omogoča uporabo več različnih nastavkov, od katerih je eden narejen skladno s Couettovo geometrijo. Ta nastavek omogoča meritve na materialih do velikosti zrna 0,2 mm pri točno določenih strižnih hitrostih. Priporočen je za meritve Newtonskih tekočin ob predpostavki, da se ne pojavlja zdrs materiala na stenah in segregacija materiala. Drugi nastavek je v obliki košare in deluje po principu dvojnega razmaka. Košara je mreža z odprtiniami diamantne oblike in omogoča meritve na materialih z največjim zrnom 2 mm (Vogel, 2008). Posebej je primerna za zelo tekoče malte brez segregacije. Omogoča izračun točnih strižnih hitrosti in temeljnih reoloških parametrov. Princip dvojnega razmaka je bil uporabljen tudi v napravi Powers and Wiler Plastomer (Koehler in Fowler, 2003), ki je bil razvit že pred drugo svetovno vojno, in je bil prvi primer uporabe koaksialnih valjev za meritve na betonih.

Obstaja še veliko reometrov z geometrijo koaksialnih valjev, ki pa so primerni za materiale z zelo majhnimi največjimi zrnji. Taki aparati so ponavadi zelo natančni in se uporabljajo večinoma v kemijski industriji. V posameznih raziskavah so bili razviti tudi drugi reometri, ki pa niso komercialno dostopni. Primer je FHPCM reometer (the Flow of High Performance Concrete Meter), ki je zasnovan na aparatu Mk II ali Two - point, ki sicer ni koaksialni. Razlika je v obliki vretena (Yen et al., 1999). Drugi primer je Bertta, kjer se valji ne vrtijo, temveč oscilirajo. Geometrija pri obeh naštetih dovoljuje meritve na betonih z relativno majhnim največjim zrnom.



Slika 9: Schleibinger Viscomat NT (levo), nastavek v obliki košare (sredina), nastavek koaksialnih valjev (desno) (Schleibinger, 2013b).

Figure 9: Schleibinger Viscomat NT (left), basket probe (middle), coaxial cylinders probe (right) (Schleibinger, 2013b).

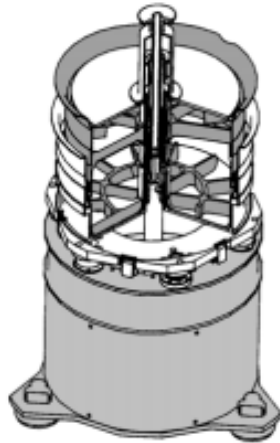
### 3.3.2 Reometri z vzporednimi ploščami

Reometri z vzporednimi ploščami delujejo na principu vrtenja dveh (ali ene) horizontalnih plošč, ki strižeta material med njima. Takih reometrov je malo, najbolj znan je BTRHEOM, v razvoju pa je še sistem Coplete 5 proizvajalca ConTec.

V reometru *BTRHEOM* se vrti zgornja plošča (slika 10). Plošče niso ravne, ampak so v obliki rezil. Plošča se vrti pri različnih hitrostih, pri vsaki hitrosti pa se meri navor, ki ga povzroča material. Avtomatično računa temeljne Binghamovske parametre in omogoča uporabo izmerjenih rezultatov v naknadnih preračunih, npr. v primeru obnašanja materiala kot Herschel-Bulkley tekočine (Wong et al., 2001). Omogoča različne tipe meritev (z vibracijami ali brez, z naraščajočimi ali padajočimi kotnimi hitrostmi, lahko meri dilatantnost materiala in strižno napetost na meji tečenja v mirovanju), ki so vse vgrajene v spremljevalni računalnik, preko katerega kontroliramo napravo (de Larrard et al., 1997). *UIUC Rheometer* je nadgradnja *BTRHEOM* v smislu lažje instalacije med meritvijo in lažjega čiščenja ter s tem tudi manjše napake meritve.

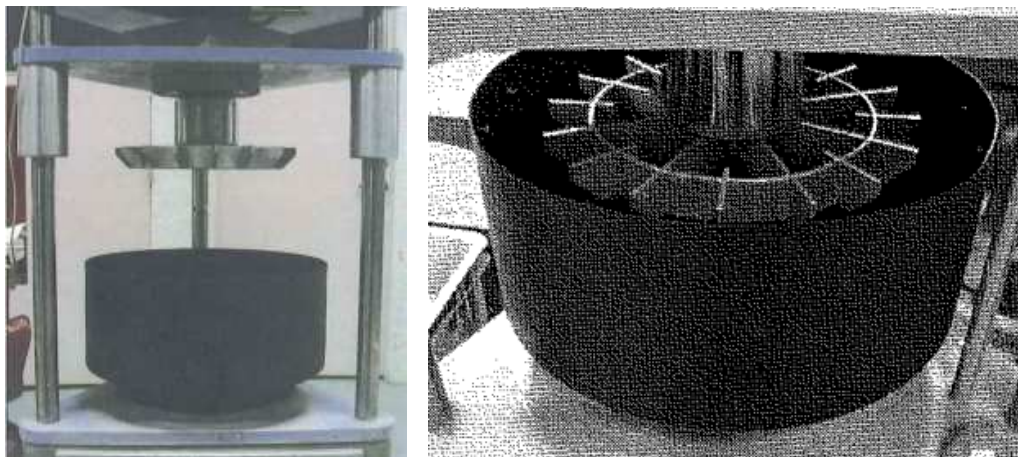
*ConTec Coplete 5* sistem se uporablja kar na reometru ConTec Viscometer 5 (slika 11) in predstavlja nadgradnjo tega reometra. Tak sistem naj bi omogočal meritve na betonih z največjim zrnom 32 mm ali več, brez velikega povečanja vzorca. Notranji valj zamenjamo z narebreno vodoravno ploščo. V spodnjem delu imamo prirejeno posodo, ki simulira spodnjo ploščo. Tak sistem ni povsem pravi sistem dveh vzporednih plošč, saj je dejansko kombinacija koaksialnih valjev, stožca in vzporednih plošč. Algebraičen izračun temeljnih fizikalnih količin tako ni mogoč zaradi kompleksnega toka, ki se ustvarja v posodi, in zaradi kompleksnih robnih pogojev. Je pa ta izračun možen na podlagi večjega

števila numeričnih izračunov, kjer povežemo posamezne vrednosti  $G$  in  $H$  z vrednostmi  $\tau_0$  in  $\mu$ . Sistem Coplete 5 in sistem koaksialnih valjev dajeta podobne rezultate. Poudariti je treba, da je ta sistem še v razvoju in je potrebno še več meritev in podatkov za potrditev zgornjih trditev (Wallevik, 2009a).



Slika 10: BTRHEOM reometer z vzporednimi ploščami (Ferraris in Brower, 2001).

*Figure 10: BTRHEOM rheometer with parallel plates (Ferraris in Brower, 2001).*



Slika 11: Sistem Coplete 5 dveh vzporednih plošč (Wallevik, 2009a; Wallevik, 2009b).

*Figure 11: System Coplete 5 of two parallel plates (Wallevik, 2009a; Wallevik, 2009b).*



Slika 12: ICAR Rheometer (foto: osebni arhiv).  
Figure 12: ICAR Rheometer (photo: personal archive).

### 3.3.3 Mešalni reometri z rotorjem

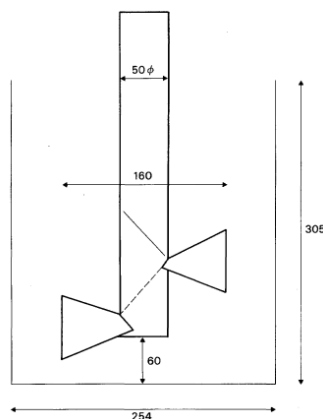
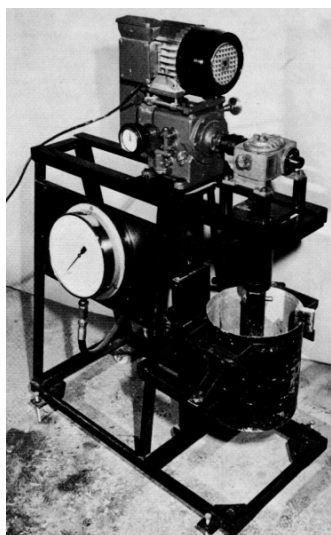
Mešalni reometri z rotorjem imajo na rotorju, ki je v navpični osi, nameščene lopatice (vreteno). Obstaja več različnih vrst lopatic, od pravokotnih do takih v obliki kril. Tovrstni reometri so zelo primerni za delo na terenu, saj omogočajo izvedbo naprav manjših dimenzij.

*ICAR Rheometer* je naprava ameriške izdelave (slika 12). Načrtovan je bil na podlagi omejitev obstoječih reometrov in potreb industrije; velikost naj bo primerna za delo na terenu, meritev naj bo hitra, preprosta in dovolj natančna ter tako primerna za delo na terenu, cena aparata pa ugodna. Uporablja vreteno s 4 rezili, ki so pravokotna druga na drugo. Vreteno se potopi v material in vrtil pri različnih hitrostih, aparat pa meri navor, potreben za vrtenje vretena pri določeni hitrosti. Vreteno deluje kot notranji valj koaksialnega reometra. Zaradi te predpostavke omogoča tudi preračun v osnovne Binghamovske parametre preko Reiner-Riwlinove enačbe (23). Tak način izračuna (s to predpostavko) je potrjen v literaturi (Barnes in Nguyen, 2001). Aparat je voden preko računalnika. Program nam omogoča izbiro različnih nastavitvev hitrosti, števila točk ipd.

*Tattersall Two-point* rheometer je eden prvih reometrov, ki je meril po Binghamovskem principu, in eden prvih, ki je uporabljal sistem mešala. Skozi leta so aparat razvijali. Prva verzija je bil modificiran kuhinjski mešalnik (Mk-I), ki je za mešalo uporabljal zavito kljuko, nato pa so razvili naprednejši aparat z mešalom s štirimi nagnjenimi rezili (Mk-II), spiralasto razvrščenimi okrog glavne osi (slika13), ki je najbolj pogosto uporabljana verzija aparata. Ta model so nadgradili še z mešalom v obliki črke H (Mk-III), ki se po materialu premika planetarno in okrog svoje osi ter je primeren za manj obdelavne betone z vrednostjo poseda pod 50 mm. V kolikor želimo pridobiti podatke v obliki temeljnih fizikalnih količin, mora biti aparat umerjen z uporabo Newtonskih ali ne-Newtonskih

tekočin z znanimi reološkimi lastnostmi. Kalibracija je podrobneje opisana v literaturi (Tattersall in Banfill, 1983).

*IBB rheometer* (slika 14) je avtomatizirana nadgradnja Tattersallove Two-point naprave. Aparat se je sprva uporabljal za testiranje brizganega betona, vendar so ga uspešno uporabili tudi za betone s posedom od 20 mm do 300 mm, za betone SCC, običajne betone, vlaknaste betone itd. Z uporabo posod različnih velikosti lahko izvajamo meritve na betonih in maltah. Uporablja mešalo v obliki črke H, ki se lahko vrti planetarno ali le okoli glavne osi, in je oblikovano enako kot v Tattersalovi napravi Mk-III. Meri le vrednosti  $G$  in  $H$  in na žalost ne omogoča preračuna v temeljne fizikalne količine. Zaradi oblike mešala se v vzorcu lahko pojavi segregacija večjih delcev, kljub temu da sam material sicer ni podvržen segregaciji. Razvita je bila tudi prenosna verzija naprave. Izdelana je na aluminijevem ohišju in opremljena s kolesi za lažji transport (slika 14, desno). Prenosna verzija za pogon potrebuje vir električne energije, kar najlaže dosežemo s pomočjo dizelskega ali bencinskega pogonskega agregata.



Slika 13: Tattersall Two-point reometer, levo naprava, desno mešalo (Tattersall in Banfill, 1983).

Figure 13: Tattersall Two-point rheometer, left is apparatus, right is impeller (Tattersall in Banfill, 1983).





Slika 14: IBB reometer, desno prenosna verzija (Ferraris in Brower, 2001).

Figure 14: IBB rheometer, on the right portable version (Ferraris in Brower, 2001).

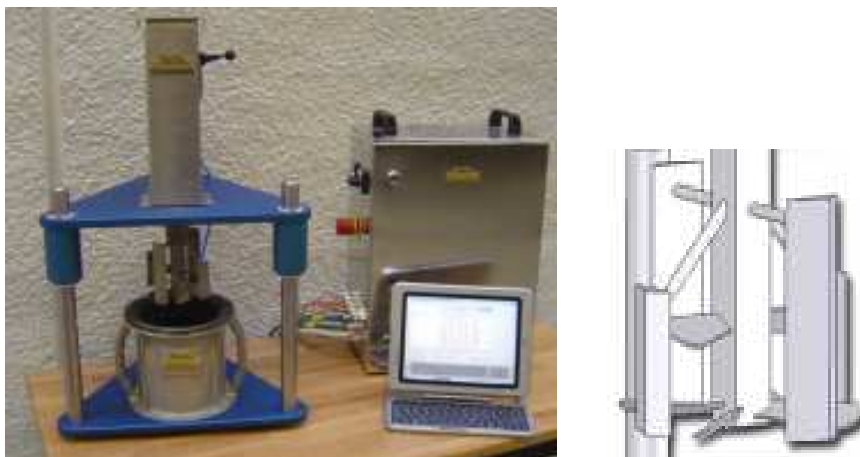
*ConTec Rheometer-4SCC* (Wallevik, 2009b) je naprava, razvita za uporabo na gradbiščih za kontrolo kakovosti betonov SCC (slika 15). Uporablja lopatice v obliki kril (trikoten prerez). Sama velikost posode je majhna, zato je delo na tem aparatu lažje. Možna je tudi modifikacija za betone običajne konsistence, vendar moramo tedaj mešalo zamenjati z mešalom enake oblike kot v Two-point aparatu. Zaradi oblike mešal meri le vrednosti  $G$  in  $H$  in ne temeljnih fizikalnih parametrov. Pri istem podjetju so razvili tudi aparat *ConTec Rheomixer* (slika 16), ki je namenjen meritvam na pastah in maltah (ConTec, 2013). Njegova posebnost je, da uporablja enake lopatice za merjenje kot aparat 4SCC z dodatnimi mešalnimi lopaticami. V ta aparat torej dodamo vse sestavine mešanice, ki jih aparat najprej premeša in šele potem izvaja meritve. Tudi ta aparat meri le vrednosti  $G$  in  $H$ . Oba aparata izkazujeta dobro korelacijo z aparatom ConTec Viscometer 5.



Slika 15: ConTec Rheometer-4SCC (Wallevik, 2009b).

Figure 15: ConTec Rheometer-4SCC (Wallevik, 2009b).





Slika 16: ConTec Rheomixer, desno mešalo (ConTec, 2013).

Figure 16: ConTec Rheomixer, on the rightt is impeller (ConTec, 2013).

*BT SCC Rheometer for fresh concrete*, verzija eBT2 (Schleibinger, 2013a), je prenosni reometer edinstvene zasnove (slika 17). Merilni sistem sta dve palici, nameščeni navpično, ki krožno potujeta skozi beton in merita silo, povzročeno s strani betona na njiju. Najnovejša verzija ni več ročna, temveč se napaja preko baterij. Aparat lahko upravljamo preko pametnega telefona in povezave bluetooth. Palici sta nameščeni na različnih razdaljah od središča vrtenja, da ne potujeta po isti tirnici in da potujeta pri različnih hitrostih. Palici opišeta en zaključen krog. Med obračanjem reometer spreminja hitrosti, katere beleži. Zaradi svoje zasnove naj bi preprečeval pojav segregacije in razbijanje strukture betona. Možne so le meritve v relativnih in ne v temeljnih fizikalnih enotah.



Slika 17: BT SCC Rheometer for fresh concrete, verzija eBT2 (Schleibinger, 2013a).

Figure 17: BT SCC Rheometer for fresh concrete, version eBT2 (Schleibinger, 2013a).

Isti proizvajalec ponuja tudi aparat *Viscomat XL* (Schleibinger, 2013c), ki je namenjen meritvam na maltah in betonih, do velikosti največjega zrna 8 mm. Aparat je zelo podoben aparatu *Viscomat NT*, le da je večji in deluje v večjem območju navorov ter je opremljen z različnimi merilnimi sistemi za malte in betone.



Slika 18: Reometer FCT – 101 (FCT-101, 2013).

Figure 18: Rheometer FCT – 101 (FCT-101, 2013).

*Fresh concrete tester FCT – 101* je reometer, ki ga upravljamo ročno, podobno kot vrtalnik (slika 18). Poganjajo ga baterije. Mešalo je sestavljeno iz dveh polkrogel. Merimo navor, potreben za vrtenje, in tako ocenimo konsistenco svežega betona. Meritev lahko izvajamo le pri eni hitrosti, zato je naprava primerna le za oceno konsistence in ne za oceno reoloških parametrov. Za vsako različno betonsko mešanico moramo napravo umeriti, da lahko rezultat povežemo z vrednostjo poseda in V/C razmerjem. Naprava ni primerna za betonske mešanice z manjšo obdelavnostjo, saj polkrogle za seboj puščajo prazen prostor, kanale. Obstaja še nekaj reometrov z vretenom, ki ponujajo celo vrsto različnih vrst in oblik (nastavljivih) lopatic in so lahko namenjeni za betone (Jau in Yang, 2010; Sanchez et al., 2009) ali malte (Yamasaki et al., 2009). Poznamo tudi reološke meritve betonov z geotehničnimi metodami (Hendrickx et al., 2009) in meritve reoloških lastnosti kar z avtomešalcem za beton.

## 4 PREGLED LITERATURE S PODROČJA REOLOŠKIH PREISKAV IN ANALIZ REZULTATOV TEH PREISKAV

V tem poglavju podajamo pregled literature, ki predstavlja izhodišče za primerjavo z rezultati preiskav in analiz, ki smo jih opravili v okviru doktorske disertacije. Pregled je zasnovan v podpoglavjih, ki so smiselno zaključene enote, primerljive s podpoglavji v Poglavju 6, kjer so predstavljeni rezultati preiskav in analiz, ki smo jih opravili v okviru doktorske disertacije.

### 4.1 Primerjava reometrov

Na podlagi pregleda, podanega v Poglavju 3, lahko trdimo, da reometri, izdelani za meritve na polimerih in gladkih tekočinah, niso primerni za meritve na cementnih kompozitih, ki vsebujejo večje delce. Zaradi tega dejstva so v različnih državah razvijali različne reometre, ki se povsem razlikujejo v geometriji, zasnovi, načinu in možnosti preračuna v temeljne fizikalne količine. To onemogoča primerjave reometrov na neki skupni osnovi. Priporoča se uporaba kalibracijskega materiala, ki pa za malte in betone še ni bil razvit (Ferraris in Brower, 2001). V preteklosti je bilo zato organiziranih nekaj srečanj, kjer so primerjali različne reometre, poleg tega pa so avtorji, ki so imeli možnost uporabljati več različnih reometrov hkrati, posredno primerjali nekaj reometrov.

Srečanje z namenom neposredne primerjave reometrov je bilo organizirano dvakrat. Prvič leta 2000 v Nantu, Francija (Ferraris in Brower, 2001), ko so primerjali sledeče reometre: BML Viscometer 3, BTRHEOM, CEMAGREF – IMG, IBB Rheometer in Two-point rheometer. Betonske mešanice so bile izbrane tako, da so zajele široko območje strižnih napetosti na meji tečenja in plastičnih viskoznosti ter so bile stabilne (odporne proti segregaciji). Posebnost so bile mešanice s prekinjeno zrnastostno krivuljo, dve mešanici SCC in mešanica z majhnim maksimalnim zrnom. Vse skupaj so pripravili 12 različnih mešanic. Mešanice so dosegle vrednosti poseda med 90 mm in 235 mm (vključno s predvidenimi mešanicami SCC). Ugotovili so, da dajejo reometri popolnoma različne rezultate, ne glede na geometrijo, velikost idr. Kljub temu so odkrili dobre korelacije med posameznimi (vsi pari) reometri. Vsi reometri so razvrstili mešanice v enakem vrstnem redu za oba reološka parametra. Vrednosti poseda so dobro korelirane z vrednostmi strižne napetosti na meji tečenja za vsak reometer. Razlik med reometri niso pojasnili. Na drugem srečanju v Clevelandu, ZDA, leta 2003 (Ferraris in Brower, 2004) niso uporabili reometra CEMAGREF – IMG. Uporabili pa so reometer UIUC Rheometer, ki pa je bil uporabljen le za meritve z visoko viskoznim oljem. Meritev z visoko viskoznim oljem je novost, ki je niso uporabili na prvem srečanju. Uvedli so jo z namenom preizkušanja možnosti razvoja kalibracijske tekočine za reometre za cementne kompozite. Olje ima to pomanjkljivost, da je Newtonska tekočina in ne Binghamovska, kot je beton, in ne vsebuje večjih delcev. Najbližje izmerjeni vrednosti viskoznosti z umerjenim viskozimetrom je bil BML viscometer

3. Ostali reometri, predvsem tisti z vzporednimi ploščami, so dajali povsem drugačne rezultate zaradi neprimerne geometrije za merjenje Newtonskih tekočin. Tokrat so primerjali 17 betonskih mešanic in 5 malt. Vrednosti poseda so se tokrat gibale med 120 mm in 250 mm, vrednosti poseda z razlezom pa med 360 mm in 790 mm. Nekatero meritve so popolnoma potrdile meritve s prvega srečanja, vse pa so potrdile tudi razkorak med reometri. Reometri tokrat niso razporedili mešanic povsem enako. Zaključili so tudi, da lahko majhna sprememba v sestavi mešanice, v določenih primerih, močno vpliva na rezultate reoloških preiskav. Poudariti je potrebno, da so predstavljeni rezultati (z obeh srečanj) taki, kot so bili izmerjeni, brez dodatne obdelave, in da so vsi reometri zaznali Binghamovsko obnašanje. Za boljše primerjave bi bilo potrebno dodatno raziskati pojave segregacije, zdrsa in tiksotropije. Pri meritvah z oljem je potrebno omeniti tudi dodaten poskus umerjanja reometra z vzporednimi ploščami z uporabo olja (Ferraris et al., 2007). V ta namen je bil reometer delno prirejen, da so lahko prilagajali razmak med ploščama.

Nova ugotovitev je bila, da se lahko uporabi princip relativne viskoznosti za primerjavo med reometri, ki ne uporabljajo enake geometrije in načina izvedbe preiskave. Princip je bil pred tem že opisan v literaturi (Ferraris in Martys, 2003). Princip temelji na dejstvu, da večina reometrov meri navor in krožno frekvenco, definicija viskoznosti pa je naklon premice, ki prikazuje razmerje med strižno napetostjo in strižno hitrostjo. Da lahko povežemo naklon premice, ki prikazuje razmerje med navorom in krožno frekvenco s pravo viskoznostjo, potrebujemo korekcijsko funkcijo, s katero pomnožimo pravo viskoznost. Korekcijska funkcija je odvisna od geometrije reometra in pogojev eksperimenta, kateri pa nimajo velikega vpliva. Zaradi kompleksnih geometrij reometrov ta funkcija ni popolnoma določljiva. Avtorji so se odločili, da eliminirajo korekcijsko funkcijo. To storijo na način, da izračunajo razmerje med dvema viskoznostma, merjenima z istim reometrom. To razmerje imenujemo relativna plastična viskoznost. Ena od mešanic je lahko beton, druga pa malta, enaka po sestavi betonu, vendar brez večjih zrn. Ta relativna plastična viskoznost je drugačna od splošno definirane, kjer je druga mešanica matrika prve mešanice. Prikazan je primer, kjer si izberemo referenčno malto in z njeno viskoznostjo delimo viskoznosti vseh betonov. Dobimo relativne viskoznosti, katere lahko v grafikonu rišemo na isto koordinatno os in posledično lažje primerjamo različne reometre med seboj.

Feys et al. (Feys et al., 2007b) je preverjal ustreznost različnih časovno neodvisnih matematičnih modelov za opis betonov SCC z dvema različnima reometroma. V prispevku ni prikazane primerjave reometrov, a je prikazan postopek umerjanja Two-point reometra, ki zaradi svoje geometrije ne omogoča neposrednega preračuna izmerjenih parametrov v temeljne fizikalne količine. Isti avtor z več sodelavci (Feys et al., 2007a) je primerjal ista reometra, kot jih je uporabil v že omenjeni preiskavi (Feys et al., 2007b), v smislu zaznavanja dilatantnega obnašanja betona SCC. Ker se je beton SCC obnašal dilatantno, za preračun v temeljne reološke količine ni bilo možno uporabiti Reiner-Riwlinove

enačbe (za ConTec Viscometer 5). Za primerjavo reometrov, v smislu zaznavanja dilatantnosti mešanice, potrebujemo rezultate reoloških preiskav izražene v temeljnih reoloških količinah. Za tako obnašanje še ne obstaja analitična rešitev, obstajajo pa približki. Avtor (Feys et al., 2007b) je za preračun v temeljne fizikalne količine uporabil enačbi (31) in (32), za račun strižne napetosti in strižne hitrosti. Za uporabo teh enačb velja predpostavka o konstantni strižni hitrosti vzdolž razmaka med valjema. V primeru reoloških meritev betona ta predpostavka ne velja. Za Binghamovske tekočine uporaba enačb (31) in (32), kljub neveljavnosti predpostavke, ne predstavlja velike napake. Za primer dilatantnega obnašanja betona pa podatka o velikosti napake nimamo. Zaključki so bili, da so za betone SCC srednje obdelavnosti rezultati podobni, Two-point reometer daje le nekoliko višje rezultate za strižno napetost. Pri bolj tekočih betonih SCC ta naprava kaže večjo ukrivljenost krivulje (večjo dilatantnost), kar je lahko posledica sekundarnih tokov okrog vretena.

$$\tau = \frac{R_o^2 + R_i^2}{4 \pi h R_i^2 R_o^2} T \quad (31)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \Omega \quad (32)$$

Nehdi in Rahman (Nehdi in Rahman, 2004) poročata o vplivu različnih geometrij reometrov pri oscilatornih meritvah cementnih past. Najpomembnejša lastnost je odpornost posamezne geometrije proti zdrsu materiala na stenah. Na sam rezultat ima vpliv tudi sam postopek meritve. Relaksacijski čas do stabilnega stanja tečenja je pri različnih betonih lahko različen. Uporabiti moramo tako velikega, da dosežemo stabilno stanje, vendar ne prevelikega, da preprečimo segregacijo betona (Geiker et al., 2002). Relaksacijski časi so različni pri različnih reometrih, kar tudi delno onemogoča neposredno primerjavo.

To podglavje bomo zaključili z izjavo Banfilla (Banfill, 2006), ki še vedno velja, in sicer da naše znanje na področju merjenja reoloških parametrov svežega betona še ni doseglo razreda III iz preglednice 1. Meritve še niso povsem neodvisne od merilne metode.

## 4.2 Primerjava med betonom in malto

Za razliko od cementnih past, kjer lastnosti tečenja določajo interakcije med cementnimi delci in vodo, je to pri maltah in betonih drugače. Glavne lastnosti določa agregat; večja zrna kot imamo, večji vpliv imajo (Banfill, 2003; Banfill, 2006). Beton, proizveden na osnovi dveh popolnoma različnih cementnih past, ima lahko povsem enake lastnosti v svežem stanju (Tattersall in Banfill, 1983). Z naraščanjem največjega zrna v mešanici naraščajo tudi vrednosti strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti. To se zgodi zaradi agregatnih zrn, ki se ne deformirajo pod obtežbo. Zaradi tega

je matrica med večjimi zrni podvržena do 5-krat večji strižni hitrosti, kot jo vnašamo s pomočjo reometra. To posledično pomeni večji odpor matrice. Plastična viskoznost se poveča zaradi večje stopnje interakcije med delci. To lahko demonstriramo z dejstvom, da imajo betoni z zaobljenim agregatom manjšo viskoznost kot tisti z drobljenim agregatom (Banfill, 2006).

V preteklosti so bili dodatki za betone rezervirani zgolj za betone, namenjene posebni uporabi. Danes pa že skoraj vsak beton vsebuje vsaj plastifikator. Količina dodatka v betonu je še en parameter, ki ga je potrebno optimizirati, in to je lahko zamudno, saj se poveča število testnih mešanic in posledično tudi poraba materiala in časa. Glede na zgoraj opisana spoznanja naj bi se torej beton in malta obnašala podobno, ker vsebujeta agregatne delce. Na podlagi tega so bile razvite metode na pastah in maltah, ki naj bi olajšale delo. Te metode so: LCPC metoda injekcijskih mas z uporabo mini stožca in metoda, razvita na Univerzi v Sherbrooku, kjer uporabljajo Marshev lijak. Ti metodi ne upoštevata vpliva dodatkov. Razvita je bila tudi metoda AFREM, ki upošteva delce velike, do 2 mm, in tekoče mešanice z velikimi količinami dodatkov (de Larrand et al., 1997). Te metode torej ne zajemajo betonov z različnimi dodatki in večjimi agregatnimi zrni, kar je bil povod za vpeljavo metode concrete equivalent mortar (CEM), ali betonu enakovredne malte (Schwartzentruber in Catherine, 2000), ki je bila preverjena tudi na betonih SCC (Nachbaur et al., 2003). Metoda upošteva vpliv dodatkov, vendar na posamezni sestavi betona, kjer se spreminja le količina dodatka. Bistvo metode je, da iz betonske mešanice odstranimo grob agregat in ga v malto nadomestimo s količino drobne frakcije, ki ima enako specifično površino kot odvzeti grobi agregat. Tako ohranimo specifično površino agregatnih zrn in zrn praškastih materialov v mešanici enako, saj količina dodatka, cementa in mineralnih dodatkov ostane enaka, prav tako vodocementno razmerje. Metodo za betone SCC je izpopolnil še Erdem s sodelavci (Erdem et al., 2009) na način, da so spreminjali količino superplastifikatorja in tako ohranjali enako relativno debelino vzorca po končani preiskavi razleza s posedom glede na tisto pri betonu SCC. Bistvo metode je določitev povprečne debeline materiala pri testu razleza s posedom, ki jo normaliziramo s premerom največjega zrna.

Metoda CEM je bila s pridom uporabljena v več raziskovalnih projektih (Schwartzentruber in Catherine, 2000) in drugih znanstvenih delih. S strani avtorjev metode je bila potrjena preko korelacije med posedom betona in razlezom malte (Schwartzentruber in Catherine, 2000) ter med razlezom s posedom betona SCC in razlezom s posedom z mini stožcem na maltah. Ravno tako so potrdili (na dveh mešanicah) enako časovno odvisno obnašanje betona in malte CEM (Nachbaur et al., 2003). Drugi avtorji so z uporabo metode CEM vzpostavili povezavo med viskoznostmi in strižnimi napetostmi betona in malte CEM. Ta povezava je časovno in temperaturno odvisna (Petit et al., 2007). Poskušali so tudi napovedovati obnašanje betona SCC na podlagi rezultatov meritev na malti CEM (Rubio-Hernández et al., 2013). Lastnosti malte so bile izmerjene z natančnim reometrom. Glede na rezultate so predpostavili, kakšne lastnosti naj bi imel beton. Nato so preizkusili tudi beton (le razlez s

posedom) in v osnovi potrdili ugotovitve na maltah. Razvijali so tudi merilne metode za oceno stopnje tiksotropičnosti, ki so primerne za uporabo na terenu. Ugotovili so, da te naprave zaznajo enako razliko med mešanicami betona SCC in prav tako med njim pripadajočimi maltami CEM (Khayat et al., 2012). Preizkušali so tudi malte z mikro vlakni, kjer pa so morali za želeno obdelavnost povečati količino superplastifikatorja do te mere, da je bila nekajkrat večja od predvidene v betonu. Ugotovili so, da za malte z vlakni metoda CEM ni primerna (Nilsson in Sargenius, 2011).

### **4.3 Primerjava med reološkimi lastnostmi betonov in malt s standardnimi metodami obdelavnosti**

Tako kot znani testi poseda in razleza betona, s katerimi ocenimo obdelavnost betona, tudi reometri merijo parametre, ki določajo obdelavnost betona. Zato nas vedno zanima tudi povezava med reološkimi parametri in rezultati standardnih preiskav obdelavnosti. Ko pri preskusu poseda dvignemo stožec, se beton posede zaradi vpliva lastne teže. Posedati se preneha, ko je strižna napetost, povzročena s strani lastne teže, manjša od strižne napetosti na meji tečenja. Zato lahko pričakujemo, da sta vrednosti poseda (in razleza s posedom ter razleza in podobnih preiskav) in strižne napetosti na meji tečenja korelirani. Viskoznost ni neposredno korelirana z vrednostjo poseda, poskuša pa se jo povezati z lastnostmi sveže betonske mešanice, pri katerih se meri čas deformiranja.

Dobra korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in rezultatom preskusa s posedom ali razleza s posedom je bila že večkrat dokazana s strani različnih raziskovalcev in ob upoštevanju različnih vidikov. Predlagane so bile tudi enačbe za povezavo med posedom in strižno napetostjo na meji tečenja. Prvi avtorji so podali le enostavne enačbe na podlagi manjšega števila preiskav (Koehler in Fowler, 2004; Koehler in Fowler, 2005; Koehler et al., 2006; Murata in Kukawa, 1992), spet drugi so razširili področje preiskav in uporabili modele drugih avtorjev za opis reoloških lastnosti betonov (Ferraris in de Larrard, 1998). Nekateri avtorji upoštevajo normalizirane vrednosti rezultatov pri modeliranju. Tako na primer strižno napetost na meji tečenja normalizirajo z gostoto merjenega betona (Laskar, 2009; Roussel et al., 2005) ali pa upoštevajo brez dimenzionalne vrednosti rezultatov obdelavnosti in reoloških parametrov (Saak et al., 2004). Zadnja direktna primerjava upošteva večino vseh naštetih različnih pristopov in nadgradi teorijo, ki sicer sloni na omejenem številu eksperimentalnih rezultatov (Wallevik, 2006). Wallevik (Wallevik, 2006) podaja enačbo, ki upošteva tudi mazivni učinek in učinek prostorninskega deleža matrice ter faktor, ki je sicer prirejen in veljaven le za mešanice, uporabljene v preiskavi. Na tak način je razmerje med izmerjenim posedom in napovedanim (na podlagi izmerjene strižne napetosti na meji tečenja) skoraj enako ena. Pričakujemo lahko, da na betonskih mešanicah iz drugačnih materialov to razmerje ne bo več tako dobro.

Isti avtor (Wallevik, 2006) je tudi dokazal, da plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja nista povezani ter da je plastična viskoznost slabo korelirana s strižno napetostjo na meji tečenja. To dejstvo so opazili tudi drugi avtorji (Koehler in Fowler, 2004), spet drugi so opazili določene povezave, ki pa so kompleksne (Laskar, 2009). Številni avtorji so se bolj osredotočili na razvoj modelov za napovedovanje viskoznosti, ki slonijo na razmerjih sestavin v mešanici. Chidiac in Mahmoodzadeh sta v preglednem delu zbrala različne modele in predlagala svojega (Chidiac in Mahmoodzadeh, 2009). Večina modelov izvira iz teorij, ki niso bile razvite za visoko koncentrirane zmesi, kot je beton, in zato ne predvidevajo interakcij med posameznimi zrni, zato rezultati niso praktično uporabni. Kot so predvideli že prej, je napovedovanje obnašanja tečenja betona na podlagi meritev na cementni pasti nezanesljivo (Ferraris in Gaidis, 1992). Razvita je bila tudi metoda za napovedovanje viskoznosti z jeklenimi vlakni ojačenega betona SCC (Ghanbari in Karihaloo, 2009) in metoda za napovedovanje viskoznosti za visoko »zmogljive« betone na podlagi prostorninske koncentracije delcev in stopnje zaklinjenosti delcev, katera da dobro korelacijo med izmerjeno in predvideno viskoznostjo (Hu et al., 1995).

Nekateri avtorji predlagajo tudi enačbe za napovedovanje strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti v odvisnosti od časa in temperature (Petit et al., 2007). Opravljena je bila tudi primerjava metode z L-zabojem in strižne napetosti na meji tečenja (Nguyen et al., 2006), ki je bila uspešna le pri omejitvi glede hitrosti odpiranja zapore pri L-zaboju, ki mora biti počasna. Nadgradnja te metode je metoda LCPC BOX, ki je poenostavljen L-zaboj (Roussel, 2007). Avtorji navajajo, da je LCPC BOX metoda boljša od razleza s posedom, saj je pri slednji rezultat preiskave omejen in odvisen od velikosti največjega zrna v mešanici.

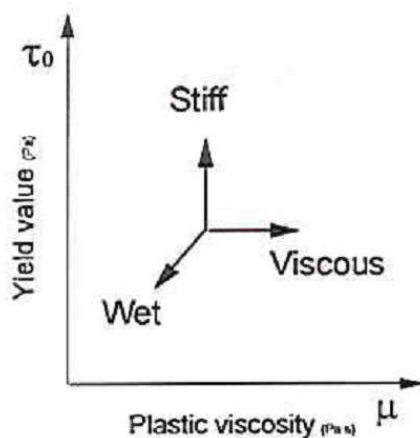
#### **4.4 Vpliv posameznih sestavin na reologijo betonov**

Reološke meritve so uporabne za oceno različnih vplivov sestavin betona. Preverimo lahko nihanja v proizvodnji cementa in še posebno njegovo interakcijo z dodatki, katera se lahko ob majhni spremembi sestave cementa zelo spremeni. Lahko kontroliramo vsebnost vode v betonu, ki je glavni faktor pri zmanjševanju viskoznosti v betonu. Pri betonih z malo vode je namreč zelo pomembno zagotoviti zadostno obdelavnost betona. Preverimo lahko tudi vpliv oblike agregatnih zrn in spremembo zrnastostne krivulje, tako posameznih frakcij kot spremembo razmerij med frakcijami (Wallevik, 2009b).

Za lažji prikaz in opis vpliva posameznih sestavin betona je najbolj uporaben diagram imenovan "reograf", ki prikazuje razmerje med strižno napetostjo na meji tečenja in viskoznostjo, slika 19 (Wallevik, 2009b). Vsi grafikonu v poglavju 4.4 so povzeti iz iste angleške literature (Wallevik, 2009b), zato tukaj navajamo nekaj prevodov. Yield value pomeni strižna napetost na meji tečenja,



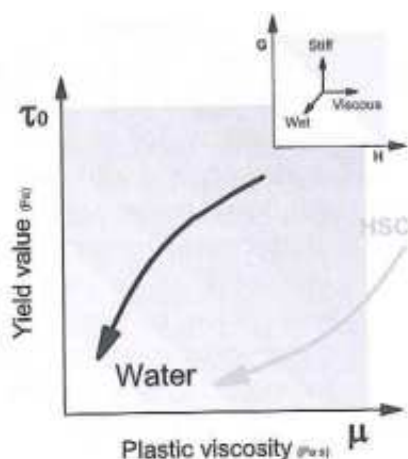
plastic viscosity pa pomeni plastična viskoznost. Wet pomeni moker beton, viscous pomeni viskozen in stiff pomeni gost. Ostale oznake iz slik bomo obrazložili sproti ob besedilu ob vsaki sliki.



Slika 19: "Reograf" –  $\tau_0/\mu$  diagram (Wallevik, 2009b).  
 Figure 19: »Reograph« -  $\tau_0/\mu$  diagram (Wallevik, 2009b).

#### 4.4.1 Vpliv vode

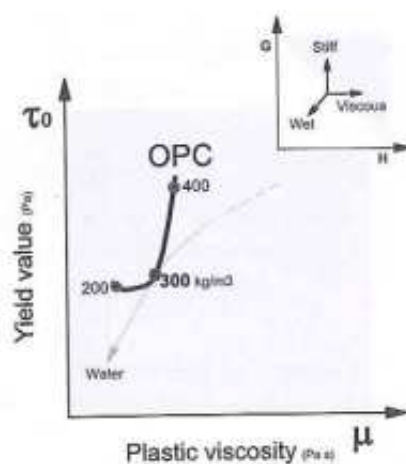
Z dodajanjem vode se pomikamo proti izhodišču reografa, slika 20 (HSC-high strength concrete pomeni visoko trden beton). Zmanjšata se tako strižna napetost na meji tečenja kot viskoznost (Wallevik, 2009b). Dodatek vode zmanjša koncentracijo trdnih delcev, kar povzroča manjši odpor proti tečenju (Koehler in Fowler, 2004). Trditve so bile dokazane večkrat, tako na betonih kot maltah (Hočevar et al., 2010; Hočevar et al., 2011; Koehler in Fowler, 2004, 2006).



Slika 20: Vpliv vode na vrednosti  $\tau_0/\mu$  (Wallevik, 2009b).  
 Figure 20: Effect of water on the  $\tau_0/\mu$  values (Wallevik, 2009b).

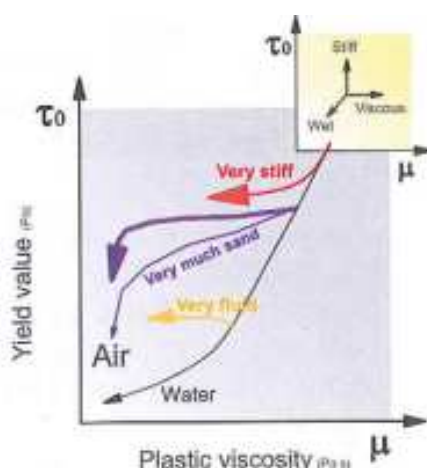
#### 4.4.2 Cement

Ko želimo zmanjšati V/C razmerje, lahko zmanjšamo vsebnost vode v betonu, kar lahko drastično poveča njegovo viskoznost, ali pa povečamo količino cementa v betonu, kar le zmerno poveča viskoznost betona, slika 21 (OPC-ordinary portland cement pomeni portlandski cement). Spremembe v količini vode imajo torej veliko večji vpliv kot spremembe v količini cementa oz. količini finih delcev. Ravno tako ima vpliv finost mletja cementa. Bolj, kot je cement fin, večjo ima napetost na meji tečenja in manjšo ima viskoznost (Wallevik, 2009b).



Slika 21: Vpliv količine cementa na vrednosti  $\tau_0/\mu$  (Wallevik, 2009b).  
Figure 21: Effect of cement content on the  $\tau_0/\mu$  values (Wallevik, 2009b).

#### 4.4.3 Aerant



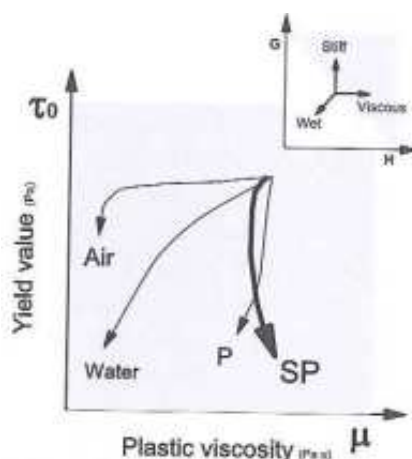
Slika 22: Vpliv aeranta na vrednosti  $\tau_0/\mu$  (Wallevik, 2009b).  
Figure 22: Effect of air entraining on the  $\tau_0/\mu$  values (Wallevik, 2009b).

Dodajanje aeranta naj bi sprva zmanjšalo le viskoznost betona, napetost na meji tečenja pa se naj ne bi bistveno spremenila do večjih dozacij aeranta (slika 22). Pri zelo gostih betonih (na sliki 22 označeno

z »very stiff«) brez plastifikatorja in pri betonih z veliko finimi delci (na sliki 22 označeno z »very much sand«) je možno, da se bo malo zmanjšala tudi strižna napetost na meji tečenja. Pri zelo tekočih betonih (na sliki 22 označeno z »very fluid«) pa lahko vrednost celo naraste, vendar v nobenem primeru sprememba ni bistvena (Wallevik, 2009b). Viskoznost z naraščanjem količine zračnih mehurčkov zelo hitro pada, vendar se po doseženi vrednosti 5 % zraka v betonu ne spreminja več. Vrednost strižne napetosti na meji tečenja pada počasneje. Padanje vrednosti strižne napetosti na meji tečenja se nadaljuje tudi pri deležih zraka v betonu, večjih od 5 %, a je ta padec počasen (Tattersall in Banfill, 1983).

#### 4.4.4 Plastifikator in superplastifikator

Uporaba plastifikatorja (P) ali superplastifikatorja (SP) naj bi vplivala le na spremembo strižne napetosti na meji tečenja, in sicer tako, da jo bistveno zmanjša, viskoznost pa naj se ne bi bistveno spremenila (slika 23). V primeru, da vrednost poseda držimo konstantno (vzdržujemo enako obdelavnost) in odvezemo vodo ter dodajamo plastifikator, je učinek dodajanja plastifikatorja ravno obraten, spreminja se viskoznost. V primeru šibkejših plastifikatorjev se viskoznost rahlo zmanjša, v primeru močnejših plastifikatorjev pa se viskoznost rahlo poveča. Največje učinke plastifikatorjev opazimo pri manjših količinah le-teh v betonu. V primeru betonov z manj fine frakcije se viskoznost z uporabo plastifikatorja poveča, v betonih z več fine frakcije pa se viskoznost zmanjša (Koehler in Fowler, 2004; Tattersall in Banfill, 1983; Wallevik, 2009b).



Slika 23: Vpliv plastifikatorja na vrednosti  $\tau_0/\mu$  (Wallevik, 2009b).

Figure 23: Effect of plasticizer on the  $\tau_0/\mu$  values (Wallevik, 2009b).

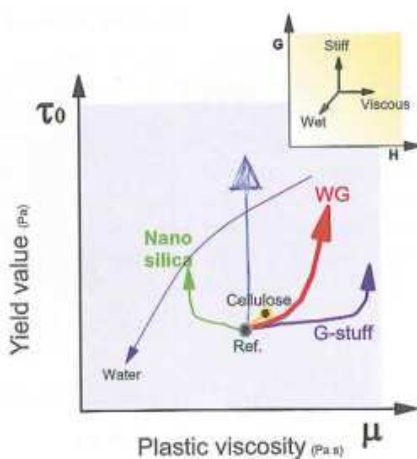
#### 4.4.5 Stabilizator

Stabilizatorjev je več vrst in imajo zelo različne lastnosti. V splošnem se uporabljajo za zmanjšanje segregacije grobih zrn agregata in notranjega ter površinskega izcejanja vode pri betonih SCC ter za

preprečitev izgube materiala zaradi izpiranja med podvodnim betoniranjem. Oba reološka parametra se lahko zmanjšata ali povečata, spreminjata se lahko oba istočasno ali samo eden. Nekaj primerov je prikazanih na sliki 24. Vendar pa stabilizatorji povečajo stabilnost betona zaradi zmanjšanja mobilnosti vode v betonu (Koehler in Fowler, 2004; Wallevik, 2009b).

#### 4.4.6 Mikro silika

Mikro silika se obnaša podobno kot stabilizatorji (oziroma podobno kot »nano silica« na sliki 24), predvsem zaradi sposobnosti zmanjšanja mobilnosti vode v betonu. Pri majhnih dozacijah (do 5% zamenjave cementa z mikro siliko) naj bi mikro silika zmanjšala le viskoznost, pri večjih pa tudi strižno napetost na meji tečenja (Wallevik, 2009b). Mikro silika tvori gel v betonu, ki pri majhnih dozacijah deluje kot mazivo in tako zelo zmanjša viskoznost betona. Ker pa je mikro silika istočasno velik porabnik vode, lahko pričakujemo, da se bo pri večjih dozacijah najprej pojavilo povečanje strižne napetosti na meji tečenja, nato pa še povečanje viskoznosti (Wallevik, 2009b). Meja odstotka zamenjave cementa z mikro siliko, do katere v betonu deluje kot mazivo in do katere se obnaša kot stabilizator ter nad katero ima že škodljiv vpliv, se sicer razlikuje glede na avtorje, ravno tako samo obnašanje betonov z dodano mikro siliko (Faroug in Szwabowski, 1999). To je lahko tudi posledica uporabljenih različnih vhodnih materialov. Na sliki 24 so zarisani tudi vplivi ostalih stabilizatorjev (WG je welan gumi).



Slika 24: Vpliv stabilizatorja in mikro silike na vrednosti  $\tau_0/\mu$  (Wallevik, 2009b).

Figure 24: Effect of stabilizers and silica fume on the  $\tau_0/\mu$  values (Wallevik, 2009b).

#### 4.4.7 Žlindra

Vpliv žlindre na obdelavnost betona naj bi bil načeloma ugoden, saj poveča vrednost poseda, a je učinek majhen. Učinek se povečuje s povečevanjem stopnje zamenjave cementa z žlindro ob konstantni količini vode v mešanici (Koehler in Fowler, 2004; Tattersall in Banfill, 1983). Spet drugi

rezultati kažejo na neugoden učinek do zamenjave 20 %, pri večjih zamenjavah pa učinek postopoma spet postaja ugoden (Koehler in Fowler, 2006). Učinek žindre je tako precej odvisen od same žindre, njene finosti in od lastnosti betonske mešanice, v kateri je uporabljena.

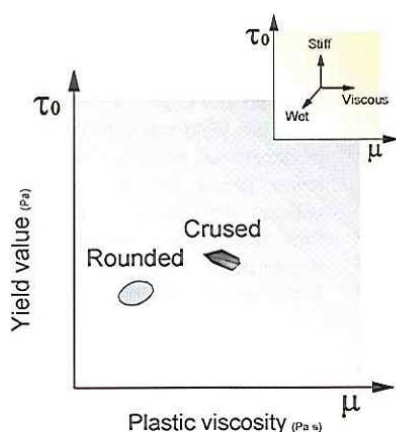
#### 4.4.8 Tuf

Tuf se večinoma uporablja kot zamenjava za cementni klinker. Študije na mešanih cementih z naravnimi vulkanskimi tufi kažejo na veliko povečanje zahtevane vode za doseganje standardne konsistence, tudi do 50 % v primerjavi s portland cementom brez tufa. To je posledica večje finosti mešanih cementov in velike sposobnosti tufa za vpijanje vode (Turanli et al., 2004; Uzal in Turanli, 2003, 2012). V študiji primernosti naravnega zeolitnega tufa kot stabilizatorja v injekcijskih masah so opazili poslabšanje obdelavnosti ter povečanje strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti s povečevanjem količine tufa v mešanici. Kot tak je torej primeren za uporabo le v prisotnosti superplastifikatorja (Sahmaran et al., 2008). Ahmadi in Shekarchi sta v študiji primernosti zeolitnega tufa kot nadomestnega cementnega materiala opazila povečanje porabe superplastifikatorja z večanjem deleža zamenjave cementa s tufom ob ohranjanju enake konsistence betona. To sta pripisala veliki poroznosti tufa in njegovi veliki specifični površini. S povečevanjem deleža tufa se je povečevala viskoznost betona. Poročata tudi o delih drugih avtorjev, ki niso opazili sprememb v betonih ob uporabi tufa. To gre verjetno pripisati uporabi druge vrste tufa s povsem drugačnimi lastnostmi, od kemijske sestave do finosti mletja (Ahmadi in Shekarchi, 2010).

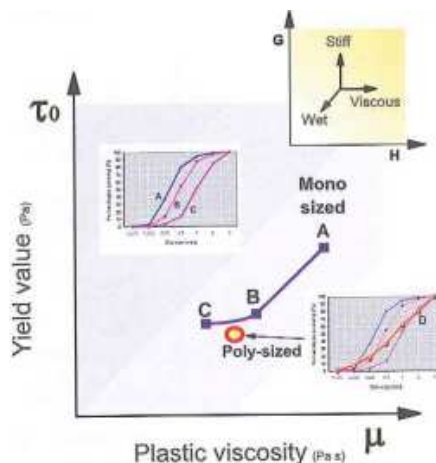
#### 4.4.9 Kamni agregat

V splošnem bo imel beton z večjim deležem agregata višje vrednosti reoloških parametrov (Geiker et al., 2002). Beton, ki vsebuje prodat agregat, bo imel precej manjšo viskoznost kot beton z drobljenim agregatom (slika 25, rounded so okrogla zrna in crushed so drobljena zrna), manjša pa bo razlika v strižni napetosti na meji tečenja, pa še ta le v primeru, ko je vsebnost paste majhna. S povečevanjem vsebnosti drobne frakcije agregata v betonu se povečuje strižna napetost na meji tečenja, plastična viskoznost pa se manjša. Z zmanjševanjem vsebnosti drobne frakcije velja seveda obratno (Wallevik, 2009b). Povečanje deleža drobne frakcije pomeni večjo specifično površino agregatnih zrn, ki mora biti prekrita s cementno pasto. Vsaka razlika od okroglih delcev v koncentrirani suspenziji pomeni povečanje viskoznosti (Barnes et al., 1989). Prav tako je pomembna nepravilnost oblike agregata v smislu razmerja med dolžino in širino. Večje, kot je razmerje, večji sta strižna napetost na meji tečenja in plastična viskoznost. Površinska tekstura agregatnih zrn ima manjši vpliv (Bager et al., 2001). Tudi sama zrnastostna sestava in finost kamenega polnila (kamene moke) vpliva na lastnosti sveže betonske mešanice. S pravilno izbiro kamene moke lahko močno znižamo V/C razmerje v betonu in ohranimo enako obdelavnost betona (Bokan Bosiljkov, 2003).

V primeru, da je prevladujoča velikost delcev v drobni frakciji (frakcija s poudarjeno eno velikostjo zrn – mono sized) manjša, bosta imela oba reološka parametra visoke vrednosti. S povečevanjem povprečne velikosti zrna se bosta oba parametra zmanjševala (slika 26), od neke vrednosti velikosti povprečnega zrna, naprej pa le še viskoznost. Drobni frakciji z enakomerno razporeditvijo zrn vseh velikosti pripadata nižja oba reološka parametra, a kljub temu se poveča stabilnost mešanice proti segregaciji (Bager et al., 2001; Wallevik, 2009b). Betoni z agregati, ki imajo večjo sposobnost zaklinjanja, bodo imeli večje vrednosti poseda in posledično nižjo strižno napetost na meji tečenja (Quiroga in Fowler, 2004).



Slika 25: Vpliv oblike agregata na vrednosti  $\tau_0/\mu$  (Wallevik, 2009b).  
Figure 25: Effect of aggregate shape on the  $\tau_0/\mu$  values (Wallevik, 2009b).



Slika 26: Vpliv zrnastostne krivulje peska na vrednosti  $\tau_0/\mu$  (Wallevik, 2009b).  
Figure 26: Effect of particle size distribution of sand on the  $\tau_0/\mu$  values (Wallevik, 2009b).

Uporaba kamene moke (zelo fin material) lahko na reološke parametre vpliva na več načinov, pomembna pa je oblika delcev, tekstura in zrnastostna porazdelitev delcev, podobno kot pri večjih agregatnih zrnih. V betonih SCC zniža vrednosti reoloških parametrov in poveča stabilnost, to je odpornost proti segregaciji. Učinek kamene moke je izrazit predvsem pri betonih z manj cementa v

sestavi (Ghezal in Khayat, 2002). Dodatek kamene moke pa ponavadi pomeni večjo porabo plastifikatorja (Quiroga in Fowler, 2004).

#### 4.5 Pregled uporabljenih statističnih metod

V analizah raziskovalnega dela skoraj vedno uporabimo različne statistične metode. Na ta način si lahko odgovorimo na vprašanja glede povezanosti posameznih spremenljivk, glede ponovljivosti meritev, glede vpliva posameznih parametrov itd. V doktorski disertaciji smo uporabili regresijo (dveh spremenljivk), ki prilagaja ustrezne matematične funkcije empiričnim podatkom. To funkcijo imenujemo regresijska funkcija, opisuje pa, kakšen je vpliv ene spremenljivke na drugo. Predpostavili smo, da je regresijska funkcija linearna. Z metodo najmanjših kvadratov določimo čimboljše prilaganje regresijske premice našim podatkom. Podatke smo predstavili tudi v razsevnih grafikonih. Linearno povezanost (prilaganje premice točkam) merimo s kovarianco ali z brezdimenzijskim Pearsonovim koeficientom korelacije  $R$ , lahko pa tudi s koeficientom determinacije  $R^2$ , katerega smo tudi uporabljali. To so enostavne mere za kakovost regresijskega modela (Košmelj, 2007; Turk, 2012).

Uporabili smo tudi analizo variance. Osnovni princip je, da skupno varianco večjega števila podatkov razcepimo na variance posameznih skupin podatkov, ki so združeni glede na skupen vpliv, ki povzroča odstopanje od drugih skupin. Z analizo nato preverimo, ali so razlike znotraj posameznega dela razložljive in dovolj majhne glede na razlike z drugimi skupinami (Hays, 1994). Več o metodi lahko preberemo v različni literaturi (Lane, 2007; Turk, 2012). Metoda je bila večkrat uspešno uporabljena tudi v gradbeništvu (Trtnik, 2009; Tušar et al., 1995) in drugi industriji (Trtnik, 2009; Tušar et al., 1995).

## **5 EKSPERIMENTALNI DEL**

### **5.1 Uvod**

Eksperimentalni del doktorske disertacije je bil načrtovan relativno široko in razvejano. S tematiko reologije svežih cementnih kompozitov se v Sloveniji še nismo ukvarjali, zato je bila želja preizkusiti tudi osnovne zakonitosti, ki veljajo na tem področju in izhajajo iz rezultatov preiskav relativno majhnega števila raziskovalcev.

Imeli smo priložnost izvajati meritve na dveh različnih reometrih, primernih za sveži beton. S prirejenim merilnim sistemom smo izvedli tudi reološke meritve na svežih maltah, ki so bile formulirane z metodo CEM na podlagi že preiskanih betonskih mešanic. Na ta način je bila opravljena primerjava reometrov in primerjava med maltami in betoni. Primerjava med maltami in betoni je bila opravljena tudi v časovnem smislu, s pomočjo meritev v različnih časovnih intervalih po zamešanju sveže mešanice.

Reometre smo umerili s silikonskim oljem visoke viskoznosti. Umerjanje s silikonskimi olji poznamo iz literature (Ferraris in Brower, 2004; Feys et al., 2007b), uporablja pa ga tudi proizvajalec ICAR reometra.

Mešanice so bile zastavljene tako, da smo lahko preverili vpliv posameznih sestavin na reološke parametre. Vpliv sestavin v smislu: i) različnih količin (vode, dodatkov), ii) različnih stopenj nadomeščanja cementa ipd. V smislu obdelavnosti so bile mešanice projektirane od slabše obdelavnih, vendar še vedno plastičnih, saj merilna oprema ni primerna za zemeljsko vlažne betone, do skoraj tekočih betonov in betonov SCC. Obdelavnost smo merili tudi s standardnimi metodami, kot so posed, razlez in razlez s posedom.

V eksperimentalno delo so bili vključeni tudi diplomanti, saj je delo vključevalo prenašanje težjih bremen in izvajanje več različnih preskusov hkrati. Študentje diplomanti so del rezultatov preiskav, ki so jih izvajali v okviru te doktorske disertacije, prikazali v svojih diplomskih nalogah.

### **5.2 Materiali**

#### **5.2.1 Cement**

Uporabljena sta bila dva različna cementa z oznakama CEM I 42,5 R in CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R. Njune glavne karakteristike so podane v preglednici 3. Prvi je portlandski cement, ki vsebuje



minimalno 95 % klinkerja, in sadro, ki učinkuje kot regulator vezanja. Drugi je portlandski mešani cement z dvema dodatkom, apnencem in žlindro. Vsebuje minimalno 80 % klinkerja, 6 %-20 % mešanega dodatka ter maksimalno 5 % polnil, skupaj s sadro kot regulatorjem vezanja.

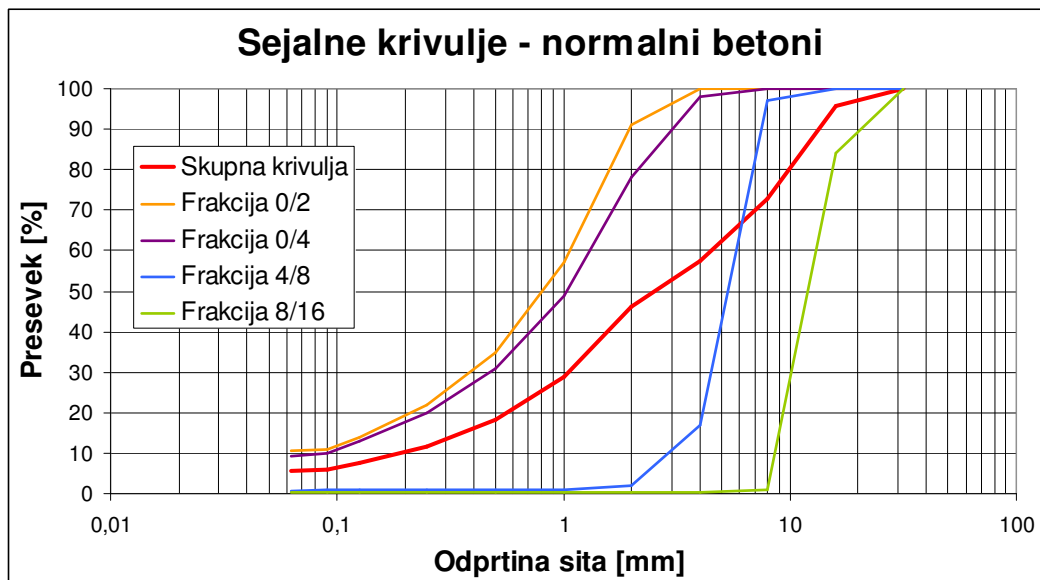
Preglednica 3: Karakteristike cementov.

Table 3: Cement characteristics.

	<b>CEMI425R</b>	<b>CEMII/A-M(LL-S)425R</b>
Moja oznaka	CEM 1	CEM 2
Vsebnost sulfata	2,99 %	2,70 %
Vsebnost klorida	-	0,02 %
Tlačna trdnost, 2 dni	36,3 MPa	27,5 MPa
Tlačna trdnost, 28 dni	59,7 MPa	52,0 MPa
Čas začetka vezanja	150 min	200 min
Prostorninska obstojnost	< 1 mm	0,4 mm
Standardna konsistenca	29,0 %	28,1 %
Specifična površina	3760 cm <sup>2</sup> /g	4000 cm <sup>2</sup> /g
Prostorninska teža	3,08 g/cm <sup>3</sup>	3,01 g/cm <sup>3</sup>

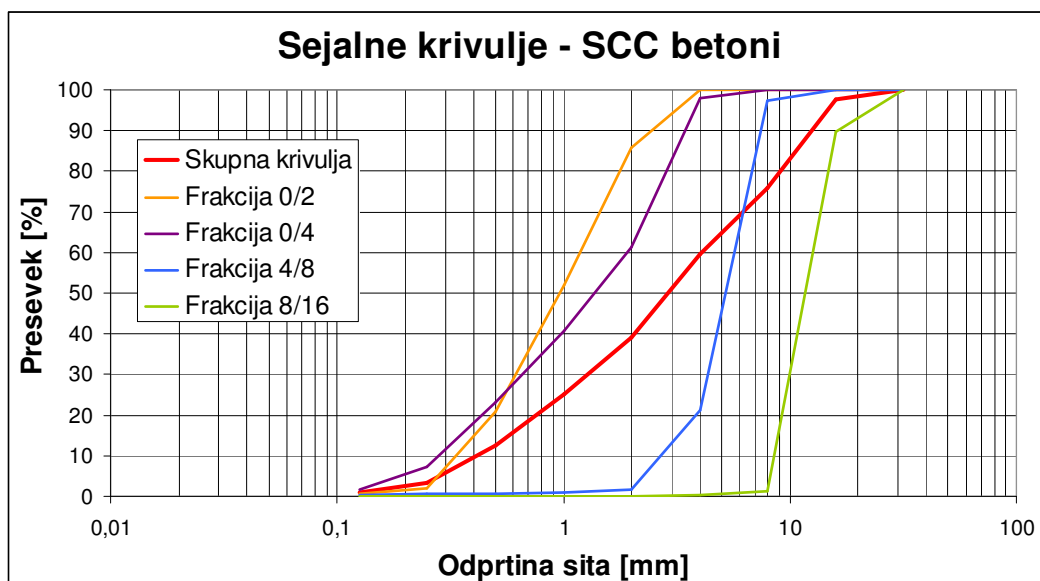
### 5.2.2 Agregat

V betonih in maltah smo uporabili apnenčev drobljeni agregat z gostoto 2,70 kg/dm<sup>3</sup>. Agregat je bil zračno suh. Za izdelavo betonov smo uporabili frakcije 0/2 mm, 0/4 mm, 4/8 mm in 8/16 mm. Vsaka frakcija ima različno vodovpojnost, in sicer (kot so zapisane frakcije) 1,00 %, 0,72 %, 0,75 % in 0,35 %. Za izdelavo malt smo uporabili le frakcijo 0/2 mm. Sejalne krivulje so podane na slikah 27 in 28 ter v preglednici 4. Krivulje so različne za običajne betone in za betone SCC. Na slikah so prikazane tudi skupne krivulje vseh frakcij. Podrobnosti o skupnih krivuljah so podane v poglavju 5.3.



Slika 27: Sejalne krivulje agregata za običajne betone.

Figure 27: Aggregate grading for normal concretes.



Slika 28: Sejalne krivulje za betone SCC.

Figure 28: Aggregate grading for SCC.

Preglednica 4: Presevky vseh frakcij v %.

Table 4: Passing through sieves for all fractions in %.

	Frakcija	Presevek v % skozi sito										
		0,063	0,090	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0
Običajni beton	02	10	11	14	22	35	57	91	100	100	100	100
	04	9	10	13	20	31	49	78	98	100	100	100
	48	1	1	1	1	1	1	2	17	97	100	100
	8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	84	100
SCC	02	-	-	1	2	21	52	86	100	100	100	100
	04	-	-	2	7	23	41	61	98	100	100	100
	48	-	-	0	0	1	1	2	21	97	100	100
	8/16	-	-	0	0	0	0	0	0	1	90	100

### 5.2.3 Mineralni dodatki

Za bolj raznovrstno paleto različnih mešanic smo uporabili tudi raznovrstne mineralne dodatke. Mikro siliko (slika 29), žlindro (slika 30) in tuf (slika 31) smo uporabili kot zamenjavo za del cementa. Apnenčevo kameno moko iz istega vira kot kameni agregat smo uporabili kot dodatni praškasti material pri betonih SCC. Gostote mineralnih dodatkov so podane v preglednici 5.



Slika 29: Mikro silika.

Figure 29: Silica fume.



Slika 30: Mleta granulirana plavžna žindra.  
*Figure 30: Ground granulated blast furnace slag.*



Slika 31: Zeolitni tuf.  
*Figure 31: Zeolite tuff.*



Slika 32: Kamena moka.  
Figure 32: Limestone filler.

Preglednica 5: Gostote in specifične površine mineralnih dodatkov.  
Table 5: Densities and specific surfaces of mineral additives.

Mineralni dodatek	Gostota [g/cm <sup>3</sup> ]	Specifična površina [cm <sup>2</sup> /g]
Mikro silika	2,20	-
Žindra	2,86	2930
Tuf	2,41	2910
Kamena moka	2,70	3300

#### 5.2.4 Kemijski dodatki

Uporabili smo vrsto različnih kemijskih dodatkov, ki različno vplivajo na beton in obstajajo v različnih agregatnih stanjih. Uporabili smo superplastifikatorje različnih kemijskih osnov, tekoče in praškaste stabilizatorje ter aerant. V preglednici 6 so naštetni vsi uporabljeni kemijski dodatki in podane njihove glavne značilnosti. Poleg tega so podane tudi njihove kratke oznake, uporabljene v nadaljevanju disertacije.

Preglednica 6: Kemijski dodatki.

Table 6: Chemical admixtures.

Kemijski dodatek	Oznaka	Značilnosti
Superplastifikator 1	SP1	V tekoči obliki, družina polikarboksilatov, gostota 1,06 kg/dm <sup>3</sup>
Superplastifikator 2	SP2	V tekoči obliki, družina polikarboksilatov, gostota 1,08 kg/dm <sup>3</sup>
Superplastifikator 3	SP3	V tekoči obliki, družina polifosfonatov, gostota 1,05 kg/dm <sup>3</sup>
Aerant	AE	V tekoči obliki, raztopina modificiranih naravnih smol, gostota 1,01 kg/dm <sup>3</sup>
Stabilizator 1	ST1	V tekoči obliki, disperzija kopolimera na osnovi akrilata in karboksilnih kislin, gostota 1,05 kg/dm <sup>3</sup>
Stabilizator 2	ST2	V praškasti obliki, glavna sestavina je celulozni eter

### 5.3 Projektirane mešanice

#### 5.3.1 Beton

Betonske mešanice so bile zasnovane razvejano, od vrste različnih vhodnih materialov do vrste različnih stopenj konsistence. V mešanicah običajnega betona smo spreminjali predvsem vhodne sestavine. Spremembe konsistence so odražale uporabo različnih vrst in količin vhodnih materialov. Zasnovali smo 26 različnih betonskih mešanic. Mešanice lahko razdelimo v skupine po 3 mešanice, kjer se je spreminjala količina le ene sestavine. Učinek spreminjanja količine ene sestavine bo ovrednoten s pomočjo reografa, kot je prikazano v poglavju 4.4. Podrobnosti o sestavi mešanic za običajni beton so podane v preglednici 7. Količine so podane za mešanico s prostornino 1 m<sup>3</sup>. Agregat je sestavljen iz frakcij, prikazanih v poglavju 5.2.2. Frakcije so zastopane v naslednjih deležih: 22 % frakcije 0/2, 33 % frakcije 0/4, 18 % frakcije 4/8 in 27 % frakcije 8/16. Skupna količina agregata v mešanici je 1735 kg (ob upoštevanju 2 % poroznosti betona) in se ne spreminja.



Preglednica 7: Sestava mešanic običajnega betona.  
Table 7: Proportions of normal concrete mixtures.

SESTAVINE**	MEŠANICE OBIČAJNIH BETONOV								
	CR1	CR1A	CR1B	CR1C	CL1	CL1A	CL1B	CL1C	
CEM I 42,5 R (kg)	-	-	-	-	400	400	400	400	
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg)	400	400	400	400	-	-	-	-	
V/C <sub>ef</sub>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
Voda (kg)	212	212	212	212	212	212	212	212	
SP1 (%)	-	0,10	0,20	0,30	-	0,10	0,20	0,30	
	CRA1A*	CRA1B*	CRA1C*	CG1A*	CG1B*	CG1C*	CV1A*	CV1B*	CV1C*
CEM I 42,5 R (kg)	-	-	-	400	400	400	400	400	400
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg)	400	400	400	-	-	-	-	-	-
V/C <sub>ef</sub>	0,50	0,50	0,50	0,62	0,62	0,62	0,53	0,56	0,59
Voda (kg)	212	212	212	259	259	259	224	236	247
SP1 (%)	0,10	0,10	0,10	-	-	-	-	-	-
AE (%)	0,04	0,06	0,05	-	-	-	-	-	-
ST1 (%)	-	-	-	0,10	0,15	0,20	-	-	-
	CZ1A	CZ1B	CZ1C	CM1A	CM1B	CM1C	CT1A	CT1B	CT1C
Zamenjava cementa (%)	20	40	60	5	10	2,5	10	20	5
CEM I 42,5 R (kg)	320	240	160	380	360	390	360	320	380
V/V <sub>ef</sub>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Voda (kg)	212	212	212	212	212	212	212	212	212
SP1 (%)	0,20	0,20	0,20	0,30	0,30	0,30	0,50	0,50	0,50
Tuf (kg)	-	-	-	-	-	-	32	64	16
Mikro silika (kg)	-	-	-	14,50	29,00	7,25	-	-	-
Žlindra (kg)	76	152	228	-	-	-	-	-	-

\* prostornina betonske mešanice je večja od 1 m<sup>3</sup>.

\*\* količina agregata je podana v odstavku pred preglednico in je v vsaki mešanici enaka, in sicer 1735 kg.

V sestavi mešanic je upoštevana vodovpojnost agregata, zato je količina vode povečana za količino vode, ki jo vpije suh agregat. Upoštevano je torej efektivno vodocementno razmerje, ki ga označimo V/C<sub>ef</sub>. V mešanicah z mineralnimi dodatki se V/C<sub>ef</sub> spremeni v vodovezivno razmerje (V/V<sub>ef</sub>), saj mineralni dodatki sodelujejo pri kemijski reakciji strjevanja v betonu. Podobno je podana količina superplastifikatorja, ki je izračunana kot odstotek mase cementa oz. cementa in mineralnega dodatka, kjer je ta prisoten. Pri mešanicah z aerantom, stabilizatorjem in različnimi V/C razmerji ob spremembah nisem korigiral ostalih sestavin, zato imajo te mešanice dejansko prostornino večjo od 1 m<sup>3</sup>. Vse količine, ki so v preglednicah 7 in 8 podane v odstotkih (%) so masni procenti (m/m).

Preglednica 8: Sestava mešanic betona SCC.

Table 8: Proportions of SCC mixtures.

SESTAVINE	MEŠANICE SCC						
	SCCR1	SCCR2	SCCR3	SCCM1	SCCM2	SCCM3	SCCM4
CEM I 42,5 R (kg)	400	400	400	400	400	400	400
V/C	0,46	0,52	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
V/C <sub>ef</sub>	0,44	0,50	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Voda (kg)	184	208	232	232	232	232	232
Agregat (kg)	1552	1488	1422	1472	1522	1572	1639
Kamena moka (kg)	216,5	216,5	216,5	166,5	116,5	66,5	-
SP2 (%)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
ST2 (%)	-	-	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35
	<b>SCCR4</b>	<b>SCCR4A*</b>	<b>SCCR4B*</b>	<b>SCCR4C*</b>	<b>SCCR4D*</b>		
CEM I 42,5 R (kg)	400	400	400	400	400		
V/C	0,52	0,53	0,51	0,50	0,55		
V/C <sub>ef</sub>	0,51	0,52	0,49	0,48	0,53		
Voda (kg)	208	213	203	198	218		
Agregat (kg)	1481	1481	1481	1481	1481		
Kamena moka (kg)	216,5	216,5	216,5	216,5	216,5		
SP3 (%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15		

\* prostornina betonske mešanice je različna od 1 m<sup>3</sup>.

### 5.3.2 Malta in metoda CEM

Malte so bile zasnovane s pomočjo metode CEM (concrete equivalent mortar) iz vseh betonov, ki smo jih obravnavali. Ta korak je bil storjen z namenom kasnejše primerjave med lastnostmi betonov in njim ekvivalentnih malt. V preglednicah 9 in 10 so podane sestave vseh malt. Količine niso zapisane za mešanice prostornine 1 m<sup>3</sup>, saj se med preračunom ta podatek izgubi in tudi ni bistven. Količine, ki so zapisane, so dejansko porabljene količine materiala. Ta zapis je namenjen predvsem informaciji in občutku o razmerjih.

Bistvo metode CEM je ohranjanje specifične površine agregata. Skupna specifična površina agregatnih zrn vseh frakcij v betonu je enaka specifični površini agregatnih zrn v malti. Količine cementa in vseh dodatkov ostanejo enake, kot so bile v betonu. Vodocementno razmerje ohranimo tako, da spremenimo količino vode. S tem postopkom se torej zmanjšata masa in prostornina agregata v mešanici.



Preglednica 9: Sestava mešanic malt CEM.

Table 9: Proportions of CEM mortars.

SESTAVINE	MEŠANICE MALT CEM IZ OBIČAJNIH BETONOV								
	MRI	MR1A	MR1B	MR1C	ML1	ML1A	ML1B	ML1C	
CEM I 42,5 R (kg)	-	-	-	-	5,60	5,60	5,60	5,60	
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg)	5,60	5,60	5,60	5,60	-	-	-	-	
Agregat (kg)	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	
Voda (kg)	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932	
SP1 (g)	-	5,6	11,2	16,8	-	5,6	11,2	16,8	
	MRA1A	MRA1B	MRA1C	MG1A	MG1B	MG1C	MV1A	MV1B	MV1C
CEM I 42,5 R (kg)	-	-	-	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg)	5,60	5,60	5,60	-	-	-	-	-	-
Agregat (kg)	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032
Voda (kg)	2,932	2,932	2,932	3,588	3,588	3,588	3,098	3,262	3,428
SP1 (g)	5,60	5,60	5,60	-	-	-	-	-	-
AE (g)	2,24	3,36	2,80	-	-	-	-	-	-
ST1 (g)	-	-	-	5,60	8,40	11,20	-	-	-
	MZ1A	MZ1B	MZ1C	MM1A	MM1B	MM1C	MT1A	MT1B	MT1C
CEM I 42,5 R (kg)	4,48	3,36	2,24	5,32	5,04	5,46	5,04	4,48	5,32
Agregat (kg)	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032	13,032
Voda (kg)	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932	2,932
SP1 (g)	11,09	10,98	10,86	16,57	16,34	16,68	27,44	26,88	27,72
Tuf (g)	-	-	-	-	-	-	448	896	224
Mikro silika (g)	-	-	-	203	406	102	-	-	-
Žlindra (kg)	1,064	2,128	3,192	-	-	-	-	-	-

Definicija metode CEM je taka:

- isti tip in količina cementa,
- ista vrsta in količina mineralnih dodatkov,
- isto V/C razmerje,
- isti tip in količina kemičnega dodatka z enako metodo umešanja,
- isti agregat, kot je bil uporabljen v betonu,
- dodatek fine frakcije, v zadostni količini, da ohranimo skupno specifično površino agregatnih zrn enako kot v betonu.

Definicija je veljavna, v kolikor grobe frakcije ne vsebujejo preveč finih delcev. V takem primeru moramo grobo frakcijo presejati in v mešanico malte dodati odsejane fine delce.

Preglednica 10: Sestava mešanic malt CEM.

Table 10: Proportions of CEM mortars.

SESTAVINE	MEŠANICE MALT CEM IZ SCC						
	MR1	MR2	MR3	MM1	MM2	MM3	MM4
CEM I 42,5 R (kg)	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
Voda (kg)	2,576	2,912	3,248	3,248	3,248	3,248	3,248
Agregat 0/2 (kg)	14,052	13,470	12,886	13,326	13,778	14,232	14,836
Kamena moka (kg)	3,032	3,032	3,032	2,332	1,631	0,932	-
SP2 (g)	60,42	60,42	60,42	55,52	50,62	45,72	39,20
ST2 (g)	-	-	5,60	11,20	14,00	16,80	19,60
	MR4	MR4A	MR4B	MR4C	MR4D		
CEM I 42,5 R (kg)	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60		
Voda (kg)	2,912	2,928	2,842	2,772	3,052		
Agregat (kg)	13,405	13,405	13,405	13,405	13,405		
Kamena moka (kg)	3,032	3,032	3,032	3,032	3,032		
SP3 (g)	99,26	99,26	99,26	99,26	99,26		

Za izračun mešanice CEM najprej potrebujemo specifične površine posameznih frakcij. Tu upoštevamo predpostavke o tem, da so agregatna zrna popolnoma okrogla, da so agregatna zrna površinsko osušena in da je velikost zrna med dvema zaporednima sitoma enaka povprečni velikosti odprtih teh sit. Primer izračuna specifične površine dejanske frakcije 0/2 mm je podan v preglednici 11 (rezultati v preglednici so informativni, za potrebe disertacije so bili izračunani bolj natančno v programu Excel, odstotki v preglednici so masni odstotki).

Preglednica 11: Izračun specifične površine frakcije 0/2 mm.

Table 11: Example of calculation of specific surface of fraction 0/2 mm.

Sito [mm]	Delež podfrakcije [%]	Presevek kumulativno [%]	Povprečno zrno [mm]	Spec.površina podfrakcije [m <sup>2</sup> /kg]	Specifična površina podfrakcije glede na njen delež [m <sup>2</sup> /kg]
0,000	0,7	0,0	0,0625	35,556	0,238
0,125	1,5	0,7	0,1875	11,852	0,174
0,250	18,9	2,2	0,3750	5,926	1,119
0,500	31,0	21,1	0,7500	2,963	0,920
1,000	33,6	52,1	1,5000	1,481	0,498
2,000	14,3	85,7	3,0000	0,741	0,106
skupaj	100,0	100,0		Σ =	<b>3,055</b>

Za izračun specifične površine potrebujemo podatek o granulometrijski sestavi posameznih frakcij agregata in podatek o gostoti agregata (2,70 kg/m<sup>3</sup> za primer v preglednici 11). Glede na uporabljena sita razdelimo posamezno frakcijo na podfrakcije. Povprečen premer zrna podfrakcije ocenimo kot povprečje med odprtinami sita, pod in nad podfrakcijo in njegovo obliko opišemo kot kroglo.

Specifično površino podfrakcije izračunamo s pomočjo izraza  $S_{x/y} = \frac{A}{V \rho}$ , kjer je  $A$  površina povprečnega zrna podfrakcije,  $V$  prostornina povprečnega zrna podfrakcije in  $\rho$  gostota frakcije. V naslednjem koraku določimo, koliko posamezna podfrakcija prispeva k skupni specifični površini frakcije: specifično površino podfrakcije pomnožimo z deležem podfrakcije. Specifične površine podfrakcij glede na delež seštejemo in dobimo skupno specifično površino posamezne frakcije.

Iz preprostega pogoja o ohranjanju specifične površine dobimo izraz za izračun količine fine frakcije v malti CEM, enačba (33):

$$m_{0/2\_CEM} = m_{0/2} + \frac{m_{0/4}S_{0/4} + m_{4/8}S_{4/8} + m_{8/16}S_{8/16}}{S_{0/2}} \quad (33)$$

Količine z oznakami  $m_{ij}$  so mase posamezne frakcije (v z vodo zasičenem površinsko suhem stanju) v betonu, oznake  $S_{ij}$  pa pomenijo specifične površine posameznih frakcij.

### 5.3.3 Vrednotenje metode CEM

Metodo CEM smo želeli ovrednotiti z uporabo klasičnih metod obdelavnosti. Erdem je tak princip uporabil pri betonih SCC (Erdem et al., 2009). Razlez s posedom betona SCC je po postopku, opisanem v poglavju 4.2, primerjal z mini razlezom s posedom pripadajoče malte CEM. Pričakoval je, da bosta ti vrednosti enaki. Za doseg tega pogoja je korigiral vrednost superplastifikatorja v malti CEM. Na koncu je primerjal rezultate betona SCC in korigirane malte CEM.

To metodo smo poskušali prenesti na običajne betone. Odločili smo se primerjati vrednosti razleza, saj je to metoda, ki je najbolj podobna za uporabo na betonih in za uporabo na maltah. Metoda se bistveno razlikuje le v dimenzijah same merilne opreme. Podrobnosti metod bodo opisane v poglavju 5.4. Prenos metode Erdem na naše uporabljene merilne metode ni smiseln. Tako so pokazale opravljene preiskave, saj dobljeni rezultati niso realni. Zato smo poskusili s podobnimi, a drugačnimi pristopi.

Pričakovani razlez malte smo določili na naslednje načine:

- najprej po metodi Erdem (račun normirane povprečne debeline betona po preskusu razleza, normirane glede na največje zrno betona).
- Drugi pristop je skrajšana metoda Erdem, kjer smo izračunali le povprečno debelino betona po preskusu razleza.
- Normiranje vrednosti razleza z velikostjo največjega zrna.
- Normiranje vrednosti razleza s prostornino stožca.
- Normiranje vrednosti razleza z osnovnim premerom stožca.
- Normiranje razlike med vrednostjo razleza in osnovnega premera stožca, normiranje s prostornino stožca.
- Normiranje razlike med vrednostjo razleza in osnovnega premera stožca, normiranje z velikostjo največjega zrna.
- Normiranje razlike med vrednostjo razleza in osnovnega premera stožca, normiranje z velikostjo največjega zrna in s prostornino stožca.

Po opravljenih preiskavah smo izbrali metodo normiranja vrednosti razleza z osnovnim premerom stožca, saj dajejo vsi ostali pristopi nerealne rezultate. Podajamo tudi preprosto enačbo (34) za izbran pristop. V enačbi (34) oznaka  $d_{beton}$  pomeni premer betona in  $d_{prič.malta}$  pomeni premer malte po preskusu razleza. V preglednici 12 podajamo primer izračuna za vse izbrane pristope. Za primer smo si izbrali namišljen beton z razlezom 520 mm in izračunali pričakovane razleze malte. Pri vrednotenju smo izhajali iz standardnih dimenzij prisekanih stožcev za beton (SIST EN 12350-2:2009) in za malto (SIST EN 1015-3:2001), kjer je premer osnovne ploskve stožca za preskus betona 200 mm in za preskus malte 100 mm.

$$\frac{d_{prič.malta}}{100} = \frac{d_{beton}}{200} \rightarrow d_{prič.malta} = \frac{d_{beton}}{2} \quad (34)$$

Preglednica 12: Pregled različnih pristopov za vrednotenje metode CEM na podlagi metod obdelavnosti.

Table 12: Review of different principles for evaluation of CEM method on the basis of workability methods.

#	Pristop	Izračunani pričakovani razlez malte
1	Erdem et al.	414
2	Skrajšani Erdem et al.	146
3	Normiranje z $D_{max}$	65
4	Normiranje s prostornino	41
<b>5</b>	<b>Normiranje s premerom stožca</b>	<b>260</b>
6	Normiranje razlike s prostornino stožca	125
7	Normiranje razlike z $D_{max}$	140
8	Normiranje razlike z $D_{max}$ in prost. stožca	103

Pristop 1 daje preveliko vrednost razleza, pristopi 2, 6, 7 in 8 pa dajejo premajhne vrednosti. Pristopa 3 in 4 dajeta vrednosti, ki realno sploh niso možne, saj so manjše od premera stožca za preskus razleza malte. Ostane torej pristop 5, ki smo ga na koncu tudi izbrali.

Za vrednotenje malt, enakovrednih betonom SCC, smo uporabili isto metodo. Poskusili smo z uporabo stožca za »mini slump« test (za polovico zmanjšanega stožca za preskus poseda betona, premer baze 100 mm, premer pri vrhu 50 mm in višina 150 mm), ki pa zaradi večje prostornine preskušane materiala v stožcu ne daje realnih rezultatov. Metoda Erdem se v našem primeru pri betonih SCC ni izkazala za ustrezno, saj je odvisna od velikosti uporabljenih stožcev in velikosti največjih zrn v mešanici. Stožec, ki smo ga uporabljali, je višji (skladen s SIST EN 1015-3:2001) za 10 mm, največje zrno betonov je 2 mm večje, največje zrno malt pa 3 mm manjše. Pričakovan razlez malte po metodi Erdem za beton, ki ima razlez s posedom 650 mm, je v našem primeru 460 mm, v primeru, opisanem v literaturi (Erdem et al., 2009), pa 248 mm. Za doseganje razleza s posedom 460 mm bi bilo potrebno mešanico preveč spremeniti oz. prilagoditi količino superplastifikatorja, kot je to storil Erdem.

#### 5.4 Meritve obdelavnosti

Glede na vrsto betona in malte smo uporabili različne metode meritev obdelavnosti. Vse meritve bodo podrobno opisane. Za meritve na običajnih betonih smo uporabili metodi poseda in razleza. Na njem ekvivalentnih maltah smo izvajali meritve razleza na stresalni mizici z dodatno meritvijo pred stresanjem. Betoni SCC so posebna vrsta betonov, za katere se uporabljajo posebne metode meritev obdelavnosti. Uporabili smo metodo razleza s posedom. Na njem ekvivalentnih maltah smo izvajali meritve enako kot pri maltah, enakovrednih običajnemu betonu z enako dodatno meritvijo.

Meritve *poseda* (standard SIST EN 12350:2:2009) je najbolj uporabljana meritev obdelavnosti običajnega betona (slika 33). Beton vgradimo v stožec dimenzij: premer baze 200 mm, premer pri vrhu 100 mm in višina 300 mm. Vgradnja betona poteka v treh plasteh, pri čemer vsako plast zgostimo s 25 prebodi s standardno kovinsko palico krožnega prečnega prereza in na koncu ustrezno zaobljeno. Stožec počasi navpično dvignemo in izmerimo, za koliko se je beton posedel.



Slika 33: Oprema za preskus poseda (<http://www.alibaba.com>).

Figure 33: Slump test equipment (<http://www.alibaba.com>).

Preskus *razleza* (SIST EN 12350-5:2009) se prav tako uporablja za običajne betone. V tem primeru uporabljamo stožec, ki pa ima naslednje dimenzije: premer baze 200 mm, premer na vrhu 130 mm, višina 200 mm. Beton vgrajujemo v stožec, stoječ na gladki stresalni mizi, s pomočjo palice kvadratnega prečnega prereza s stranico 40 mm. Miza naj ima stranice dolge 700 mm in naj ima maso 16 kg. Na eni stranici je miza pritrjena s tečajji, na drugi strani pa omogoča dviganje do višine 40 mm. Beton vgradimo v dveh plasteh z zgoščanjem v obliki 10 rahlih udarcev s palico. Stožec počasi navpično dvignemo in nato 15-krat dvignemo in spustimo prosti rob mize, da 40 mm pada v prostem padu. Zaradi tresljajev, ki pri tem nastajajo, se betonski vzorec po vsakem padcu razleze na večji premer. Rezultat je končni povprečni premer razlezenega vzorca, ki ga izračunamo kot povprečje meritev v dveh pravokotnih smereh.



Slika 34: Oprema za preskus razleza (<http://www.reliancelab.co.za/concrete-flow-table/>).

Figure 34: Flow table test equipment (<http://www.reliancelab.co.za/concrete-flow-table/>).

Preskus *razleza s posedom* (SIST EN 12350-8: 2010) je zelo podoben preskusu poseda. Uporablja se enak stožec kot za posed. Beton se pri tem preskusu vgradi v enem sloju brez zgoščanja. Ker se

metoda uporablja za betone SCC, se beton v kalup v bistvu vlije. Stožec dvignemo in pustimo, da se beton razleze zaradi delovanja lastne teže, kar lahko včasih traja tudi minuto. Določimo povprečni premer razlezenega vzorca betona kot povprečje meritev v dveh pravokotnih smereh.

Metoda *razleza malte* je zelo podobna metodi razleza betona (SIST EN 1015-3:2001). Sama oprema je manjša in lažja. Stožec ima premer baze 100 mm, premer na vrhu 70 mm in je visok 60 mm. Palica je krožnega prečnega prereza s premerom 40 mm. Mizica v obliki diska s premerom 300 mm ima maso 3,25 kg in omogoča prosti pad mizice za 10 mm. Mizica pada cela in enakomerno, saj ni enostransko pritrjena z ležaji kot stresalna miza pri preskusu razleza betona. Rezultat preiskave je povprečni premer razlezenega vzorca malte po 15-ih padcih mizice, določen kot povprečje meritev v dveh pravokotnih smereh.



Slika 35: Oprema za preskus razleza malte (<http://www.matest.com>).

Figure 35: Flow table test for mortar equipment (<http://www.matest.com>).

Pri meritvah razleza malte, ekvivalentne običajnemu betonu, smo izvajali dodatno meritev. Poimenovali smo jo *razlez s posedom malte*. Postopek je bil enak postopku pri razlezu s posedom betona, le da smo uporabili opremo za meritev razleza malte.

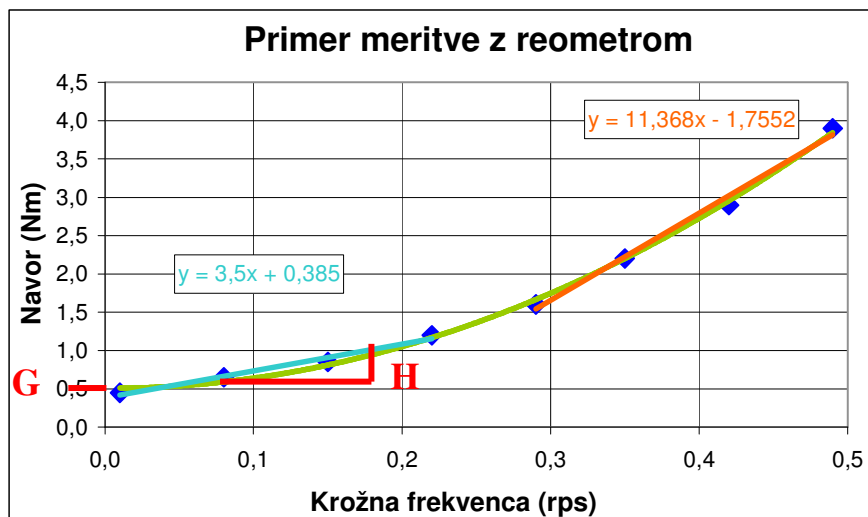
Obdelavnost malt, ekvivalentnih betonu SCC, smo merili na dva podobna načina. Obakrat smo merili *razlez s posedom malte*. Prvič smo uporabili opremo za razlez malte in upoštevali navodila za razlez s posedom betona. Drugič smo uporabili stožec, ki je za polovico manjši od stožca za posed betona (mini razlez s posedom, premer baze 100 mm, premer pri vrhu 50 mm in višina 150 mm). Spet smo sledili navodilom metode razleza s posedom za beton.

## 5.5 Reološke meritve

V raziskovalnem delu smo uporabili dva različna reometra. Prvi je ConTec Viscometer 5 proizvajalca ConTec / Steyputaekni ehf z Islandije (slika 7). Drugi je ICAR Rheometer proizvajalca Germann Instruments A/S z Danske (slika 12). Podrobnejši opisi reometrov so podani v poglavju 3.3, zato se bomo tukaj osredotočili na same postopke meritev z reometri in podrobnosti glede geometrije merilnih sistemov. Sami postopki meritev so bili podobni pri obeh reometrih. Oba reometra najprej ves material spravita v gibanje pri najvišji hitrosti, dokler se ne ustvari neko ravnotežno stanje. Nato hitrost vrtenja po korakih pada.

ConTec Viscometer 5 je tipičen predstavnik koaksialnih valjastih reometrov. Posoda, ki predstavlja zunanji valj, se vrti, notranji valj pa miruje in meri navor, ki ga povzroča vrteči se beton ali malta. Za uporabo z betonom uporabljamo posodo, katere polmer znaša 145 mm. Polmer notranjega valja znaša 100 mm. Del notranjega valja, na katerem merimo navor, je visok 100 mm. Merilni sistem, prirejen za malte, ima zunanji polmer 101 mm in notranji polmer 85 mm. Višina na valju je bila izmerjena za vsako mešanico posebej. Izmerjena je bila takoj po prvi meritvi. Ravnotežno stanje vzpostavlja 5 s, vsak korak pa prav tako traja 5 s. Korakov je 8 in se gibajo v območju krožnih frekvenc od  $0,49 \text{ s}^{-1}$  do  $0,01 \text{ s}^{-1}$ . Prve 3 sekunde vsakega koraka zanemari, da se po spremembi krožne frekvence zopet vzpostavi ravnotežje. Kot rezultat za izmerjeni navor upošteva povprečje zadnjih dveh sekund. V grafikonu izriše točke  $T - f$ . V primeru običajnih betonov smo upoštevali Binghamovski model. Predpostavili smo, da točke  $T - f$  ležijo v ravni črti. Za tak linearni model smo poiskali kar najbolje prilegajočo se premico izmerjenim točkam, kar je narejeno po metodi najmanjših kvadratov. Poiskali smo naklon te premice  $H$  ter presečišče z navpično osjo  $G$ . Reološka parametra, strižno napetost na meji tečenja  $\tau_0$  in plastično viskoznost  $\mu$ , smo izračunali po enačbah (26) in (27) z upoštevanjem določenih vrednosti  $G$  in  $H$ . Pri betonih SCC smo pri nekaterih mešanicah opazili pojav strižnega zgoščanja. Takšen primer je podan na sliki 36. Krivuljo smo aproksimirali z dvema premicama, na spodnjih 4 točkah in na zgornjih 4 točkah. To je inženirski pristop, ki določi dve različni plastični viskoznosti za en beton in eno strižno napetost na meji tečenja, določeno iz spodnjih točk. Tista na spodnjih 4 točkah opisuje počasi se premikajoč beton, tista na zgornjih 4 točkah pa hitreje se gibajoč beton. Te hitrosti so sicer relativno velike in veljajo le v posebnih primerih, kot recimo pri črpanju betona z večjimi hitrostmi črpanja. Na tak način lahko vrednotimo tudi pojav strižnega zgoščanja (razlika med viskoznostmi), a to ni bil predmet doktorske disertacije. Rezultat viskoznosti, izračunane iz zgornjih točk, vseeno podajamo v prilogah. V kolikor bi aplicirali Binghamovski model na podatke betona s pojavom strižnega zgoščanja, bi se lahko zgodilo, da bi bila določena vrednost  $G$  negativna, kar ni realen rezultat.





Slika 36: Primer meritve in postopka obdelave rezultatov za beton SCC s pojavom strižne zgoščanja.

Figure 36: Example of measurement and data processing for SCC with shear thickening behavior.

ICAR Rheometer je mešalni reometer z rotorjem, ki z obliko mešala in načinom vrtenja mešala simulira koaksialni valjasti reometer. Tudi za izračun reoloških parametrov se v splošnem uporabljajo iste enačbe kot pri ConTec reometru. Dimenzije opreme za meritve na betonih so: zunanji polmer 143 mm, notranji polmer 64 mm in višina mešala 127 mm. Pri meritvah na maltah se spremeni le zunanji polmer, ki znaša 74 mm. Ravnotežno stanje vzpostavlja 20 s, vsak korak pa traja 5 s. Korakov je 7, in sicer v območju krožnih frekvenc od  $0,5 \text{ s}^{-1}$  do  $0,05 \text{ s}^{-1}$ . V izračun povprečja upošteva zadnje 1,5 s vsakega koraka. Računa tudi povprečje krožne frekvence pri določeni točki. Izračun reoloških parametrov običajnega betona je potekal v programu Excel z orodjem Solver. Podlogo za ta preračun je priložil proizvajalec reometra. V postopku preračuna se upošteva pojav mrtvega območja. Reološke parametre se izračuna s pomočjo metode efektivni obroč, opisane v poglavju 3.2.4. Preračun podatkov, pridobljenih z merjenji na betonih SCC, je potekal povsem enako kot preračun podatkov, pridobljenih s ConTec Viscometer 5 na betonih SCC. Na ta način nismo upoštevali morebitnega pojava mrtvega območja.

## 5.6 Postopki meritev

Sama meritev je sestavljena iz priprave vhodnih materialov, točnega postopka mešanja ter izvajanja meritev obdelavnosti in reoloških lastnosti. Priprava vhodnih materialov obsega natančen zajem z mesta deponiranja in natančno tehtanje. V laboratoriju namreč operiramo z manjšimi količinami betona in še manjšimi količinami malt. Zaradi tega je potrebno biti pri tehtanju izjemno natančen, saj bi že najmanjša napaka pri tehtanju lahko povzročila večjo napako pri končnem materialu. Natančen zajem materiala je pomemben zaradi zagotavljanja homogenosti in zaradi manjših količin, s katerimi operiramo. Predvsem frakcije kamenega agregata so podvržene segregaciji, ko jih odlagamo na

deponijo. Še posebej so občutljive frakcije 0/2 mm in 0/4 mm. Te frakcije, ki vsebujejo zelo fine delce, lahko zaradi teh delcev močno vplivajo na obdelavnost svežega betona. Kemijske dodatke tehtamo v tako majhnih količinah, da je za to potrebna tehtnica z natančnostjo stotinke grama. Mešanice betonov so imele prostornino 40 litrov, mešanice malt pa 10-11 litrov, odvisno od mešanice.

### **5.6.1 Mešanje betona in malte**

Po končanem tehtanju sestavin betona ali malte je pomemben točen postopek mešanja. Postopka za mešanje betonov in malt sta si različna zaradi specifičnosti uporabljenih mešalcev. Betone (običajne in SCC) smo mešali po naslednjem postopku. V mešalcu smo najprej 1 minuto mešali vse suhe sestavine (agregat, cement in morebitne mineralne dodatke). Nato smo med mešanjem dodajali vodo in tekoče dodatke. Najprej približno polovico vode, nato tekoče dodatke, razredčene s približno 0,3 l vode, in nato preostanek vode, s katero smo sprali posodo, v kateri so bili tekoči dodatki. Dodajanje vode in tekočih dodatkov je trajalo dodatno minuto. Po končanem dodajanju tekočin smo mešali še minuto, nato pa mešanje ustavili in z zidarsko žlico preverili, ali se ves material enakomerno meša. V kolikor temu ni bilo tako, smo ročno odstranili, kar je ostalo oprijetega na dno in stene mešalca. To je vzelo dodatno minuto. Potem smo še dve minuti strojno mešali beton. Efektivno mešanje je torej trajalo 5 min, skupaj z ročnim odstranjevanjem prijetega materiala na dnu mešalca pa 6 min.

Mešanje malt je imelo drugačen vrstni red. V mešalec smo najprej vsuli cement in nato med mešanjem 1 min dodajali vodo in tekoče dodatke po enakem postopku, kot smo to storili pri betonih. Takoj zatem smo dodali kameni agregat in suhe mineralne dodatke, kar je vzelo nadaljnjo minuto. Po še eni minuti mešanja smo odstranili ves material, ki se je oprijel sten posode mešalca. Nato smo malto mešali še 2 min. Skupni čas trajanja mešanja je enak kot pri betonih.

### **5.6.2 Meritve**

Takoj po končanem mešanju se začnejo izvajati meritve lastnosti svežega betona. Vzporedno smo merili obdelavnost in reološke lastnosti svežega betona. Reološke lastnosti smo merili vzporedno v obeh uporabljenih reometrih po podobnem postopku. Beton smo naložili v posodo reometra in posodo predstavili na mesto meritve. Reometri so stali na stalnih mestih in jih nismo premikali. Tako smo zagotovili enake pogoje pri vseh meritvah. Beton (malto) v posodi reometra smo dodatno premešali s ploščato jekleno palico, da bi zagotovili homogen material in odpravili morebitno zgoščanje ali segregacijo med prenašanjem posod, ki povzroča vibracije. Istočasno smo izvedli meritve na obeh reometrih. Na vsakem reometru smo izvedli 3 meritve zapored. Pred vsako meritvijo smo beton (malto) spet premešali s ploščato jekleno palico.

Sočasno z meritvami reoloških lastnosti smo izvajali tudi meritve obdelavnosti. Na običajnem betonu smo izvedli meritve poseda in razleza, na betonu SCC pa meritev razleza s posedom. Na maltah, ekvivalentnih običajnemu betonu, smo izvedli meritve razleza s posedom in razleza, na maltah, ekvivalentnih betonu SCC, pa meritve razleza s posedom z dvema različnima stožcema. Izvajali smo po eno ponovitev.

Vse meritve smo izvajali tudi v časovnih intervalih. Postopek meritev smo ponovili 20 min, 40 min in 60 min po prvih meritvah, ki so se izvajale približno 7 min po dodatku vode v mešanico. Vsako mešanico smo zamešali le enkrat. Na ta način smo simulirali dejanske pogoje v praksi, saj tam nimamo druge možnosti in moramo v svojo meritev zaupati oz. moramo vedeti, koliko ji smemo zaupati.

## 5.7 Umerjanje s silikonskim oljem

### 5.7.1 Silikonsko olje

Oba uporabljena reometra smo poskušali pred izvedbo reoloških meritev tudi umeriti, da bi dobili dodatne informacije glede učinkovitosti reometrov pri določanju reoloških parametrov. To smo storili z uporabo tekočine znane viskoznosti. Proizvajalec reometra ICAR Rheometer pred prodajo opreme vsak reometer preskusi s silikonskim oljem z znano viskoznostjo in tako preveri pravilno delovanje naprave. Tudi sami smo se odločili za podoben postopek. Uporabili smo silikonsko olje visoke viskoznosti. Nazivna kinematična viskoznost je 30000 cSt ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ), reometri, uporabljeni v doktorski disertaciji, pa merijo dinamično viskoznost. Povezava med obema viskoznostima je gostota merjenega materiala. Gostota uporabljenega olja je  $0,971 \text{ g/cm}^3$ , torej je nazivna dinamična viskoznost 29,1 Pa·s. Ker smo želeli tudi sami preveriti viskoznost uporabljenega olja, smo jo izmerili s priznanimi metodami. Najprej smo izmerili kinematično viskoznost z viskozimetri po Cannon-Manningu in Cannon-Fenskeju. Rezultat kinematične viskoznosti po standardu SIST EN 12595:2007 je 25965 cSt, preračunana dinamična viskoznost pa je 25,2 Pa·s. Meritev je bila izvedena pri temperaturi 25,2 °C.

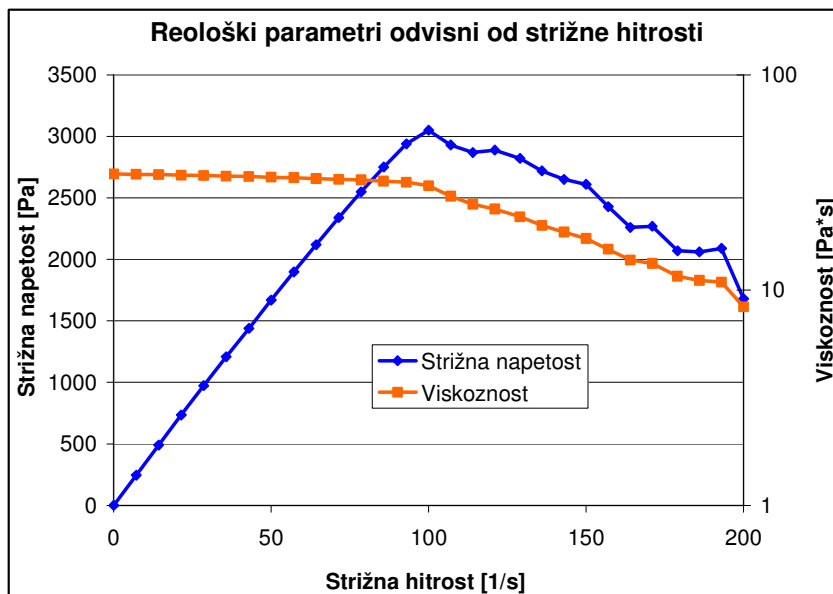
Želeli smo še več podatkov o olju, zato smo izvedli meritve tudi z viskozimetrom Anton Paar MCR 301, ki meri dinamično viskoznost (slika 37). Viskozimeter omogoča nadzorovanje temperature vzorca in velik razpon strižnih hitrosti. Uporabljen je bil merilni sistem med ploščo in stožcem.



Slika 37: Reometer Anton Paar MCR ([www.anton-paar.com](http://www.anton-paar.com))

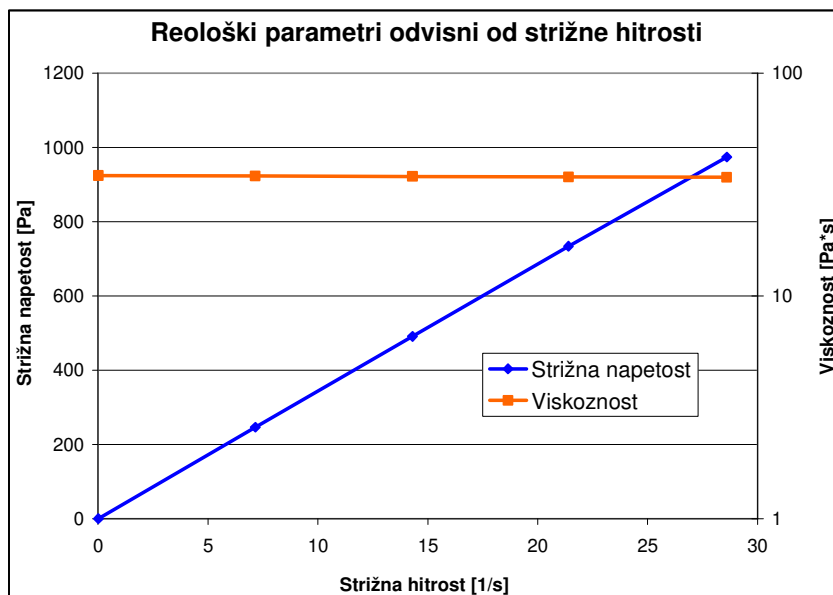
Figure 37: Rheometer Anton Paar MCR ([www.anton-paar.com](http://www.anton-paar.com))

Meritve so bile opravljene na več različnih načinov. Najprej smo se želeli prepričati o tem, kakšne vrste tekočina je uporabljeno silikonsko olje. Predvidevali smo, da je to Newtonska tekočina. Izkazalo se je, da pri večjih strižnih hitrostih temu ni tako (ta pojav lahko razložimo z uhajanjem materiala iz merilnega sistema ali z orientiranjem makromolekul silikonskega olja v smeri striga). Vendar se odstopanja od Newtonskega obnašanja začnejo pojavljati šele pri strižni hitrosti  $100 \text{ s}^{-1}$  (slika 38). Ta strižna hitrost je veliko večja od največje, ki jo dosežemo z uporabljenimi reometri za beton. Največja ocenjena strižna hitrost (uporaba enačb (30) in (31)) v uporabljenih reometrih (posoda za malte pri ICAR Rheometer) je približno  $20 \text{ s}^{-1}$ . V takšnem območju (slika 39) opazimo majhen padec viskoznosti s povečanjem strižne hitrosti. Takšno obnašanje vseeno smatramo kot Newtonsko. Strižna napetost je ob strižni hitrosti  $0 \text{ s}^{-1}$  enaka  $0 \text{ Pa}$  in se povečuje linearno s povečanjem strižne hitrosti.



Slika 38: Reološki parametri silikonskega olja v odvisnosti od strižne hitrosti, velik razpon strižnih hitrosti.

Figure 38: Rheological parameters of silicon oil in relation to shear rate, large range of shear rates.

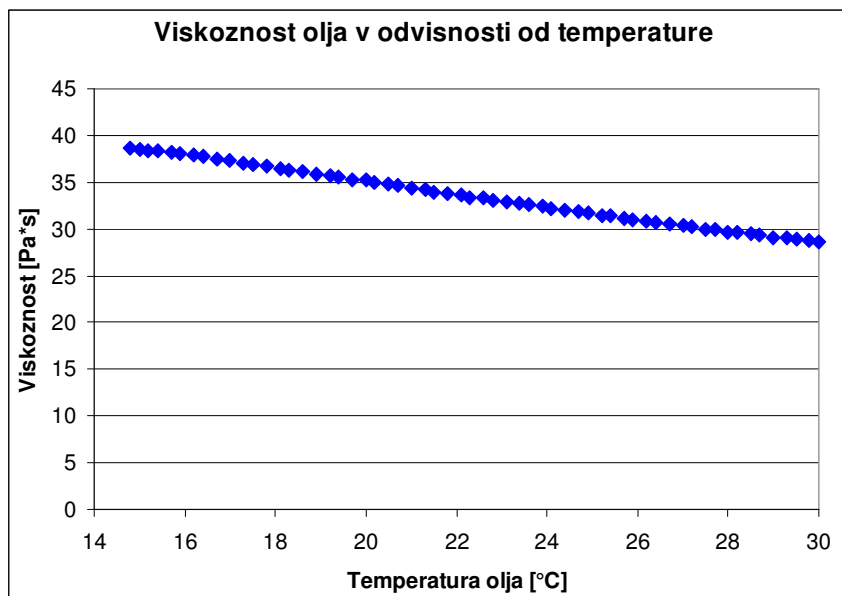


Slika 39: Reološki parametri silikonskega olja v odvisnosti od strižne hitrosti, manjši razpon strižnih hitrosti.

Figure 39: Rheological parameters of silicon oil in relation to shear rate, smaller range of shear rates.

Meritve ob različnih strižnih hitrostih so bile opravljene pri temperaturi olja 20 °C. Za primerjavo z meritvami, opravljenimi z drugimi napravami in postopki, potrebujemo vrednosti viskoznosti v širšem območju temperatur. To smo tudi izmerili (slika 40) v temperaturnem območju 15 °C do 30 °C. Strižna hitrost je bila 1 s<sup>-1</sup>. Ta podatek v našem primeru ne pomeni veliko, pomembno je le, da se nahaja v območju, ko lahko obnašanje silikonskega olja še opišemo kot Newtonsko. V preglednici 13 podajamo vrednosti viskoznosti silikonskega olja ob nekaterih zanimivejših temperaturah. Temperature se približno skladajo z nekaterimi iz preglednic 14 in 15. Tako omogočimo lažjo

primerjavo. Viskoznost se spreminja linearno s spremembo temperature silikonskega olja. Meritve, izvedene z napravo Anton Paar, privzamemo kot referenčne za primerjavo z meritvami na ostalih napravah.



Slika 40: Viskoznost silikonskega olja v odvisnosti od temperature.

Figure 40: Viscosity of silicon oil dependent on temperature.

Preglednica 13: Viskoznost silikonskega olja ob različnih temperaturah.

Table 13: Viscosity of silicon oil at different temperatures.

Temperatura	°C	14,8	21,5	24,4	25,2	25,9	30,0
Viskoznost	Pa·s	38,6	34,0	32,0	31,5	31,0	28,6

Primerjava med obema metodama nam pove, da (ob temperaturi 25,2 °C) meritev po metodi SIST EN 12595:2007 (25,2 Pa·s) podaja nižjo vrednost. Podatek, ki smo ga pridobili s strani proizvajalca silikonskega olja (za isto metodo), kaže na vrednost 29,8 Pa·s. Te metode nismo izbrali za referenčno, ker podaja drugačne rezultate in sloni na drugačnem principu merjenja.

### 5.7.2 Meritve plastične viskoznosti silikonskega olja v veliki posodi ICAR Rheometer

Meritve viskoznosti silikonskega olja v ICAR Rheometer so potekale po enakem postopku, kot so opisane meritve na betonu. Nastavitve naprave so bile enake. Meritve so bile dolgotrajne, saj smo morali zagotoviti enakomerno temperaturo olja skozi celoten prezek. Celo napravo smo shranili v temperaturno komoro in nastavili želeno temperaturo. Počakali smo 24 h in nato izmerili temperaturo silikonskega olja v 4 točkah. 24 h je bil dovolj velik časovni interval za zagotovitev enakomerne razporeditve temperature skozi celoten vzorec. Temperatura se je skozi vzorec spreminjala za  $\pm 0,2$  °C od povprečne vrednosti. Nato smo 10-krat zapored pognali meritev, brez vmesnega mešanja, saj v

homogeni tekočini, kot je silikonsko olje, to ne bi imelo smisla. Kot rezultat smo upoštevali povprečje desetih meritev in povprečno izmerjeno temperaturo. Spreminjanje temperature ni potekalo enakomerno. Meritve smo začeli pri sobni temperaturi, nato smo povečevali temperaturo do približno 30 °C, jo nato znižali na 10 °C in jo nato spet povečevali do približno 25 °C, vse to v več korakih. Želja je bila nekatere točke ponoviti ali se jim vsaj približati. Rezultati so podani v preglednici 14 in na sliki 41. Pričakovano so se vse izmerjene vrednosti strižne napetosti na meji tečenja gibale okoli vrednost 0 Pa, zato nismo izvedli dodatnih analiz. Ugotovljena odvisnost viskoznosti od temperature je linearna.

Preglednica 14: Rezultati meritev viskoznosti silikonskega olja v veliki posodi ICAR Rheometer.

Table 14: Results of measurements of viscosity of silicon oil in large container of ICAR Rheometer.

<b>Temperatura</b>	°C	9,2	14,2	19,8	21,5	22,5	24,5	26,5	29,7
<b>Viskoznost</b>	Pa·s	34,6	30,2	26,9	25,8	25,4	24,3	23,4	22,5

### 5.7.3 Meritve plastične viskoznosti silikonskega olja v mali posodi ICAR Rheometer

Glede na meritve v veliki posodi je pri meritvah v mali posodi le ena razlika. Za zagotovitev enakomerne temperature čez celoten prerez posode smo potrebovali 8 h. Na ta način smo lahko izvajali dve meritvi na dan. Rezultati meritev so podani v preglednici 15 in na sliki 41.

Preglednica 15: Rezultati meritev viskoznosti silikonskega olja v mali posodi ICAR Rheometer.

Table 15: Results of measurements of viscosity of silicon oil in the small container of ICAR Rheometer.

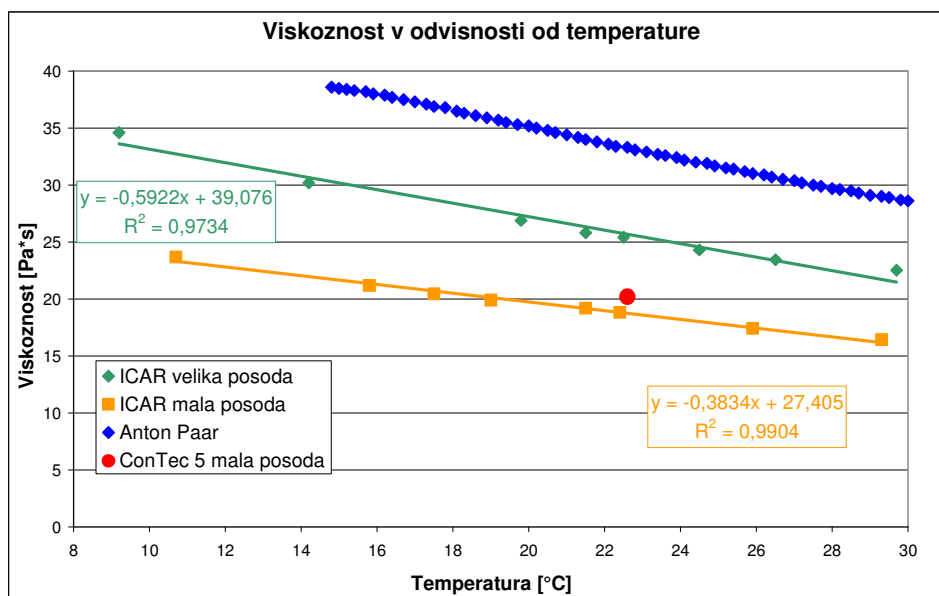
<b>Temperatura</b>	°C	10,7	15,8	17,5	19,0	21,5	22,4	25,9	29,3
<b>Viskoznost</b>	Pa·s	23,7	21,2	20,5	19,9	19,2	18,8	17,4	16,4

### 5.7.4 Meritve plastične viskoznosti silikonskega olja v reometru ConTec Viscometer 5

Meritve na tej napravi nismo izvajali sami. Izvajal jih je Blaž Štupar v okviru svoje diplomske naloge (Štupar, 2012). Namen izvajanja meritev s silikonskim oljem v okviru diplomske naloge je bil sicer drugačen od predstavljenega tukaj, vendar lahko iz meritev pridobimo določene informacije. Žal nimamo podatka o točni temperaturi silikonskega olja, vendar jo na podlagi letnega časa izvajanja meritev ocenjujemo na 22,5 °C. Izmerjena viskoznost je imela povprečno vrednost petih ponovitev 20,2 Pa·s. Rezultat je vključen v sliko 41. Med samim izvajanjem meritev je Štupar naletel na nekaj težav. Zaradi samega postopka meritve reometra, kjer se mešalo (notranji valj) samodejno dvigne po koncu vsake meritve, so se v olju pojavljali mehurčki. Za izločitev teh mehurčkov bi potrebovali približno 1 dan. Zaradi dolgotrajnosti izločanja mehurčkov je predpostavil, da so homogeno razporejeni in ne vplivajo na točnost meritve, kar se je na koncu tudi izkazalo kot resnično.

### 5.7.5 Primerjava rezultatov viskoznosti pridobljenih na različnih napravah

Vsi rezultati (razen tistih, pridobljenih z metodo kinematične viskoznosti) so zbrani na sliki 41. Veseli nas dejstvo, da z reometrom ICAR Rheometer zaznamo linearno spreminjanje viskoznosti s spreminjanjem temperature in to ne glede na velikost posode, v kateri merimo. Enako smo zaznali z referenčno napravo.



Slika 41: Primerjava rezultatov meritev viskoznosti silikonskega olja.

Figure 41: Comparison of results of viscosity measurements of silicon oil.

Tudi sama hitrost spreminjanja je podobna. Še najbolj odstopajo rezultati v mali posodi, kjer je merjen material podvržen največjim strižnim hitrostim, kar bi lahko bil vzrok za razliko in manj intenzivno spreminjanje viskoznosti s temperaturo, glede na veliko ICAR posodo.

Najbolj motijo absolutne razlike vrednosti viskoznosti med meritvami v posameznih merilnih sistemih. V referenčni napravi je bil uporabljen merilni sistem stožec-plošča, medtem ko je bil drugje uporabljen sistem koaksialnih valjev. Povsem drugačne so tudi dimenzije referenčne opreme, kjer merilni sistem meri le nekaj milimetrov. Poleg tega so reometri za beton prilagojeni meritvam materialov z večjimi delci in upoštevajo nekatere predpostavke, ki so le približki teoretično pravilnim zakonitostim. Razlika v meritvah v veliki in mali posodi je verjetno predvsem posledica velikosti vzorca in različnih strižnih hitrosti. Več materiala ustvarja večji navor, katerega merimo in pretvarjamo v reološke parametre in zato so rezultati v veliki posodi večji. Kljub temu, da geometrijo posod upoštevamo v enačbah, je lahko obnašanje materiala v različno velikih posodah nepredvidljivo.

Meritev v reometru ConTec Viscometer 5 je uvrščena med obe velikosti posode reometra ICAR Rheometer. Tudi velikost posode in strižne hitrosti se nahaja vmes. Različen je tudi razmak med



valjema in oblika notranjega valja. Vsi ti parametri niso bili preverjeni, vendar obstaja utemeljen sum, da vplivajo na rezultat meritve.

Najbolj pomembno je to, da z uporabo kalibracijskih materialov lahko ocenimo razlike med posameznimi reometri in se teh razlik zavedamo. Veseli dejstvo, da z različnimi reometri na zelo podoben način zaznavamo iste spremembe v materialu.

### 5.7.6 Ponovljivost meritev viskoznosti silikonskega olja z reometrom ICAR Rheometer

Ponovljivost meritev smo izvedli z analizo variance (ANOVA), ki sicer ni namenjena ugotavljanju ponovljivosti, a dobimo določen vpogled v rezultate. V nadaljevanju predstavljamo rezultate meritev, rezultate vmesnih izračunov in končni rezultat. Ničelna hipoteza  $H_0$ , ki velja za obe posodi, je: sprememba temperature (faktor) ne vpliva na viskoznost silikonskega olja (spremenljivka). Alternativna hipoteza  $H_1$  je v tem primeru: faktor vpliva na spremenljivko.

V preglednicah 16 in 18 so podani rezultati analize ANOVA ter vsi rezultati meritev viskoznosti silikonskega olja v veliki posodi, v preglednicah 17 in 19 pa so podani rezultati za malo posodo.

Preglednica 16: Preglednica ANOVA za meritve v veliki posodi.

Table 16: Table ANOVA for measurements in large container.

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika F
Efekt eksperimenta	$SS_A = 1108,11$	$n_{psa} = 7$	$MS_A = 158,30$	$F = 1044,51$
Napaka	$SS_E = 10,91$	$n_{pse} = 72$	$MS_E = 0,15$	
Skupaj	$SS_T = 1119,02$	$n_{pst} = 79$		

Preglednica 17: Preglednica ANOVA za meritve v mali posodi.

Table 17: Table ANOVA for measurements in small container.

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika F
Efekt eksperimenta	$SS_A = 356,48$	$n_{psa} = 7$	$MS_A = 50,93$	$F = 2056,46$
Napaka	$SS_E = 1,78$	$n_{pse} = 72$	$MS_E = 0,02$	
Skupaj	$SS_T = 358,26$	$n_{pst} = 79$		

Pri izbranem tveganju  $\alpha = 5 \%$ , da naredimo napako pri zavračanju ničelne hipoteze, določimo kritično vrednost statistike za veliko posodo, ki je  $F_{krit} = 2,14$ . Statistika  $F$  je torej večja od kritične vrednosti, kar pomeni, da ničelno hipotezo zavrnilo in trdimo, da ima sprememba temperature silikonskega olja statistično značilen vpliv na viskoznost silikonskega olja.

V primeru male posode je izbrano tveganje enako kot v primeru velike posode in posledično je tudi v tem primeru  $F_{krit} = 2,14$ . Meritve smo namreč opravili po enakem sistemu. Spet zavrnilo ničelno

hipotezo in trdimo, da ima sprememba temperature silikonskega olja statistično značilen vpliv na viskoznost silikonskega olja.

Preglednica 18: Rezultati vseh meritev viskoznosti silikonskega olja v veliki posodi.

Table 18: Results of all measurements of viscosity of silicon oil in large container.

Temperatura [°C]	9,2	14,2	19,8	21,5	22,5	24,5	26,5	29,7
Viskoznost [Pa·s]	35,3	29,9	27,5	25,9	25,7	24,2	23,5	22,3
	34,3	30,3	26,7	26,3	25,8	24,1	22,7	21,7
	34,3	29,4	26,6	25,5	25,9	24,7	23,2	22,1
	34,7	30,3	27,0	25,7	25,2	24,8	23,1	22,4
	34,8	30,0	26,9	25,5	25,3	23,7	23,2	22,5
	34,2	30,4	27,2	25,4	25,4	24,3	22,7	22,7
	34,9	30,3	26,8	26,1	25,7	24,3	23,7	23,0
	34,7	30,2	26,3	25,8	24,8	24,3	24,2	23,3
	34,3	30,5	27,0	26,0	25,5	24,2	24,3	22,9
	34,5	30,6	27,0	25,8	24,8	24,5	23,8	22,4

Preglednica 19: Rezultati vseh meritev viskoznosti silikonskega olja v mali posodi.

Table 19: Results of all measurements of viscosity of silicon oil in small container.

Temperatura [°C]	10,7	15,8	17,5	19,0	21,5	22,4	25,9	29,3
Viskoznost [Pa·s]	23,5	21,4	20,6	19,9	19,4	19,0	17,3	16,7
	23,8	21,4	20,7	19,9	19,3	18,6	17,3	16,4
	23,8	21,3	20,7	19,7	19,3	18,8	17,5	16,2
	23,5	21,0	20,4	19,8	19,2	18,9	17,3	16,4
	23,8	21,0	20,3	20,1	19,1	18,7	17,3	16,5
	23,8	21,2	20,3	20,1	19,0	18,6	17,5	16,4
	23,5	21,3	20,6	19,8	19,0	19,1	17,6	16,3
	23,6	21,0	20,3	19,7	19,1	18,8	17,4	16,4
	23,8	21,1	20,2	20,0	19,3	18,9	17,6	16,7
	23,8	21,2	20,5	20,1	19,0	18,7	17,5	16,3

Ocenjujemo, da je ponovljivost meritev na silikonskem olju dobra. Ti rezultati so dobra popotnica za meritve na betonih in maltah, kjer pa bo potrebno upoštevati tudi velika zrna v mešanicah in njihov vpliv na morebitno zmanjšanje ponovljivosti meritev.

## 6 REZULTATI MERITEV IN ANALIZ

### 6.1 Rezultati meritev reoloških lastnosti betonov

Najprej podajamo rezultate v obliki preglednic in grafikonov "mešanica za mešanico". V preglednicah in grafikonih so podani povprečni rezultati meritev (običajni beton, običajna CEM, beton SCC in SCC CEM) takoj po končanem mešanju sveže mešanice. Za te meritve uporabimo oznako »0 min«. Ti rezultati (čas 0 minut) so uporabljeni za vse primerjave, razen za časovne primerjave (poglavje 6.6). Na grafikonih so, odvisno od mešanice, narisane vrednosti reoloških parametrov in meritev obdelavnosti. Na grafikonih so poleg povprečne vrednosti zarisane tudi vse tri ponovitve.

Grafikone "mešanica za mešanico" smo izbrali zaradi dobrega prvega vpogleda v to, ali oba reometra beležita spremembe v sestavi mešanice na podoben način in ali se beležijo spremembe v sestavi na podoben način tudi z meritvami obdelavnosti ter je tako mogoča neka korelacija med meritvami obdelavnosti in reološkimi parametri.

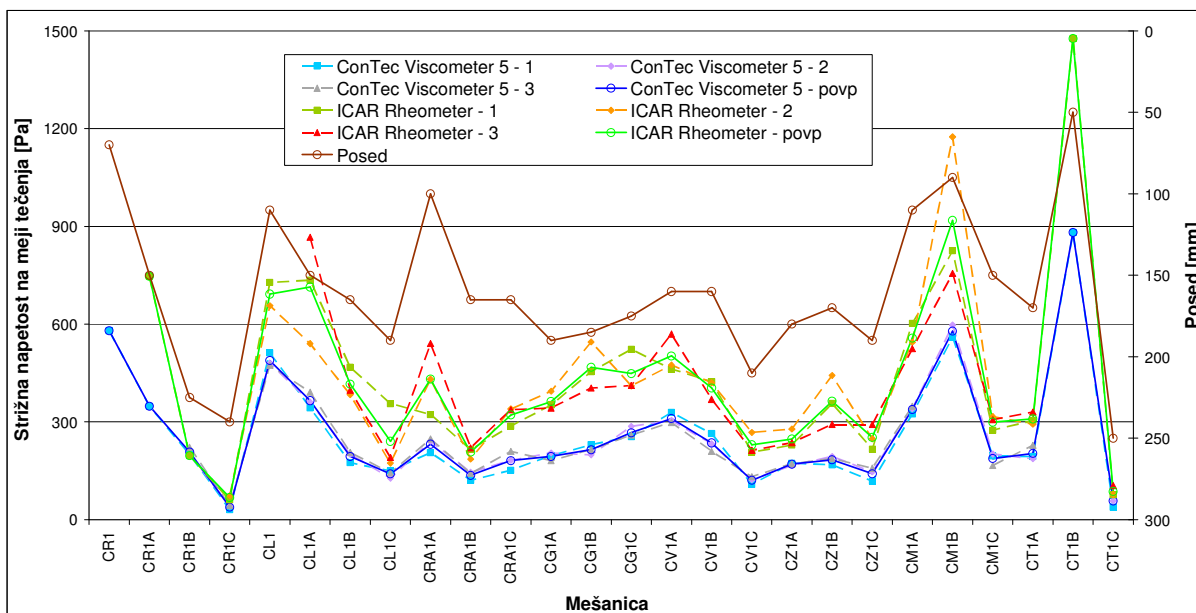
Posamezni rezultati za vsako mešanico z vsemi tremi ponovitvami v vsakem časovnem terminu (20 minut, 40 minut in 60 minut) ter ločeno za vsak reometer so zaradi velikega obsega podani v prilogah. Rezultati običajnega betona so podani v prilogah A in C, rezultati betona SCC v prilogah E in G, rezultati malte CEM v prilogah B in D ter rezultati SCC CEM malte v prilogah F in H. V prilogi I so podani povečani grafikoni "mešanica za mešanico".

#### 6.1.1 Običajni betoni

V preglednici 20 ter na slikah 42 in 43 so prikazani rezultati meritev poseda in razleza ter reoloških parametrov običajnih betonov, strižne napetosti na meji tečenja ( $\tau_0$ ) in plastične viskoznosti ( $\mu$ ), opravljenih takoj po končanem mešanju (čas 0 min). Rezultati reoloških parametrov v preglednici 20 so podani kot povprečje treh meritev.

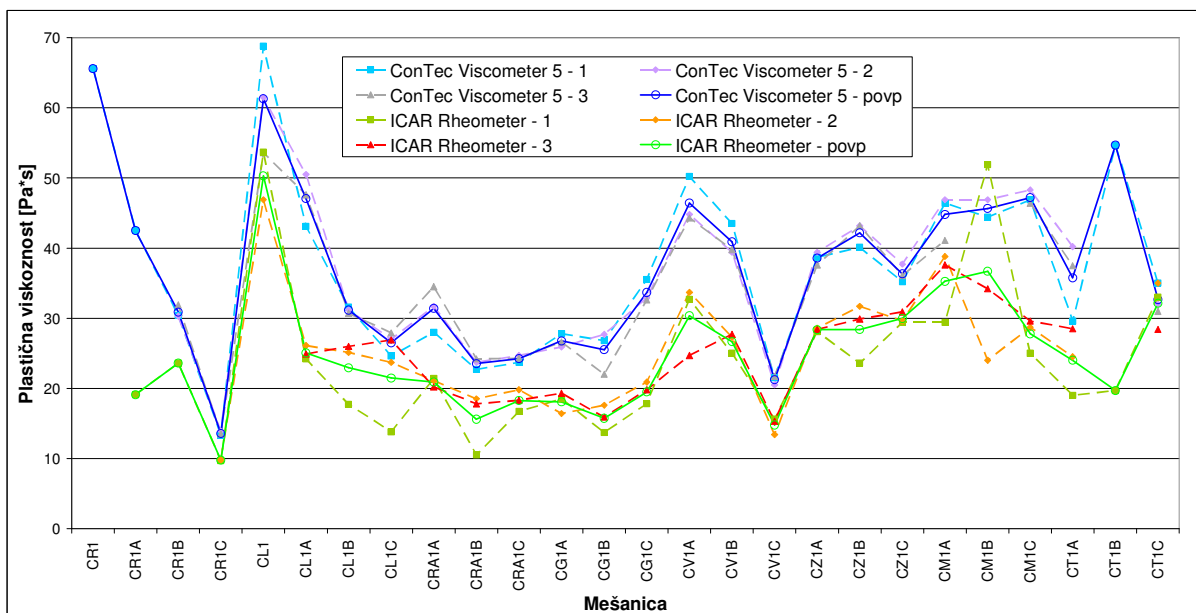
Opozoriti je potrebno, da ni bilo vedno možno opraviti načrtovanih meritev na vseh mešanicah, izvesti načrtovanega števila ponovitev ali opraviti meritev v vseh načrtovanih časovnih intervalih. Z reometrom ConTec Viscometer 5 je bila na mešanicah CR1, CR1A in CT1B opravljena le prva od treh načrtovanih ponovitev v času 0 minut po končanem mešanju (od tu naprej velja, da se vsi časi štejejo od končanega mešanja naprej). Na mešanici CR1 je bila opravljena le prva meritev v času 0 min, na mešanici CT1B pa v času 0 min prva meritev in v času 20 min prvi dve meritvi. Z reometrom ICAR Rheometer ni bilo možno opraviti meritev na mešanici CR1, na mešanicah CR1A, CR1B in CT1B pa je bila opravljena le prva od načrtovanih treh meritev v času 0 min. Na mešanici CR1A je bila skoraj v

vseh časovnih intervalih (razen 40 min) opravljena le prva meritev, na mešanici CM1B niso bile opravljene meritve v času 60 min, na mešanici CT1B pa je bila opravljena le prva meritev v času 0 min. Mešanice CR1, CR1A, CT1B in CR1B bomo, zaradi nepopolnih meritev, v nekaterih primerih izpustili iz analize.



Slika 42: Strižne napetosti na meji tečenja in posed običajnih betonov, čas 0 min.

Figure 42: Yield values and slump values of normal concretes, time 0 min.



Slika 43: Plastične viskoznosti običajnih betonov, čas 0 min.

Figure 43: Plastic viscosities of normal concretes, time 0 min.

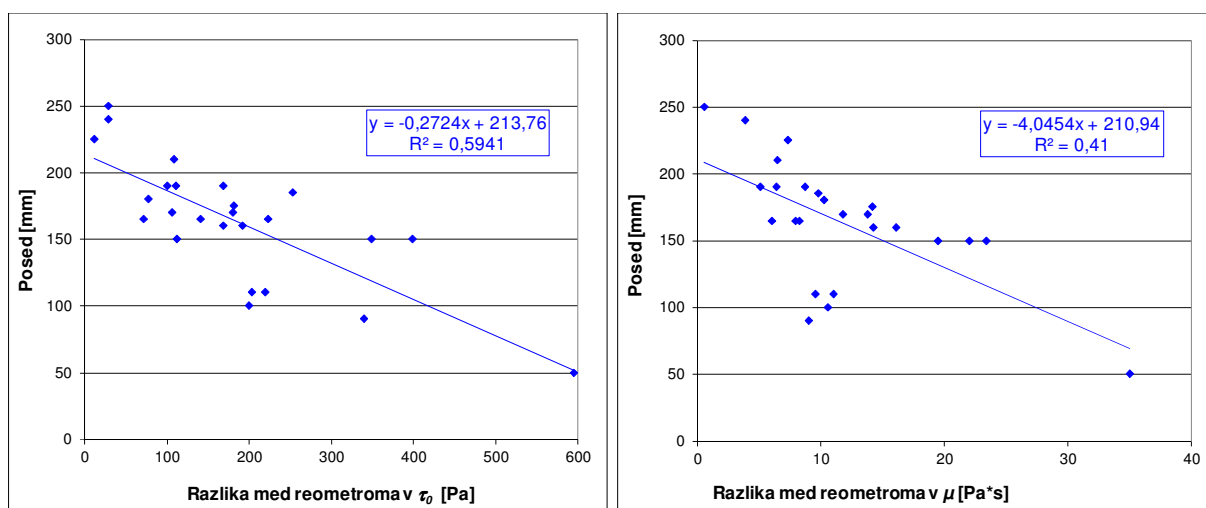
Preglednica 20: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za običajne betone v času 0 minut.

Table 20: Results of workability and rheological measurements of normal concretes at time 0 minutes.

		CR1	CR1A	CR1B	CR1C	CL1	CL1A	CL1B	CL1C	
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	580,0	348,3	208,0	38,6	488,5	365,1	193,9	140,5	
	ICAR	-	746,4	196,4	67,7	692,3	714,0	416,2	240,3	
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	65,6	42,5	30,9	13,6	61,3	47,1	31,1	26,5	
	ICAR	-	19,1	23,6	9,8	50,3	25,1	22,9	21,5	
Posed (mm)		70	150	225	240	110	150	165	190	
Razlez (mm)		410	500	540	670	430	470	510	545	
		CRA1A	CRA1B	CRA1C	CG1A	CG1B	CG1C	CV1A	CV1B	CV1C
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	231,5	136,2	181,2	194,0	214,8	266,9	310,6	235,7	121,2
	ICAR	431,5	207,3	321,5	362,8	467,8	448,3	502,3	404,4	229,5
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	31,4	23,5	24,3	26,8	25,5	33,7	46,4	40,9	21,2
	ICAR	20,9	15,6	18,3	18,1	15,7	19,5	30,4	26,7	14,8
Posed (mm)		100	165	165	190	185	175	160	160	210
Razlez (mm)		400	580	520	530	500	475	480	485	545
		CZ1A	CZ1B	CZ1C	CM1A	CM1B	CM1C	CT1A	CT1B	CT1C
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	170,5	183,4	141,0	337,7	578,5	187,7	203,2	881,4	57,7
	ICAR	247,8	363,9	252,3	557,2	918,5	299,3	309,2	1476,1	86,5
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	38,6	42,2	36,3	44,8	45,7	47,2	35,8	54,7	32,7
	ICAR	28,4	28,4	30,0	35,3	36,7	27,8	24,0	19,7	32,1
Posed (mm)		180	170	190	110	90	150	170	50	250
Razlez (mm)		535	525	545	465	430	490	485	370	635

Na slikah 42 in 43 opazimo določeno razliko med rezultati meritev, dobljenih z obema reometroma. V primeru  $\tau_0$  je reometer ICAR vsakokrat (razen pri CR1B) izmeril večjo vrednost kot reometer ConTec, pri  $\mu$  pa je večjo vrednost vsakokrat izmeril ConTec reometer. Absolutne razlike v rezultatih med obema reometroma se gibljejo od 0 Pa do 600 Pa za  $\tau_0$  in od 0 Pa·s do 35 Pa·s za  $\mu$ . Če pa iz analize izločimo vse betone s posedom, večjim od 210 mm (CR1B, CR1C in CT1C), ki spadajo že v skupino lahkogradljivih betonov (in tako ohranimo le »prave« običajne betone), poleg tega pa izločimo še betone, pri katerih ni bilo možno opraviti načrtovanega števila meritev (CR1, CR1A in CT1B), se absolutne razlike v rezultatih zmanjšajo na 70 Pa do 350 Pa za  $\tau_0$  in od 5 Pa·s do 20 Pa·s za  $\mu$ . Pri analizi, kjer izločimo betone s posedom, manjšim od 150 mm (CL1, CRA1A, CM1A in CM1B) in betone, kjer ni bilo možno opraviti načrtovanega števila meritev (CR1, CR1A in CT1B), so absolutne razlike v rezultatih od 30 Pa do 350 Pa za  $\tau_0$  in od 0 Pa·s do 20 Pa·s za  $\mu$ . Kakorkoli že, oba reometra beležita vpliv spremembe sestave betona za veliko večino mešanic na enak način, z zmanjšanjem ali povečanjem izmerjenih reoloških parametrov  $\tau_0$  in  $\mu$ .

Iz rezultatov na sliki 42 lahko ugotovimo, da lomljena črta, ki predstavlja rezultate poseda, sledi lomljenim črtam, ki predstavljajo strižne napetosti na meji tečenja za preizkušene betone. Na podlagi tega opazovanja lahko sklepamo, da je korelacija med posedom in strižno napetostjo na meji tečenja dobra. Opazimo tudi, da sta si lomljeni črti, ki predstavljata  $\tau_0$  različnih reometrov, bližje na mestih, kjer je vrednost poseda večja. To potrdimo tudi s sliko 44 (na sliki so vključeni vsi rezultati). Sklepamo torej, da bodo razlike med izmerjenimi vrednostmi  $\tau_0$  obeh reometrov minimalne ob boljše obdelavnih betonih. Podobno lahko opazimo (slika 44) za korelacijo med vrednostjo poseda in vrednostjo razlike med izmerjenimi plastičnimi viskoznostmi z različnimi reometri. Ob izločitvi betonov s posedom, manjšim od 150 mm, se korelacija izboljša na vrednost  $R^2 = 0,6$ . Ta korelacija sicer nima praktičnega pomena, ker je znano, da plastična viskoznost ni dobro povezana z vrednostmi poseda (Wallevik, 2006).

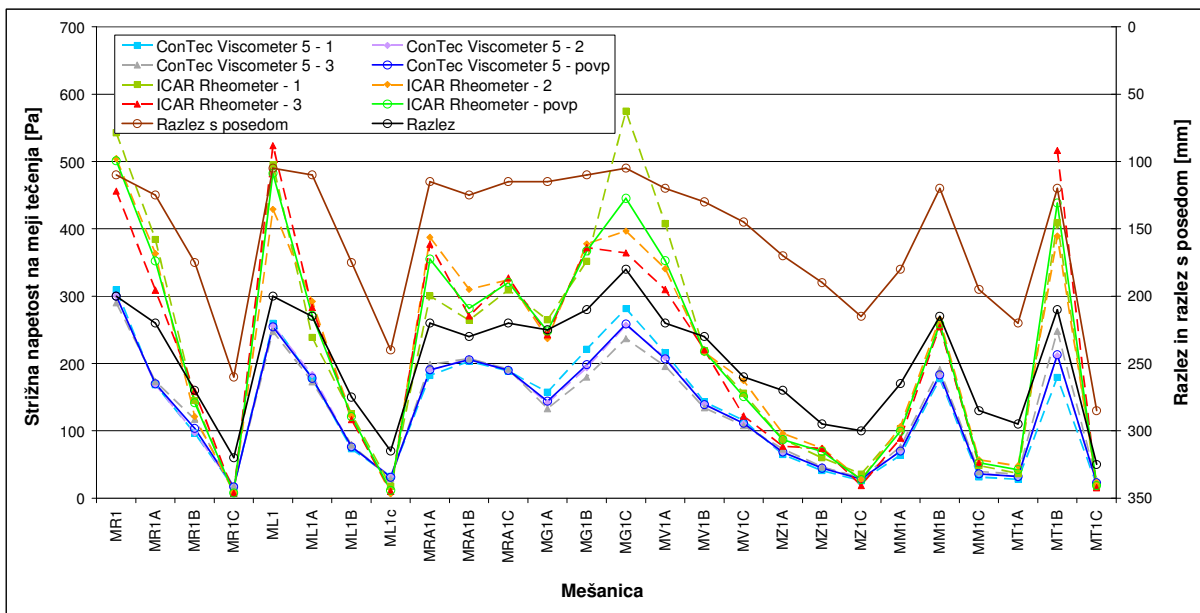


Slika 44: Korelacija med posedom in razliko med vrednostmi reoloških parametrov izmerjenimi z različnimi reometri.

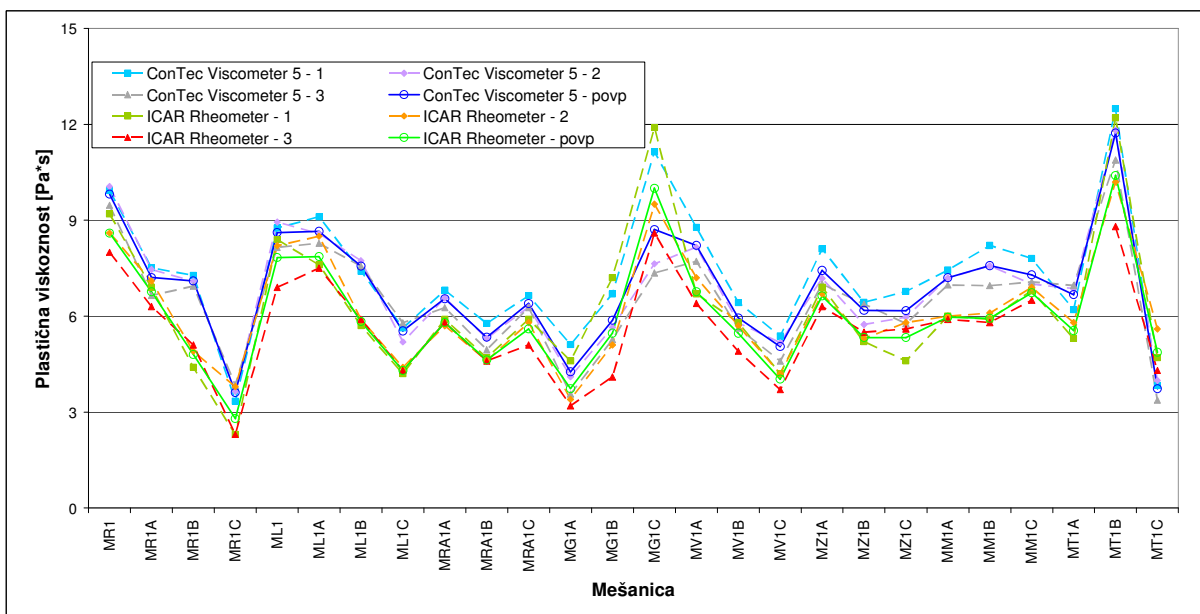
Figure 44: Correlation between slump values and difference between rheological parameters measured with different rheometers.

### 6.1.2 Malte ekvivalentne običajnemu betonu (CEM)

V preglednici 21 ter na slikah 45 in 46 so prikazani rezultati meritev razleza, razleza s posedom in reoloških parametrov malt ekvivalentnih običajnim betonom. Meritve so bile opravljene v času 0 minut po končanem mešanju. Rezultati meritev reoloških parametrov v preglednici 21 so podani kot povprečje treh meritev. V primeru CEM ni bilo težav z izvajanjem meritev, opravljena je bila velika večina vseh ponovitev v vseh časovnih intervalih na vseh maltah, razen z reometrom ConTec v primeru mešanic MT1B in MR1B, kjer ni bilo opravljene zadnje, tretje ponovitve v času 60 min ter z reometrom ICAR v primeru mešanic MV1C in MT1C, kjer ni bilo opravljene tretje ponovitve v času 40 min in v primeru mešanice MT1A, kjer ni bilo opravljene tretje ponovitve v času 0 min.



Slika 45: Strižne napetosti na meji tečenja in razlezi malt ekvivalentnih običajnim betonom, čas 0 min.  
 Figure 45: Yield values and flow values of mortars equivalent to normal concretes, time 0 min.



Slika 46: Plastične viskoznosti malt ekvivalentnih običajnim betonom, čas 0 min.  
 Figure 46: Plastic viscosities of mortars equivalent to normal concretes, time 0 min.

Na slikah 45 in 46 opazimo določeno razliko med rezultati meritev, dobljenimi z uporabljenima reometroma. Ugotovimo lahko, da reometra na podoben način zaznavata spremembe reoloških parametrov zaradi sprememb v sestavi mešanice: če ConTec izmeri padec parametra med mešanicama, ga praviloma izmeri tudi ICAR, in če ConTec izmeri skok parametra, ga praviloma izmeri tudi ICAR. Za analizo primerjave reometrov pri meritvah 5 malt bomo uporabili vse mešanice. Absolutne razlike v rezultatih med obema reometroma se gibljejo od 20 Pa do 230 Pa za  $\tau_0$  in od 1 Pa·s do 2,5 Pa·s za  $\mu$ . Z

enako analizo (slik tu nisem vključil), kot smo jo naredili pri običajnih betonih, torej primerjavo rezultatov obdelavnosti in razlike med reološkimi parametri med dvema reometroma ugotovim, da razlike med reometroma za parameter  $\tau_0$  padajo s povečanjem obdelavnosti CEM, pri najbolj obdelavnih CEM razlika celo zamenja predznak. Korelacija je boljša v primeru korelacije razlike z razlezom ( $R^2 = 0,81$ ) kot v primeru korelacije razlike z razlezom s posedom ( $R^2 = 0,68$ ). Korelacija med razlikami med vrednostmi  $\mu$  in rezultati obdelavnosti je slaba ( $R^2 = 0,01$ ). Številčne vrednosti meritev  $\mu$  so majhne, zato so posledično še manjše tudi razlike med obema reometroma. Te majhne vrednosti vplivajo na korelacijo. Predvidevamo, da meritev ni dovolj natančna za tako analizo. Odstranjanje posameznih rezultatov tu nima smisla, saj noben rezultat vidno ne odstopa.

Preglednica 21: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev malt CEM za običajne betone, čas 0 min.

Table 21: Results of workability and rheology of CEM mortars of normal concretes, time 0 min.

		MR1	MR1a	MR1b	MR1c	ML1	ML1a	ML1b	ML1c	
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	300,1	169,9	103,5	16,8	254,4	178,1	76,2	31,0	
	ICAR	500,9	352,1	141,6	7,7	482,5	271,4	121,2	11,5	
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	9,8	7,2	7,1	3,6	8,6	8,7	7,6	5,5	
	ICAR	8,6	6,8	4,8	2,8	7,8	7,9	5,8	4,3	
Razlez s pos. (mm)		110	125	175	260	105	110	175	240	
Razlez (mm)		200	220	270	320	200	215	275	315	
		MRA1a	MRA1b	MRA1c	MG1a	MG1b	MG1c	MV1a	MV1b	MV1c
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	190,4	205,6	189,8	143,9	198,2	258,4	206,9	139,0	111,3
	ICAR	354,9	281,6	320,2	248,2	367,2	445,2	352,7	218,2	150,8
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	6,5	5,3	6,4	4,3	5,9	8,7	8,2	5,9	5,0
	ICAR	5,8	4,6	5,6	3,7	5,5	10,0	6,8	5,5	4,0
Razlez s pos. (mm)		115	125	115	115	110	105	120	130	145
Razlez (mm)		220	230	220	225	210	180	220	230	260
		MZ1a	MZ1b	MZ1c	MM1a	MM1b	MM1c	MT1a	MT1b	MT1c
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	68,5	44,4	28,5	69,8	183,1	35,9	32,0	212,8	22,7
	ICAR	86,8	44,4	27,4	99,6	258,8	52,5	42,4	438,2	18,6
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	7,4	6,2	6,2	7,2	7,6	7,3	6,7	11,7	3,7
	ICAR	6,6	5,3	5,3	6,0	5,9	6,7	5,6	10,4	4,9
Razlez s pos. (mm)		170	190	215	180	120	195	220	120	285
Razlez (mm)		270	295	300	265	215	285	295	210	325

Tudi pri CEM lahko ugotovimo, da lomljeni črti, ki predstavljata rezultate razleza in razleza s posedom, sledita lomljenim črtam, ki predstavljajo strižne napetosti na meji tečenja za preizkušene CEM (slika 45). Na podlagi tega opazovanja lahko sklepamo, da je korelacija med razlezom in razlezom s posedom ter strižno napetostjo na meji tečenja dobra.



### 6.1.3 Betoni SCC

V preglednici 22 ter na slikah 47 in 48 so prikazani rezultati meritev razleza s posedom in meritev reoloških parametrov betonov SCC. Meritve so bile opravljene v času 0 minut po končanem mešanju. Rezultati meritev reoloških parametrov v preglednici 22 so podani kot povprečje treh meritev.

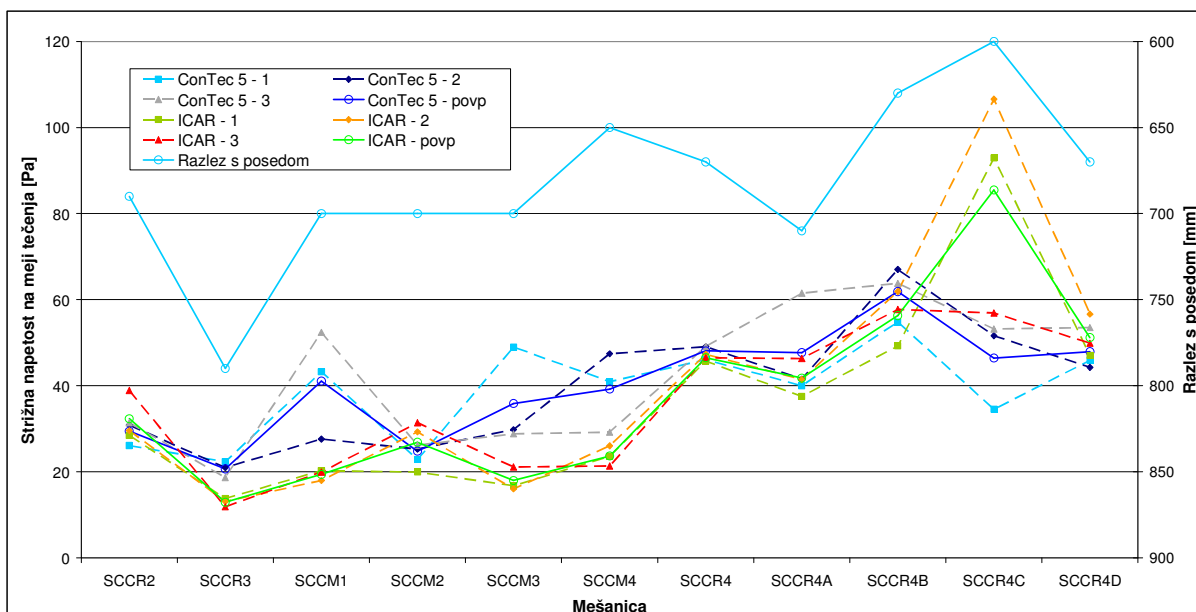
Preglednica 22: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za betone SCC, čas 0 minut.

Table 22: Results of workability and rheological measurements for SCC, time 0 minutes.

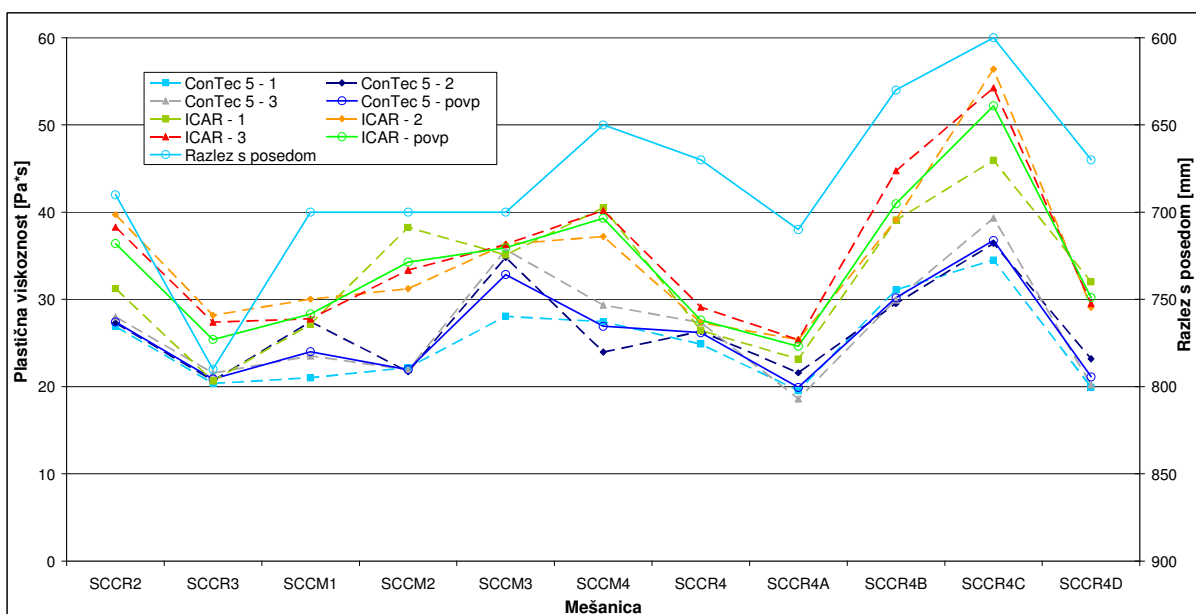
		SCCR1	SCCR2	SCCR3	SCCM1	SCCM2	SCCM3	SCCM4
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	223,9	29,4	20,7	41,1	24,8	35,9	39,2
	ICAR	169,5	32,3	12,9	19,4	26,9	18,0	23,6
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	148,1	27,4	20,9	24,0	21,9	32,9	26,9
	ICAR	192,0	36,4	25,4	28,3	34,3	35,9	39,3
Razlez s posedom (mm)		370	690	790	700	700	700	650
		SCCR4	SCCR4A	SCCR4B	SCCR4C	SCCR4D		
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	48,1	47,7	61,9	46,4	47,9		
	ICAR	46,5	41,8	56,3	85,5	51,2		
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	26,2	19,9	30,2	36,8	21,1		
	ICAR	27,6	24,6	41,0	52,2	30,2		
Razlez (mm)		670	710	630	600	670		

Na slikah 47 in 48 opazimo relativno dobro ujemanje rezultatov meritev, dobljenih z obema reometroma. Razlika med rezultati praviloma ni večja od 20 Pa pri  $\tau_0$  in 10 Pa·s pri  $\mu$ . Izjema je le SCCR4C, ki je dosegla najnižji razlez s posedom izmed betonov SCC. Pri tej mešanici so razlike med reometroma večje. Iz rezultatov, prikazanih na sliki 47, lahko vidimo, da sta oba reometra kar pri šestih mešanicah SCC izmerila približno enako strižno napetost na meji tečenja. Iz analize smo izločili mešanico SCCR1, ker ne spada v skupino betonov SCC. Dosežen razlez s posedom je le 370 mm, kar je bistveno manj kot je najnižja dovoljena meja po standardu SIST EN 206-9:2010 (550 mm).

Ponovno smo analizirali korelacijo med metodo obdelavnosti (v tem primeru razlez s posedom) in razliko med reološkima parametroma, izmerjenima z različnima reometroma. V primeru  $\tau_0$  lahko potrdimo ugotovitve iz slike 44, kjer smo ugotovili, da se razlika med reometroma zmanjša s povečanjem vrednosti poseda (običajni betoni). Dodatna ugotovitev je, da se tudi predznak razlike zamenja, kar pomeni, da je v primeru betonov SCC večje vrednosti izmeril reometer ConTec. Tudi v primeru  $\mu$  opazimo zamenjavo predznaka razlike med reometroma glede na običajne betone, tokrat večjo vrednost izmeri ICAR Rheometer.



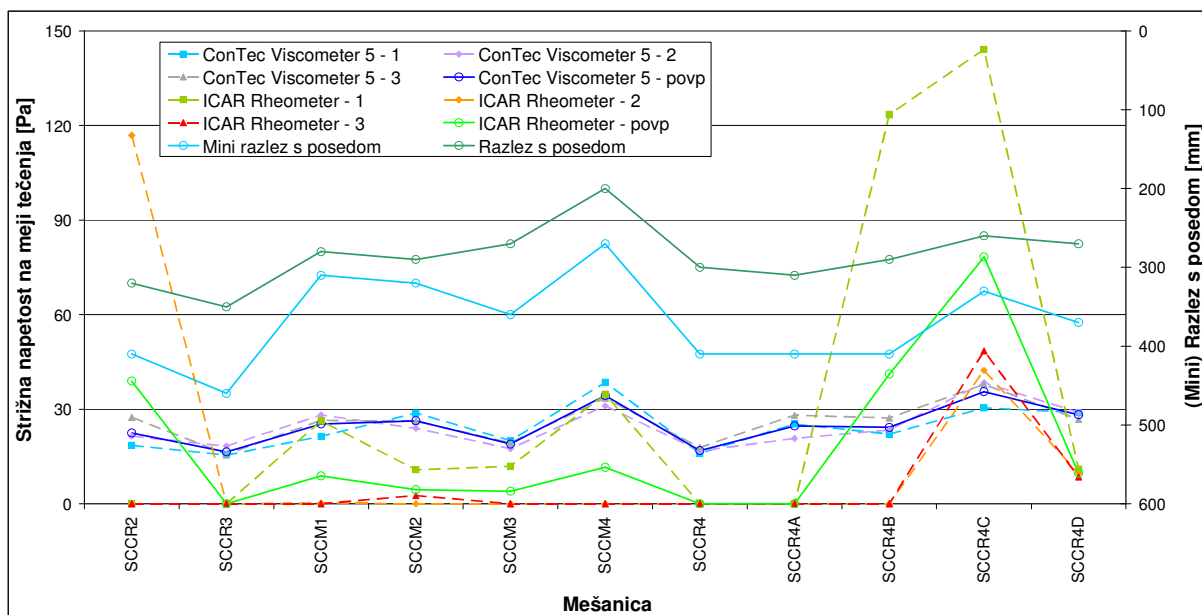
Slika 47: Strižne napetosti na meji tečenja in razlez s posedom betonov SCC, čas 0 min.  
 Figure 47: Yield values and slump flow values of SCC, time 0 min.



Slika 48: Plastične viskoznosti betonov SCC, čas 0 min.  
 Figure 48: Plastic viscosities of SCC concretes, time 0 min.

### 6.1.4 Malte SCC CEM

V preglednici 23 ter na slikah 49 in 50 so prikazani rezultati meritev razleza s posedom, mini razleza s posedom in reoloških meritev malt SCC, ekvivalentnih normalnim betonom. Meritve so bile opravljene v času 0 minut po končanem mešanju. Rezultati reoloških meritev v preglednici 23 so podani kot povprečje treh meritev.



Slika 49: Strižne napetosti na meji tečenja in razlezi malt ekvivalentnih betonom SCC, čas 0 min.

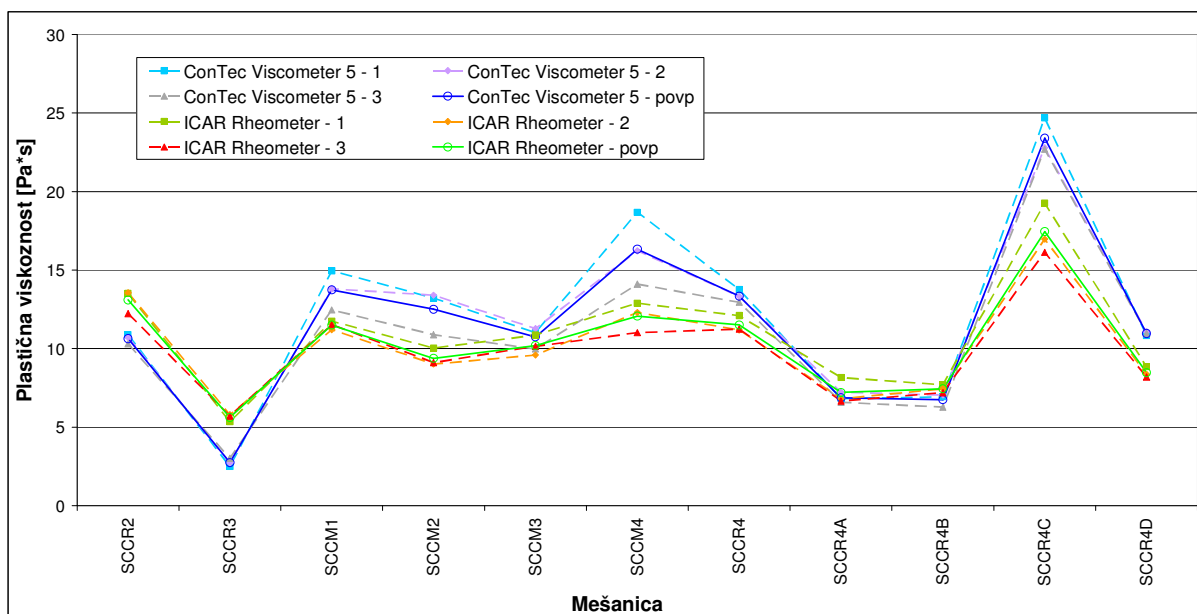
Figure 49: Yield values and slump flow values of mortars equivalent to SCC's, time 0 min.

Kot smo opazili že v poglavju 6.1.2, se meritve strižne napetosti na meji tečenja z ICAR Rheometrom na bolj tekočih maltah približujejo vrednosti 0 Pa. V primeru malt SCC je tako (pričakovano) veliko izmerjenih vrednosti (z ICAR Rheometrom) enakih nič (slika 49). Pojavljajo pa se meritve, ki popolnoma odstopajo in prikazujejo visoke vrednosti. Nakazan je sicer trend, da si meritve na obeh reometrih sledijo, vendar meritve niso dovolj točne, da bi to lahko z gotovostjo trdili. Procentualno so razlike, zaradi izmerjenih vrednosti 0, nedoločljive. Meritve obdelavnosti dokaj enakomerno sledijo meritvam strižne napetosti na meji tečenja, izmerjenimi z Viscometrom ConTec 5. Na podlagi slike 50 lahko trdimo, da reometra podobno zaznavata spremembe plastičnih viskoznosti mešanic malt SCC. Viscometer ConTec 5 te spremembe zaznava bolj izrazito, saj je razlika med največjo in najmanjšo izmerjeno viskoznostjo večja kot v primeru ICAR Rheometra. Prav tako opazimo, da pri bolj obdelavnih mešanicah večje vrednosti kaže ICAR Rheometer, pri manj obdelavnih mešanicah pa večje vrednosti pripadajo ConTec reometru.

Priljubljen sistem ICAR Rheometra za meritve na maltah vsebuje le pomanjšano posodo, ki predstavlja zunanji valj v sistemu koaksialnih valjev. Račun strižnih hitrosti po enačbi (32) nam pove, da taka geometrija ustvarja velike strižne hitrosti v preizkušnem materialu. Za doseganje enakih strižnih hitrosti kot v večjem merilnem sistemu bi bilo potrebno enakomerno pomanjšati tako posodo kot mešalo. Večje strižne hitrosti so lahko vzrok za neuporabne rezultate meritev  $\tau_0$ .

Preglednica 23: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za malte SCC CEM, čas 0 minut.  
Table 23: Results of workability and rheological measurements for SCC CEM, time 0 minutes.

		SCCMR1	SCCMR2	SCCMR3	SCCMM1	SCCMM2	SCCMM3	SCCMM4
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	27,5	22,5	16,5	25,3	26,3	18,9	34,4
	ICAR	58,3	39,0	0,0	8,9	4,5	4,0	11,6
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	49,7	10,6	2,7	13,7	12,5	10,8	16,3
	ICAR	43,9	13,1	5,6	11,5	9,4	10,2	12,1
Razlez s posedom (mm)		-	320	350	280	290	270	200
Mini razlez s pos. (mm)		280	410	460	310	320	360	270
		SCCMR4	SCCMR4A	SCCMR4B	SCCMR4C	SCCMR4D		
$\tau_0$ (Pa)	Visco 5	16,9	24,7	24,3	35,6	28,2		
	ICAR	0,0	0,0	41,2	78,3	9,7		
$\mu$ (Pa·s)	Visco 5	13,3	6,9	6,7	23,4	11,0		
	ICAR	11,5	7,2	7,4	17,5	8,5		
Razlez s posedom (mm)		300	310	290	260	280		
Mini razlez s pos. (mm)		410	410	410	330	370		



Slika 50: Plastične viskoznosti malt ekvivalentnih betonov SCC, čas 0 min.

Figure 50: Plastic viscosities of mortars equivalent to SCC's, time 0 min.

## 6.2 Primerjava reometrov

V tem poglavju bomo opravili primerjavo reometrov s pomočjo statističnih postopkov. Reometre bomo primerjali za meritve na običajnih betonih, betonih SCC in maltah, ekvivalentnih tem betonom. Osnovna vizualna primerjava reometrov je bila opravljena v poglavju 6.1 s pomočjo grafikonov "mešanica za mešanico" in enostavnega izračuna povprečnih razlik med rezultati meritev obeh

reometrov ter pripadajočih standardnih odklonov. V tem poglavju bomo opravili še analizo s pomočjo koeficienta determinacije in statističnega postopka ANOVA. Preverili bomo tudi vpliv števila ponovitev meritev v izbranem časovnem intervalu na isti mešanici. Kot smo že povedali (poglavje 5), smo meritve z vsakim reometrom opravili 3-krat na isti mešanici in kot rezultat upoštevali povprečje. Tu bomo preverili, ali so rezultati slabši, če upoštevamo le prvo meritev, povprečje prvih dveh itd. Posamezni pristopi bodo naštetni za vsak primer posebej.

Izračunali smo koeficient determinacije. V grafikone smo vrisali tudi intervale zaupanja in intervale predvidevanja. V grafikonih prekinjena črta predstavlja interval zaupanja s 95% stopnjo zaupanja, pikčasta črta pa predstavlja interval predvidevanja pri 95% stopnji zaupanja. Oba sta izračunana na podlagi t-porazdelitve. Interval zaupanja predstavlja meje, znotraj katerih lahko z določeno stopnjo zaupanja trdimo, da se nahaja regresijska črta. Interval predvidevanja pa predstavlja meje, znotraj katerih se bo z določeno verjetnostjo nahajala naslednja izmerjena vrednost.

Za izvedbo postopka ANOVA moramo postaviti ničelno in alternativno hipotezo. Najprej smo opravili analizo variance za dva faktorja. V tem primeru je sprememba sestave mešanice faktor A, sprememba vrste reometra je faktor B, rezultat meritve pa je spremenljivka. Hipoteze so:

$H_0: \alpha_i = 0$ ; za vse  $i = 1, \dots, a \rightarrow$  sprememba sestave mešanice ne vpliva na rezultat meritve,

$H_1: \alpha_i \neq 0$ ; za vsaj en  $i = 1, \dots, a \rightarrow$  sprememba sestave mešanice vpliva na rezultat meritve,

$H_0: \beta_j = 0$ ; za vse  $j = 1, \dots, b \rightarrow$  sprememba vrste reometra ne vpliva na rezultat meritve,

$H_1: \beta_j \neq 0$ ; za vsaj en  $j = 1, \dots, b \rightarrow$  sprememba vrste reometra vpliva na rezultat meritve,

$H_0: \alpha\beta_{ij} = 0$ ; za vse  $i = 1, \dots, a$  in  $j = 1, \dots, b \rightarrow$  interakcija med faktorjema ne vpliva na rezultat meritve,

$H_1: \alpha\beta_{ij} \neq 0$ ; za vsaj en  $i = 1, \dots, a$  in  $j = 1, \dots, b \rightarrow$  interakcija med faktorjema vpliva na rezultat meritve.

Postopek smo opravili za dve spremenljivki, in sicer za strižno napetost na meji tečenja  $\tau_0$  in za plastično viskoznost  $\mu$ . Prav tako smo ta postopek opravili posebej za izmerjene podatke ter za umerjene podatke (kjer velja drugače, je to posebej zapisano). Umeritev smo izvedli tako, da smo izbrali ConTec Viscometer 5 kot referenčni in upoštevali enačbo linearne regresijske premice med obema reometroma, rezultate ICAR Rheometra pa smo prilagodili z enačbo te premice.

Opravili smo tudi podrobnejšo analizo za vsak reometer posebej, torej analizo variance za en faktor. Sprememba sestave mešanice predstavlja faktor, rezultat meritve pa spremenljivko. Analizo smo opravili za oba reološka parametra. Hipotezi v tem primeru sta:

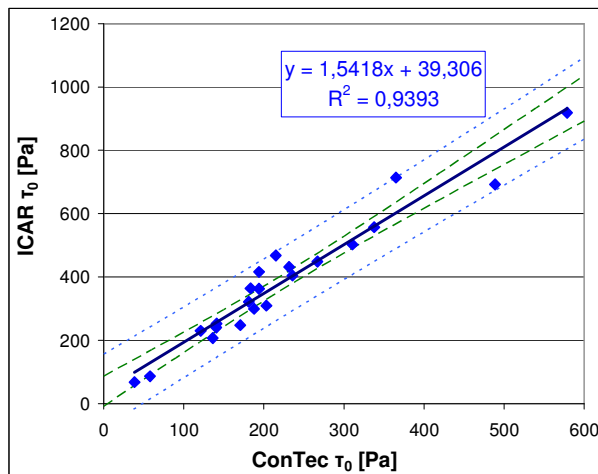
$H_0: \alpha_i = 0$ ; za vse  $i = 1, \dots, a \rightarrow$  sprememba sestave mešanice ne vpliva na rezultat meritve,

$H_1: \alpha_i \neq 0$ ; za vsaj en  $i = 1, \dots, a \rightarrow$  sprememba sestave mešanice vpliva na rezultat meritve.

V vseh primerih je izbrano tveganje  $\alpha$ , da naredimo napako pri zavračanju ničelne hipoteze, enako 5 %. Na podlagi tega tveganja določimo kritično vrednost statistike  $F_{krit}$ . Kritično vrednost statistike smo določili v programu Microsoft Office Excel<sup>®</sup> z vgrajeno funkcijo FINV. Rezultati analize variance so podani v preglednicah ANOVA, v katerih so zapisane vsote kvadratov, prostostne stopnje, povprečni kvadrati, vrednosti statistik  $F$  in kritične vrednosti statistik  $F_{krit}$ . Za izračun smo uporabili programsko opremo Mathematica<sup>®</sup>. Struktura podatkov za analizo variance z dvema faktorjema je naslednja. Število razredov faktorja A (mešanica) se spreminja in se giblje od 22 do 26 pri normalnih mešanicah ter med 11 in 12 pri mešanicah SCC. Vrsta reometra je naš faktor B, kjer vsaka vrsta reometra predstavlja svoj razred. V večini razredov faktorja B imamo 3 elemente. Kjer temu ni tako (manjkajoči podatki), je to upoštevano in razvidno iz števila prostostnih stopenj. Pri analizi variance z enim faktorjem je struktura podatkov naslednja. Sprememba sestave mešanice je naš faktor, kjer vsaka mešanica predstavlja svoj razred faktorja. V vsakem razredu so 3 elementi, manjkajoči podatki so upoštevani. Izvedeni so bili tudi naknadni testi (Duncan, Bonferroni), ki pa ne bodo obširneje predstavljeni. S pomočjo teh testov lahko vzorce razdelimo v razrede, v katerih se vzorci statistično značilno ne razlikujejo.

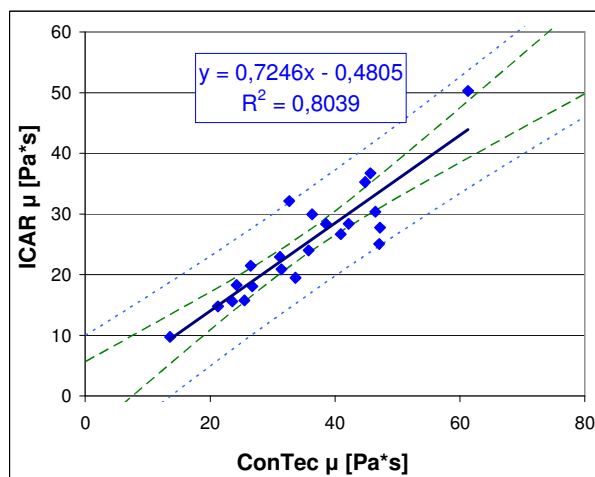
### 6.2.1 Običajni betoni

Rezultati analize za običajne betone so predstavljeni na slikah 51 in 52 ter v preglednicah 24 do 26. Iz analize smo postopoma izločili mešanice CR1, CR1A, CR1B in CT1B. Preverjali smo namreč vpliv števila ponovitev. Mešanica CR1 je bila izločena takoj na začetku, saj z ICAR reometrom na tej mešanici ni bilo možno opraviti nobene meritve. Na preostalih mešanicah smo opravili vsaj eno meritev. Preizkusili smo 4 različne pristope. V prvem pristopu smo izračunali povprečje iz števila vseh rezultatov meritev na eni mešanici, ki smo jih lahko opravili: 1, 2 ali 3. Potem smo preverili rezultat z upoštevanjem le prve izmerjene vrednosti in nato povprečja prvih dveh izmerjenih vrednosti. V tretjem primeru smo izločili še preostale 3 našete mešanice. Za zadnji primer smo izračunali povprečje vsaj dveh izmerjenih vrednosti. Kjer so bili na voljo trije rezultati, smo obvezno upoštevali vse tri. Pristope smo ovrednotili na podlagi koeficienta determinacije; rezultati so podani v preglednici 24. Rezultat zadnjega pristopa je podan na slikah 51 in 52. Na slikah so podane tudi preproste zveze med obema reometroma. Ugotovili smo, da število meritev, ki jih opravimo na isti mešanici v enakem časovnem intervalu, močno vpliva na primerjavo med reometroma, še posebej pri plastičnih viskoznostih. Korelacija je sicer dobra, saj je koeficient determinacije za strižno napetost na meji tečenja nad 0,90 in za plastično viskoznost (z zadostnim številom ponovitev) nad 0,80.



Slika 51: Linearna regresija primerjave strižnih napetosti na meji tečenja za običajne betone.

Figure 51: Linear regression of yield stress comparison for normal concretes.



Slika 52: Linearna regresija primerjave plastičnih viskoznosti za običajne betone.

Figure 52: Linear regression of plastic viscosity comparison for normal concretes.

Preglednica 24: Vpliv števila ponovitev na koeficient determinacije med reometroma, običajni betoni.

Table 24: Effect of number of repetitions on coefficient of determination, normal concretes.

Pristop	R <sup>2</sup>	
	τ <sub>0</sub>	μ
Vsi rezultati	0,95	0,58
Prva vrednost	0,92	0,55
Povprečje prvih dveh vrednosti	0,93	0,81
Povprečje vsaj dveh vrednosti	0,94	0,80

Preglednici 25 in 26 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti τ<sub>0</sub> in μ za analizo z dvema faktorjema za običajne betone. Iz analize izločimo mešanice CR1, CR1A, CR1B in CT1B (manjkajoče meritve pri enem od reometrov). Pri mešanicah CR1C, CL1 in CM1B manjka tretji

element pri ICAR Rheometru (prvi dve mešanici) in pri ConTec reometru (tretja mešanica). Vse ničelne hipoteze zavrnilo, saj so statistike  $F$  večje od kritičnih vrednosti. Trdimo, da so vplivi spremembe sestave mešanice, vrste reometra in interakcije med faktorjema na spremenljivki  $\tau_0$  in  $\mu$  statistično značilni s 5% tveganjem. Povedano drugače: ugotovimo lahko, da reometra zaznata razlike med posameznimi mešanicami, da reometra izmerita različne vrednosti za reološka parametra in da je vpliv spremembe sestave mešanice odvisen od vrste reometra.

Preglednica 25: Preglednica ANOVA za dva faktorja, običajni betoni, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 25: ANOVA table for two factors, normal concretes, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	$3,16 \cdot 10^6$	21	150526,00	46,62	1,68
Faktor B	833140,00	1	833140,00	258,02	3,95
Interakcija AB	214152,00	21	10197,70	3,16	1,68
Napaka	274462,00	85	3228,96		
Skupaj	$4,48 \cdot 10^6$	128			

Preglednica 26: Preglednica ANOVA za dva faktorja, običajni betoni, spremenljivka  $\mu$ .

Table 26: ANOVA table for two factors, normal concretes, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	11016,90	21	524,61	37,42	1,68
Faktor B	3403,22	1	3403,22	242,72	3,95
Interakcija AB	768,71	21	36,61	2,61	1,68
Napaka	1191,78	85	14,02		
Skupaj	16380,60	128			

Preglednici 27 in 28 predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\tau_0$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za običajne betone. Ničelno hipotezo zavrnilo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilen s 5% tveganjem. Preglednici 29 in 30 pa predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\mu$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer. Ničelno hipotezo zavrnilo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\mu$  statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: sklepamo lahko, da vsak reometer zazna razlike med posameznimi mešanicami, kar velja za oba reološka parametra.



Preglednica 27: Rezultati ANOVA, običajni betoni, reometer ConTec, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 27: ANOVA results, normal concretes, rheometer ConTec, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	900292,00	21	42871,10	129,22	1,81
Napaka	14266,50	43	331,78		
Skupaj	914559,00	64			

Preglednica 28: Rezultati ANOVA, običajni betoni, reometer ICAR, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 28: ANOVA results, normal concretes, rheometer ICAR, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	2,40*10 <sup>6</sup>	21	114393,00	18,47	1,81
Napaka	260195	42	6195,12		
Skupaj	2,66*10 <sup>6</sup>	63			

Preglednica 29: Rezultati ANOVA, običajni betoni, reometer ConTec, spremenljivka  $\mu$ .

Table 29: ANOVA results, normal concretes, rheometer ConTec, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	7619,35	21	362,83	45,16	1,81
Napaka	345,51	43	8,04		
Skupaj	7964,85	64			

Preglednica 30: Rezultati ANOVA, običajni betoni, reometer ICAR, spremenljivka  $\mu$ .

Table 30: ANOVA results, normal concretes, rheometer ICAR, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	4196,51	21	199,83	9,92	1,81
Napaka	846,28	42	20,15		
Skupaj	5042,79	63			

Preglednici 31 in 32 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za običajne betone, pri čemer so rezultati ICAR Rheometra umerjeni glede na reometer ConTec Viscometer 5. Podrobnosti testa so enake kot v primeru neumerjenih rezultatov, rezultati pa pričakovano niso enaki. Najprej podajamo rezultate za spremenljivko  $\tau_0$ . Ničelno hipotezo za spremembo sestave mešanice zavrnemo, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilen s 5% tveganjem. Ničelnih domnev za vrsto reometra in interakcijo med faktorjema ne moremo zavrniti, saj sta statistiki  $F$  manjši od kritičnih vrednosti. Vpliva vrste reometra in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\tau_0$  nista statistično značilna s 5% tveganjem. Rezultati v primeru spremenljivke  $\mu$  so naslednji: ničelni hipotezi za spremembo sestave mešanice in interakcijo med faktorjema zavrnemo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\mu$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Vpliv vrste reometra na

spremenljivko  $\mu$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: dejstvo, da nismo mogli zavrniti ničelnih hipotez za faktor vrste reometra pomeni, da je umeritev reometra dobra. Rezultat je pričakovan, sploh glede na dejstvo, da je koeficient determinacije visok ter da sta si krivulji na slikah 42 in 43 sledili dokaj enakomerno.

Preglednica 31: Preglednica ANOVA za dva faktorja, običajni betoni, umerjeni rezultati, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 31: ANOVA table for two factors, normal concretes, calibrated results, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	$1,76 \cdot 10^6$	21	83989,9	64,40	1,68
Faktor B	36,16	1	36,16	$2,77 \cdot 10^{-2}$	3,95
Interakcija AB	29064,30	21	1384,02	1,06	1,68
Napaka	110853,00	85	1304,15		
Skupaj	$1,90 \cdot 10^6$	128			

Preglednica 32: Preglednica ANOVA za dva faktorja, običajni betoni, umerjeni rezultati, spremenljivka  $\mu$ .

Table 32: ANOVA table for two factors, normal concretes, calibrated results, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	12040,80	21	573,37	35,23	1,68
Faktor B	0,44	1	0,44	$2,72 \cdot 10^{-2}$	3,95
Interakcija AB	743,53	21	35,41	2,18	1,68
Napaka	1383,50	85	16,28		
Skupaj	14168,30	128			

Rezultat naknadnega testa (Duncanov test) nam pove, da ima reometer ICAR večje variance med ponovitvami meritev na isti mešanici, zato so razredi večji in manj izraziti. Razporeditev razredov je podobna za oba reometra. Razvrstitev rezultatov meritev po velikosti je v spodnjem in zgornjem območju skoraj enaka za oba reometra, v srednjem območju pa je opaziti nekaj razlik. Vendar opazimo tudi, da se v srednjem območju nahaja večina mešanic, ki imajo zelo podobne rezultate meritev (manjše medsebojne razlike), zato razlika v razvrstitvi ni presenetljiva. Ugotovitve veljajo za oba reološka parametra.

## 6.2.2 Malte ekvivalentne običajnemu betonu (malte CEM)

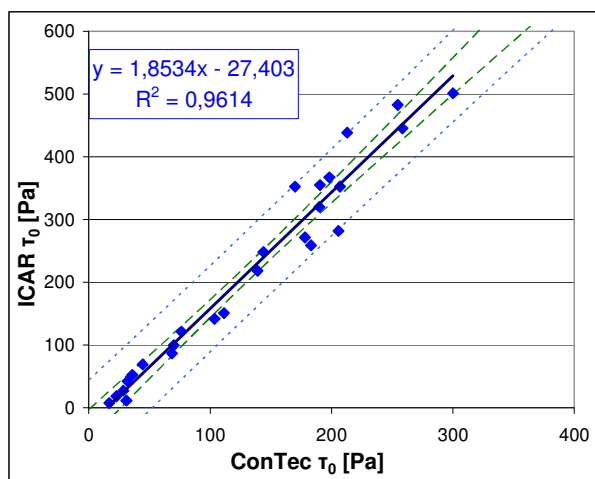
Na maltah smo opravili meritve na vseh mešanicah, pri čemer sta bili uspešni vsaj dve ponovitvi. Zato so pristopi glede vpliva števila ponovitev na primerljivost med reometroma le trije. Vedno so upoštevane vse mešanice.

Rezultati vpliva števila ponovitev so ovrednoteni s pomočjo koeficienta determinacije in podani v preglednici 33. Za zadnji pristop so rezultati slikovno predstavljeni na slikah 53 in 54. Tako kot pri

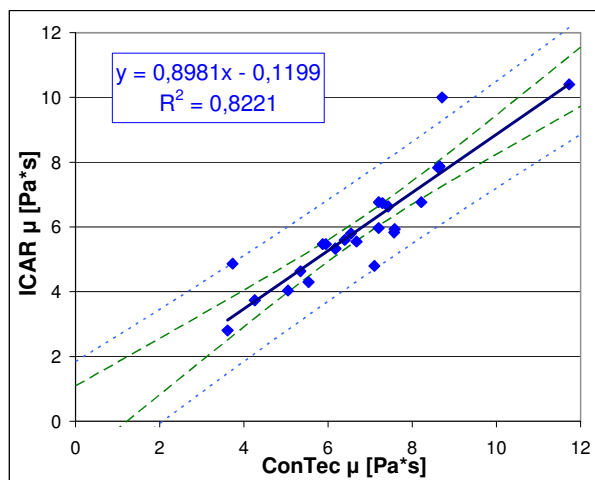
običajnih betonih tudi tukaj podajamo preproste zveze med reometroma. Pri maltah število ponovitev nima vpliva na korelacijo med reometroma, saj se vrednosti  $R^2$  skoraj ne spreminjajo s spreminjanjem števila ponovitev. Stopnja korelacije je podobna kot pri običajnih betonih.

Preglednica 33: Vpliv števila ponovitev na koeficient determinacije med reometroma, običajne malte CEM.  
 Table 33: Effect of number of repetitions on coefficient of determination, normal CEM mortars.

Pristop	$R^2$	
	$\tau_0$	$\mu$
Prva vrednost	0,94	0,84
Povprečje prvih dveh vrednosti	0,96	0,83
Povprečje vsaj dveh vrednosti	0,96	0,82



Slika 53: Linearna regresija primerjave strižnih napetosti na meji tečenja za običajne malte CEM.  
 Figure 53: Linear regression of yield stress comparison for normal CEM mortars.



Slika 54: Linearna regresija primerjave plastičnih viskoznosti za običajne malte CEM.  
 Figure 54: Linear regression of plastic viscosity comparison for normal CEM mortars.

Preglednici 34 in 35 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za malte CEM. Pri mešanici CT1A manjka tretji element pri ICAR Rheometru. Vse ničelne hipoteze zavrnamo, saj so statistike  $F$  večje od kritičnih vrednosti. Trdimo, da so vplivi spremembe sestave mešanice, vrste reometra in interakcije med faktorjema na spremenljivki  $\tau_0$  in  $\mu$  statistično značilni s 5% tveganjem. Povedano drugače: ugotovimo lahko, da reometra zaznata razlike med posameznimi mešanicami, da reometra izmerita različne vrednosti za reološka parametra in da je vpliv spremembe sestave mešanice odvisen od vrste reometra.

Preglednica 34: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte CEM, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 34: ANOVA table for two factors, CEM mortars, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	2,21*10 <sup>6</sup>	25	88274,70	132,09	1,61
Faktor B	291438,00	1	291438,00	436,10	3,93
Interakcija AB	229072	25	9162,90	13,71	1,61
Napaka	68833,50	103	668,29		
Skupaj	2,80*10 <sup>6</sup>	154			

Preglednica 35: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte CEM, spremenljivka  $\mu$ .

Table 35: ANOVA table for two factors, CEM mortars, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	468,97	25	18,76	42,59	1,61
Faktor B	26,34	1	26,34	59,81	3,93
Interakcija AB	20,96	25	0,84	1,90	1,61
Napaka	45,37	103	0,44		
Skupaj	561,63	154			

Preglednici 36 in 37 predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\tau_0$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za malte CEM. Ničelno hipotezo zavrnamo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilen s 5% tveganjem. Preglednici 38 in 39 pa predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\mu$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za malte CEM. Ničelno hipotezo zavrnamo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\mu$  statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: sklepamo lahko, da vsak reometer zazna razlike med posameznimi mešanicami, kar velja za oba reološka parametra.

Preglednica 36: Rezultati ANOVA, malte CEM, reometer ConTec, spremenljivka  $\tau_0$ .Table 36: ANOVA results, CEM mortars, rheometer ConTec, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	538493,00	25	21539,70	187,67	1,72
Napaka	5968,13	52	114,77		
Skupaj	544461	77			

Preglednica 37: Rezultati ANOVA, malte CEM, reometer ICAR, spremenljivka  $\tau_0$ .Table 37: ANOVA results, CEM mortars, rheometer ICAR, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	$1,89 \cdot 10^6$	25	75417,30	61,18	1,72
Napaka	62865,30	51	1232,65		
Skupaj	$1,95 \cdot 10^6$	76			

Preglednica 38: Rezultati ANOVA, malte CEM, reometer ConTec, spremenljivka  $\mu$ .Table 38: ANOVA results, CEM mortars, rheometer ConTec, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	251,40	25	10,06	27,31	1,72
Napaka	19,15	52	0,37		
Skupaj	270,55	77			

Preglednica 39: Rezultati ANOVA, malte CEM, reometer ICAR, spremenljivka  $\mu$ .Table 39: ANOVA results, CEM mortars, rheometer ICAR, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	238,73	25	9,55	18,58	1,72
Napaka	26,22	51	0,51		
Skupaj	264,95	76			

Preglednici 40 in 41 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrdnosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za malte CEM, pri čemer so rezultati ICAR Rheometra umerjeni glede na reometer ConTec Viscometer 5. Podrobnosti testa so enake kot v primeru neumerjenih rezultatov, rezultati pa pričakovano niso enaki. Najprej naštejmo rezultate za spremenljivko  $\tau_0$ . Ničelni hipotezi za spremembo sestave mešanice in interakcijo med faktorjema zavrnilo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Vpliv vrste reometra na spremenljivko  $\tau_0$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Rezultati v primeru spremenljivke  $\mu$  so naslednji: ničelni hipotezi za spremembo sestave mešanice in interakcijo med faktorjema zavrnilo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\mu$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Vpliv vrste

reometra na spremenljivko  $\mu$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: dejstvo, da nismo mogli zavrniti ničelnih hipotez za faktor vrste reometra pomeni, da je umeritev reometra dobra. Rezultat je pričakovan, sploh glede na dejstvo, da je korelacija med reometroma visoka.

Preglednica 40: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte CEM, umerjeni rezultati, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 40: ANOVA table for two factors, CEM mortars, calibrated results, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	$1,04 \cdot 10^6$	25	41489,90	186,36	1,61
Faktor B	0,19	1	0,19	$8,34 \cdot 10^{-4}$	3,93
Interakcija AB	10380,80	25	415,23	1,87	1,61
Napaka	22931,30	103	222,63		
Skupaj	$1,07 \cdot 10^6$	154			

Preglednica 41: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte CEM, umerjeni rezultati, spremenljivka  $\mu$ .

Table 41: ANOVA table for two factors, CEM mortars, calibrated results, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	440,24	25	17,61	43,30	1,61
Faktor B	$2,48 \cdot 10^{-3}$	1	$2,48 \cdot 10^{-3}$	$6,11 \cdot 10^{-3}$	3,93
Interakcija AB	20,78	25	0,83	2,04	1,61
Napaka	41,89	103	0,41		
Skupaj	502,91	154			

Rezultat naknadnega testa (Duncanov test v tem primeru odpove zaradi prevelikega števila mešanic, zato uporabimo Bonferronijev test) nam pove, da ima reometer ICAR večje variance med ponovitvami meritev na isti mešanici, zato so razredi večji in manj izraziti. Razporeditev razredov je podobna za oba reometra. Razvrstitev rezultatov meritev po velikosti je v spodnjem in zgornjem območju skoraj enaka za oba reometra, v srednjem območju pa je opaziti nekaj razlik. Vendar opazimo tudi, da se v srednjem območju nahaja večina mešanic, ki imajo zelo podobne rezultate meritev (manjše medsebojne razlike), zato razlika v razvrstitvi ni presenetljiva.

### 6.2.3 Betoni SCC

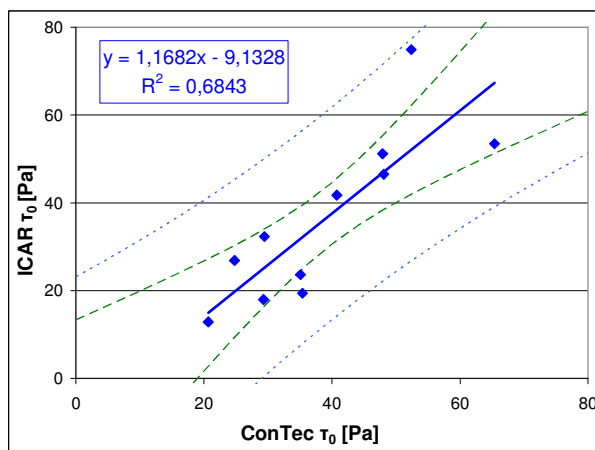
Zaradi specifičnosti betonov SCC smo spet izbrali nekoliko drugačne pristope ovrednotenja števila meritev na isti mešanici v enakem časovnem intervalu. Najprej smo izločili mešanico SCCR1, ker po svojih lastnostih ni več beton SCC, zato lahko bistveno spremeni rezultate analize. Poleg pristopa upoštevanja prve meritve, povprečja prvih dveh meritev in povprečja vsaj dveh meritev, smo izbrali še četrti pristop. Izločili smo nekatere »slabe« meritve. Kriterijev za izločitev posamezne meritve je bilo več. Izločili smo tisto meritev, ki je odstopala več kot 30 % od povprečja ostalih dveh. Ta meja je smiselna na podlagi pregleda vseh meritev in ocene, kakšne so večinoma razlike med posameznimi

ponovitvami meritev. Meritev smo izločili tudi, če je bilo prileganje premice, ki opisuje tokovno krivuljo, slabo, ker je katera izmed izmerjenih točk navora preveč odstopala.

Preglednica 42: Vpliv števila ponovitev na koeficient determinacije med reometroma, betoni SCC.

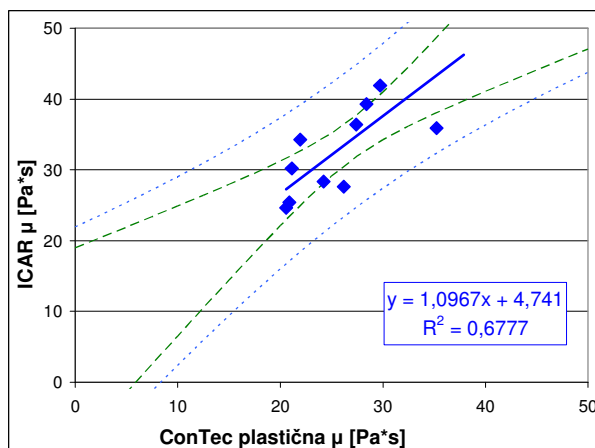
Table 42: Effect of number of repetitions on coefficient of determination, SCC concretes.

Pristop	R <sup>2</sup>	
	$\tau_0$	$\mu$
Prva meritev	0,05	0,61
Povprečje prvih dveh meritev	0,28	0,70
Povprečje vsaj dveh meritev	0,44	0,73
Povprečje vsaj dveh meritev, »slabe« meritve odstranimo	0,68	0,68



Slika 55: Linearna regresija primerjave strižnih napetosti na meji tečenja za betone SCC.

Figure 55: Linear regression of yield stress comparison for SCC concrete.



Slika 56: Linearna regresija primerjave plastičnih viskoznosti za betone SCC.

Figure 56: Linear regression of plastic viscosity comparison for SCC concrete.

Korelacija med reometroma je v primeru betonov SCC slabša kot pri običajnih betonih (preglednica 42). Najbolj je razlika opazna v primeru parametra  $\tau_0$ . S pravilno analizo vseh meritev in z zadostnim številom ponovitev lahko izločimo posamezne meritve ter tako izboljšamo rezultat. Absolutne vrednosti rezultatov so si med reometroma podobne, razmerje je blizu 1:1 za oba reološka parametra.

Preglednici 43 in 44 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za betone SCC. Pri mešanici SCCR1 manjka tretji element pri ICAR Rheometru. Vse ničelne hipoteze zavrnilo, saj so statistike  $F$  večje od kritičnih vrednosti. Trdimo, da so vplivi spremembe sestave mešanice, vrste reometra in interakcije med faktorjema na spremenljivki  $\tau_0$  in  $\mu$  statistično značilni s 5% tveganjem. Povedano drugače: ugotovimo lahko, da reometra zaznata razlike med posameznimi mešanicami, da reometra izmerita različne vrednosti za reološka parametra in da je vpliv spremembe sestave mešanice odvisen od vrste reometra. Rezultat v primeru celotnega vzorca vrednosti  $\tau_0$  je lahko varljiv, saj smo v analizi upoštevali tudi mešanico SCCR1, ki po rezultatih odstopa. Že ob pogledu na sliko 47 opazimo, da krivulji nista vzporedni. Pri nekaterih mešanicah višjo vrednost pokaže en reometer, pri drugih mešanicah pa drugi reometer. Pričakovali bi torej, da ničelne hipoteze za vrsto reometra ne bi sprejeli, a očitno zelo visoka vrednost pri mešanici SCCR1 popači rezultat. V nadaljevanju bomo opravili analizo še brez mešanice SCCR1.

Preglednica 43: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 43: ANOVA table for two factors, SCC concretes, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	137789,00	11	12526,30	128,63	2,00
Faktor B	662,16	1	662,16	6,80	4,05
Interakcija AB	6947,68	11	631,61	6,49	2,00
Napaka	4577,06	47	97,38		
Skupaj	149976,00	70			

Preglednica 44: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC, spremenljivka  $\mu$ .

Table 44: ANOVA table for two factors, SCC concretes, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	111333,00	11	10121,10	1040,68	2,00
Faktor B	1240,19	1	1240,19	127,52	4,05
Interakcija AB	361,21	11	32,84	3,38	2,00
Napaka	457,10	47	9,73		
Skupaj	113391,00	70			

Preglednici 45 in 46 predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\tau_0$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za betone SCC. Ničelno hipotezo zavrnilo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave



mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilen s 5% tveganjem. Preglednici 47 in 48 pa predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\mu$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za betone SCC. Ničelno hipotezo zavrnamo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\mu$  statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: sklepamo lahko, da vsak reometer zazna razlike med posameznimi mešanici, kar velja za oba reološka parametra.

Preglednica 45: Rezultati ANOVA, betoni SCC, reometer ConTec, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 45: ANOVA results, SCC concretes, rheometer ConTec, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	96988,20	11	8817,11	72,88	2,22
Napaka	2903,49	24	120,98		
Skupaj	99891,70	35			

Preglednica 46: Rezultati ANOVA, betoni SCC, reometer ICAR, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 46: ANOVA results, SCC concretes, rheometer ICAR, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	46501,30	11	4227,39	58,10	2,24
Napaka	1673,56	23	72,76		
Skupaj	48174,90	34			

Preglednica 47: Rezultati ANOVA, betoni SCC, reometer ConTec, spremenljivka  $\mu$ .

Table 47: ANOVA results, SCC concretes, rheometer ConTec, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	63619,10	11	5783,55	783,33	2,22
Napaka	177,20	24	7,38		
Skupaj	63796,30	35			

Preglednica 48: Rezultati ANOVA, betoni SCC, reometer ICAR, spremenljivka  $\mu$ .

Table 48: ANOVA results, SCC concretes, rheometer ICAR, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	48980,20	11	4452,75	365,89	2,24
Napaka	279,90	23	12,17		
Skupaj	49260,10	34			

Preglednici 49 in 50 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za betone SCC. Iz analize izločimo mešanico SCCR1. Najprej podajamo rezultate za spremenljivko  $\tau_0$ . Ničelno hipotezo za spremembo sestave mešanice in interakcijo med faktorjema zavrnamo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične

vrednosti. Vpliv vrste reometra na spremenljivko  $\tau_0$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Rezultati v primeru spremenljivke  $\mu$  so naslednji: vse ničelne hipoteze zavrnilo, saj so statistike  $F$  večje od kritičnih vrednosti. Trdimo, da so vplivi spremembe sestave mešanice, vrste reometra in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\mu$  statistično značilni s 5% tveganjem. Povedano drugače: ugotovimo lahko, da reometra zaznata razlike med posameznimi mešanicami in da je vpliv spremembe sestave mešanice odvisen od vrste reometra. V primeru celotnega vzorca vrednosti  $\tau_0$  reometra ne izmerita različnih vrednosti, v primeru celotnega vzorca vrednosti  $\mu$  pa še vedno izmerita različne vrednosti. Uporabljena vrsta reometra torej ne vpliva na rezultat za parameter  $\tau_0$ , kar smo ugotovili že prej, kjer smo s preprostim opazovanjem ugotovili, da je razmerje med rezultati reometrov približno enako 1 ter da smo že v diagramih »mešanica za mešanico« opazili, da absolutna razlika med rezultati obeh reometrov nima več istega predznaka za vse betonske mešanice.

Preglednica 49: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC brez SCCR1, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 49: ANOVA table for two factors, SCC concretes without SCCR1, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	14122,90	10	1412,29	20,22	2,05
Faktor B	112,06	1	112,06	1,60	4,06
Interakcija AB	3948,72	10	394,87	5,65	2,05
Napaka	3073,37	44	69,85		
Skupaj	21257,00	65			

Preglednica 50: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC brez SCCR1, spremenljivka  $\mu$ .

Table 50: ANOVA table for two factors, SCC concretes without SCCR1, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	2549,08	10	254,91	36,98	2,05
Faktor B	1032,14	1	1032,14	149,72	4,06
Interakcija AB	309,37	10	30,94	4,49	2,05
Napaka	303,33	44	6,89		
Skupaj	4193,91	70			

Preglednici 51 in 52 predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\tau_0$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za betone SCC brez mešanice SCCR1. Ničelno hipotezo zavrnilo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilen s 5% tveganjem. Preglednici 53 in 54 pa predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\mu$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za betone SCC brez mešanice SCCR1. Ničelno hipotezo zavrnilo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave

mešanice na spremenljivko  $\mu$  statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: sklepamo lahko, da vsak reometer zazna razlike med posameznimi mešanicami, kar velja za oba reološka parametra.

Preglednica 51: Rezultati ANOVA, betoni SCC brez SCCR1, reometer ConTec, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 51: ANOVA results, SCC concretes without SCCR1, rheometer ConTec, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	4322,19	10	432,22	6,74	2,30
Napaka	1411,81	22	64,17		
Skupaj	5733,99	32			

Preglednica 52: Rezultati ANOVA, betoni SCC brez SCCR1, reometer ICAR, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 52: ANOVA results, SCC concretes without SCCR1, rheometer ICAR, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	13749,40	10	1374,99	18,21	2,30
Napaka	1661,56	22	75,53		
Skupaj	15411,00	32			

Preglednica 53: Rezultati ANOVA, betoni SCC brez SCCR1, reometer ConTec, spremenljivka  $\mu$ .

Table 53: ANOVA results, SCC concretes without SCCR1, rheometer ConTec, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	874,04	10	87,10	19,34	2,30
Napaka	99,07	22	4,50		
Skupaj	970,12	32			

Preglednica 54: Rezultati ANOVA, betoni SCC brez SCCR1, reometer ICAR, spremenljivka  $\mu$ .

Table 54: ANOVA results, SCC concretes without SCCR1, rheometer ICAR, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	1987,40	10	198,74	21,41	2,30
Napaka	204,25	22	9,28		
Skupaj	2191,66	32			

Preglednici 55 in 56 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za betone SCC brez mešanice SCCR1. Rezultati ICAR Rheometra so umerjeni glede na reometer ConTec Viscometer 5. Podrobnosti testa so enake kot v primeru neumerjenih rezultatov, rezultati pa pričakovano niso enaki. Najprej podajamo rezultate za spremenljivko  $\tau_0$ . Ničelni hipotezi za spremembo sestave mešanice in interakcijo med faktorjema zavrnilo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Vpliv vrste reometra na spremenljivko  $\tau_0$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Rezultati v primeru spremenljivke  $\mu$  so naslednji: ničelni hipotezi za spremembo sestave mešanice in interakcijo med

faktorjema zavrnilo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\mu$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Vpliv vrste reometra na spremenljivko  $\mu$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: dejstvo, da nismo mogli zavrniti ničelnih hipotez za faktor vrste reometra pomeni, da je umeritev reometra dobra. Umeritev reometra sicer v tem primeru ni povsem smiselna, saj je korelacija med reometroma relativno slaba. Ob tem je potrebno poudariti, da so bile nekatere mešanice SCC zasnovane tako, da bi se lahko pojavljala segregacija večjih delcev. V nekaterih primerih se je to v manjši meri tudi zgodilo. Prav tako so delci med samo meritvijo potovali na rob posode reometra. Te mešanice bi prav tako lahko vplivale na rezultate analize, saj omenjeni pojavi lahko popačijo rezultat meritve, ki ni več realen.

Preglednica 55: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC brez SCCR1, umerjeni rezultati, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 55: ANOVA table for two factors, SCC concretes without SCCR1, calibrated results, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	7508,37	10	750,84	16,68	2,05
Faktor B	5,02	1	5,05	0,11	4,06
Interakcija AB	1538,08	10	153,81	3,42	2,05
Napaka	1980,89	44	45,02		
Skupaj	11032,40	65			

Preglednica 56: Preglednica ANOVA za dva faktorja, betoni SCC brez SCCR1, umerjeni rezultati, spremenljivka  $\mu$ .

Table 56: ANOVA table for two factors, SCC concretes without SCCR1, calibrated results, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	1511,62	10	151,16	37,45	2,05
Faktor B	5,41	1	5,41	1,34	4,06
Interakcija AB	122,55	10	12,25	3,04	2,05
Napaka	177,59	44	4,04		
Skupaj	1817,17	65			

Rezultat naknadnega testa (Duncanov test) nam v primeru strižnih napetosti na meji tečenja pove, da ima tokrat reometer ConTec večje variance med ponovitvami meritev na isti mešanici, zato so razredi večji in manj izraziti. V primeru plastičnih viskoznosti je rezultat testa podoben za oba reometra.

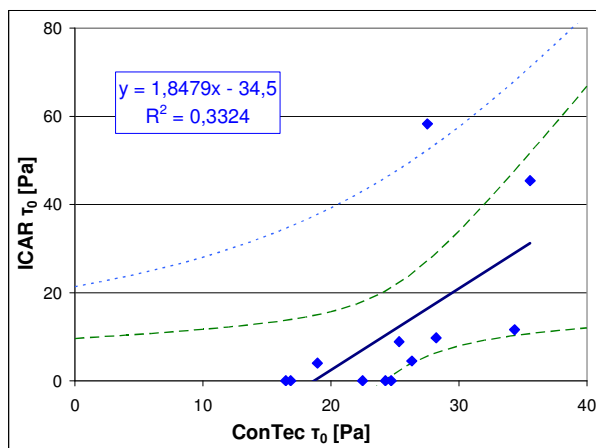
#### 6.2.4 Malte SCC CEM

V tem primeru pričakujemo zelo slabo korelacijo med reometri v primeru strižne napetosti na meji tečenja. V poglavju 6.1.4 smo videli, da ima veliko mešanic, izmerjenih z ICAR Rheometrom,

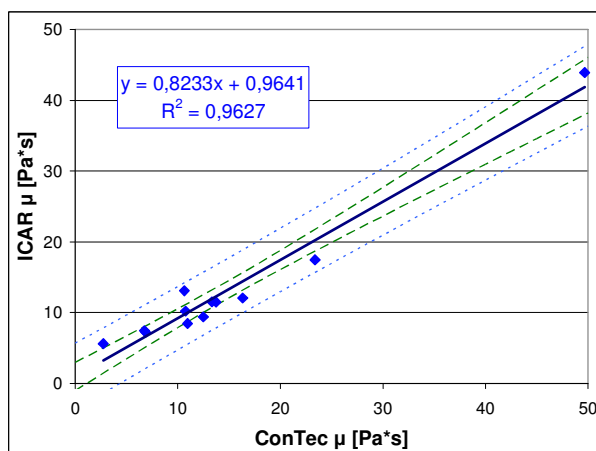
vrednost strižne napetosti na meji tečenja enako nič. To lahko potrdimo z majhnim koeficientom determinacije (preglednica 57). Ta ostaja majhen kljub pristopu, kjer lahko odstranimo slabe meritve. Korelacija v primeru plastičnih viskoznosti pa je dobra (sliki 57 in 58).

Preglednica 57: Vpliv števila ponovitev na koeficient determinacije med reometroma, malte SCC CEM.  
 Table 57: Effect of number of repetitions on coefficient of determination, SCC CEM mortars.

Pristop	R <sup>2</sup>	
	$\tau_0$	$\mu$
Prva vrednost	0,10	0,95
Povprečje prvih dveh vrednosti	0,18	0,96
Povprečje vsaj dveh vrednosti	0,29	0,96
Povprečje vsaj dveh vrednosti, slabe meritve odstranimo	0,33	0,96



Slika 57: Linearna regresija primerjave strižnih napetosti na meji tečenja za malte SCC CEM.  
 Figure 57: Linear regression of yield stress comparison for SCC CEM mortars.



Slika 58: Linearna regresija primerjave plastičnih viskoznosti za malte SCC CEM.  
 Figure 58: Linear regression of plastic viscosity comparison for SCC CEM mortars.

Preglednici 58 in 59 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za malte SCC CEM. Najprej naštejmo rezultate za spremenljivko  $\tau_0$ . Ničelno hipotezo za spremembo sestave mešanice zavrnilo, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilen s 5% tveganjem. Ničelnih domnev za vrsto reometra in interakcijo med faktorjema ne moremo zavrniti, saj sta statistiki  $F$  manjši od kritičnih vrednosti. Vpliva vrste reometra in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\tau_0$  nista statistično značilna s 5% tveganjem. Rezultati v primeru spremenljivke  $\mu$  so naslednji: vse ničelne hipoteze zavrnilo, saj so statistike  $F$  večje od kritičnih vrednosti. Trdimo, da so vplivi spremembe sestave mešanice, vrste reometra in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\mu$  statistično značilni s 5% tveganjem. Povedano drugače: ugotovimo lahko, da reometra zaznata razlike med posameznimi mešanicami v primeru obeh reoloških parametrov. V primeru celotnega vzorca vrednosti  $\tau_0$  reometra ne izmerita različnih vrednosti in vpliv spremembe sestave mešanice ni odvisen od vrste reometra. Rezultat je pričakovan zaradi velikega števila meritev z vrednostjo nič in večjega raztrosa rezultatov znotraj mešanic v primeru reometra ICAR. Na podlagi tega menimo, da umerjanje reometra ICAR za celoten vzorec vrednosti  $\tau_0$  ni smiselno.

Preglednica 58: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 58: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	14297,00	11	1357,00	2,33	1,99
Faktor B	260,30	1	260,30	0,45	4,04
Interakcija AB	9233,06	11	839,37	1,44	1,99
Napaka	27921,90	48	581,71		
Skupaj	52342,20	71			

Preglednica 59: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, spremenljivka  $\mu$ .

Table 59: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	8161,71	11	741,97	836,94	1,99
Faktor B	49,50	1	49,50	55,84	4,04
Interakcija AB	140,44	11	12,77	14,40	1,99
Napaka	42,55	48	0,87		
Skupaj	8394,21	71			

Preglednici 60 in 61 predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\tau_0$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za malte SCC CEM. Ničelno hipotezo za reometer ConTec zavrnilo, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilen s 5% tveganjem. Ničelne hipoteze za reometer ICAR ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Trdimo, da vpliv

spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Preglednici 62 in 63 pa predstavljata preglednici ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\mu$  za reometra ConTec Viscometer 5 in ICAR Rheometer za malte SCC CEM. Ničelno hipotezo zavrnemo za oba reometra, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\mu$  statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: sklepamo lahko, da reometer ICAR ne zazna razlik med posameznimi mešanicami v primeru spremenljivke  $\tau_0$ . Ta rezultat je pričakovan zaradi velikega števila rezultatov meritev z ICAR Rheometrom, ki imajo vrednost nič. V ostalih primerih reometra zaznata razlike v mešanicah.

Preglednica 60: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ConTec, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 60: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ConTec, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	1201,71	11	109,25	10,79	2,22
Napaka	242,97	24	10,12		
Skupaj	1444,68	35			

Preglednica 61: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ICAR, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 61: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ICAR, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	22958,30	11	2087,12	1,81	2,22
Napaka	27678,90	24	1153,29		
Skupaj	50637,30	35			

Preglednica 62: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ConTec, spremenljivka  $\mu$ .

Table 62: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ConTec, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	4874,30	11	443,12	387,00	2,22
Napaka	27,48	24	1,15		
Skupaj	4901,78	35			

Preglednica 63: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ICAR, spremenljivka  $\mu$ .

Table 63: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ICAR, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	3427,86	11	311,62	496,17	2,22
Napaka	15,07	24	0,63		
Skupaj	3442,93	35			

Preglednica 64 predstavlja preglednico ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za malte SCC CEM, pri čemer so rezultati ICAR Rheometra umerjeni glede na reometer ConTec Viscometer 5. Podrobnosti testa so enake kot v primeru neumerjenih rezultatov, rezultati pa pričakovano niso enaki. Ničelni hipotezi za spremembo sestave mešanice in interakcijo med

faktorjema zavrnilo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Vpliv vrste reometra na spremenljivko  $\mu$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: dejstvo, da nismo mogli zavrniti ničelne hipoteze za faktor vrste reometra pomeni, da je umeritev reometra dobra. Rezultat je pričakovan, sploh glede na dejstvo, da je korelacija med reometroma visoka.

Preglednica 64: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, umerjeni rezultati, spremenljivka  $\mu$ .

Table 64: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, calibrated results, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	9455,43	11	859,59	339,12	1,99
Faktor B	1,42	1	1,42	0,56	4,04
Interakcija AB	96,46	11	8,77	3,46	1,99
Napaka	121,68	48	2,53		
Skupaj	9674,98	71			

Vpliv slabih rezultatov (vrednost nič ali netipično velika vrednost pri eni izmed ponovitev) poskusimo dokazati s ponovno analizo ANOVA na popravljenih rezultatih strižne napetosti na meji tečenja ICAR Rheometra. Vzporedno smo popravili tudi vrednosti plastične viskoznosti, da ustrezajo popravljenim strižnim napetostim na meji tečenja. Nekatere rezultate meritev, ki so vidno odstopali (mešanice SCCMR2, SCCMR4B in SCCMR4C), smo popravili tako, da smo izločili določene točke izmerjenega navora in ponovno izračunali reološke parametre.

Preglednici 65 in 66 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za malte SCC CEM s popravljenimi rezultati reometra ICAR. Vse ničelne hipoteze zavrnilo, saj so statistike  $F$  večje od kritičnih vrednosti. Trdimo, da so vplivi spremembe sestave mešanice, vrste reometra in interakcije med faktorjema na spremenljivki  $\tau_0$  in  $\mu$  statistično značilni s 5% tveganjem. Povedano drugače: ugotovimo lahko, da reometra zaznata razlike med posameznimi mešanicami, da reometra izmerita različne vrednosti za reološka parametra in da je vpliv spremembe sestave mešanice odvisen od vrste reometra.



Preglednica 65: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, popravljene rezultati, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 65: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, corrected results, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	9000,09	11	818,19	18,27	1,99
Faktor B	3146,89	1	3146,89	70,29	4,04
Interakcija AB	4547,94	11	413,45	9,24	1,99
Napaka	2148,86	48	44,77		
Skupaj	18843,80	71			

Preglednica 66: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, popravljene rezultati, spremenljivka  $\mu$ .

Table 66: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, corrected results, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	8147,50	11	740,68	944,71	1,99
Faktor B	54,43	1	54,43	69,42	4,04
Interakcija AB	144,84	11	13,17	16,79	1,99
Napaka	37,63	48	0,78		
Skupaj	8384,40	71			

Ločena analiza za vsak reometer je bila v tem primeru opravljena le za reometer ICAR, saj so rezultati reometra ConTec ostali nespremenjeni. Preglednica 67 predstavlja preglednico ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\tau_0$  za reometer ICAR za malte SCC CEM s popraavljenimi rezultati. Ničelno hipotezo zavrnamo, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilen s 5% tveganjem. Preglednica 68 pa predstavlja preglednico ANOVA za celoten vzorec vrednosti  $\mu$  za reometer ICAR za malte SCC CEM s popraavljenimi rezultati. Ničelno hipotezo zavrnamo, saj je statistika  $F$  večja od kritične vrednosti. Trdimo, da je vpliv spremembe sestave mešanice na spremenljivko  $\mu$  statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: sklepamo lahko, da vsak reometer zazna razlike med posameznimi mešanicami, kar velja za oba reološka parametra.

Preglednica 67: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ConTec, popravljeni rezultati, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 67: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ConTec, corrected results, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	12346,30	11	1122,39	14,13	2,22
Napaka	1905,89	24	79,41		
Skupaj	14252,20	35			

Preglednica 68: Rezultati ANOVA, malte SCC CEM, reometer ICAR, popravljeni rezultati, spremenljivka  $\mu$ .

Table 68: ANOVA results, SCC CEM mortars, rheometer ICAR, corrected results, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor	3418,04	11	310,73	734,49	2,22
Napaka	10,15	24	0,42		
Skupaj	3428,19	35			

Preglednici 69 in 70 predstavljata preglednici ANOVA za celotna vzorca vrednosti  $\tau_0$  in  $\mu$  za analizo z dvema faktorjema za malte SCC CEM, pri čemer so rezultati ICAR Rheometra popravljeni in umerjeni glede na reometer ConTec Viscometer 5. Podrobnosti testa so enake kot v primeru neumerjenih rezultatov, rezultati pa pričakovano niso enaki. Najprej podajamo rezultate za spremenljivko  $\tau_0$ . Ničelni hipotezi za spremembo sestave mešanice in interakcijo med faktorjema zavrnilo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\tau_0$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Vpliv vrste reometra na spremenljivko  $\tau_0$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Rezultati v primeru spremenljivke  $\mu$  so naslednji: ničelni hipotezi za spremembo sestave mešanice in interakcijo med faktorjema zavrnilo, saj sta statistiki  $F$  večji od kritičnih vrednosti. Trdimo, da sta vpliva spremembe sestave mešanice in interakcije med faktorjema na spremenljivko  $\mu$  statistično značilna s 5% tveganjem. Ničelne domneve za vrsto reometra ne moremo zavrniti, saj je statistika  $F$  manjša od kritične vrednosti. Vpliv vrste reometra na spremenljivko  $\mu$  ni statistično značilen s 5% tveganjem. Povedano drugače: dejstvo, da nismo mogli zavrniti ničelnih hipotez za faktor vrste reometra pomeni, da je umeritev reometra dobra. Rezultat je pričakovan, sploh glede na dejstvo, da je korelacija med reometroma visoka.

Preglednica 69: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, popravljeni in umerjeni rezultati, spremenljivka  $\tau_0$ .

Table 69: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, corrected and calibrated results, variable  $\tau_0$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	1197,18	11	108,83	17,18	1,99
Faktor B	0,02	1	0,02	$3,16 \cdot 10^{-3}$	4,04
Interakcija AB	400,76	11	36,43	5,75	1,99
Napaka	304,16	48	6,34		
Skupaj	1902,12	71			

Preglednica 70: Preglednica ANOVA za dva faktorja, malte SCC CEM, popravljeni in umerjeni rezultati, spremenljivka  $\mu$ .

Table 70: ANOVA table for two factors, SCC CEM mortars, corrected and calibrated results, variable  $\mu$ .

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika $F$	$F_{krit}$
Faktor A	9437,74	11	857,98	358,01	1,99
Faktor B	0,64	1	0,64	0,27	4,04
Interakcija AB	101,70	11	9,25	3,86	1,99
Napaka	115,03	48	2,40		
Skupaj	9655,12	71			

Po popravljanju posameznih rezultatov so se vrednosti statistik  $F$  povečale. To je indikacija boljših rezultatov. Vendar moramo te rezultate vseeno jemati z določeno mero nezaupanja. Nikjer ni namreč določena meja, do katere je smiselno popravljati rezultate, da bodo ti realni. V primeru malt SCC CEM pa je prav tako moteče dejstvo, da je veliko rezultatov meritev strižnih napetosti na meji tečenja enako nič. Zaradi tega dejstva lahko rečemo, da uporabljen merilni sistem ni primeren za izvajanje meritev na takih mešanicah. Z uporabo drugačnega merilnega sistema predvidevamo, da bi bili tudi rezultati boljši, bolj realni in bolj natančni.

Naknadni test (Duncanov test) v primeru strižnih napetosti na meji tečenja odpove zaradi večjega števila rezultatov meritev z vrednostjo nič, ki smo jih izmerili z reometrom ICAR. Primerjava v tem primeru torej ni možna. V primeru plastičnih viskoznosti je rezultat testa podoben za oba reometra.

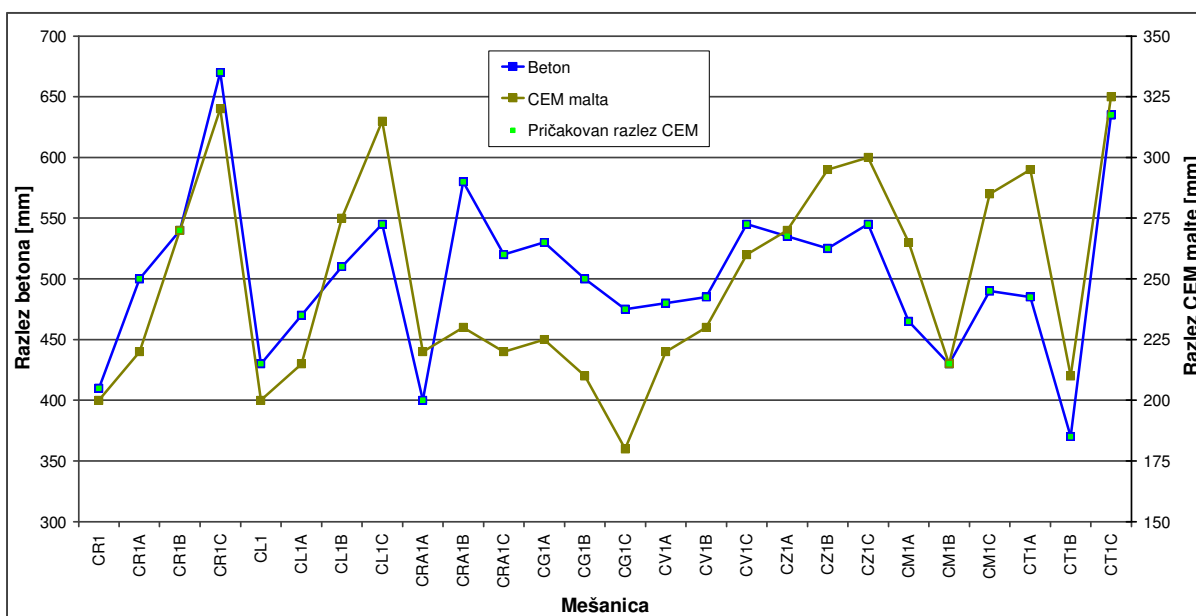
### 6.3 Primerjava med betonom in njemu ekvivalentno malto

V začetni fazi primerjav betona in malte CEM nas zanima primerjava v času 0 minut. Preko te primerjave lahko ocenimo učinkovitost metode CEM in ali reometer zaznava razlike v sestavi mešanice na enak način na betonih in maltah CEM. Prav tako lahko ocenimo učinkovitost metode pričakovanega razleza malte CEM, ki smo jo vpeljali v okviru doktorske disertacije. Obdelali bomo le rezultate, pridobljene s ConTec Viscometrom 5, saj smo pri ICAR Rheometru ugotovili, da ima

uporabljen merilni sistem za preiskave na maltah določene pomanjkljivosti, predvsem pri meritvah strižnih napetosti na meji tečenja bolj tekočih malt (poglavje 6.1).

### 6.3.1 Običajni beton in malta

Najprej nas zanima, kako se skladajo rezultati razleza malt, formuliranih z metodo CEM, in izračunanih pričakovanih razlezov. Metoda pričakovanega razleza je opisana v poglavju 5.3.3, rezultati pa so predstavljeni na sliki 59. Opazimo lahko dobro ujemanje rezultatov za vse mešanice, razen za mešanice z aerantom (CRA1a, CRA1b, CRA1c) in za mešanice s stabilizatorjem (CG1a, CG1b, CG1c). Pri teh mešanicah je razlika med izmerjenim razlezom malte CEM in pričakovanim razlezom malte CEM (po enačbi (34)) velika. Izračunane razlike med izmerjenim in pričakovanim razlezom malt CEM so podane v preglednici 71. Razmerje med razlezom betona in razlezom malte je približno 2.

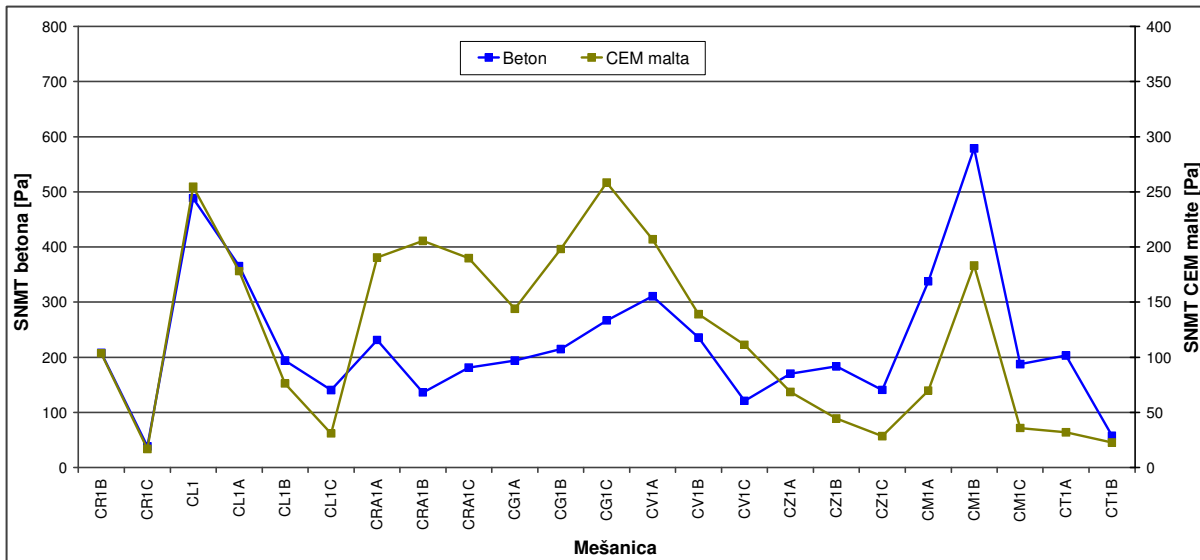


Slika 59: Rezultati vrednosti razleza običajnega betona in malt CEM, čas 0 min.

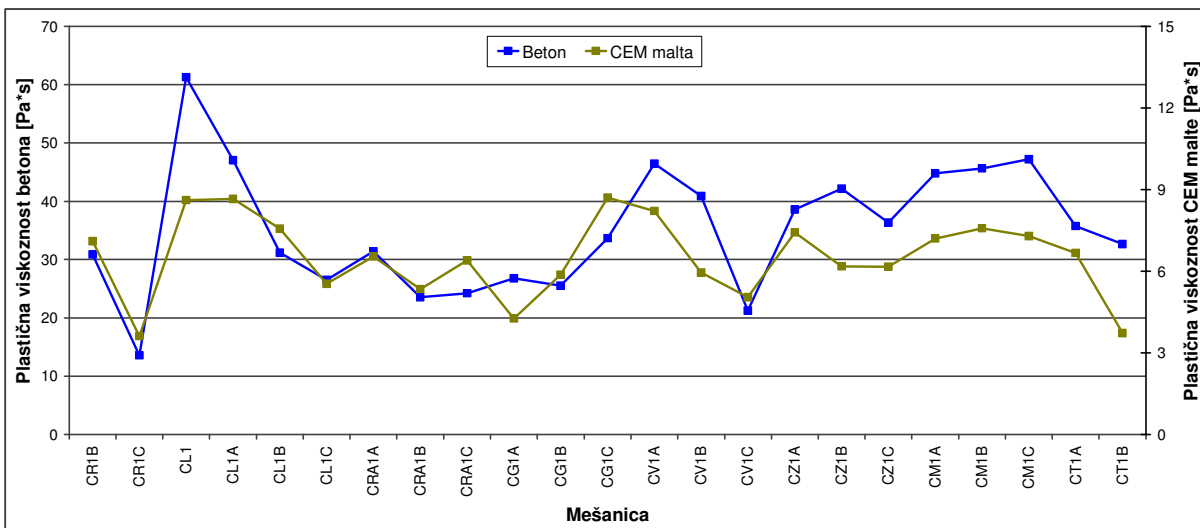
Figure 59: Results of flow values for normal concretes and its CEM mortars, time 0 min.

Glede na to, da se pričakuje dobra korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in preiskavami obdelavnosti, pričakujemo podobno ujemanje tudi pri strižnih napetostih na meji tečenja, izmerjenih za beton, in njegovo malto CEM. Rezultati meritev so prikazani na sliki 60. Podobno kot na sliki 59 tudi tukaj opazimo večjo razliko med meritvami v srednjem delu grafikona, torej pri mešanicah z aerantom in stabilizatorjem. Ugotovimo lahko, da aerant in stabilizator na malto CEM vplivata drugače kot na beton. Vzroki za drugačen vpliv obeh kemijskih dodatkov na malte CEM, v primerjavi z betoni, bodo diskutirani v poglavju 7. Razmerje med  $\tau_0$  betona in malte CEM je približno 3.

Na sliki 61 so predstavljeni rezultati plastičnih viskoznosti betona in malte CEM. Razmerje med rezultati beton/malta CEM se giblje okrog vrednosti 5. Opazimo relativno dobro ujemanje rezultatov za večino obravnavanih mešanic, z občasno večjo razliko pri posamezni mešanici.



Slika 60: Rezultati strižnih napetosti na meji tečenja običajnega betona in malt CEM, čas 0 min.  
 Figure 60: Results of yield stress values for normal concretes and its CEM mortars, time 0 min.



Slika 61: Rezultati plastičnih viskoznosti običajnega betona in malt CEM, čas 0 min.  
 Figure 61: Results of plastic viscosity values for normal concretes and its CEM mortars, time 0 min.

Preglednica 71: Razlezi betona in malte CEM, ter razlika do pričakovanega razleza malte CEM.

Table 71: Flow spread values of concretes and CEM mortars, and difference to expected flow of CEM.

Mešanica	Razlez betona [mm]	Razlez CEM [mm]	Pričakovan razlez CEM [mm], enačba (34)	Razlika [mm]
CR1	410	200	205	5
CR1A	500	220	250	30
CR1B	540	270	270	0
CR1C	670	320	335	15
CL1	430	200	215	15
CL1A	470	215	235	20
CL1B	510	275	255	-20
CL1C	545	315	273	-43
CRA1A	400	220	200	-20
CRA1B	580	230	290	60
CRA1C	520	220	260	40
CG1A	530	225	265	40
CG1B	500	210	250	40
CG1C	475	180	238	58
CV1A	480	220	240	20
CV1B	485	230	243	13
CV1C	545	260	273	13
CZ1A	535	270	268	-3
CZ1B	525	295	263	-33
CZ1C	545	300	273	-28
CM1A	465	265	233	-33
CM1B	430	215	215	0
CM1C	490	285	245	-40
CT1A	485	295	243	-53
CT1B	370	210	185	-25
CT1C	635	325	318	-8

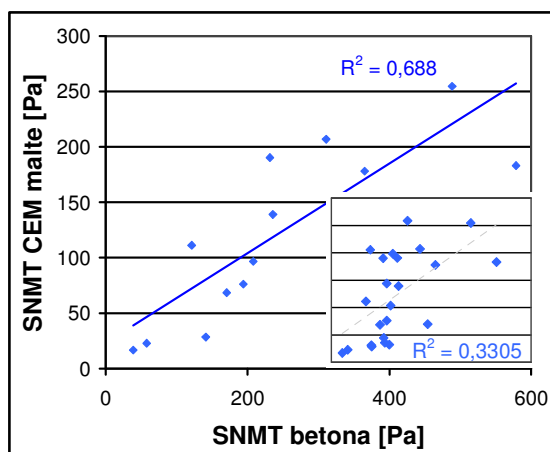
V preglednici 71 so podane vrednosti razlezov za beton in njegovo malto CEM ter pričakovan razlez malte CEM (po enačbi (34)) in razlika med izmerjeno in pričakovano vrednostjo razleza malte CEM. Tudi iz rezultatov v preglednici 71 vidimo, da so razlike največje pri sestavah, ki vsebujejo aerant in gostilec. Velikost razlike smo izbrali kot merilo za vrednotenje metode CEM. Postopoma smo izločali meritve glede na izbrano velikost razlike, od največje razlike (vse meritve, pri katerih je razlika večja od 40 mm) proti manjšim razlikam (vse meritve, pri katerih je razlika večja od 25 mm). Korelacijo med rezultati preiskav ( $\tau_b$ ,  $\mu$  in razlez) za betone in malte CEM smo vrednotili s pomočjo koeficienta determinacije; rezultati so podani v preglednici 72 ter na slikah 62 in 63. Iz rezultatov analize je

razvidno, da je iz analize smiselno izločiti mešanice, pri katerih je razlika v razlezih večja od 30 mm. Izločanje mešanic z manjšo razliko v razlezih ne izboljša več bistveno rezultata, poleg tega to pomeni izločitev prevelikega števila mešanic. V preglednici 71 so z rumeno barvo označene mešanice, ki so bile odstranjene. Razlika pri teh mešanicah je večja od 30 mm. Na slikah 62 in 63 predstavljamo rezultat korelacije med betonom in malto CEM za strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti po izločitvi mešanic z razliko, večjo od 30 mm. V spodnjem desnem kotu slike so prikazani rezultati analize pred izločitvijo mešanic, a z upoštevanjem mešanic, pri katerih smo opravili vsaj dve meritvi. Tak princip smo uporabili pri vseh analizah.

Preglednica 72: Vpliv izločanja mešanic na korelacijo med betonom in malto CEM.

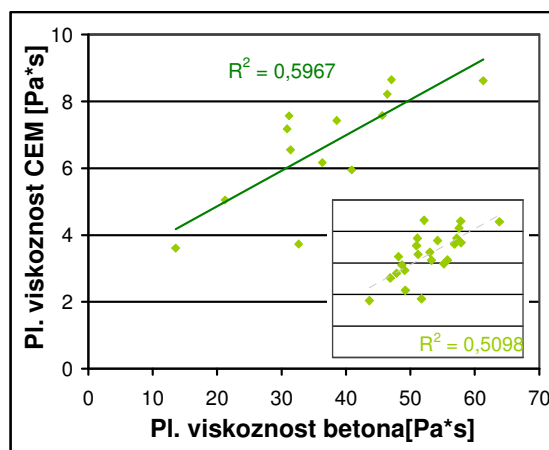
Table 72: Effect of eliminating mixtures on correlation of concrete and CEM mortar.

Razlika - pristop	R <sup>2</sup>		
	$\tau_0$	$\mu$	razlez
Vse mešanice	0,38	0,60	0,46
Vsaj dva rezultata	0,33	0,51	0,42
>40 mm	0,44	0,56	0,59
>35 mm	0,60	0,58	0,78
>30 mm	0,69	0,60	0,85
>25 mm	0,69	0,60	0,88



Slika 62: Korelacija strižnih napetosti na meji tečenja betona in malte CEM, pred in po izločitvi mešanic.

Figure 62: Correlation of yield stress of concrete and CEM mortar, before and after elimination of mixtures.



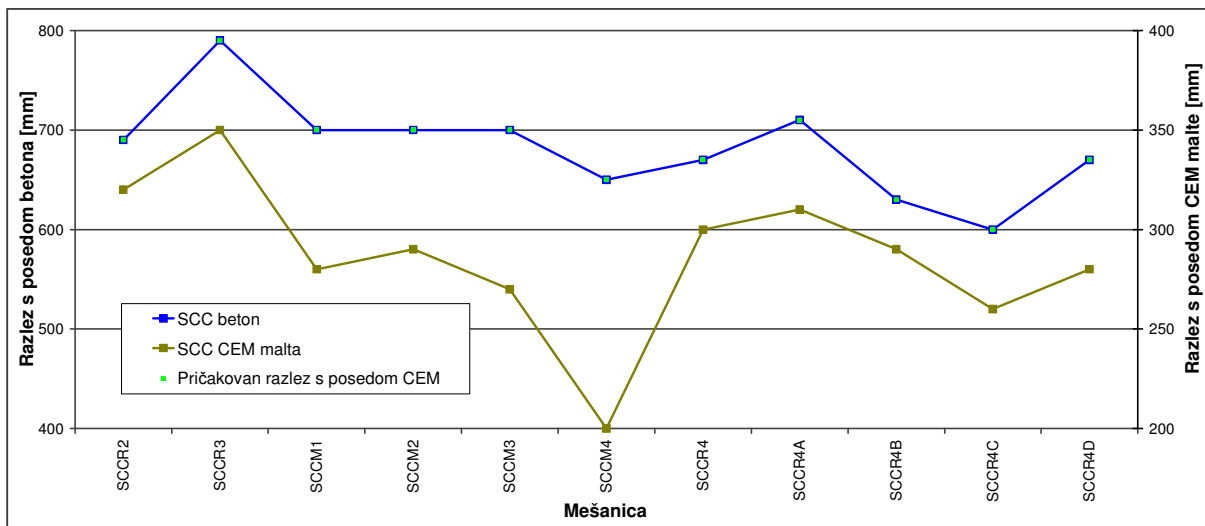
Slika 63: Korelacija plastičnih viskoznosti betona in malte CEM, pred in po izločitvi mešanic.

Figure 63: Correlation of plastic viscosities of concrete and CEM mortar, before and after elimination of mixtures.

### 6.3.2 Beton SCC in malta SCC CEM

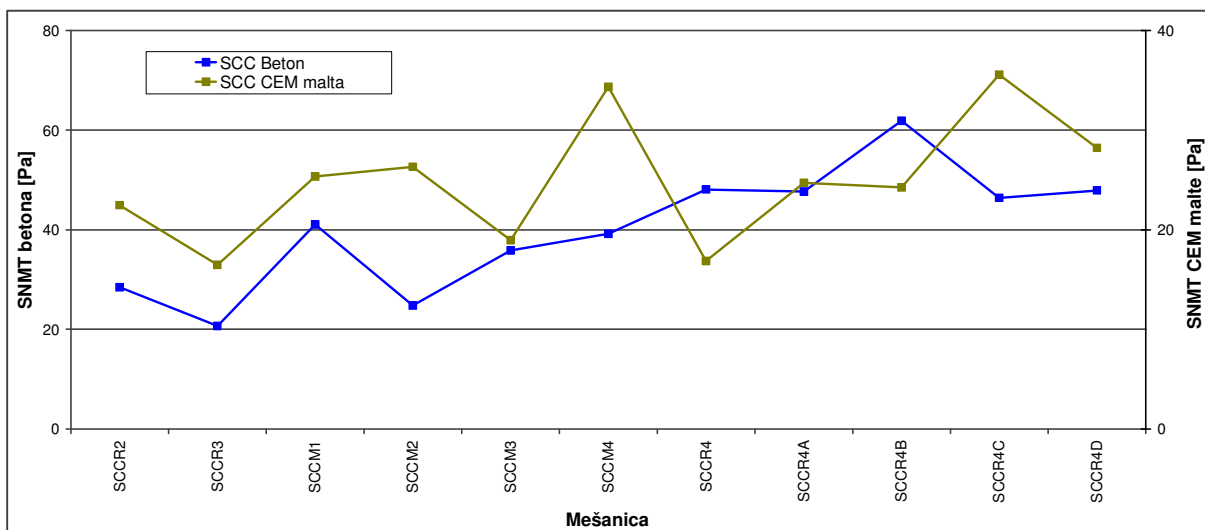
Tudi za betone SCC smo želeli ovrednotiti učinkovitost pristopa z napovedovanjem obdelavnosti malt CEM. V primeru mešanic SCC smo metodo pričakovanega razleza prilagodili glede na metode obdelavnosti, ki jih uporabljamo za meritve obdelavnosti mešanic SCC. Za meritev obdelavnosti betona SCC uporabljamo metodo razleza s posedom. Za malte SCC CEM torej izračunamo pričakovan razlez s posedom. Merilna oprema, uporabljena za meritev razleza s posedom malte SCC CEM, je stožec enak stožcu za preizkus razleza malte in ne stožcu za meritev mini razleza s posedom malte. Pričakovan razlez s posedom malte SCC je izračunan enako kot pričakovan razlez malte pri normalnih betonih. V preglednici 73 smo zbrali rezultate za razlez s posedom betonov SCC, njim pripadajočih malt CEM ter izračunan pričakovan razlez s posedom za malte CEM in razliko med izmerjenim in pričakovanim razlezom, na sliki 64 pa podajamo te karakteristike še grafično. Iz rezultatov v preglednici 73 in na sliki 64 lahko vidimo, da so pri mešanicah SCC razlike v obdelavnosti med betoni in maltami CEM večje kot pri običajnih mešanicah. Razlike so v povprečju enake 55 mm, s standardnim odklonom 29 mm. Ta odklon je velik predvsem zaradi mešanice SCCM4, kjer je razlika med razlezi s posesti kar 125 mm. Tudi sicer so največje razlike pri mešanicah, ki vsebujejo stabilizator, SCCM1 do SCCM4. Tudi pri normalnih betonih, ki so vsebovali stabilizator, smo dobili največje razlike med izmerjenim in napovedanim razlezom malt CEM.





Slika 64: Rezultati vrednosti razleza s posedom betona SCC in malt SCC CEM, čas 0 min.

Figure 64: Results of slump flow values for SCC and its SCC CEM mortars, time 0 min.



Slika 65: Rezultati strižnih napetosti na meji tečenja betona SCC in malt SCC CEM, čas 0 min.

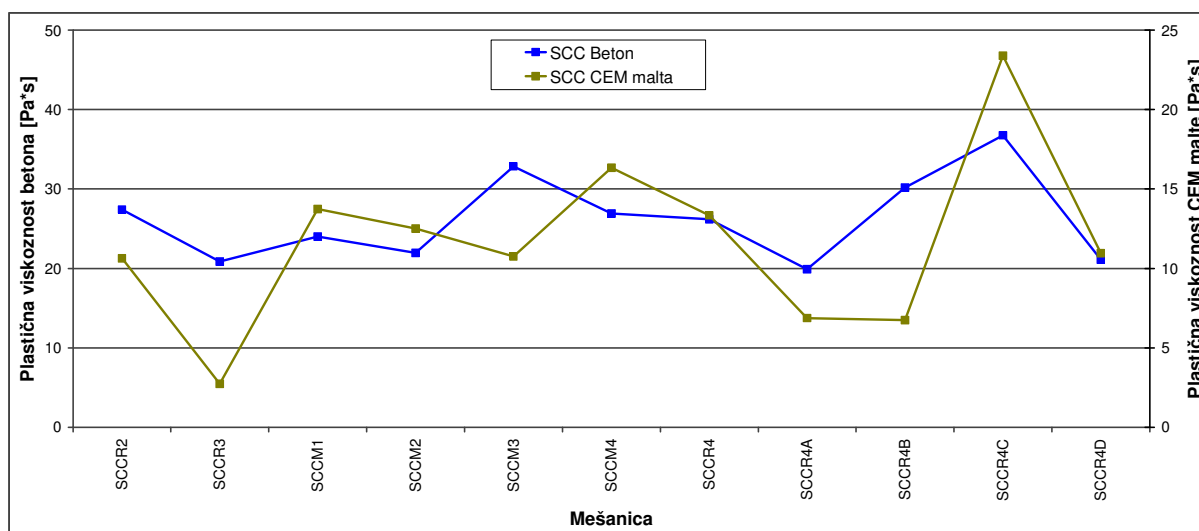
Figure 65: Results of yield stress values for SCC and its SCC CEM mortars, time 0 min.

Preglednica 73: Razlezi s posedom betona SCC in malte SCC CEM, ter razlika do pričakanega razleza s posedom malte SCC CEM.

Table 73: Slump flow values of SCC and SCC CEM mortars, and difference to expected slump flow of SCC CEM.

Mešanica	Razlez s posedom betona [mm]	Razlez s posedom CEM [mm]	Pričakovan razlez s posedom CEM [mm]	Razlika [mm]
SCCR2	690	320	345	25
SCCR3	790	350	395	45
SCCM1	700	280	350	70
SCCM2	700	290	350	60
SCCM3	700	270	350	80
SCCM4	650	200	325	125
SCCR4	670	300	335	35
SCCR4A	710	310	355	45
SCCR4B	630	290	315	25
SCCR4C	600	260	300	40
SCCR4D	670	280	335	55

Tudi korelacija med strižnimi napetostmi na meji tečenja betonov SCC in njim pripadajočih malt CEM (slika 65) se zdi relativno slaba. Podobno lahko ugotovimo tudi za rezultate plastične viskoznosti (slika 66). Razmerje med rezultati meritev na betonu SCC in njemu pripadajoče malte CEM je pri obeh reoloških parametrih približno enako 2 za obravnavane mešanice SCC.

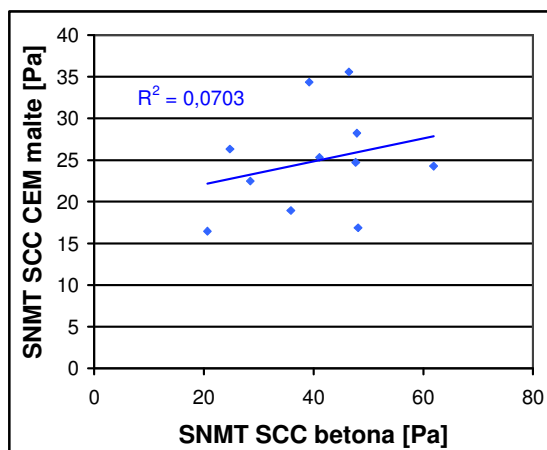


Slika 66: Rezultati plastičnih viskoznosti betona SCC in malt SCC CEM, čas 0 min.

Figure 66: Results of plastic viscosity values for SCC concretes and its SCC CEM mortars, time 0 min.

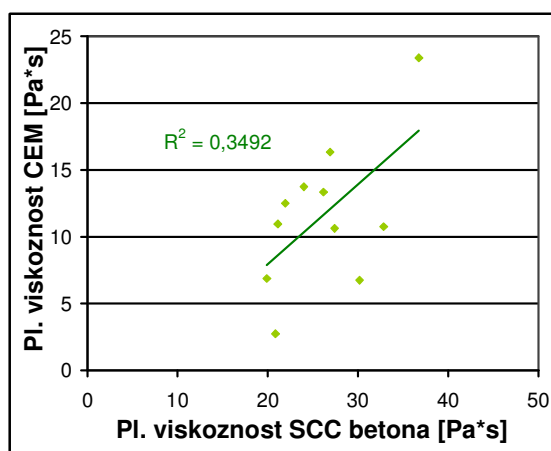
Korelacijo med reološkimi parametri betonov SCC in njim pripadajočih malt CEM smo ocenili s pomočjo koeficienta determinacije. Rezultati analize so podani na slikah 67 in 68. Rezultati na slikah 67 in 68 potrjujejo zgornje ugotovitve, da je korelacija med betoni SCC in njim pripadajočimi maltami

CEM za oba reološka parametra slaba. V tem primeru tudi nismo opravili analize z izločanjem mešanic, kjer je razlika med izmerjenim in pričakovanim razlezom s posedom za malte CEM velika. Na slikah 67 in 68 namreč lahko vidimo, da so rezultati preveč razkropljeni, da bi tak postopek imel želen učinek.



Slika 67: Korelacija strižnih napetosti na meji tečenja betona SCC in malte SCC CEM.

*Figure 67: Correlation of yield stress of SCC and SCC CEM mortar.*



Slika 68: Korelacija plastičnih viskoznosti na meji tečenja betona SCC in malte SCC CEM.

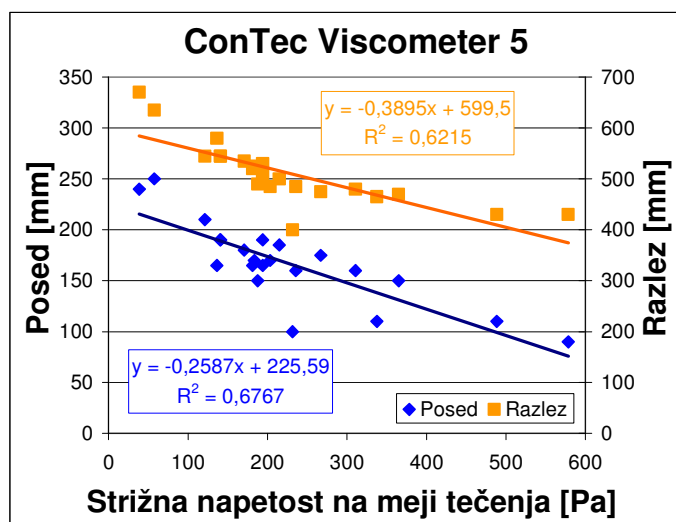
*Figure 68: Correlation of plastic viscosities of SCC and SCC CEM mortar.*

#### 6.4 Primerjava rezultatov reoloških meritev z rezultati meritvev obdelavnosti

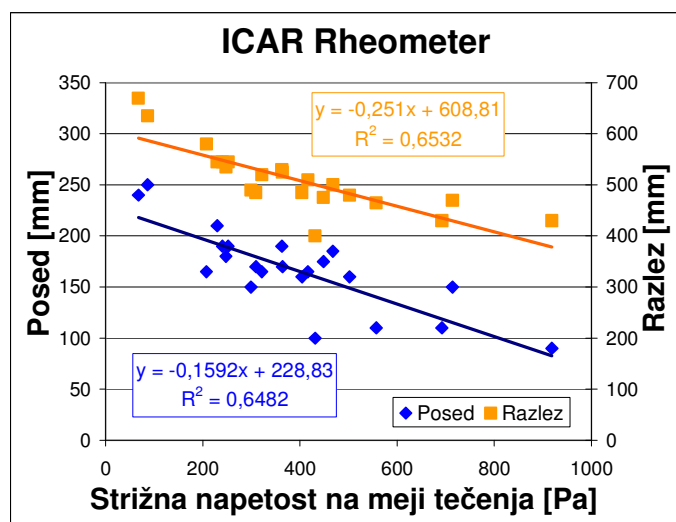
V tem poglavju bomo preverili povezavo med rezultati meritev obdelavnosti in posameznimi reološkimi parametri. Primerjavo bomo opravili posebej za betone in posebej za malte ter posebej za vsak reometer. Korelacijo med parametrom  $\mu$  in izbrano metodo obdelavnosti bomo v tem poglavju prikazali na slikah, a je ne bomo dodatno diskutirali. Pričakuje se, da je korelacija slaba, kar je tudi razvidno iz slik v tem poglavju. Izbrali smo linearni model za opis korelacije med reološkimi parametri in meritvami obdelavnosti, saj so tak pristop uporabili tudi v literaturi (Wallevik, 2006).

### 6.4.1 Običajni betoni

Na običajnih betonih smo izvajali meritve poseda in razleza. Meritve poseda so pogosto primerjane z reološkimi parametri, medtem ko to ne velja za meritve razleza. Rezultate predstavljamo v obliki grafikonov na slikah 69 do 72. Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in metodami obdelavnosti je dobra za oba reometra in za obe metodi obdelavnosti. Razlike so minimalne. Poleg korelacije, ovrednotene s pomočjo koeficienta determinacije, lahko določimo tudi preproste zveze med strižno napetostjo na meji tečenja in metodami obdelavnosti.

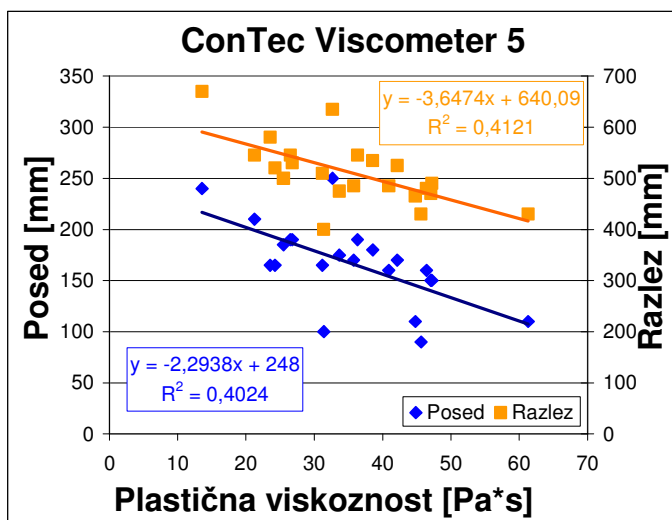


Slika 69: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za običajne betone, ConTec.  
Figure 69: Correlation between yield stress and workability for normal concretes, ConTec.

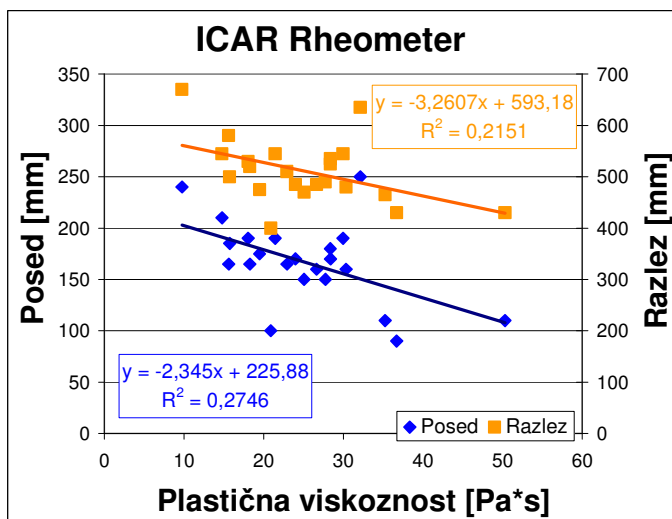


Slika 70: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za običajne betone, ICAR.  
Figure 70: Correlation between yield stress and workability for normal concretes, ICAR.

Korelacija med plastično viskoznostjo in metodami obdelavnosti je slabša. Razlika med metodami obdelavnosti je minimalna. Večja razlika je med reometroma, saj je korelacija rezultatov plastičnih viskoznosti, pridobljenih z ICAR Rheometrom, in metodami obdelavnosti slabša, kot pri reometru ConTec Viscometer 5.



Slika 71: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za običajne betone, ConTec.  
Figure 71: Correlation between plastic viscosity and workability for normal concretes, ConTec.

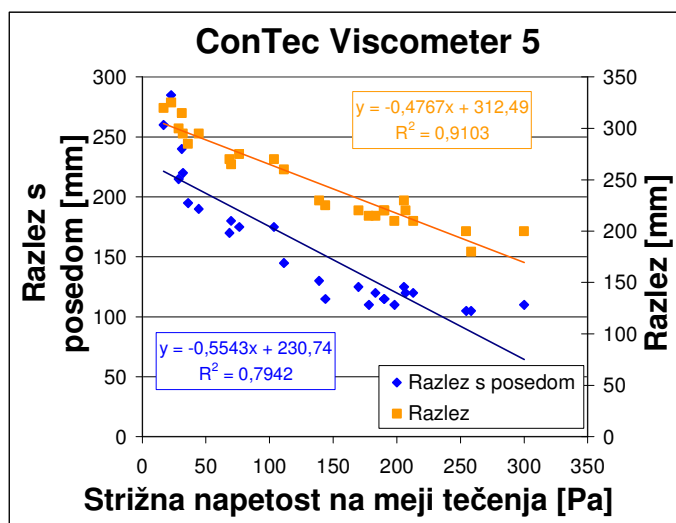


Slika 72: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za običajne betone, ICAR.  
Figure 72: Correlation between plastic viscosity and workability for normal concretes, ICAR.

#### 6.4.2 Običajne malte

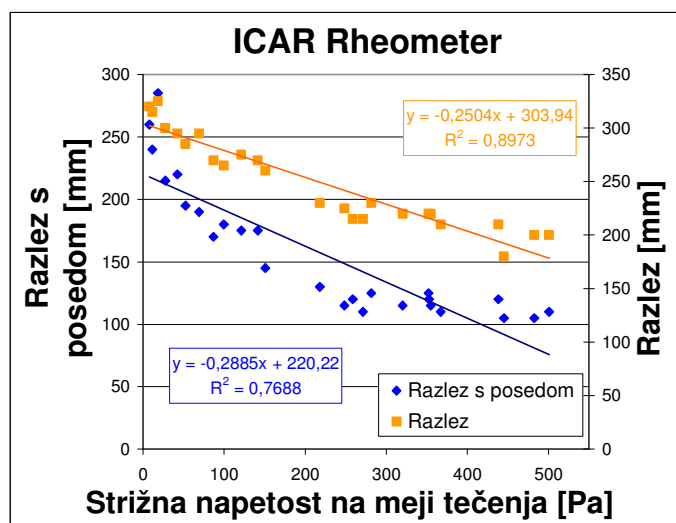
Pri maltah smo merili razlez s posedom (s stožcem za razlez malte) in razlez malte. Korelacija s strižnimi napetostmi na meji tečenja je dobra. Boljša je v primeru razleza kot v primeru razleza s

posedom. V primeru razleza s posedom se zdi, da povezava ni linearna, temveč logaritemska ali potenčna.



Slika 73: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za običajne malte, ConTec.

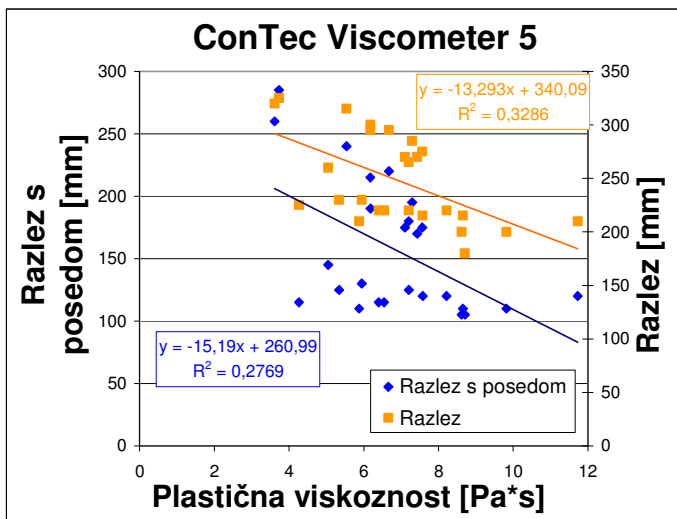
Figure 73: Correlation between yield stress and workability for normal mortars, ConTec.



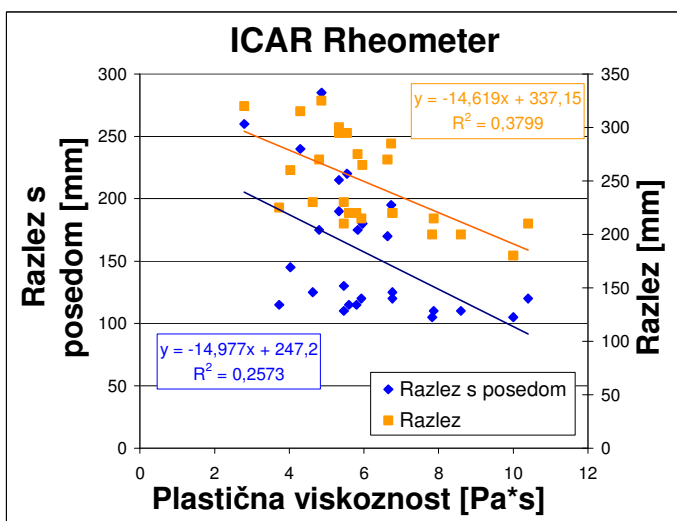
Slika 74: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za običajne malte, ICAR.

Figure 74: Correlation between yield stress and workability for normal mortars, ICAR.

Korelacija s plastičnimi viskoznostmi je slaba in za razliko od betonov podobna pri obeh reometrih. Korelacija je za spoznanje boljša v primeru razleza.



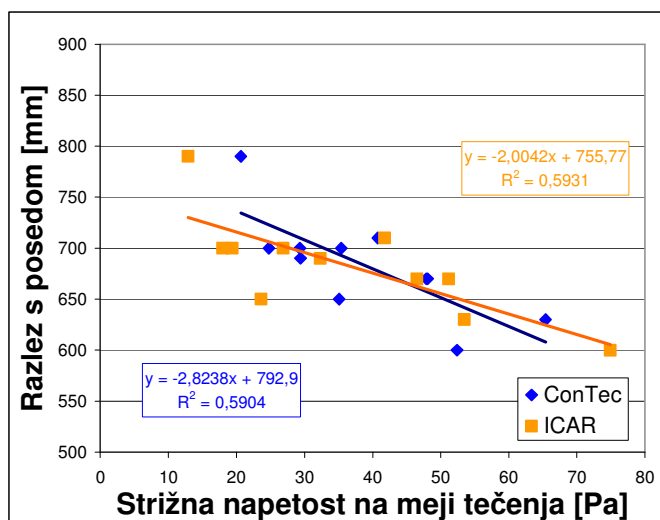
Slika 75: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za običajne malte, ConTec.  
 Figure 75: Correlation between plastic viscosity and workability for normal mortars, ConTec.



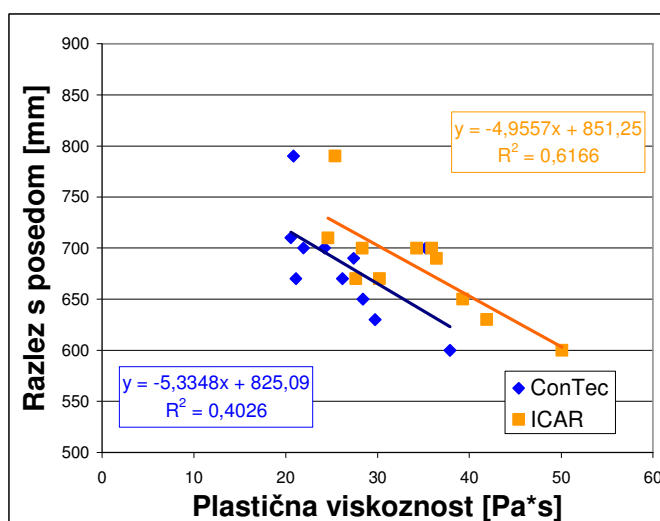
Slika 76: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za običajne malte, ICAR.  
 Figure 76: Correlation between plastic viscosity and workability for normal mortars, ICAR.

### 6.4.3 Beton SCC

V primeru betonov SCC smo izvajali le eno metodo meritev obdelavnosti, in sicer razlez s posedom. Posledično drugače izgledajo tudi grafikoni, saj sta na enem grafikonu prikazana oba reometra in ne dve metodi meritev obdelavnosti. Korelacija  $\tau_0$  in razleza s posedom je dobra, a bi lahko bila boljše. Z analizo večjega števila meritev pričakujemo, da bi bila korelacija še boljše. Korelacija  $\mu$  in razleza s posedom je slabša. Presenetljiv je rezultat v primeru ICAR Rheometra, kjer kaže na enako stopnjo korelacije kot v primeru  $\tau_0$ . Tudi ta rezultat lahko pripišemo majhnemu številu rezultatov.



Slika 77: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za betone SCC.  
Figure 77: Correlation between yield stress and workability for SCC.



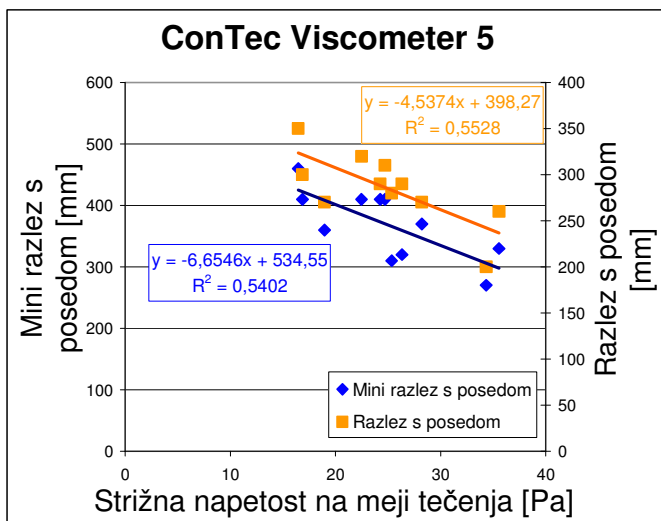
Slika 78: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za betone SCC.  
Figure 78: Correlation between plastic viscosity and workability for SCC.

#### 6.4.4 Malte SCC

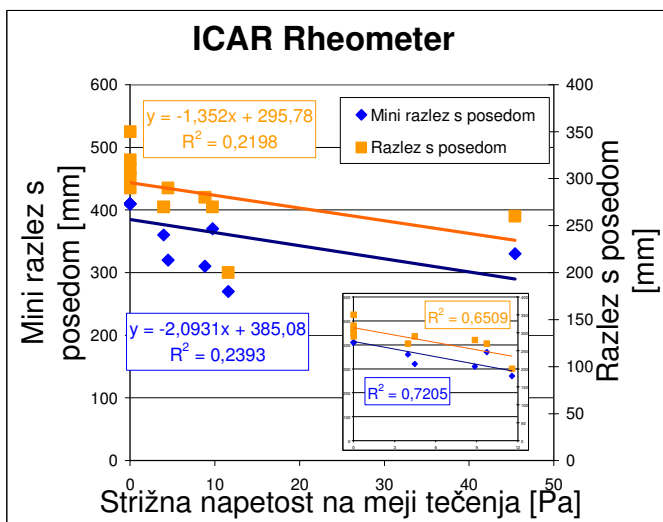
Glede na rezultate in analize, opravljene na maltah SCC CEM do sedaj, ocenjujemo, da korelacija med reološkimi parametri malt SCC CEM in metodami obdelavnosti (razlez s posedom in mini razlez s posedom) ne bo dobra. Še posebej ne za primer meritev strižne napetosti na meji tečenja z ICAR Rheometrom. Opravljena analiza (slike 79 do 82) je našo oceno potrdila. Čeprav je dobljena korelacija za ConTec Viscometer 5 bistveno boljša (okrog 0,5) kot za ICAR Rheometer (okrog 0,2), je še vedno nezadovoljiva. Pri posameznem reometru je korelacija med posameznim reološkim parametrom in razlezom s posedom podobna za obe uporabljeni metodi obdelavnosti. Na sliki 80 (korelacija  $\tau_0$  ICAR Rheometer z razlezom s posedom) opazimo rezultat, ki vidno odstopa. V kolikor ta rezultat izločimo,



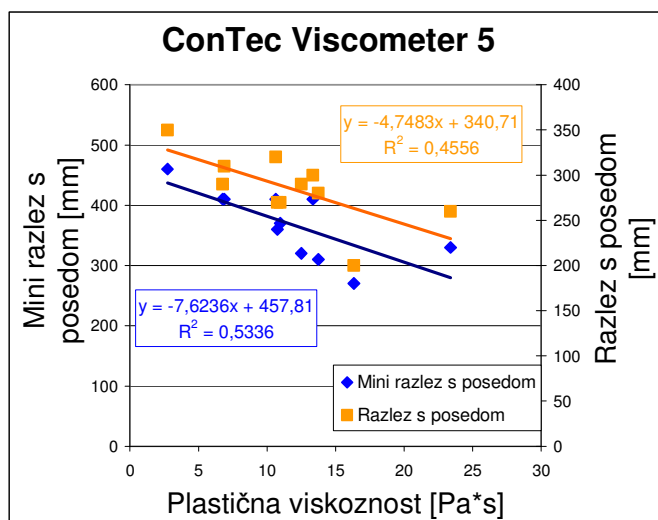
se korelacija s prejšnjih 0,2 dvigne na vrednost približno 0,7. Ta rezultat je presenetljiv, če upoštevamo, da je bilo mnogo vrednosti  $\tau_0$  enako 0. Kljub dobri korelaciji ocenjujemo, da meritve reoloških parametrov malt SCC z uporabljenim merilnim sistemom na ICAR Rheometer še vedno ne dajejo uporabnih rezultatov.



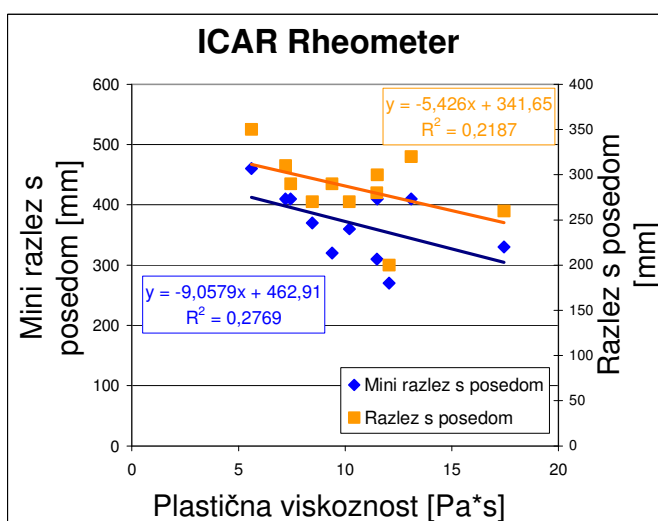
Slika 79: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za malte SCC, ConTec.  
 Figure 79: Correlation between yield stress and workability for SCC mortars, ConTec.



Slika 80: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo za malte SCC, ICAR.  
 Figure 80: Correlation between yield stress and workability for SCC mortars, ICAR.



Slika 81: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za malte SCC, ConTec.  
Figure 81: Correlation between plastic viscosity and workability for SCC mortars, ConTec.



Slika 82: Korelacija med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo za malte SCC, ICAR.  
Figure 82: Correlation between plastic viscosity and workability for SCC mortars, ICAR.

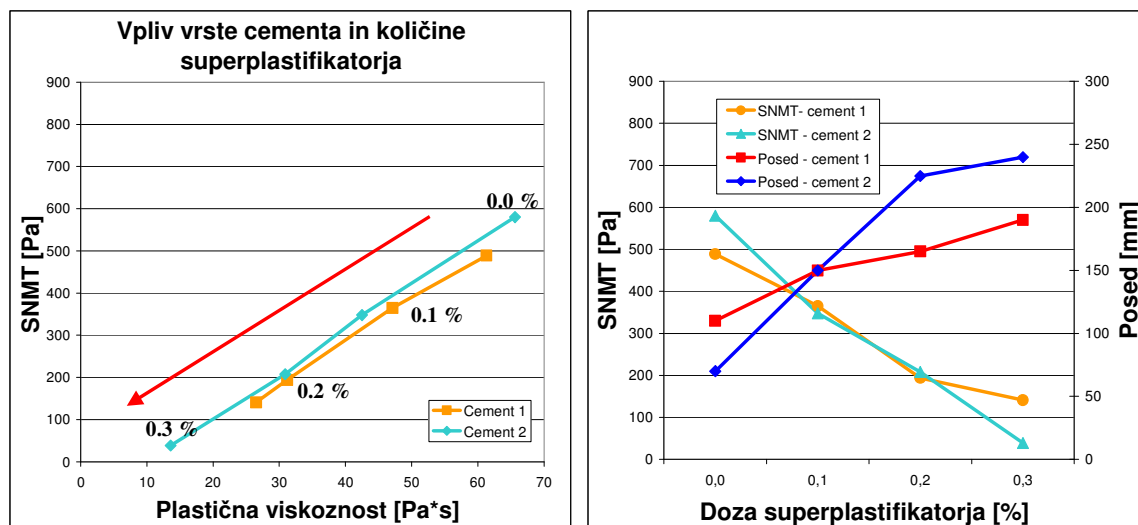
## 6.5 Vpliv količine posameznih sestavin na reologijo svežega betona

V tem poglavju bomo analizirali vpliv spreminjanja posamezne sestavine mešanice na reološke lastnosti svežega betona. Za analizo normalnih betonov bomo uporabili rezultate meritev, opravljenih s ConTec Viscometrom 5, za analizo betonov SCC pa rezultate meritev, opravljenih z ICAR Rheometrom. Za ta korak smo se odločili, da pokažemo uporabno vrednost obeh reometrov, saj lahko z obema enakovredno spremljamo spremembe v svežem betonu: lahko torej uspešno izvajamo temeljne meritve v laboratoriju ali vršimo kontrolo kakovosti na terenu. Poleg tega je korelacija med obema reometroma v primeru betonov dobra. V analizo bomo vključili tudi rezultate izbrane metode obdelavnosti. Kljub temu, da smo uporabili več različnih metod, bomo vedno uporabili le eno, saj smo

predhodno pokazali, da so reološki parametri podobno korelirani z vsemi metodami obdelavnosti. V primeru normalnih betonov bomo uporabili metodo poseda, v primeru betonov SCC pa metodo razleza s posedom. Kot v vseh primerih do sedaj bomo uporabili rezultate meritev za čas 0 min. Rezultati bodo prikazani na dva načina. Prvič v obliki reografa, ki prikazuje relacijo med strižno napetostjo na meji tečenja in plastično viskoznostjo v primeru spreminjanja določene sestavine. Tako lahko na enem diagramu prikažemo spreminjanje obeh reoloških parametrov zaradi izbranih sprememb v sestavi betonske mešanice. Drugič bomo predstavili sovisnost med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo pri spreminjanju izbrane sestavine. Zaradi lažjega vrednotenja vpliva sprememb izbranih sestavin imajo vsi grafikoni enako največjo vrednost in enako razdelbo na koordinatnih oseh.

### 6.5.1 Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja

Analizo smo opravili na dveh skupinah betonskih mešanic, CR1, CR1a, CR1b, CR1c in CL1, CL1a, CL1b, CL1c. Sestava betonskih mešanic v obeh skupinah je bila povsem enaka, razlika je bila le v vrsti cementa. V skupini CR smo uporabili cement CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R (CEM 2), v skupini CL pa cement CEM I 42,5 R (CEM 1). Opazimo lahko, da je imel beton s cementom 1 boljšo obdelavnost in nižjo strižno napetost na meji tečenja, ko v mešanici ni bilo prisotnega superplastifikatorja. Tovrstno obnašanje je v skladu s pričakovanji, saj je bila specifična površina cementa 1 manjša od specifične površine cementa 2 (preglednica 3). Pri bolj grobo mletih cementih namreč pričakujemo nižjo strižno napetost na meji tečenja in večji posed. Z dodajanjem superplastifikatorja in večanjem njegove količine pa postane bolj obdelaven beton s cementom 2, ker je učinek superplastifikatorja večji na cementu 2. Pri največjem deležu superplastifikatorja (0,3%) doseže beton s cementom 2 tudi bistveno nižjo strižno napetost na meji tečenja in plastično viskoznost kot beton s cementom 1.

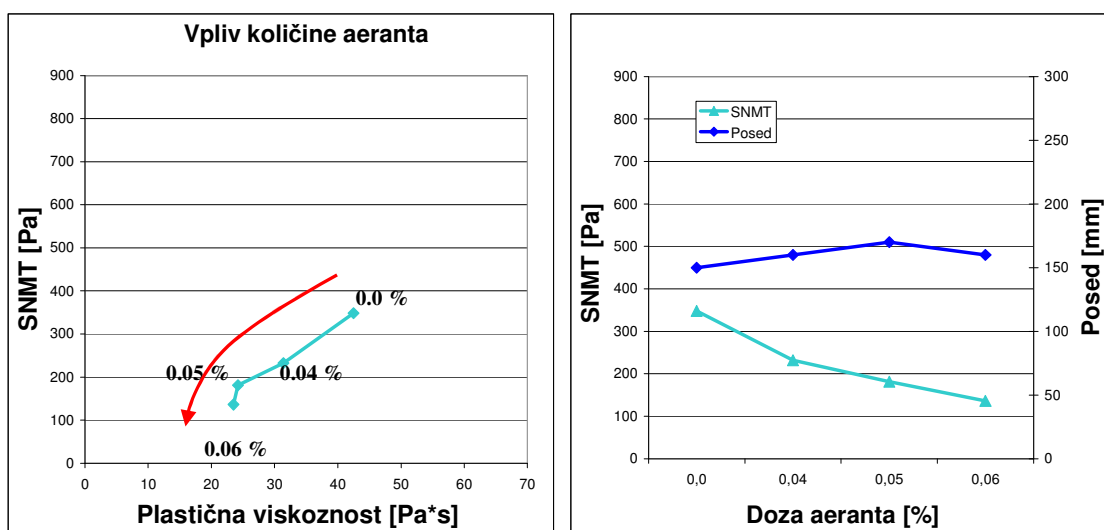


Slika 83: Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti betona.

Figure 83: Effect of type of cement and dosage of superplasticizer on concrete rheological properties.

Dodatek superplastifikatorja in večanje njegovega deleža bistveno vpliva na oba reološka parametra – bistveno se znižata tako strižna napetost na meji tečenja kot plastična viskoznost. To ni v skladu z rezultati analiz drugih raziskovalcev, saj smo v poglavju 4.4.4 navedli primer iz literature (Wallevik, 2009b), iz katerega sledi, da superplastifikator bistveno vpliva na strižno napetost na meji tečenja, plastična viskoznost pa se pomembno ne spremeni.

### 6.5.2 Vpliv količine aeranta



Slika 84: Vpliv količine aeranta na reološke lastnosti betona.

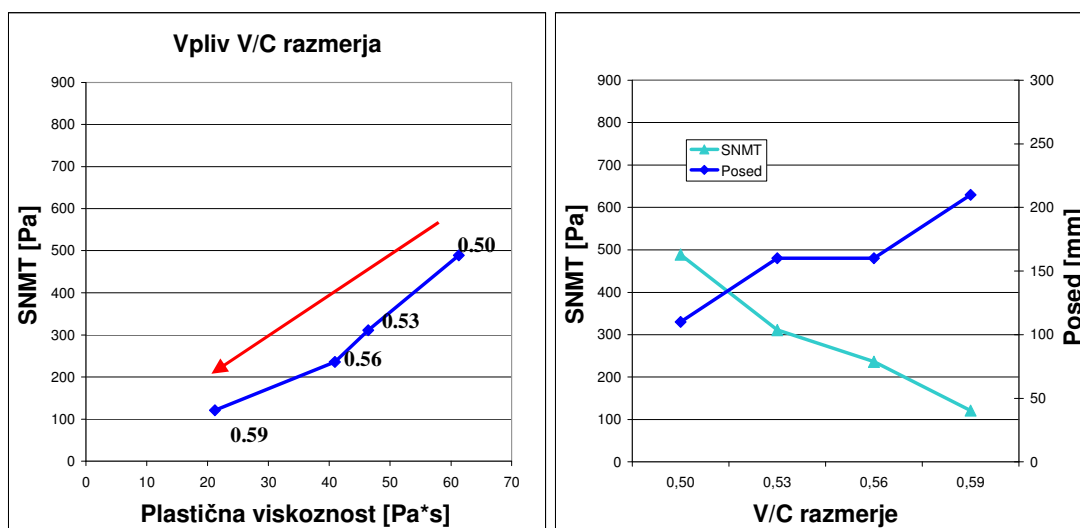
Figure 84: Effect of dosage of air entrainer on rheological properties of concrete.

Vpliv količine aeranta smo ugotavljali na skupini betonov z oznakami CRA1a, CRA1b in CRA1c. Izhodiščna mešanica brez aeranta je bila mešanica z oznako CR1a. Dodatek aeranta in posledično oblikovanje zračnih mehurčkov je imelo vpliv tako na strižno napetost na meji tečenja kot na plastično viskoznost, vendar je učinek do deleža aeranta enakega 0,05% nekoliko večji v primeru plastične viskoznosti (slika 84). Tako obnašanje je značilno za betone z veliko količino finih delcev (Wallevik, 2009b). V našem primeru gre za betone z veliko količino finih delcev, saj je že delež fine frakcije velik (22% frakcije 0/2 in 33% frakcije 0/4), poleg tega pa fina frakcija vsebuje velik delež praškastih delcev (14% frakcija 0/2 in 13% frakcija 0/4). S povečanjem količine aeranta z 0,05% na 0,06% pa se plastična viskoznost le zanemarljivo zmanjša (vsebnost zraka je pri teh dveh dozacijah enaka 5,6 % in 5,9 %, pri mešanici z 0,04 % aeranta pa je količina zraka enaka 4,1 %), enako kot pri predhodnem povečanju količine aeranta (z 0,04 % na 0,05 %) pa se zmanjša strižna napetost na meji tečenja. Tudi ta pojav je povsem pričakovan, saj se pri vsebnostih zraka v betonu, večjih od 5 %, spreminja le še  $\tau_0$  (Tattersall in Banfill, 1983). Z večanjem deleža aeranta do 0,05 % se večja tudi posed betona (slika 84), kar je v skladu s pričakovanji. Povečanje deleža aeranta z 0,05 % na 0,06 % pa na obdelavnost betona, izmerjeno s posedom, ne vpliva več, saj ostane posed skoraj nespremenjen. V tem primeru je

torej obnašanje pri posedu podobno tistemu, ki smo ga opazili pri plastični viskoznosti. Pričakovali bi, da se pri pomanjšanju vrednosti parametra  $\tau_0$  poveča vrednost poseada. Temu v primeru betona z aerantom ni tako, saj zračni mehurčki, povzročeni s strani aeranta, nudijo dodatno notranjo oporo betonu. Posledično se ta ne posede toliko, kot bi lahko sklepali na podlagi reoloških parametrov.

### 6.5.3 Vpliv vodocementnega razmerja

Vpliv vodocementnega razmerja smo ugotavljali na skupini betonov z oznakami CR1, CV1a, CV1b in CV1c. Količina cementa v mešaninah je bila konstantna, povečevali pa smo vsebnost vode. V skladu s pričakovanji sta se z večanjem količine vode in s tem vodocementnega razmerja manjšala oba reološka parametra,  $\tau_0$  in  $\mu$  (slika 85), in to bistveno. Sovisnost med  $\tau_0$  in  $\mu$  na reografu se približuje izhodišču koordinatnega sistema reografa, ko se vodocementno razmerje postopoma veča z 0,5 na 0,59. Tudi posed se z večanjem deleža vode v splošnem veča, kar je vsekakor v skladu s pričakovanji (Wallevik, 2009b). Bolj zanimiva je ugotovitev, da se s povečanjem vodocementnega razmerja z 0,53 na 0,56 posed ni spremenil, čeprav se je strižna napetost na meji tečenja zmanjšala s 310 na 240 Pa. Tovrstno obnašanje bi lahko bilo povezano z majhno spremembo plastične viskoznosti (zmanjšanje s 45 Pa·s na 40 Pa·s), ki je bistveno odstopala od zmanjšanja te karakteristike med vodocementnima razmerjema 0,50 in 0,53 (20 Pa·s) ali 0,56 in 0,59 (20 Pa·s).



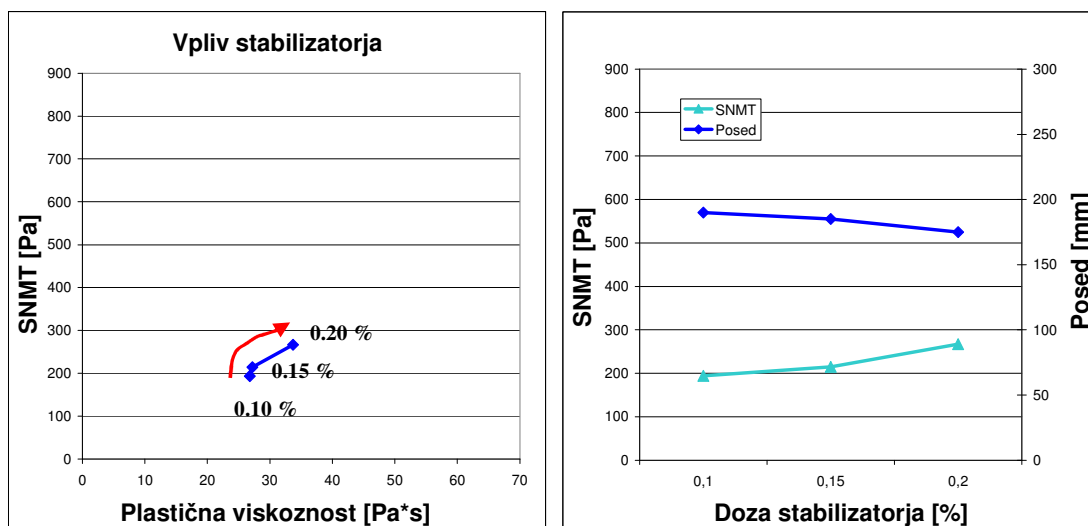
Slika 85: Vpliv vodocementnega razmerja na reološke lastnosti betona.

Figure 85: Effect of water to cement ratio on rheological properties of concrete.

### 6.5.4 Vpliv stabilizatorja

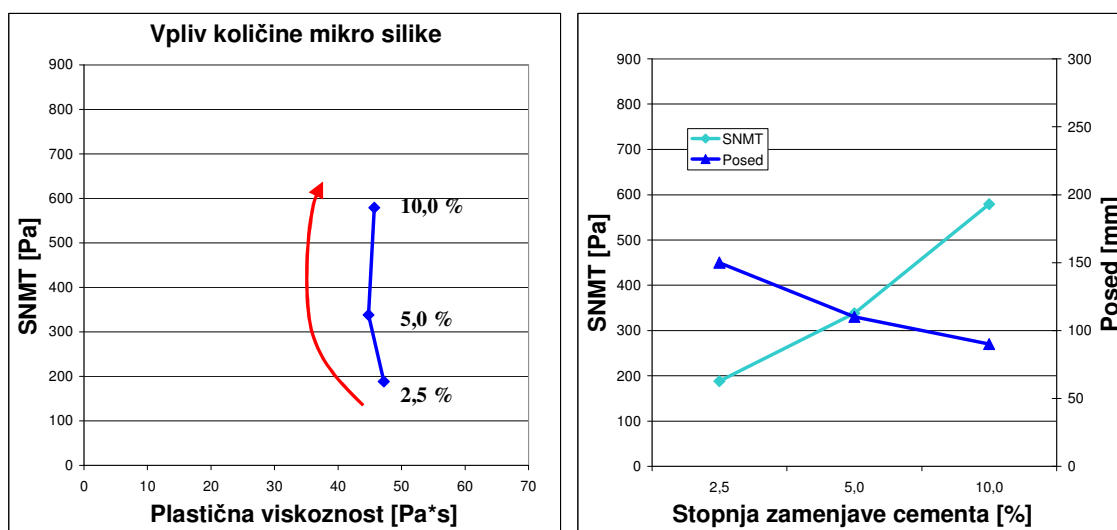
Vpliv stabilizatorja z oznako ST1 (lastnosti so navedene v preglednici 6) smo ugotavljali na skupini betonov z oznakami CG1a, CG1b in CG1c. Rezultati preiskav so prikazani na sliki 86. Kot je razvidno

z rezultatov na sliki 86, je uporabljen stabilizator najbolj vplival na plastično viskoznost, ki pa jo je povečal za okrog 10 Pa·s šele pri povečanju deleža z 0,15 na 0,20%. Ponavadi je razlog, zakaj betonski mešanici dodamo stabilizator, zmanjšanje mobilnosti vode in s tem povečanje odpornosti betona proti segregaciji. Z zmanjšanjem mobilnosti vode pa se seveda poveča viskoznost. Parameter  $\tau_0$  se ni bistveno povečal, vrednost poseda pa je malenkostno padla, kar je pričakovano, saj sta  $\tau_0$  in posed povezana na tak način.



Slika 86: Vpliv količine stabilizatorja na reološke lastnosti betona.  
Figure 86: Effect of dosage of stabilizer on rheological properties of concrete.

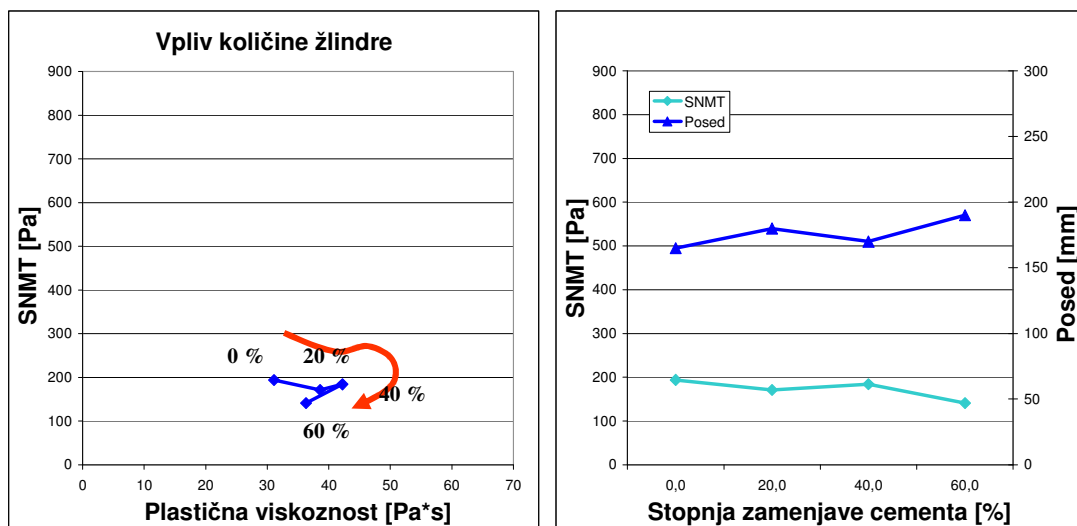
### 6.5.5 Vpliv zamenjave cementa z mikro siliko



Slika 87: Vpliv stopnje zamenjave cementa z mikro siliko na reološke lastnosti betona.  
Figure 87: Effect of rate of substitution of cement with silica fume on rheological properties of concrete.

Vpliv zamenjave dela cementa CEM I 42.5 R z mikro siliko smo ugotavljali na skupini betonov CM1a, CM1b in CM1c. Referenčna mešanica brez mikro silike je CL1c. Mikro silika v našem primeru ni zmanjšala viskoznosti betona pri manjših stopnjah zamenjave, kot to poroča (Wallevik, 2009b), ampak jo je povečala s 25 Pa·s pri CL1c na 45 Pa·s pri CM1c (2,5% zamenjava). To lahko razložimo tudi s časovnim zamikom med meritvami na referenčni mešanici in ostalimi mešanicami. V tem času so se lahko zamenjale nekatere karakteristike sestavin betona, npr. finega agregata, cementa itd., ki bi lahko vplivale na lastnosti sveže mešanice. Z nadaljnjim večanjem deleža zamenjave cementa z mikro siliko, v območju zamenjave med 2,5% in 10%, ki smo ga analizirali, ni bilo spremembe v plastični viskoznosti betona. Z večanjem deleža zamenjave cementa z mikro siliko pa se je večala strižna napetost na meji tečenja, pri 2,5% zamenjavi le za spoznanje (s 140 na 190 Pa), z večanjem deleža zamenjave pa izrazito (340 Pa pri 5% in 580 Pa pri 10% zamenjavi). Ker je mikro silika velik porabnik vode v mešanici, je naraščanje vrednosti strižne napetosti na meji tečenja z naraščanjem deleža mikro silike logično. Po drugi strani pa kroglasta oblika delcev mikro silike očitno kompenzira povečanje viskoznosti zaradi porabe vode, a le do neke stopnje zamenjave cementa z mikro siliko, ko poraba vode zaradi dodajanja mikro silike postane prevelika.

### 6.5.6 Vpliv zamenjave cementa z žlindro



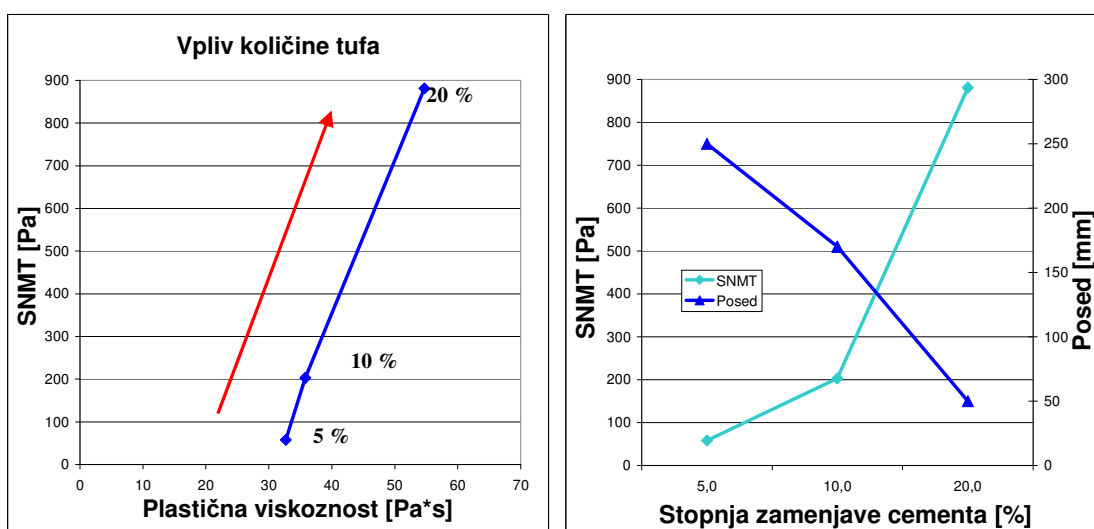
Slika 88: Vpliv stopnje zamenjave cementa z žlindro na reološke lastnosti betona.

Figure 88: Effect of rate of substitution of cement with slag on rheological properties of concrete.

Vpliv zamenjave dela cementa CEM I 42.5 R z mleto granulirano plavžno žlindro (v nadaljevanju žlindra) smo ugotavljali na skupini betonov CZ1a, CZ1b in CZ1c. Referenčna mešanica brez žlindre je CL1b. Ker je žlindra latentno hidravlično vezivo, smo z njo zamenjali večje deleže cementa, kot v primeru mikro silike in tufa, za katerega so podani rezultati v nadaljevanju. Kljub relativno velikim deležem zamenjave cementa z žlindro (od 20% do 60%), so se pri obravnavi skupini betonov reološke

lastnosti spreminjale v zelo majhnem območju; strižna napetost na meji tečenja med 140 in 190 Pa, plastična viskoznost pa med 30 Pa·s in 40 Pa·s. Žlindra je za spoznanje zmanjšala strižno napetost na meji tečenja in povečala plastično viskoznost. Glede na spremembe, ki smo jih izmerili z uporabo ostalih materialov (razen stabilizatorja), so spremembe zaradi zamenjave cementa z žlindro relativno majhne, lahko bi rekli zanemarljive. To potrjujejo tudi rezultati poseda, ki se gibljejo v območju od 165 do 190 mm za celotno obravnavano skupino betonov.

### 6.5.7 Vpliv zamenjave cementa s tufom



Slika 89: Vpliv stopnje zamenjave cementa s tufom na reološke lastnosti betona.

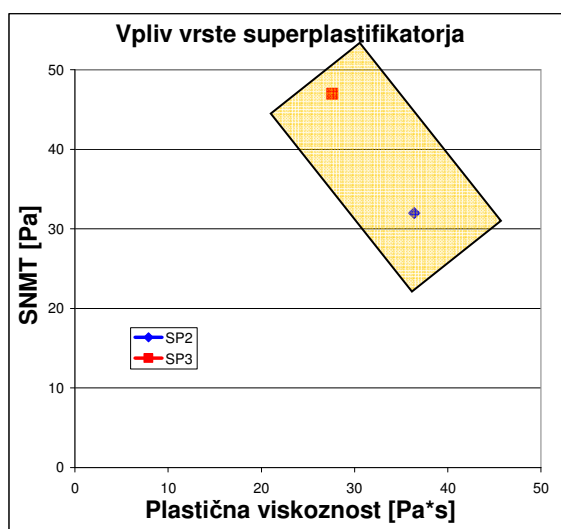
Figure 89: Effect of rate of substitution of cement with tuff on rheological properties of concrete.

Za meritve s tufom smo morali dvakratno povečati količino superplastifikatorja v mešanicah, da so bile le-te sploh obdelavne, saj je uporabljen tuf velik porabnik vode. Vpliv zamenjave dela cementa CEM I 42.5 R s tufom smo zato ugotavljali na skupini betonov CT1a, CT1b in CT1c, brez referenčne mešanice (mešanica, ki ni vsebovala tufa). Rezultati na reografu (slika 89) kažejo, da je zamenjava cementa s tufom v območju od 5 do 20% bistveno bolj vplivala na povečanje strižne napetosti na meji tečenja kot pa na povečanje plastične viskoznosti. Povečanje deleža tufa v betonu s 5 na 10% v bistvu ni imelo pomembnega vpliva na plastično viskoznost, strižna napetost na meji tečenja pa se je povečala za 2,5-krat (s 60 na 200 Pa). Nadaljnje povečanje deleža tufa (na 20%) pa je povečalo plastično viskoznost s 35 na 55 Pa·s, strižna napetost na meji tečenja pa z 200 na 880 Pa, to je za 3,4-krat. Ti vplivi so se seveda odrazili tudi na obdelavnosti, saj se je posed zmanjšal z 250 mm pri 5% zamenjavi, na 170 mm pri 10% in 50 mm pri 20% zamenjavi cementa s tufom.



### 6.5.8 Vpliv vrste superplastifikatorja

V poglavjih od 6.5.1 do 6.5.7 smo analizirali vpliv spreminjanja posamezne sestavine betona na reološke lastnosti normalnih betonov. V tem in naslednjem poglavju (6.5.8 in 6.5.9) pa bomo opravili analize na betonih SCC. Naj še enkrat povem, da smo pri teh analizah uporabili rezultate meritev z reometrom ICAR Rheometer. Zaradi drugačnega območja, v katerem se nahajajo reološki parametri betonov SCC, smo spremenili tudi največje vrednosti in razdelbe na koordinatnih oseh diagramov. Za primerjavo vpliva vrste uporabljenega superplastifikatorja smo načrtovali mešanici z enako obdelavnostjo. Razlez s posedom za mešanico s SP2 je bil 690 mm (beton SCCR2), za mešanico s SP3 (beton SCCR4) pa 670 mm. Da smo to dosegli, je bilo potrebno dodati precej večjo količino superplastifikatorja SP3. Dozacija SP2 je bila 0.7 %, dozacija SP3 pa 1.15 %. Izkazalo se je, da imata mešanici precej različne reološke lastnosti, kljub enaki obdelavnosti. Uporaba izbranih superplastifikatorjev, ki omogočata doseganje ustrezne obdelavnosti in stabilnosti pri zelo različnih reoloških lastnostih, je lep primer uporabe želenega območja obdelavnosti (workability box, ki je na sliki 90 označen z osenčenim pravokotnikom). V območju zelene obdelavnosti se nahajajo betonske mešanice z ustrezno sposobnostjo tečenja in stabilnostjo za določen namen uporabe (Wallevik, 2009b). Stabilnost dosežemo z zadosti veliko viskoznostjo ali zadosti veliko strižno napetostjo na meji tečenja. Primer želenega območja obdelavnosti betonov SCC z razlezom okrog 680 mm je prikazan na sliki 90, kjer ima mešanica SCCR2 strižno napetost na meji tečenja 32 Pa in plastično viskoznost 36 Pa·s, mešanica SCCR4 pa strižno napetost na meji tečenja 47 Pa in plastično viskoznost 28 Pa·s.

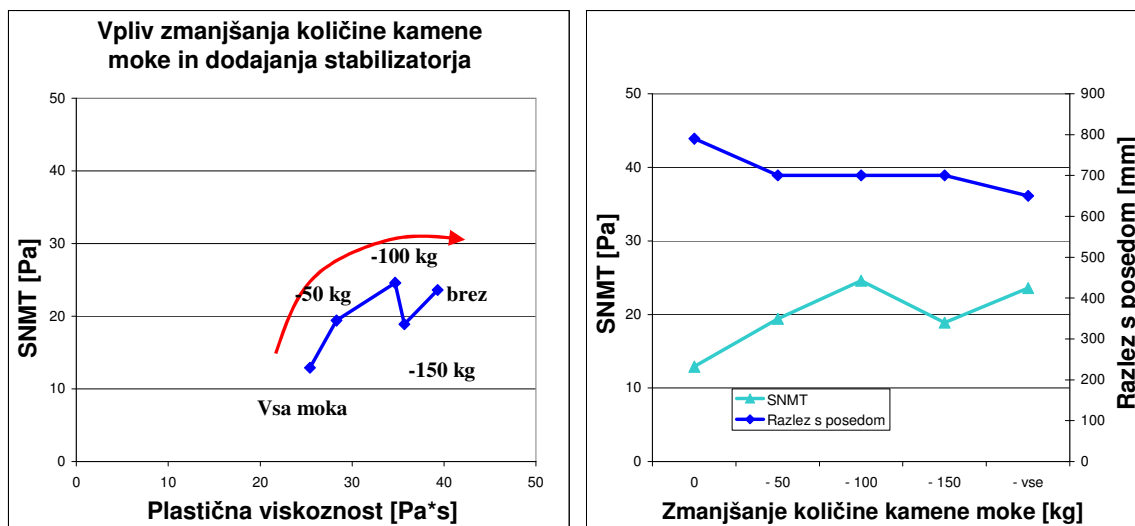


Slika 90: Vpliv vodocementnega razmerja na reološke lastnosti betona.

Figure 90: Effect of water to cement ratio on rheological properties of concrete.

### 6.5.9 Vpliv zmanjšanja količine kamene moke in povečanja količine stabilizatorja

Na skupini betonov SCC, SCCR3 in SCCM1 do SCCM4, smo analizirali vpliv manjšanja deleža apnenčeve moke in istočasnega večanja deleža stabilizatorja na reološke lastnosti betonov SCC, pri približno konstantni obdelavnosti teh betonov. Apnenčeva moka oblikuje, skupaj s cementom, dovolj debelo plast paste med agregatnimi zrn, ki omogoča neovirano gibanje večjih zrn agregata. Poleg tega zagotavlja tudi ustrezno stabilnost betona. Manjše količine kamene moke smo v korakih nadomestili z uporabo stabilizatorja ST2. Podobno kot v primeru dodajanja stabilizatorja ST1 se tudi pri uporabi stabilizatorja ST2 povečuje predvsem plastična viskoznost betona. Parameter  $\tau_0$  rahlo narašča, najbolj na začetku (slika 91), saj je bila količina povečanja stabilizatorja s prve mešanice na tisto z odvzemom 50 kg moke dvakrat večja, kot je bila v naslednjih korakih. Skladno s povečanjem parametra  $\tau_0$  se je zmanjšala vrednost razleza s posedom. Manj kot je imela mešanica kamene moke, večjo segregacijo smo opazili v posodi reometra, kljub dodatku stabilizatorja. Pojavilo se je predvsem premikanje večjih zrn agregata proti obodu posode. V posodi reometra je beton izpostavljen večjim hitrostim. Med preskusom razleza s posedom segregacija ni bila opazna. Z uporabo stabilizatorja smo torej uspeli mešanice obdržati dovolj stabilne pri strižnih hitrostih, ki pripadajo razlezu vzorca betona zaradi delovanja lastne teže. Kljub temu so take mešanice uporabne z omejitvami, saj so pri vgrajevanju lahko izpostavljene večjim strižnim hitrostim.



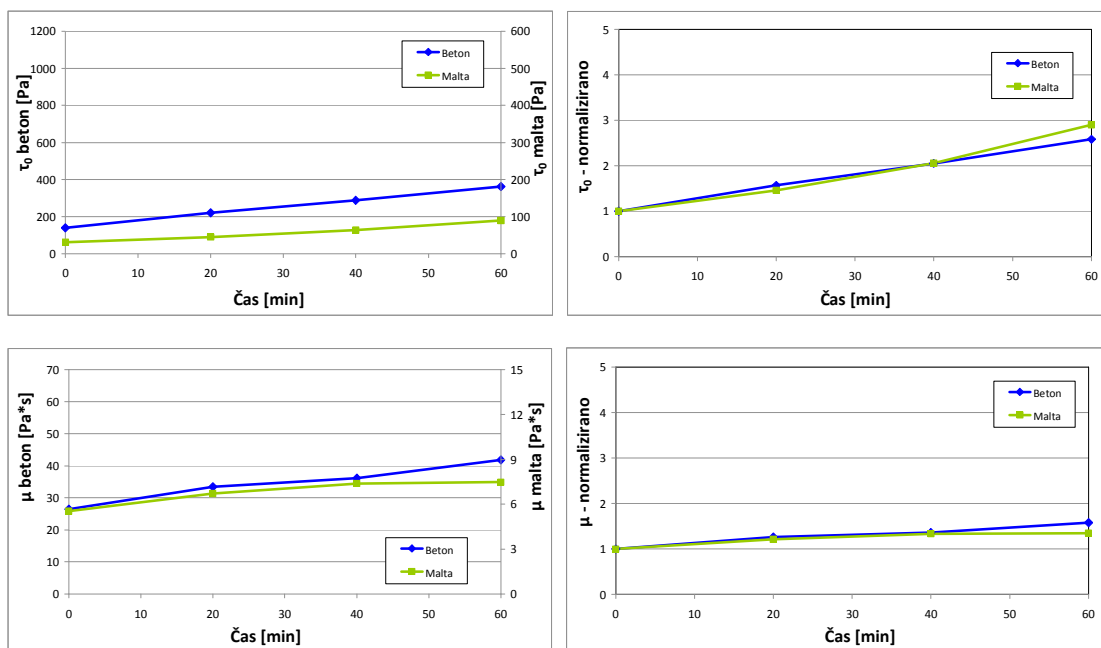
Slika 91: Vpliv vodocementnega razmerja na reološke lastnosti betona.

Figure 91: Effect of water to cement ratio on rheological properties of concrete.

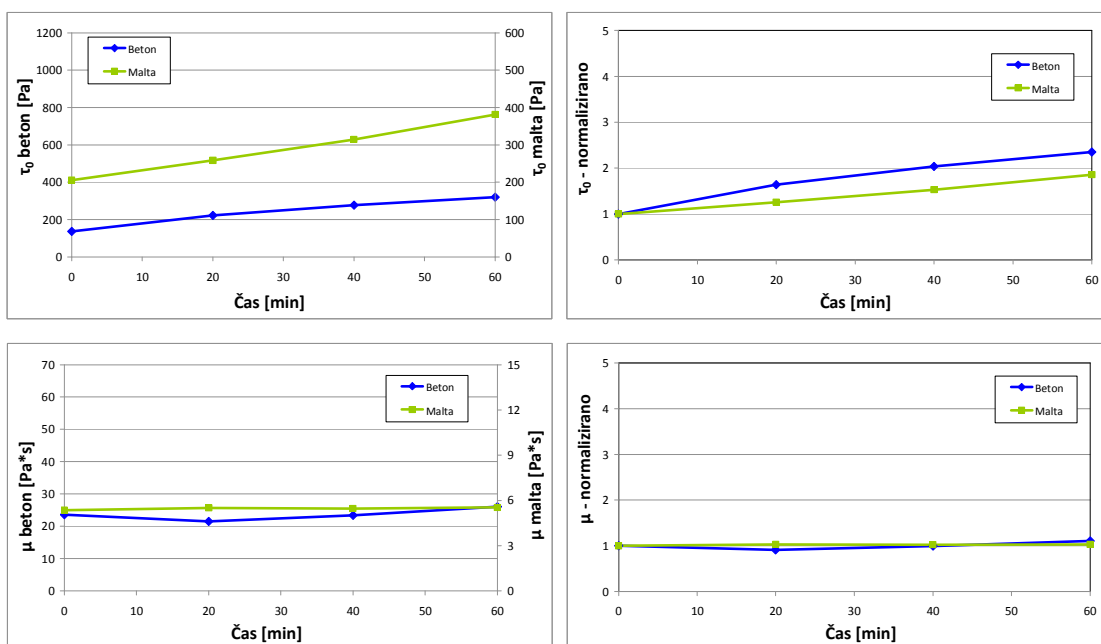
## 6.6 Povezava med časovnim spreminjanjem reoloških parametrov svežih betonov in njim ekvivalentnih malt

Analizo korelacije med časovnim spreminjanjem reoloških parametrov betonov in njim ekvivalentnih malt smo opravili na dva načina, vedno s pomočjo grafikona. Izbrani rezultati, ki prikazujejo ugotovljene zakonitosti, so prikazani v nadaljevanju, na slikah 92 do 99. Za vse ostale preskušane mešanice so enaki grafikon prikazani v prilogi I. Grafikon v prilogi prikazuje enake zakonitosti, kot grafikon v tem poglavju. Ena slika prikazuje graficone za izbrano sestavo betona in njemu pripadajočo malto CEM. Vsaka slika je sestavljena iz 4 grafikonov. V zgornji vrsti je na levi grafikon strižnih napetosti na meji tečenja. Na levi navpični osi grafikona so navedene vrednosti za beton in na desni za malte. Razpon leve in desne osi je v razmerju 2:1. Na desni strani zgornje vrste je grafikon normaliziranih vrednosti strižnih napetosti na meji tečenja. Vsaka vrednost je deljena z izmerjeno vrednostjo v času 0 minut. V spodnji vrsti so na enak način prikazane plastične viskoznosti. Razmerje leve in desne navpične osi na levem grafikonu je približno 5:1 za normalne betone in 2:1 za betone SCC. Ta razmerja so pomembna, saj delno popačijo originalno sliko. Na ta način so si krivulje na grafikonu bližje in dobimo dodaten vpogled v analizirano korelacijo. Z opravljeno normalizacijo pa smo želeli poenostaviti predstavitev časovnih sprememb reoloških parametrov na betonih in njim pripadajočih maltah CEM, saj tako lažje preverimo, ali se reološke lastnosti betonov in malt CEM s časom spreminjajo primerljivo.

Na sliki 92 podajamo primer betona CL1C z deležem superplastifikatorja enakim 0,3%. Na levih grafikonih opazimo manjši razkorak med časovno odvisnim spreminjanjem reoloških parametrov betona in malto CEM, sta pa diagrama približno vzporedna, zato pričakujemo podobno obnašanje betona in njemu ekvivalentne malte s časom. Grafikona na desni strani slike sta naše pričakovanje potrdila. Diagrama betona in malte CEM se skoraj v celoti prekrijeta. Manjšo izjemo predstavljajo le rezultati pri času 60 minut. Ugotovimo lahko, da lahko pri betonu CL1C njegovo časovno odvisno obnašanje napovemo s pomočjo obnašanja njegove malte CEM. Oba reološka parametra,  $\tau_0$  in  $\mu$ , s časom naraščata, kar je pričakovano.



Slika 92: Mešanici CLIC in MLIC, vsebujeta superplastifikator.  
 Figure 92: Mixtures CLIC and MLIC, containing superplasticizer.

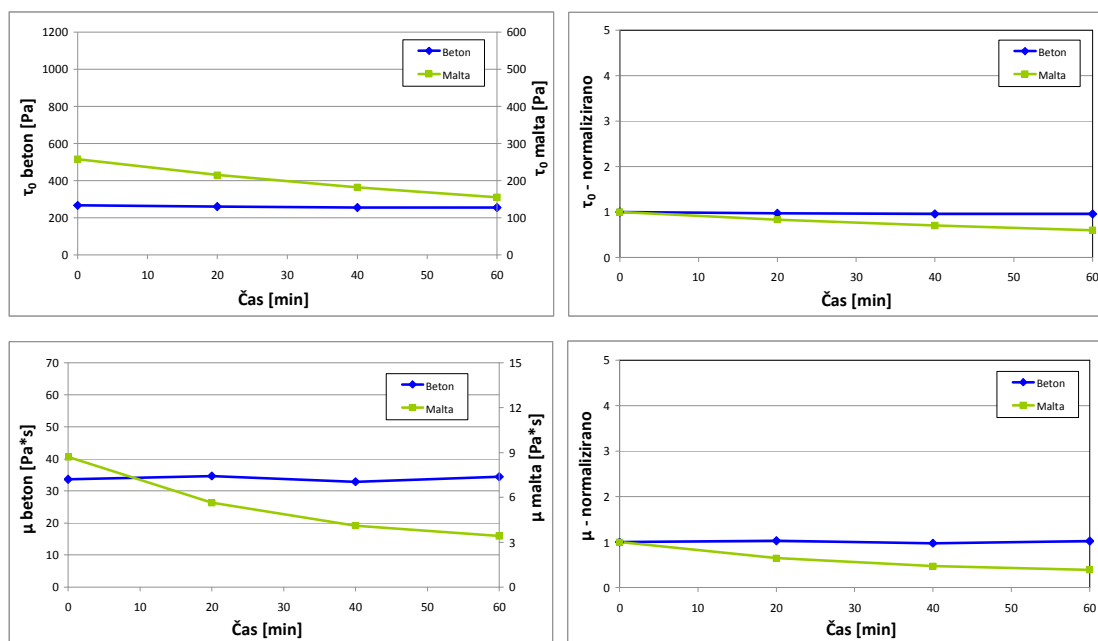


Slika 93: Mešanici CRA1B in MRA1B, vsebujeta aerant.  
 Figure 93: Mixtures CRA1B and MRA1B, containing air entrainer.

Na sliki 93 prikazujemo obnašanje betona CRA1B, ki vsebuje aerant. Normalizirana diagrama se v primeru strižnih napetosti na meji tečenja ne pokrijeta popolnoma. To lahko pripišemo nekoliko nizki izmerjeni vrednosti v času 0 min za beton. Še vedno pa z normaliziranjem dobimo približno vzporedna diagrama za beton in malto CEM od 20 min naprej, kar pomeni, da bi tudi pri tej sestavi betona lahko spreminjanje reoloških lastnosti s časom dovolj dobro napovedali s pomočjo njegove malte CEM.

Zanimiv je rezultat za plastične viskoznosti, saj vrednosti s časom ne naraščajo. Tovrstno obnašanje lahko pripišemo vnesenim zračnim mehurčkom v mešanico, ki ohranjajo enako viskoznost betona in njegove malte CEM vsaj prvih 60 minut po zamešanju. Čeprav smo pri primerjavi med betonom in malto (poglavje 6.3.1) v času 0 min zavrnil primernost metode CEM za napoved reoloških parametrov tega betona, saj so bile razlike v vrednosti razleza prevelike, pa predstavlja pri enaki sestavi betona metoda CEM primeren pristop za napovedovanje časovno odvisnih sprememb reoloških lastnosti betona.

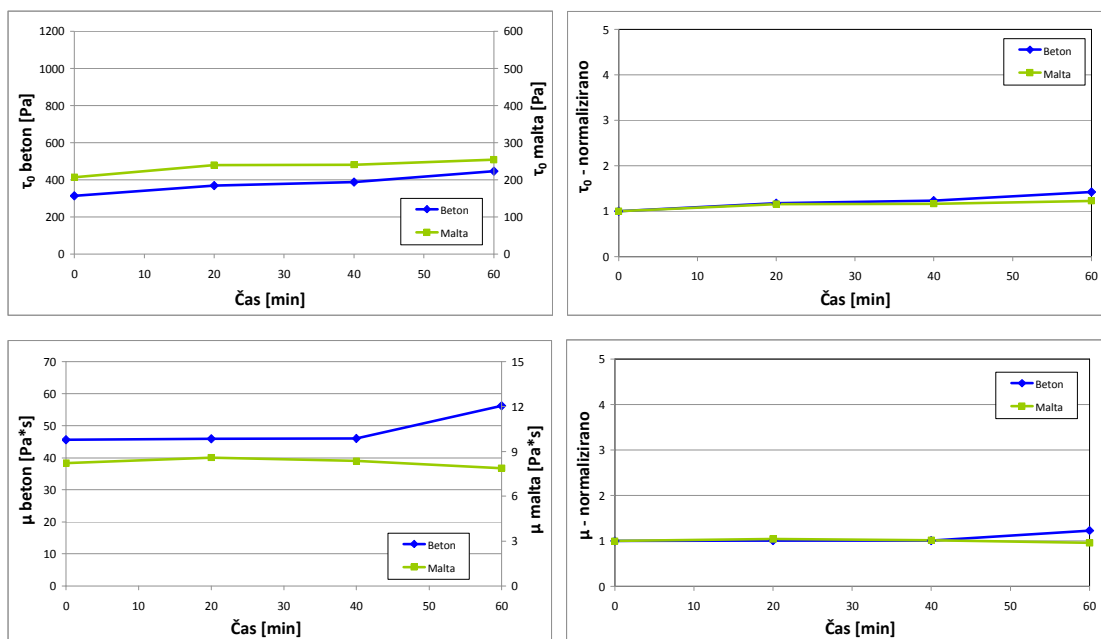
Pri betonu CG1C, ki vsebuje stabilizator, in njemu pripadajoči malti CEM je ugotovljeno časovno odvisno obnašanje v nasprotju s pričakovanji (slika 94). Stabilizator namreč drugače vpliva na beton kot na malto CEM. Oba reološka parametra betona se s časom ne spreminjata, reološka parametra malte CEM pa s časom padata. O vzrokih za ugotovljeno obnašanje bomo diskutirali v poglavju 7. Tukaj lahko le ugotovimo, da časovnega spreminjanja reoloških lastnosti mešanic betona z vključenim stabilizatorjem ne moremo napovedati s pomočjo rezultatov preiskav na malti CEM.



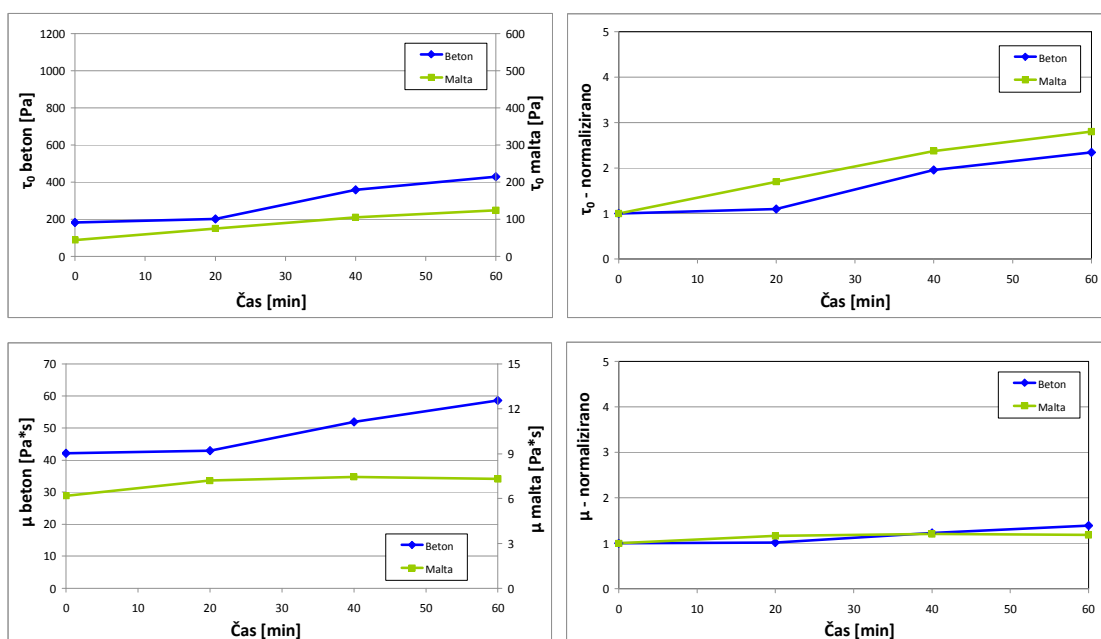
Slika 94: Mešanici CG1C in MG1C, vsebujeta stabilizator.

Figure 94: Mixtures CG1C and MG1C, containing stabilizer.

Slika 95 prikazuje obnašanje mešanic CV1A in CM1A s spremenjenim (povečanim) vodocementnim razmerjem. V primeru plastične viskoznosti opazimo v času 60 min nenaden skok diagrama, ki pripada betonu. Na grafikonu, ki prikazuje normalizirane vrednosti, vidimo, da opažen skok ni bil velik, saj normalizirana viskoznost mešanice vseskozi ostaja približno konstantna. Na koncu lahko ugotovimo, da je metoda CEM primerna za napovedovanje spreminjanja reoloških parametrov s časom tudi pri tem betonu.



Slika 95: Mešanici CV1A in MV1A, s spremenjenim V/C razmerjem.  
 Figure 95: Mixtures CV1A and MV1A, with different W/C ratio.

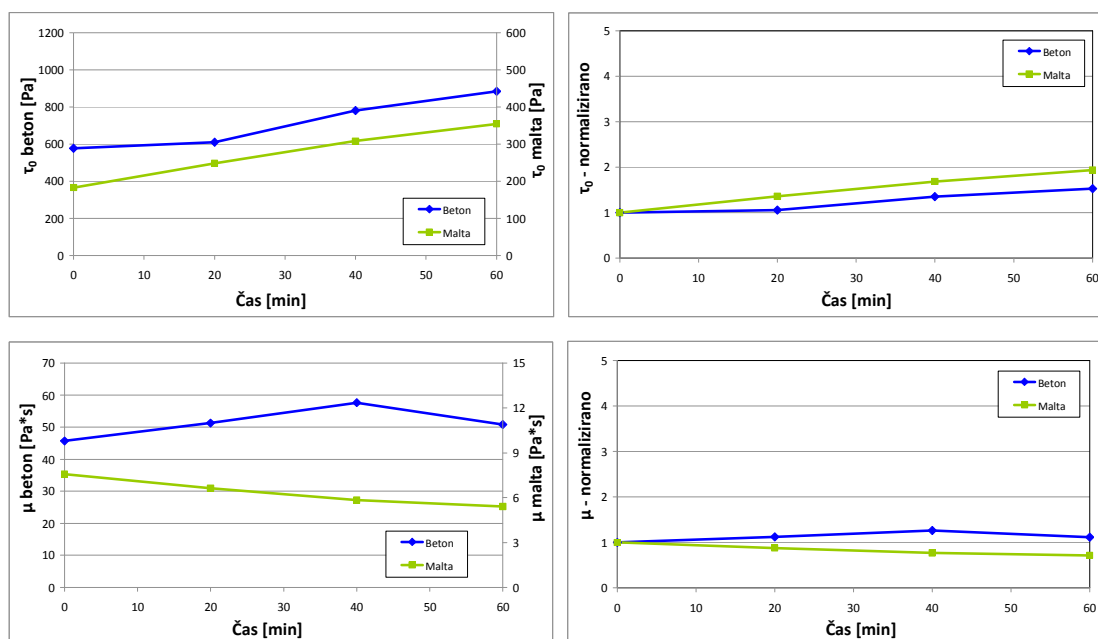


Slika 96: Mešanici CZ1B in MZ1B, vsebujeta žlindro.  
 Figure 96: Mixtures CZ1B and MZ1B, containing slag.

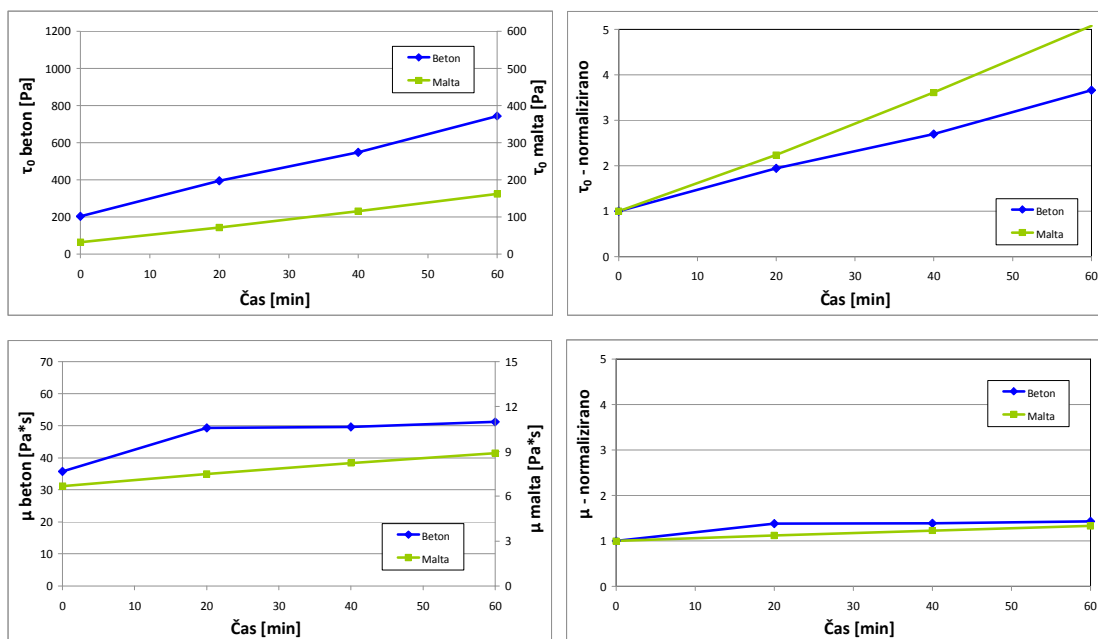
Pri mešanicah CZ1B in MZ1B, ki vsebujeta žlindro (slika 96), predstavlja za uporabnost metode CEM problem prvih 20 minut po zamešanju mešanic, ko ostajata reološka parametra pri betonski mešanici konstantna, pri malti CEM pa se nekoliko povečata. V primeru plastične viskoznosti pa ostaja le ta približno konstantna od časa 20 min do časa 60 min pri malti CEM, pri betonu pa se plastična viskoznost v enakem časovnem intervalu povečuje. Primerjava normaliziranih vrednosti za oba

reološka parametra pa pokaže, da je tudi pri tej sestavi uporaba metode CEM primeren pristop za oceno časovno odvisnega spreminjanja reoloških parametrov betona.

Rezultati za mešanici CM1B in MM1B z mikro siliko in za mešanici CT1A in MT1A s tufom so prikazani na slikah 97 in 98. Na obeh slikah lahko vidimo, da se v primeru plastične viskoznosti diagrama, ki prikazujeta časovno spreminjanje te lastnosti za beton in njegovo malto CEM, bistveno razlikujeta. Pri betonu CM1B plastična viskoznost s časom v splošnem narašča, na njegovi malti CEM MM1B pa pada. Pri betonu CT1A ostaja plastična viskoznost nespremenjena od časa 20 min pa vse do 60 min, pri malti CEM MT1A pa s časom narašča, vendar so te spremembe majhne. Po opravljeni normalizaciji se dobljeni diagrami sicer nekoliko razlikujejo, vendar ocenjujemo, da je uporaba metode CEM še vseeno uporabna za napovedovanje časovno odvisnega spreminjanja plastične viskoznosti betonov z mikro siliko ali tufom. Ujemanje rezultatov na betonih in njim pripadajočih maltah CEM se zdi boljše v primeru strižne napetosti na meji tečenja, čeprav določeno težavo povzročajo meritve v času 0 min na betonih, ki bistveno vplivajo na normalizirane vrednosti, ki pripadajo betonom in s tem na odstopanje glede na diagram, ki pripada malti CEM. Kljub temu je uporaba metode CEM primerna tudi za napovedovanje časovnega spreminjanja strižne napetosti na meji tečenja pri betonu, saj malta CEM napove nekoliko hitrejše večanje te karakteristike s časom, kar pomeni, da smo na varni strani.



Slika 97: Mešanici CM1B in MM1B, vsebujeta mikro siliko.  
Figure 97: Mixtures CM1B and MM1B, containing silica fume.

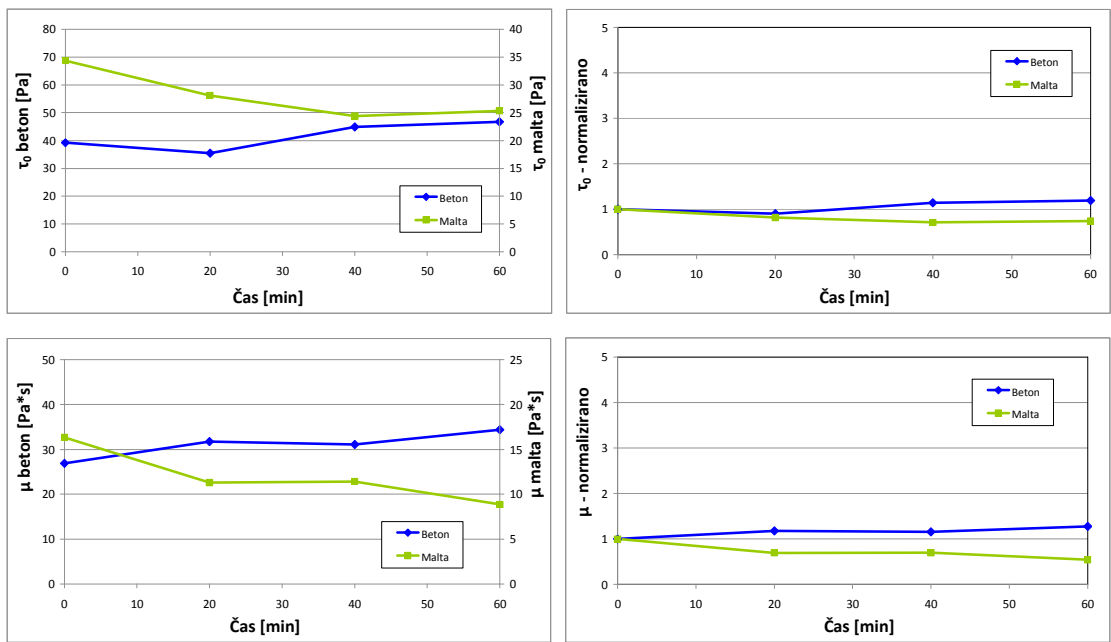


Slika 98: Mešanici CT1A in MT1A, vsebujeta tuf.  
Figure 98: Mixtures CT1A and MT1A, containing tuff.

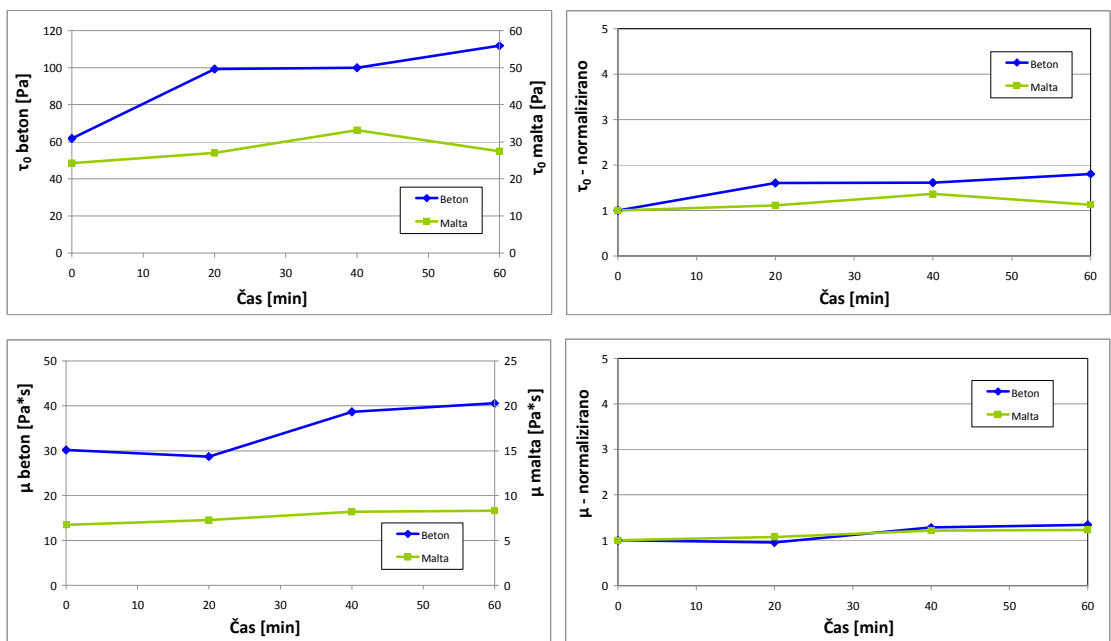
Mešanici betonov SCC s stabilizatorjem (slika 99) in s superplastifikatorjem (slika 100) potrjujeta pojave, opažene tudi pri običajnih betonih. Prvič, da je vpliv stabilizatorja na malto drugačen, kot na beton. Rezultati, izmerjeni na betonu, ostajajo s časom relativno konstantni, medtem ko rezultati izmerjeni na malti padajo. Napovedovanje rezultatov betona s stabilizatorjem zaenkrat še ni varno, potrebne bi bile dodatne preiskave. So si pa fenomeni na betonih, betonih SCC in njim ekvivalentnih maltah z uporabo stabilizatorja zelo podobni.

Na betonu SCC, ki vsebuje le superplastifikator, opazimo odstopanja med krivuljami. Vendar lahko ob opazovanju trenda obnašanja mešanice s časom trdimo, da se beton in malta obnašata podobno. Manjša odstopanja med krivuljami torej ne preprečujejo ocene časovnega obnašanja betona na podlagi rezultatov malte.





Slika 99: Mešanici SCCM4 in SCCMM4, vsebujeta stabilizator.  
 Figure 99: Mixtures SCCM4 and SCCMM4, containing stabilizer.



Slika 100: Mešanici SCCR4B in SCCMR4B, vsebujeta superplastifikator.  
 Figure 100: Mixtures SCCR4B and SCCMR4B, containing superplasticizer.

## 7 DISKUSIJA

### 7.1 Primerjava reometrov

Primerjavo reometrov smo izvedli ločeno glede na tip mešanice: običajni beton in malta CEM ter beton SCC in malta SCC CEM. Najprej smo naredili primerjavo z metodo »mešanica za mešanico«. S to metodo smo uspešno dokazali, da uporabljeni merilni sistemi obeh reometrov na enak način sledijo spremembam v sestavi mešanic, razen v primeru malt SCC in parametra strižne napetosti na meji tečenja. Te mešanice so imele največjo sposobnost tečenja. Nasploh je imel ICAR Rheometer težave z meritvami na bolj tekočih maltah. To je lahko posledica zasnove posode za merjenje reoloških parametrov malt. Pri zasnovi posode smo upoštevali pogoj, da mora biti oddaljenost med rebri in mešalom štirikrat večja od največjega zrna v mešanici. Skladno s tem pogojem je bila posoda dimenzionirana za mešanico z največjim zrnem 2 mm. Velikost mešala je ostala nespremenjena. Ko smo po opravljenih preiskavah na maltah izračunali ocenjeno strižno hitrost (po enačbi (32)), ki se ustvarja v mešanici med vrtenjem mešala, smo ugotovili, da je velika, in sicer kar dvakrat večja od hitrosti, ki se ustvarja v betonu ob uporabi večje posode ICAR Rheometra, in kar štirikrat večja od hitrosti, ki se ustvarjajo v ConTec Viscometru 5. Velika strižna hitrost bi lahko povzročala težave med meritvami, še posebej pri manj stabilnih maltnih mešanicah, pri katerih se je lahko pojavila segregacija ali potovanje delcev proti zunanjemu robu posode. Ob dimenzioniranju posode bi bilo zato smiselno zagotoviti tudi manjše strižne hitrosti, tako da bi poleg posode zmanjšali tudi mešalo. Vendar pa bi se po drugi strani z uporabo razpoložljive opreme lahko pojavil problem premajhne občutljivosti senzorja za merjenje navora.

Z metodo »mešanica za mešanico« lahko tudi ocenimo, ali ima čas, ki preteče med prvo, drugo in tretjo meritvijo na isti mešanici, vpliv na rezultate. Na diagramih, kjer so predstavljeni rezultati preiskav (slike v poglavju 6.1), bi bil namreč zaradi sprememb v strukturi mešanice, če bi bile te odvisne od časa, rezultat prve meritve vedno najmanjša vrednost merjenega reološkega parametra, rezultat tretje meritve pa vedno največja vrednost merjenega reološkega parametra. Rezultati preiskav v tem primeru kažejo, da so časovni intervali med prvo, drugo in tretjo meritvijo na isti mešanici dovolj kratki, da do tovrstnih sprememb v strukturi mešanice ne pride. Zato je privzet postopek meritev reoloških parametrov primeren za ugotavljanje ponovljivosti meritve na stabilnih mešanicah.

S pomočjo statističnih metod smo opravili tudi primerjavo med reometri. Koeficient determinacije nam omogoča dober vpogled v to, kako število meritev na isti mešanici (število ponovitev) vpliva na točnost rezultata opravljene meritve. Z upoštevanjem povprečja rezultatov večjega števila meritev izdatno izboljšamo korelacijo med reometroma. Istočasno lahko tudi ugotovimo, da je za uporabljene reometre značilen določen raztros rezultatov meritev na isti mešanici, zato je z izvajanjem večjega

števila ponovitev natančnost rezultata izboljšana. Pri večjem številu ponovitev pa imamo tudi možnost izločiti rezultate, ki bistveno odstopajo od rezultatov preostalih meritev, in tako izboljšamo končni rezultat meritve izbranega reološkega parametra. Za izločanje rezultatov meritev moramo imeti utemeljen razlog in jasno postavljena merila. Na podlagi opravljene linearne regresije smo določili izraze, ki podajajo povezave med reološkima parametroma, strižno napetostjo na meji tečenja ( $\tau_0$ ) in plastično viskoznostjo ( $\mu$ ) za posamezne vrste mešanic. V te izraze vnašamo vrednosti z naslednjimi enotami:  $\tau_0$  v Pa,  $\mu$  v Pa·s in vse meritve obdelavnosti v mm. V enakih enotah so tudi rezultati, pridobljeni iz teh izrazov. Enačbi (35) in (36) veljata za meritve na običajnih betonih (na podlagi slik 51 in 52), enačbi (37) in (38) pa za meritve na maltah CEM (na podlagi slik 53 in 53).

$$\tau_{0-ICAR} = 1,54 \tau_{0-ConTec} + 39,31 \quad (35)$$

$$\mu_{ICAR} = 0,72 \mu_{ConTec} + 0,48 \quad (36)$$

$$\tau_{0-ICAR} = 1,85 \tau_{0-ConTec} + 27,40 \quad (37)$$

$$\mu_{ICAR} = 0,90 \mu_{ConTec} - 0,12 \quad (38)$$

Enačbi (39) in (40) veljata za betone SCC (sliki 55 in 56), enačba (41) pa za povezavo med viskoznostmi malt SCC CEM (slika 57). Enačbe za povezavo strižnih napetosti na meji tečenja za malte SCC CEM ne podajamo zaradi ugotovljene slabe korelacije med obema reometroma.

$$\tau_{0-ICAR} = 1,17 \tau_{0-ConTec} - 9,13 \quad (39)$$

$$\mu_{ICAR} = 1,10 \mu_{ConTec} + 4,74 \quad (40)$$

$$\mu_{ICAR} = 0,82 \mu_{ConTec} + 0,96 \quad (41)$$

Uporaba metode ANOVA nam omogoča dodaten vpogled v rezultate meritev in relacije med njimi. Omogoča potrjevanje ali zavračanje hipoteze o tem, ali reometri dovolj dobro zaznavajo spremembe v sestavi mešanic ter ali različni reometri pri posamezni mešanici kažejo enake ali povsem drugačne rezultate meritev. Poleg tega dobimo z uporabo te metode tudi oceno za ponovljivost meritev. Na podlagi velikosti izračunane statistike  $F$  lahko namreč ocenimo, ali ima kateri izmed reometrov boljšo ponovljivost oz. ali ima kateri izmed reoloških parametrov boljšo ponovljivost. To ni dejanski račun ponovljivosti, je pa dobra ocena. Pri uporabi metode ANOVA moramo biti pozorni, da v isti analizi ne obravnavamo betonov, ki po svoji obdelavnosti spadajo v povsem drugačne razrede ali vrste betonov. S to metodo smo potrdili, da reometer ICAR Rheometer ni primeren za meritve reoloških parametrov malt z večjo sposobnostjo tečenja. Splošno gledano ima ICAR Rheometer slabšo ponovljivost kot ConTec Viscometer 5.

## 7.2 Primerjava med betonom in njemu ekvivalentno malto

Poudariti je potrebno, da smo v analizi upoštevali le rezultate v času 0 minut. V prvem koraku, kjer smo v analizo vključili vse mešanice, korelacije niso dobre. Zato smo v naslednjem koraku določili merila, na podlagi katerih smo določene sestave izločili iz analize. Pri običajnih mešanicah smo izbrali merilo pričakovanega razleza malte CEM, ki smo ga izračunali na podlagi razleza pripadajoče betonske mešanice. Ideja o vpeljavi izbranega merila je naša in jo lahko izpostavimo kot enega od prispevkov znanosti te disertacije. S pomočjo tega merila smo izločili tiste sestave, pri katerih se obnašanje betonov bistveno razlikuje od obnašanja pripadajočih malt CEM, in tako bistveno izboljšali korelacijo. Med izločenimi mešanicami prevladujejo sestave, ki vsebujejo aerant ali stabilizator. Ta dva kemijska dodatka očitno povsem drugače vplivata na malte kot na betone. Mešanice malt CEM s temi dodatki so dosegale bistveno manjše razleze od pričakovanih. Vzrok je verjetno velikost največjega zrna agregata v mešanici. Večja zrna v betonu verjetno zmanjšajo učinek teh dveh dodatkov v mešanici, saj so prevelika oz. so sile, ki jih povzročajo kemijski dodatki, premajhne za še večji učinek dodatka.

Plastične viskoznosti med običajnim betonom in malto CEM so bolj korelirane kot strižne napetosti na meji tečenja. Nekoliko večja, vendar konstantna, odstopanja so bila ugotovljena pri mešanicah z mikro siliko in tufom. Za sestave z mikro siliko ali tufom so viskoznosti malte CEM relativno nizke v primerjavi z betoni. Verjetno je za tovrstno obnašanje spet odgovorna velikost agregatnih zrn v mešanici. Trenje med agregatnimi zrnji poveča viskoznost, dodajanje mikro silike ali tufa pa viskoznost še dodatno poveča, saj sta oba mineralna dodatka velika porabnika vode. Ker so zrna v malti manjša, je vpliv trenja med zrnji na skupno viskoznost mešanice manjši kot v betonu.

Korelacija med betonom SCC in malto SCC CEM je slaba. Tudi metoda pričakovanega razleza s posedom v tem primeru ni dala zelenih rezultatov. Razlogov za slabo korelacijo je lahko več. Uporabljen kameni agregat, še posebej drobna frakcija, vsebuje veliko finih, praškastih delcev, količina in kakovost le-teh pa lahko bistveno vplivata na obdelavnost mešanic SCC. Poleg tega je v nekaterih mešanicah uporabljen stabilizator – sicer druge vrste, kot pri običajnih betonih, vendar lahko vseeno sklepamo, da ima podoben učinek, kot smo ga opazili pri običajnih betonih. Tudi število mešanic je bilo manjše, kar lahko vpliva na slabšo korelacijo. Predvsem pa ne moremo izključiti možnosti, da so bile sestave nekaterih malt SCC CEM in tudi nekaterih betonov SCC na meji stabilnosti, zato je na dobljene rezultate reoloških parametrov lahko bistveno vplivala morebitna segregacija, ki se je pojavila zaradi večjih hitrosti striga med potekom meritve.

### 7.3 Primerjava reoloških meritev z meritvami obdelavnostmi

Opravljen je bila tudi osnovna analiza korelacije med rezultati reoloških meritev in meritev obdelavnosti. V skladu s pričakovanji je bila dosežena korelacija med plastično viskoznostjo in vrednostjo poseda, razleza ali razleza s posedom slabša kot korelacija med istimi parametri obdelavnosti in strižno napetostjo na meji tečenja. Na slikah v poglavju 6.4 so podane osnovne povezave med omenjenimi parametri. Tukaj bi izpostavili le povezave med strižno napetostjo na meji tečenja in posedom, razlezom in razlezom s posedom za primer betonov (običajnih in SCC), ki jih podajamo v enačbah (42), (43) in (44) in so dobljene na podlagi slik 69 in 77. V te izraze vnašamo vrednosti z naslednjimi enotami:  $\tau_0$  v Pa,  $\mu$  v Pa·s in vse meritve obdelavnosti v mm. Te povezave so dobljene z reometrom ConTec Viscometer 5, povezave za ICAR Rheometer pa so podobne (vidimo jih lahko na sliki 70). Dobimo jih tudi tako, da v enačbe (42), (43) in (44) vstavimo povezavo, ki smo jo ugotovili med reometroma in je podana tudi v tem poglavju (enačba (35)).

$$posed = -0,26 \tau_{0-ConTec} + 226 \quad (42)$$

$$razlez = -0,39 \tau_{0-ConTec} + 600 \quad (43)$$

$$razlez\_s\_posedom = -2,82 \tau_{0-ConTec} + 793 \quad (44)$$

Dovolj dobre korelacije dobimo tudi v primeru malt CEM, vendar ne v primeru ICAR Rheometra, zaradi že omenjenih težav z bolj tekočimi maltami. V nadaljevanju zato navajamo le povezavo med razlezom in strižno napetostjo na meji tečenja za malte CEM (slika 73) v enačbi (45) ter povezavo med strižno napetostjo na meji tečenja in mini razlezom s posedom (slika 79), enačba (46), za ConTec Viscometer 5.

$$razlez\_malte = -0,48 \tau_{0-ConTec} + 312 \quad (45)$$

$$mini\_razlez\_s\_posedom = -6,65 \tau_{0-ConTec} + 535 \quad (46)$$

Poudariti je še potrebno, da so imele mešanice, za katere smo podali povezave, v svoji sestavi enako ali vsaj zelo podobno količino cementne matrice. Iz literature je namreč znano, da ima pri cementnih kompozitih količina matrice vpliv na povezavo med posedom in strižno napetostjo na meji tečenja (Wallevik, 2006). Isti avtor tudi navaja enačbe za povezave med vrednostjo poseda in strižno napetostjo na meji tečenja za betone z različnimi količinami cementne matrice. Enačba za betone s podobno količino cementne matrice se glasi  $posed = -0,265 \tau_{0-ConTec} + 245$  in je torej zelo podobna enačbi (42). V študiji (Wallevik, 2006) je bil uporabljen BML Viscometer z enakim merilnim sistemom, kot smo ga uporabili v tej disertaciji.

#### 7.4 Vpliv količine posameznih sestavin na reologijo svežega betona

Vpliv vrste in količine obravnavanih sestavin betona na reološke parametre sveže mešanice ni bil vedno enak vplivu, ki so ga za enako sestavino ugotovili tuji raziskovalci. Ugotovljene razlike lahko pripišemo predvsem uporabljenim lokalnim osnovnim sestavinam, katerih lastnosti se lahko bistveno razlikujejo od lastnosti materialov, na katerih so ugotovljene zakonitosti ti raziskovalci dobili. Bistvenih razlik sicer ni veliko, a vseeno obstajajo. Tako recimo nismo potrdili enakega vpliva superplastifikatorja, kot ga je ugotovil Wallevik (Wallevik, 2009b), ki ugotavlja, da ima superplastifikator vpliv predvsem na strižno napetost na meji tečenja, na plastično viskoznost pa skoraj ne. V primeru naših mešanic je superplastifikator močno vplival tudi na plastično viskoznost in ne le na strižno napetost na meji tečenja.

Smo pa v okviru lastnih preiskav ugotovili podobne zakonitosti kot tuji raziskovalci glede vpliva na reološke parametre za finost mletja cementa, vpliv aeranta v mešanicah z veliko fine frakcije in vpliv povečanja količine vode. Bolj grobo mleti cementi imajo nižjo strižno napetost na meji tečenja. Aerant v betonu z več finimi delci vpliva tudi na strižno napetost na meji tečenja in ne le na viskoznost (Wallevik, 2009b). Poleg tega pri večjih dozacijah aeranta le-ta ne vpliva več na plastično viskoznost. Povečanje količine vode v betonu vpliva enakomerno na oba reološka parametra, ki se pomikata proti vrednosti 0 (nič). V določeni meri pa se naše ugotovitve ujemajo z ugotovitvami tujih raziskovalcev tudi glede vpliva stabilizatorja (ti lahko učinkujejo na več različnih načinov) ter vpliva mikro silike. Večina stabilizatorjev najprej vpliva na viskoznost, pri večjih dozacijah pa se poveča predvsem strižna napetost na meji tečenja (Wallevik, 2009b). V našem primeru sta se povečala oba reološka parametra, bistvo delovanja stabilizatorja pa vseeno ostaja podobno. Mikro silika je v našem primeru ob manjši dozaciji le malenkostno znižala vrednost plastične viskoznosti, zelo pa je vplivala na strižno napetost na meji tečenja. V literaturi (Wallevik, 2009b) navajajo, da pri manjših dozacijah močnejše vpliva na plastično viskoznost, pri večjih dozacijah pa, podobno kot v našem primeru, vpliva predvsem in močno na strižno napetost na meji tečenja.

Ugotavljali smo tudi vpliv tufa, žlindre, različnega tipa superplastifikatorja ob isti obdelavnosti in učinek stabilizatorja ob pomanjšanju količine kamene moke ter ohranjanju enake obdelavnosti. To so vplivi na reološke parametre svežih betonov, za katere v dostopni literaturi rezultatov preiskav nismo našli, ali pa obstajajo le v manjšem obsegu. Rezultati so zanimivi in poučni ter dajejo smernice za razvoj svežih lastnosti betonov. Vpliv tufa na reološke lastnosti je bil pričakovan, močno se je dvignila vrednost strižne napetosti na meji tečenja in tudi plastične viskoznosti, saj ima tuf veliko sposobnost vpijanja vode (Turanli et al., 2004). Žlindra je malenkostno zmanjšala strižno napetost na meji tečenja in malenkost povečala plastično viskoznost. Težko je primerjati naše rezultate z rezultati iz literature, saj ti kažejo različne učinke žlindre v svežem betonu. Primerljiva je le izjava, da je učinek načeloma

ugoden oz. ni neugoden na reološke lastnosti svežega betona. Pri preverjanju vpliva vrste superplastifikatorja smo bili pozorni na enako obdelavnost svežega betona, saj sta imeli mešanici z različnima superplastifikatorja enako vrednost razleza s posedom. Pri tem pogoju so bile reološke lastnosti mešanic različne. Na ta način smo prikazali primer uporabe reologije pri načrtovanju lastnosti svežega betona za uporabo v točno določenih aplikacijah. Preverili smo tudi, ali je beton še lahko uporaben, če v sestavi nima dovolj kamene moke, in na kakšen način to lahko dosežemo. Z uporabo stabilizatorja smo nadomeščali zmanjšano količino kamene moke v mešanici. Mešanica je ostala stabilna v primeru manjših strižnih hitrosti. Stabilizator je povečal predvsem plastično viskoznost mešanice in jo na ta način ohranjal stabilno.

### **7.5 Časovno spreminjanje reoloških parametrov svežih betonov in njim ekvivalentnih malt**

Glavni cilj doktorske disertacije je bil preveriti obstoj povezave med časovnim spreminjanjem reoloških parametrov betonov in njim ekvivalentnih malt CEM. Ugotovili smo, da tovrstna povezava obstaja in da je za večino mešanic časovne spremembe reoloških parametrov betona mogoče napovedati s pomočjo rezultatov meritev na njim pripadajočih maltah CEM.

Težko je primerjati absolutne vrednosti reoloških parametrov v obravnavanih časovnih intervalih, to je časovne spremembe teh parametrov za malte CEM in betone, saj se absolutne vrednosti za malte in betone zelo razlikujejo. V primeru, da predstavimo rezultate meritev na istem diagramu, vendar z različnimi ordinatnimi osmi za beton in njemu pripadajočo malto CEM, je takšno primerjavo lažje opraviti. Še boljši pristop pa predstavlja normaliziranje rezultatov. Ob predpostavki, da spremljamo predvsem relativne spremembe posameznega parametra s časom glede na vrednosti, izmerjene takoj po končanem mešanju, to je v času 0 min, ki naj bi bile enake v betonu in malti CEM, lahko normaliziramo vse vrednosti, izmerjene za posamezno mešanico, s tisto, ki je bila izmerjena v času 0 min.

Izkazalo se je, da lahko na ta način zelo dobro primerjamo rezultate preiskav na malti CEM in betonu ter da je ta metoda primerna za napovedovanje obnašanja betona na podlagi meritev na pripadajoči malti CEM. Normalizirane krivulje so bile namreč pri večini sestav enake za beton in malto, na grafikonu so potekale ena prek druge. Metoda je uporabna, ker lahko na tak način opazujemo in napovemo trend obnašanja betona v odvisnosti od časa. Pri tem lahko ugotovimo in izločimo tudi morebitne napake pri meritvah v določenem časovnem intervalu. Možno je tudi analizirati naklon/naklone normalizirane ravne ali lomljene črte in na podlagi tega klasificirati časovno obnašanje posameznih mešanic.

Kljub zgoraj navedenim prednostim ima metoda z opravljeno normalizacijo tudi nekaj pomanjkljivosti. Zelo je občutljiva na absolutno vrednost, izmerjeno v času 0 minut po končanem mešanju, še posebej, če je izmerjena vrednost  $\tau_0$  ali  $\mu$  blizu vrednosti 0 (nič). Poleg tega se metoda ni pokazala kot uporabna (oz. bi bile potrebne dodatne preiskave in nadgradnja metode) za primerjavo mešanic s stabilizatorjem. V primeru malt je imel namreč stabilizator zelo velik učinek v začetnem času, ki pa je s časom upadel. Tega upada pa nismo opazili v primeru betonov, verjetno zaradi vpliva večjih agregatnih zrn na oba obravnavana reološka parametra. Ta ugotovitev velja za oba reološka parametra, vendar je vpliv v primeru plastične viskoznosti večji. Vrednost reoloških parametrov v betonu je ostajala konstantna. Določen vpliv stabilizatorja na časovno odvisno obnašanje pa se vseeno lahko oceni, saj bi reološki parametri pri betonski mešanici brez stabilizatorja naraščali s časom.



## 8 PRISPEVKI DISERTACIJE IN PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO

### 8.1 Prispevki disertacije

Ta doktorska disertacija je prva v Sloveniji s področja reologije svežih cementnih kompozitov. Zato je zasnovana tako, da obravnava vplive najpogostejših sprememb v sestavi betonskih mešanic in vplive izbranih kemijskih in mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona, ki smo jih določali z dvema reometroma. Vključuje tako običajne kot samozgoščevalne betone in njim pripadajoče malte CEM. To pomeni, da smo v okviru eksperimentalnega dela disertacije opravili veliko število preiskav. Naše ugotovitve so zato dobra osnova raziskovalcem, ki bi določene zakonitosti želeli raziskati bolj detajlno.

V okviru doktorske disertacije smo preverili, ali osnovne zakonitosti reologije svežih cementnih kompozitov, objavljene v tuji literaturi (Wallevik, 2009b; Koehler in Fowler, 2004, 2006; Tattersall in Banfill, 1983; Turanli et al., 2004), veljajo tudi v primeru uporabe slovenskih materialov. V ta namen smo izdelali reografe, ki prikazujejo vpliv spreminjanja izbranih osnovnih sestavin in tudi sestavin, ki se v praksi ne pojavljajo pogosto, in o vplivu katerih na lastnosti svežega betona ni na voljo veliko objav. Potrdili smo zakonitosti glede obnašanja reoloških lastnosti svežega betona v primeru različno fino mletih cementov, ob spreminjanju količine vode, aeranta, stabilizatorja in tufa v mešanici. V primeru spreminjanja mikro silike se viskoznost ob manjših dozacijah ni zmanjšala, kot je navedeno v literaturi (Wallevik, 2009b), v primeru spreminjanja količine superplastifikatorja v mešanici pa se je spremenila tudi vrednost plastične viskoznosti, ki pa naj bi ostala konstantna. Žlindra ni imela velikega vpliva na reološke lastnosti betona, kar je tudi eden od možnih vplivov žindre. Vpliv spreminjanja količine posameznih materialov v mešanici je zelo odvisen od vrste uporabljenih osnovnih materialov in kombinacije le-teh. Žlindra ali kateri drug material iz drugega vira bi lahko imel povsem drugačen vpliv na reološke lastnosti mešanice. To smo potrdili tudi z uporabo različnih tipov superplastifikatorjev. Obdelavnost betona je bila z uporabo obeh enaka, reološke lastnosti pa drugačne. Ob konstantni obdelavnosti betona smo preverili tudi učinek odvzemanja kamene moke iz mešanice in nadomeščanje le-te s stabilizatorjem. Sveži mešanici se je na ta način povečala plastična viskoznost, katere večja vrednost je ohranjala tudi stabilnost mešanice.

Med preiskavami v okviru doktorske disertacije je UL FGG uspela z nabavo nepremičnega reometra ConTec Viscometer 5, zato smo večino preiskav opravili na dveh reometrih: v premičnem reometru ICAR Rheometer, ki je bil že v izhodišču izbran za izvajanje preiskav, ter na ConTec Viscometer 5. Tako smo lahko v okviru analize rezultatov opravili tudi primerjavo obeh reometrov. Eden od njiju, ICAR Rheometer, še ni bil obravnavan v literaturi dostopnih primerjav med reometri. Zato predstavljajo te analize vsekakor doprinos k vidiku uporabe meritev reoloških lastnosti betona v

praksi, saj smo dokazali, da so rezultati meritev z obema reometroma primerljivi, ICAR Rheometer pa se lahko uporablja tudi na terenu.

Primerjavo reometrov smo podkrepili s statistično analizo, kjer bi poleg linearne regresije izpostavili uporabo metode ANOVA. S to metodo smo lahko ocenili različnost rezultatov meritev z dvema reometroma in ocenili ponovljivost rezultatov meritev za posamezni reometer in reološki parameter. Ocenili smo tudi možnost umeritve reometrov enega na drugega in ugotovili, da je povezava med reometroma močna ter da so izmerjeni rezultati po umeritvi enaki, ne glede na uporabljen reometer.

Poleg reoloških meritev smo izvajali tudi standardne preiskave obdelavnosti svežih cementnih kompozitov. Standardne metode so služile predvsem kot način preverjanja rezultatov reoloških meritev, saj smo na njih v praksi bolj navajeni. Število študij, ki bi se ukvarjale prav z vzpostavitvijo pravilne povezave med reološkimi parametri in preiskavami obdelavnosti, ni veliko in zato te povezave tudi niso točno določene. S pomočjo statistične analize smo vseeno uspeli pridobiti dovolj dobre korelacije, da smo podali osnovne enačbe za povezave med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo. To velja za vse meritve obdelavnosti: posed, razlez, razlez s posedom, razlez malte in mini razlez s posedom malte (enačbe (42) do (46)). Korelacije med plastično viskoznostjo in obdelavnostjo so bile slabe. Na ta način smo potrdili ugotovitve iz literature (Wallevik, 2006).

Kot zadnji in najbolj obsežen, zagotovo pa časovno najbolj zamuden del eksperimentalnega dela, je bilo preverjanje časovnega obnašanja betonov in njim ekvivalentnih malt (malt CEM). Za vrednotenje ustreznosti malte CEM za nadaljnje preiskave in primerjave z betoni smo določili svoj kriterij. Poimenovali smo ga »Pričakovan razlez malte« in je določen na podlagi rezultatov preiskave razleza betona. V tem primeru je to prispevek znanosti. Ta primerjava je bila uspešna za večino mešanic, ne pa za vse. Glede problematičnih sestav bi izpostavili mešanice z vključenim stabilizatorjem, metoda CEM pa velikokrat ni dala želenih rezultatov takoj po končanem mešanju, to je v času 0 minut. Ugotavljamo, da bi bilo meritvam takoj po končanem mešanju potrebno posvetiti večjo pozornost in sicer tako, da bi meritve opravili vedno na enak način in z več ponovitvami. Na ta način bi tudi pravilneje določili referenčno vrednost reološkega parametra za poznejše preiskave vpliva časa na reološke parametre betonske mešanice in s tem dobili boljše rezultate pristopa z normalizacijo rezultatov.

Normalizacija meritev s tisto izmerjeno v času 0 min po končanem mešanju je postopek ali model, ki ga predlagamo za primerjavo časovnega obnašanja betonov in njim ekvivalentnih malt. Normalizacija na ta način je uporabljena prvič in je tudi prispevek znanosti. Postopek se je izkazal kot uspešen in uporaben, saj omogoča napovedovanje obnašanja betona na podlagi obnašanja malte CEM, uporaben pa je tudi pri primerjavi dveh različnih mešanic malt. Primerjanje dveh ali več različnih malt je uporabno z vidika predhodnih preiskav, saj so meritve na maltah lažje izvedljive kot tiste na betonih.

Na ta način opravimo preiskave bistveno hitreje, preverjamo lahko vpliv večjega števila parametrov, količine uporabljenih materialov so bistveno manjše, preiskave lahko izvaja le ena oseba in ne nazadnje, obremenitve izvajalcev preiskav so bistveno manjše kot pri preiskavah na betonih. Še vedno pa moramo po predhodnih preiskavah na maltah CEM opraviti tudi preiskave na izbranih betonskih sestavah, da potrdimo ugotovitve na maltah CEM.

## 8.2 Priporočila za nadaljnje delo

Na osnovi opazovanj med samim merjenjem reoloških parametrov in med analizo rezultatov so se pojavile nove ideje ali vprašanja, katere bi bilo smiselno preveriti ali nanje odgovoriti. Kot priporočila za nadaljnje delo bi izpostavili naslednje:

- V duhu primerjave reometrov se pojavlja problem, kako točno ovrednotiti natančnost vsakega reometra posebej. Ocenjujem, da bi bilo potrebno razviti kalibracijski material, ki bi to omogočal. Tak material bi moral biti suspenzija grobih delcev in istočasno stabilen pri rokovanju z njim (na primer, med rokovanjem se v materialu ne bi smeli oblikovati zračni mehurčki). Uporaba silikonskega olja za kalibracijo ni dovolj, poleg tega se je pokazalo, da se med kalibracijo lahko vnesejo v olje zračni mehurčki, ki spremenijo reološke parametre tekočine.
- Ugotoviti bi bilo potrebno, zakaj je imel uporabljen stabilizator drugačen vpliv na beton kot na njemu pripadajočo malto CEM.
- Podrobno bi bilo potrebno preiskati vpliv velikosti največjega agregatnega zrna v mešanici na učinek posameznih dodatkov v mešanici.
- Na betonih SCC bi bilo potrebno opraviti večje število meritev. Predvsem bi bilo potrebno mešanice zasnovati tako, da bi pokrivalo večino možnih sestav za različne namene uporabe. To bi verjetno izboljšalo korelacije med povezavami, ki so bile predmet raziskav te doktorske disertacije.
- Dobrodošlo bi bilo preveriti reološke lastnosti betonov drugačnih sestav, kot so bile obravnavane v tej disertaciji. Predvsem bi bili uporabni rezultati meritev na betonih z vključenim prodatim agregatom.
- V primeru reografov bi bilo smiselno uporabiti manjše korake pri spreminjanju parametrov ter istočasno večji interval, v katerem parametre spreminjamo. Rezultat bi bili natančnejši in zato reografi bolj uporabni.

## VIRI

4C-Rheometer. 2013. 4C-Rheometer.

<http://www.dti.dk/4c-rheometer-8211-measuring-rheology-of-self-compacting-concrete/the-equipment/21743> (Pridobljeno 19.04.2013).

Ahmadi, B., Shekarchi, M. 2010. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites* 32, 2: 134-141.

Amziane, S., Ferraris, C. F., Koehler, E. P. 2005. Measurement of workability of fresh concrete using a mixing truck. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 110, 1: 55-66.

Bager, D.H., Geiker, R.M., Jensen, M.R. 2001. Rheology of self-compacting mortars Influence of particle grading. *The Nordic Concrete Research* 26, 1: 1-15.

Banfill, P. F. G. 2006. Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology reviews* 2006, 66-130.

Banfill, P.F.G. 2003. The rheology of fresh cement and concrete - a review. V: Grieve G. (ur.), Owens, G. (ur.). 11th International Congress on the Chemistry of Cement: Cement's Contribution to Development in the 21st Century, Durban, South Africa, 11.-16. maj 2003. Tech Book International: p. 50-63.

Barnes, H. A., Nguyen, Q. D. 2001. Rotating vane rheometry - a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 98, 1: 1-14.

Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K. 1989. An introduction to rheology. Amsterdam, Elsevier science publishers B.V.: 199 str.

Bartos, P., Sonebi, M., Tamimi, A. K. 2002. Workability and rheology of fresh concrete : compendium of tests: report of RILEM Technical Committee 145-WSM Workability of Special Concrete Mixes. Cachan, RILEM.

Bokan Bosiljkov, V. 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research* 33, 9: 1279-1286.

Callister, W.D. 2007. *Materials science and engineering: An introduction*. USA, John Wiley & Sons, Inc.: 832 str.

Chidiac, S. E., Mahmoodzadeh, F. 2009. Plastic viscosity of fresh concrete - A critical review of predictions methods. *Cement & Concrete Composites* 31, 8: 535-544.

Colleparidi, M. 2010. *The new concrete*. Casterete di Villorba, Tintoretto: 436 str.

ConTec. 2013. ConTec Rheomixer.

<http://www.contec.is/page18.htm> (Pridobljeno 26.04.2013).

Černilogar, L. 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. *Gradbenik* 14, 12/01: 18-21.

de Larrard, F., Bosc, F., Catherine, C., Deflorenne, F. 1997. The AFREM method for the mix-design of high performance concrete. *Materials and Structures* 30, 201: 439-446.

de Larrard, F., Hu, C., Sedran, T., Szitkar, J. C., Joly, M., Claux, F., Derkx, F. 1997. A new rheometer for soft-to-fluid fresh concrete. *Aci Materials Journal* 94, 3: 234-243.

- Erdem, T. K., Khayat, K. H., Yahia, A. 2009. Correlating Rheology of Self-Consolidating Concrete to Corresponding Concrete-Equivalent Mortar. *Aci Materials Journal* 106, 2: 154-160.
- Faroug, Fouad, Szwabowski, Janusz 1999. Influence of Superplasticizers on Workability of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 11, 2: 151.
- FCT-101. 2013. FCT-101.  
<http://www.novanna.co.uk/fct-101-test-freshly-mixed-concrete> (Pridobljeno 25.04.2013).
- Ferguson, J., Kembrowski, Z. 1991. Applied fluid rheology. Essex, Elsevier science publishers LTD: 340 str.
- Ferraris, C. F. 1999. Measurement of the rheological properties of high performance concrete; State of the art report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 104, 5: 461-478.
- Ferraris, C. F., Brower, L. E. 2001. Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC (Nantes, France) in October, 2000, NIST: 157 str.
- Ferraris, C. F., Brower, L. E. 2004. Comparison of concrete rheometers: International tests at MB (Cleveland OH, USA) in May, 2003, NIST: 116 str.
- Ferraris, C. F., de Larrard, F. 1998. Testing and modelling of fresh concrete rheology, NIST: 71 str.
- Ferraris, C. F., Gaidis, J. M. 1992. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. *Aci Materials Journal* 89, 4: 388-393.
- Ferraris, C. F., Geiker, M., Martys, N. S., Muzzatti, N. 2007. Parallel-plate rheometer calibration using oil and computer simulation. *Journal of Advanced Concrete Technology* 5, 3: 363-371.
- Ferraris, C. F., Martys, N. S. 2003. Relating fresh concrete viscosity measurements from different rheometers. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 108, 3: 229-234.
- Feys, D., Heirman, G., De Schutter, G., Verhoeven, R., Vandewalle, L., Van Gemert, D. 2007a. Comparison of two concrete rheometers for shear thickening behaviour of SCC. V: De Schutter, G. (ur.), Boel, V. (ur.). Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete - SCC 2007, Ghent, Belgium, 03.-05.09.2007. RILEM Publications SARL: p. 365-370.
- Feys, D., Verhoeven, R., De Schutter, G. 2007b. Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete. *Applied Rheology* 17, 5, 56244: 1-10.
- Geiker, Mette R., Brandl, Mari, Thrane, Lars N., Bager, Dirch H., Wallevik, Olafur 2002. The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 32, 11: 1791-1795.
- Ghanbari, A., Karihaloo, B. L. 2009. Prediction of the plastic viscosity of self-compacting steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research* 39, 12: 1209-1216.
- Ghezal, A., Khayat, K. H. 2002. Optimizing self-consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods. *Aci Materials Journal* 99, 3: 264-272.
- Hackley, V.A., Ferraris, C. F. 2001. Use of Nomenclature in Dispersion Science and Technology. Washington, National Institute of Standards and Technology: 72 str.
- Hays, W.L. 1994. Statistics. Fort Worth, Harcourt Brace College Publishers: 1112 str.

Hendrickx, R., Van Balen, K., Van Gemert, D. 2009. Yield stress measurement of mortar using geotechnical techniques. V: Wallevik, O.H. (ur.), Kubens, S. (ur.), Oesterheld, S. (ur.). 3rd international RILEM symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete, Reykjavik, Iceland, 19-21 August 2009. RILEM: p. 273-282.

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

Hočevar, A., Kavčič, F., Bokan Bosiljkov, V. 2011. Zanesljivost reoloških meritev svežih malt in betonov. V: Konferenca "Beton v arhitekturi", Lipica, Slovenija, 7.-8. april 2011. ZBS: p. 162-169.

Hu, C., De Larrard, F., Gjørv, O. E. 1995. Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete. *Materials and Structures* 28, 175: 1-7.

Jau, Wen-Chen, Yang, Ching-Ting 2010. Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes. *Cement and Concrete Composites* 32, 6: 450-460.

Jurjavčič, P., Mladenovič, A., Cotič, Z. 2013. Priročnik za uporabo agregata iz jeklarske žindre iz elektroobločnih peči v asfaltnih obrabnih plasteh, ReBirth, Konzorcij projekta: 34 str.

Khayat, K. H. 1998. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - An overview. *Cement & Concrete Composites* 20, 2-3: 171-188.

Khayat, K. H., Omran, A. F., Naji, S., Billberg, P., Yahia, A. 2012. Field-oriented test methods to evaluate structural build-up at rest of flowable mortar and concrete. *Materials and Structures* 45, 10: 1547-1564.

Koehler, E. P., Fowler, D.W. 2005. A portable rheometer for self consolidating concrete. V: Shah, S. P. Combining the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete - SCC 2005, Chicago, Illinois, 30.10.-02.11.2005. RILEM Publications SARL: p. 693-700.

Koehler, E. P., Fowler, D.W., Ferraris, C. F., Amziane, S. 2006. A new, portable rheometer for fresh self-consolidating concrete. V: Shi, C. (ur.), Khayat, K. H. (ur.). Workability of SCC: Roles of Its Constituents and Measurement Techniques. Proceedings of a meeting held at the ACI Spring 2005 Convention, New York, ZDA, 17.-20.04.2005. ACI: p. 97-116.

Koehler, E.P., Fowler, D.W. 2003. Summary of Concrete Workability Test Methods, ICAR report 105-1. Austin, ICAR: 92 str.

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

Koehler, E.P., Fowler, D.W. 2006. Development and Use of a Portable Rheometer for Concrete. V: Malhotra, V. M. (ur.). Supplementary Proceedings of the Eighth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Montreal, Canada, 31.05-03.06.2006. ACI: p. 53-72.

Koehler, E.P., Fowler, D.W. 2007. Aggregates in self-consolidating concrete, ICAR report 108-2F. Austin, ICAR: 362 str.

Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. 2002. Design and control of concrete mixtures. USA, Portland cement association: 371 str.

Košmelj, K. 2007. Uporabna statistika, 2. dopolnjena izdaja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta: 239 str. [http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2721/Uporabna\\_statistika\\_okt\\_2007/Uporabna\\_statistika\\_01.pdf](http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2721/Uporabna_statistika_okt_2007/Uporabna_statistika_01.pdf) (Pridobljeno 14.05.2013).

Lane, D.M. 2007. HyperStat Online Statistics Textbook. <http://davidmlane.com/hyperstat/index.html> (Pridobljeno 24.02.2011).

Laskar, A. I. 2009. Correlating Slump, Slump Flow, Vebe and Flow Tests to Rheological Parameters of High-Performance Concrete. Materials Research-Ibero-American Journal of Materials 12, 1: 75-81.

Macosko, C.W. 1994. Rheology: Principles, Measurements, and Applications. New York, Wiley-VCH, Inc.: 568 str.

Murata, J., Kukawa, H. 1992. Viscosity equation for fresh concrete. Aci Materials Journal 89, 3: 230-237.

Nachbaur, I., Kaplan, D., Marchese, G. 2003. . V: Malhotra, V. M. (ur.). 7th CANMET/ACI International Conference on super-plasticizers and other chemical admixtures in concrete, Supplementary papers, Berlin, Germany, 20.-24.10.2003. ACI: p. 333-339.

Nehdi, M., Rahman, M.A. 2004. Effect of geometry and surface friction of test accessory on oscillatory rheological properties of cement pastes. Aci Materials Journal 101, 5: 416-424.

Nguyen, T. L. H., Roussel, N., Coussot, P. 2006. Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid. Cement and Concrete Research 36, 10: 1789-1796.

Nilsson, J., Sargenius, P. 2011. Effect of microfibrillar cellulose on concrete equivalent mortar fresh and hardened properties. Stockholm: 107 str.

Petit, Jean-Yves, Wirquin, Eric, Vanhove, Yannick, Khayat, Kamal 2007. Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete. Cement and Concrete Research 37, 5: 655-670.

Quiroga, P., Fowler, D.W. 2004. The effects of aggregates characteristics on the performance of portland cement concrete, ICAR: 382 str.

Roussel, N. 2007. The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC. Materials and Structures 40, 9: 889-896.

Roussel, N., Stefani, C., Leroy, R. 2005. From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests. Cement and Concrete Research 35, 5: 817-822.

Rubio-Hernández, F. J., Velázquez-Navarro, J. F., Ordóñez-Belloc, L. M. 2013. Rheology of concrete: a study case based upon the use of the concrete equivalent mortar. Materials and Structures 46, 4: 587-605.

Saak, A. W., Jennings, H. M., Shah, S. P. 2004. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. Cement and Concrete Research 34, 3: 363-371.

Sahmaran, M., Ozkan, N., Keskin, S. B., Uzal, B., Yaman, I. O., Erdem, T. K. 2008. Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts. Cement and Concrete Research 38, 7: 930-937.

Sanchez, L., Cesar, R.O.R, Santos, D.A., John, V.M., Pileggi, R.G. 2009. Rheological characterization of self compacting concrete – a critical analysis. V: Wallevik, O.H. (ur.), Kubens, S. (ur.), Oesterheld, S. (ur.). 3rd international RILEM symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete, Reykjavik, Iceland, 19.-21.08.2009. RILEM: p. 79-87.

Schleibinger. 2013a. eBT2.

[http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%20BT\\_-\\_SCC\\_Rheometer\\_for\\_Fresh\\_Concrete](http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%20BT_-_SCC_Rheometer_for_Fresh_Concrete) (Pridobljeno 26.04.2013).

Schleibinger. 2013b. Viscomat NT.

[http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%20Viskomat\\_NT\\_-\\_Rheometer\\_f\\_Mortar\\_and\\_Paste](http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%20Viskomat_NT_-_Rheometer_f_Mortar_and_Paste) (Pridobljeno 26.04.2013).

Schleibinger. 2013c. Viscomat XL.

[http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%20Viskomat\\_XL\\_-\\_Rheometer\\_for\\_Mortar\\_and\\_Fresh\\_Concrete](http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%20Viskomat_XL_-_Rheometer_for_Mortar_and_Fresh_Concrete) (Pridobljeno 26.04.2013).

Schramm, G. 2000. A Practical Approach to Rheology and Rheometry. Karlsruhe, Gebrueder HAAKE GmbH.

Schwartzentruber, A., Catherine, C. 2000. Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - A new tool to design concrete containing admixture. *Materials and Structures* 33, 232: 475-482.

SIST 2008. SIST 1026:2008. Beton – 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206-1 (revidirana izdaja). SIST.

Smith, M.R. 1999. Stone: Building Stone, Rock Fill and Armourstone in Construction (Geological Society Engineering Geology Special Publication, 16). London, The Geological Society: 478 str.

Spiratos, N., Page, M., Mailvaganam, N.P., Malhotra, V. M., Jolicoeur, C. 2003. Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology, and practice. Ottawa, Ontario, Supplementary cementing materials for sustainable development, Inc.: 336 str.

Struble, L., Sun, G.K. 1995. Viscosity of Portland cement paste as a function of concentration. *Advanced Cement Based Materials* 2, 2: 62-69.

Štupar, B. 2012. Vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti malt. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Štupar): 64 str.

Tattersall, G. H., Banfill, P. F. G. 1983. *The rheology of fresh concrete*. Boston, London, Melbourne, Pitman: 356 str.

Trtnik, G. 2009. Uporaba ultrazvočne metode za analizo vezanja in strjevanja betona. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo (samozaložba G.Trtnik): 152 str.

Turanli, L., Uzal, B., Bektas, F. 2004. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research* 34, 12: 2277-2282.

Turk, Goran. 2012. Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 264 str.



- Tušar, L., Tušar, M., Leskovšek, N. 1995. A comparative study of polynomial and neural network modelling for the optimisation of clear coat formulations. *Surface coatings international* 78, 10: 427-435.
- Uzal, B., Turanli, L. 2003. Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research* 33, 11: 1777-1781.
- Uzal, B., Turanli, L. 2012. Blended cements containing high volume of natural zeolites: Properties, hydration and paste microstructure. *Cement & Concrete Composites* 34, 1: 101-109.
- Vikan, H. 2005. Rheology and reactivity of cementitious binders with plasticizers. Trondheim, The Norwegian university of science and technology: 333 str.
- Vogel, R. 2008. New device for rheological measurements a measuring cell for special mortars. *BFT International* 2008, 01: 124-126.
- vom Berg, W. 1979. Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behavior of cement pastes. *Magazine of concrete research* 31, 109: 211-216.
- Wallevik, J.E. 2003a. Computational rheology thixotropic explorations of cement pastes; an introduction. V: Wallevik, O.H. (ur.), Nielson, I. (ur.). 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 17.-20.08.2003. RILEM: p. 41-48.
- Wallevik, J.E. 2003b. Rheology of particle suspensions, fresh concrete, mortar, and cement paste with various lignosulfonates. Trondheim, The Norwegian university of science and technology: 413 str.
- Wallevik, J.E. 2009a. Development of Parallel Plate-Based Measuring System for the ConTec Viscometer. V: Wallevik, O.H. (ur.), Kubens, S. (ur.), Oesterheld, S. (ur.). 3rd international RILEM symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete, Reykjavik, Iceland, 19.-21.08.2009. RILEM: p. 18-24.
- Wallevik, Jon Elvar 2006. Relationship between the Bingham parameters and slump. *Cement and Concrete Research* 36, 7: 1214-1221.
- Wallevik, O.H. 2009b. Introduction to rheology of fresh concrete. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219 str.
- Whorlow, R. W. 1992. Rheological techniques, Second edition. New York, Ellis Horwood: 460 str.
- Wong, G.S., Alexander, A.M., Haskings, R., Poole, T.S., Malone, P.G., Wakeley, L. 2001. Portland-cement concrete rheology and workability final report. McLean, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration: 117 str.
- Yamasaki, H., Kitsutaka, Y., Mita, N. 2009. Fundamental study on evaluation method of rheological properties of cement mortar using the inclined blades rotational rheometer. V: Wallevik, O.H. (ur.), Kubens, S. (ur.), Oesterheld, S. (ur.). 3rd international RILEM symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete, Reykjavik, Iceland, 19.-21.08.2009. RILEM: p. 291-300.
- Yen, T., Tang, C.W., Chang, C.S., Chen, K.H. 1999. Flow behaviour of high strength high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites* 21, 5-6: 413-424.
- Zevnik, L. 2012. Rheology of SCC mortar with different superplasticizer - Introduction to polyphosphonic superplasticizer. V: Greim, M. (ur.), Kusterle, W. (ur.). 21. Conference "Rheology of building materials", Regensburg, Germany, 06.-07.03.2013. Schleichinger: p. 25.

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

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

## PRILOGE

- PRILOGA A: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO CONTEC VISCOMETER 5 NA OBIČAJNIH BETONIH
- PRILOGA B: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO CONTEC VISCOMETER 5 NA MALTAH EKVIVALENTNIH OBIČAJNEMU BETONU
- PRILOGA C: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO ICAR RHEOMETER NA OBIČAJNIH BETONIH
- PRILOGA D: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO ICAR RHEOMETER NA MALTAH EKVIVALENTNIH OBIČAJNEMU BETONU
- PRILOGA E: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO CONTEC VISCOMETER 5 NA BETONIH SCC
- PRILOGA F: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO CONTEC VISCOMETER 5 NA MALTAH EKVIVALENTNIH BETONU SCC
- PRILOGA G: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO ICAR RHEOMETER NA BETONIH SCC
- PRILOGA H: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO ICAR RHEOMETER NA MALTAH EKVIVALENTNIH BETONU SCC
- PRILOGA I: GRAFIKONI »MEŠANICA ZA MEŠANICO« IN ČASOVNE PRIMERJAVE MED BETONOM IN NJEMU EKVIVALENTNO MALTO

**PRILOGA A: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO CONTEC VISCOMETER 5  
NA OBIČAJNIH BETONIH**

Preglednica A.1: Rezultati mešanic s superplastifikatorjem 1 in CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R.

Mešanica		CR1				CR1A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	580,0	-	-	-	352,4	410,2	548,4	717,3
	2	-	-	-	-	-	-	530,3	379,9
	3	-	-	-	-	-	-	590,1	653,4
	<b>Povp.</b>	<b>580,0</b>	-	-	-	<b>352,4</b>	<b>410,2</b>	<b>556,3</b>	<b>583,5</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	65,6	-	-	-	42,5	54,7	54,4	47,9
	2	-	-	-	-	-	-	55,5	38,8
	3	-	-	-	-	-	-	45,3	51,0
	<b>Povp.</b>	<b>65,6</b>	-	-	-	<b>42,5</b>	<b>54,7</b>	<b>51,7</b>	<b>45,9</b>
<b>Posed [mm]</b>		70	-	-	-	150	-	105	75
<b>Razlez [mm]</b>		410	-	-	-	500	-	470	460
Mešanica		CR1B				CR1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	202,9	270,4	359,3	409,0	32,4	66,8	128,1	140,5
	2	205,1	280,0	344,4	433,8	43,2	75,8	108,8	167,2
	3	225,0	295,4	392,3	393,9	44,9	65,8	116,0	155,7
	<b>Povp.</b>	<b>211,0</b>	<b>281,9</b>	<b>365,4</b>	<b>412,2</b>	<b>40,2</b>	<b>69,5</b>	<b>117,7</b>	<b>154,4</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	30,5	38,4	43,2	50,6	13,2	16,7	17,8	27,9
	2	30,3	38,0	44,9	43,8	13,8	16,2	22,0	25,0
	3	31,9	36,1	38,4	53,3	13,4	18,2	20,0	28,1
	<b>Povp.</b>	<b>30,9</b>	<b>37,5</b>	<b>42,2</b>	<b>49,2</b>	<b>13,5</b>	<b>17,0</b>	<b>19,9</b>	<b>27,0</b>
<b>Posed [mm]</b>		225	170	145	120	240	240	240	210
<b>Razlez [mm]</b>		540	490	480	480	670	660	595	590

Preglednica A.2: Rezultati mešanic s superplastifikatorjem 1 in CEM I 42.5 R.

Mešanica		CL1				CL1A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	511,9	550,8	649,1	755,4	343,2	483,2	600,3	691,6
	2	479,9	528,6	596,2	842,3	360,9	547,9	608,2	724,1
	3	473,7	532,1	595,3	808,4	391,0	508,5	634,3	706,5
	Povp.	<b>488,5</b>	<b>537,2</b>	<b>613,5</b>	<b>802,0</b>	<b>365,0</b>	<b>513,2</b>	<b>614,3</b>	<b>707,4</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	68,8	59,9	58,4	79,3	43,1	55,7	63,8	62,4
	2	61,5	60,8	51,3	50,9	50,5	47,3	57,6	54,7
	3	53,6	63,0	50,9	57,0	47,6	49,3	48,7	60,5
	Povp.	<b>61,3</b>	<b>61,3</b>	<b>53,5</b>	<b>62,4</b>	<b>47,1</b>	<b>50,8</b>	<b>56,7</b>	<b>59,2</b>
Posed [mm]		110	110	90	55	150	90	70	45
Razlez [mm]		430	460	435	410	470	420	400	380
Mešanica		CL1B				CL1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	174,6	295,7	408,8	503,6	150,0	214,8	259,1	345,8
	2	200,6	313,8	402,2	546,1	127,5	225,0	283,0	381,7
	3	206,6	322,5	397,5	506,8	144,0	221,4	323,5	360,8
	Povp.	<b>193,9</b>	<b>310,6</b>	<b>402,9</b>	<b>518,8</b>	<b>140,5</b>	<b>220,4</b>	<b>288,5</b>	<b>362,8</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	31,6	46,2	52,7	61,1	24,6	31,7	35,0	45,4
	2	31,2	39,5	53,7	58,0	27,0	31,7	38,0	39,5
	3	30,7	41,5	48,7	58,6	27,9	36,9	35,5	40,6
	Povp.	<b>31,1</b>	<b>42,4</b>	<b>51,7</b>	<b>59,2</b>	<b>26,5</b>	<b>33,5</b>	<b>36,1</b>	<b>41,8</b>
Posed [mm]		165	120	120	95	190	180	160	110
Razlez [mm]		510	480	440	390	545	490	475	430

Preglednica A.3: Rezultati mešanic z aerantom.

Mešanica		CRA1A				CRA1B				CRA1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	205,8	360,4	436,0	546,1	120,8	211,0	277,0	319,6	151,9	270,7	355,4	484,0
	2	241,1	383,4	455,6	563,8	145,8	219,4	271,1	310,1	181,8	276,0	368,2	451,1
	3	247,7	374,1	440,1	576,6	142,0	238,2	285,4	330,9	209,9	289,5	362,5	462,3
	Povp.	<b>231,5</b>	<b>372,6</b>	<b>443,9</b>	<b>562,2</b>	<b>136,2</b>	<b>222,9</b>	<b>277,8</b>	<b>320,2</b>	<b>181,2</b>	<b>278,8</b>	<b>362,0</b>	<b>465,8</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	28,0	38,8	39,7	38,7	22,7	23,3	24,4	29,0	23,7	28,0	33,3	33,8
	2	31,7	34,7	37,3	37,5	23,7	22,1	23,2	26,0	24,7	26,9	29,3	39,2
	3	34,5	35,0	39,5	37,5	24,2	18,9	22,6	23,2	24,4	25,2	32,0	37,6
	Povp.	<b>31,4</b>	<b>36,2</b>	<b>38,8</b>	<b>37,9</b>	<b>23,5</b>	<b>21,5</b>	<b>23,4</b>	<b>26,0</b>	<b>24,3</b>	<b>26,7</b>	<b>31,5</b>	<b>36,9</b>
Posed [mm]		100	130	90	75	165	170	160	150	165	160	145	100
Razlez [mm]		400	440	430	390	580	520	500	465	520	510	480	505

Preglednica A.4: Rezultati mešanic s stabilizatorjem.

Mešanica		CG1A				CG1B				CG1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	196,1	207,2	176,2	227,5	230,3	217,1	241,9	232,6	254,8	296,9	259,1	280,1
	2	204,9	181,9	176,2	208,5	199,1	212,4	198,2	234,7	286,4	259,5	244,2	234,4
	3	180,9	184,8	171,8	197,9	215,0	214,5	226,3	220,0	259,5	225,1	266,1	254,8
	Povp.	<b>194,0</b>	<b>191,3</b>	<b>174,7</b>	<b>211,3</b>	<b>214,8</b>	<b>214,6</b>	<b>222,1</b>	<b>229,1</b>	<b>266,9</b>	<b>260,5</b>	<b>256,5</b>	<b>256,4</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	27,8	31,9	32,6	28,4	26,8	31,0	26,1	28,4	35,5	34,3	35,0	35,5
	2	25,9	31,3	28,8	31,7	27,7	29,3	29,5	27,3	32,9	32,3	33,9	35,9
	3	26,6	28,6	29,4	31,7	22,0	26,0	22,5	29,1	32,6	37,4	29,8	31,8
	Povp.	<b>26,8</b>	<b>30,6</b>	<b>30,3</b>	<b>30,6</b>	<b>25,5</b>	<b>28,8</b>	<b>26,0</b>	<b>28,3</b>	<b>33,7</b>	<b>34,7</b>	<b>32,9</b>	<b>34,4</b>
Posed [mm]		190	190	185	185	185	190	180	170	175	185	170	165
Razlez [mm]		530	535	530	520	500	530	515	505	475	510	505	520

Preglednica A.5: Rezultati mešanic z različnimi V/C razmerji.

Mešanica		CV1A				CV1B				CV1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	340,3	391,4	383,5	448,2	264,1	264,1	262,3	324,7	108,6	135,2	151,3	187,4
	2	304,4	359,4	390,1	451,5	233,0	252,8	251,8	313,4	122,9	140,9	138,5	209,3
	3	298,2	358,5	391,9	441,0	209,9	249,3	262,0	331,3	132,0	133,5	174,6	218,0
	Povp.	<b>314,3</b>	<b>369,8</b>	<b>388,5</b>	<b>446,9</b>	<b>235,6</b>	<b>255,4</b>	<b>258,7</b>	<b>323,1</b>	<b>121,1</b>	<b>136,5</b>	<b>154,8</b>	<b>204,9</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	48,0	47,9	49,7	59,4	43,5	39,6	39,7	41,3	21,5	25,7	29,4	33,4
	2	44,8	45,0	45,8	57,8	39,4	38,5	38,5	44,3	20,5	27,0	29,1	29,1
	3	44,3	45,0	42,6	51,5	39,7	36,6	36,3	42,2	21,6	26,4	25,5	25,8
	Povp.	<b>45,7</b>	<b>45,9</b>	<b>46,0</b>	<b>56,3</b>	<b>40,9</b>	<b>38,2</b>	<b>38,2</b>	<b>42,6</b>	<b>21,2</b>	<b>26,4</b>	<b>28,0</b>	<b>29,4</b>
Posed [mm]		160	115	90	75	160	155	140	105	210	200	195	155
Razlez [mm]		480	480	460	430	485	480	480	470	545	525	515	510

Preglednica A.6: Rezultati mešanic z različnimi količinami žlindre.

Mešanica		CZ1A				CZ1B				CZ1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	173,5	255,8	355,0	424,3	168,5	194,1	361,4	431,5	118,2	200,6	231,6	297,6
	2	166,3	224,5	321,8	421,1	194,2	199,4	329,1	427,8	146,7	195,9	232,8	323,3
	3	171,6	225,6	383,0	423,5	187,6	211,2	388,5	430,7	158,1	228,9	251,4	-
	Povp.	<b>170,4</b>	<b>235,3</b>	<b>353,3</b>	<b>423,0</b>	<b>183,4</b>	<b>201,6</b>	<b>359,7</b>	<b>430,0</b>	<b>141,0</b>	<b>208,5</b>	<b>238,6</b>	<b>310,4</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	38,7	45,8	54,5	58,0	40,1	39,8	54,1	57,6	35,2	40,5	44,8	49,9
	2	39,4	51,4	56,4	61,8	43,2	43,6	56,0	61,6	37,6	46,0	58,6	53,2
	3	37,6	47,0	45,9	57,1	43,2	45,5	45,7	56,7	36,1	40,9	48,7	-
	Povp.	<b>38,6</b>	<b>48,1</b>	<b>52,3</b>	<b>59,0</b>	<b>42,1</b>	<b>43,0</b>	<b>51,9</b>	<b>58,6</b>	<b>36,3</b>	<b>42,5</b>	<b>50,7</b>	<b>51,6</b>
Posed [mm]		180	160	125	100	170	160	135	95	190	170	155	115
Razlez [mm]		535	510	485	400	525	520	510	450	545	510	490	500

Preglednica A.7: Rezultati mešanic z različnimi količinami mikro silike.

Mešanica		CM1A				CM1B				CM1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	324,4	467,2	502,0	694,0	559,9	621,2	819,9	834,0	195,4	256,1	360,5	516,6
	2	340,4	458,3	553,7	793,9	597,1	629,5	794,8	927,3	201,3	246,4	355,0	535,4
	3	348,2	436,9	533,9	808,7	-	580,9	731,1	892,7	166,5	296,5	344,6	566,1
	Povp.	<b>337,7</b>	<b>454,1</b>	<b>529,9</b>	<b>765,5</b>	<b>578,5</b>	<b>610,5</b>	<b>781,9</b>	<b>884,6</b>	<b>187,7</b>	<b>266,4</b>	<b>353,4</b>	<b>539,4</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	46,4	45,1	54,7	62,3	44,4	49,1	59,3	61,9	46,9	53,1	58,9	62,8
	2	46,9	47,1	42,5	60,2	46,9	50,8	55,4	46,3	48,3	54,9	53,9	60,8
	3	41,0	51,7	50,7	57,4	-	54,0	58,4	44,3	46,4	49,2	58,3	55,4
	Povp.	<b>44,8</b>	<b>48,0</b>	<b>49,3</b>	<b>60,0</b>	<b>45,7</b>	<b>51,3</b>	<b>57,7</b>	<b>50,8</b>	<b>47,2</b>	<b>52,4</b>	<b>57,0</b>	<b>59,7</b>
Posed [mm]		110	105	95	65	87	65	60	50	150	110	95	85
Razlez [mm]		465	440	415	395	430	420	380	365	490	470	445	425

Preglednica A.8: Rezultati mešanic z različnimi količinami tufa.

Mešanica		CT1A				CT1B				CT1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	193,9	359,1	505,3	743,6	881,4	1216,3	-	-	38,8	151,0	187,9	337,8
	2	187,3	403,6	571,0	764,5	-	1121,7	-	-	57,7	171,9	187,0	310,9
	3	228,4	422,9	568,6	724,9	-	-	-	-	76,5	143,0	214,8	323,2
	Povp.	<b>203,2</b>	<b>395,2</b>	<b>548,3</b>	<b>744,3</b>	<b>881,4</b>	<b>1169,0</b>	-	-	<b>57,7</b>	<b>155,3</b>	<b>196,5</b>	<b>324,0</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	29,6	51,3	49,1	53,8	54,7	36,8	-	-	35,0	42,0	52,3	56,6
	2	40,2	44,9	46,1	47,0		48,2	-	-	32,0	40,9	53,5	67,7
	3	37,5	51,9	53,8	52,7			-	-	31,0	43,5	48,7	63,6
	Povp.	<b>35,7</b>	<b>49,4</b>	<b>49,7</b>	<b>51,2</b>	<b>54,7</b>	<b>42,5</b>	-	-	<b>32,7</b>	<b>42,1</b>	<b>51,5</b>	<b>62,6</b>
Posed [mm]		170	130	95	70	50	30	-	-	250	200	165	115
Razlez [mm]		485	445	430	390	370	315	-	-	635	500	450	440



»Ta stran je namenoma prazna«

**PRILOGA B: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO CONTEC VISCOMETER 5  
NA MALTAH EKVIVALENTNIH OBČAJNEMU BETONU**

Preglednica B.1: Rezultati mešanic s superplastifikatorjem 1 in CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R.

Mešanica		MR1				MR1A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	309,4	333,8	354,2	369,9	168,1	208,8	219,7	244,3
	2	300,6	321,0	343,1	364,2	168,4	205,1	215,4	246,5
	3	290,2	319,2	340,4	359,9	173,2	199,0	209,3	249,7
	<b>Povp.</b>	<b>300,1</b>	<b>324,7</b>	<b>345,9</b>	<b>364,7</b>	<b>169,9</b>	<b>204,3</b>	<b>214,8</b>	<b>246,8</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	9,9	10,1	9,1	8,9	7,5	8,3	7,9	8,3
	2	10,1	9,5	8,9	8,7	7,5	7,7	7,5	8,1
	3	9,5	8,7	8,4	8,5	6,6	7,4	7,3	8,0
	<b>Povp.</b>	<b>9,8</b>	<b>9,4</b>	<b>8,8</b>	<b>8,7</b>	<b>7,2</b>	<b>7,8</b>	<b>7,6</b>	<b>8,1</b>
<b>Raz. s posed. [mm]</b>		110	110	110	110	125	120	116	115
<b>Razlez [mm]</b>		200	200	195	190	220	205	220	205
Mešanica		MR1B				MR1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	96,4	120,6	158,1	181,7	15,9	24,5	32,8	36,3
	2	96,9	123,7	159,7	181,7	17,5	22,6	31,4	40,9
	3	117,1	156,2	184,8		17,0	25,3	29,4	39,5
	<b>Povp.</b>	<b>103,5</b>	<b>133,5</b>	<b>167,5</b>	<b>181,7</b>	<b>16,8</b>	<b>24,1</b>	<b>31,2</b>	<b>38,9</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	7,3	6,9	7,4	7,7	3,3	4,3	4,2	5,2
	2	7,1	7,0	7,1	7,3	3,6	4,6	3,9	4,7
	3	6,9	7,9	7,5		3,8	4,8	4,4	4,9
	<b>Povp.</b>	<b>7,1</b>	<b>7,3</b>	<b>7,3</b>	<b>7,5</b>	<b>3,6</b>	<b>4,6</b>	<b>4,2</b>	<b>4,9</b>
<b>Raz. s posed. [mm]</b>		175	155	140	135	260	245	230	210
<b>Razlez [mm]</b>		270	255	230	220	320	310	300	290

Preglednica B.2: Rezultati mešanic s superplastifikatorjem 1 in CEM I 42.5 R.

Mešanica		ML1				ML1A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	259,7	295,3	306,9	316,1	177,9	207,7	219,6	251,6
	2	256,0	284,7	299,3	302,4	183,5	208,9	219,8	250,0
	3	247,6	275,0	298,7	302,9	172,8	204,3	209,5	245,7
	Povp.	<b>254,5</b>	<b>285,0</b>	<b>301,7</b>	<b>307,1</b>	<b>178,1</b>	<b>207,0</b>	<b>216,3</b>	<b>249,1</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	8,8	9,4	8,1	7,8	9,1	8,4	7,6	8,1
	2	8,9	8,8	8,1	8,3	8,6	8,5	7,5	7,8
	3	8,2	8,4	7,8	7,6	8,3	7,8	7,2	7,6
	Povp.	<b>8,6</b>	<b>8,9</b>	<b>8,0</b>	<b>7,9</b>	<b>8,7</b>	<b>8,2</b>	<b>7,4</b>	<b>7,8</b>
Raz. s posed. [mm]		105	115	111	110	110	125	115	120
Razlez [mm]		200	215	210	205	215	220	225	220
Mešanica		ML1B				ML1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	73,2	122,9	143,1	174,9	32,2	45,5	60,0	88,4
	2	76,2	125,8	150,1	178,6	32,2	44,9	64,0	91,8
	3	79,2	125,9	152,8	181,0	28,4	45,2	67,1	89,1
	Povp.	<b>76,2</b>	<b>124,9</b>	<b>148,6</b>	<b>178,2</b>	<b>31,0</b>	<b>45,2</b>	<b>63,7</b>	<b>89,8</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	7,4	8,5	8,2	8,1	5,6	7,1	7,8	7,7
	2	7,7	8,1	7,6	7,7	5,2	6,5	7,4	7,4
	3	7,6	7,9	7,3	7,7	5,8	6,5	6,9	7,4
	Povp.	<b>7,6</b>	<b>8,2</b>	<b>7,7</b>	<b>7,8</b>	<b>5,5</b>	<b>6,7</b>	<b>7,4</b>	<b>7,5</b>
Raz. s posed. [mm]		175	155	145	140	240	235	195	185
Razlez [mm]		275	250	250	240	315	315	280	280

Preglednica B.3: Rezultati mešanic z aerantom.

Mešanica		MRA1A				MRA1B				MRA1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	182,3	259,2	314,5	347,5	203,0	260,6	320,0	381,2	188,8	255,0	296,7	337,1
	2	190,2	252,0	302,9	335,9	206,6	260,8	314,1	386,4	189,0	245,3	291,5	325,7
	3	198,7	249,3	302,1	334,4	207,2	254,2	309,2	376,8	191,6	240,0	286,6	319,1
	Povp.	<b>190,4</b>	<b>253,5</b>	<b>306,5</b>	<b>339,3</b>	<b>205,6</b>	<b>258,5</b>	<b>314,5</b>	<b>381,5</b>	<b>189,8</b>	<b>246,8</b>	<b>291,6</b>	<b>327,3</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	6,8	7,8	8,0	7,6	5,8	5,7	5,2	5,9	6,6	7,3	6,6	6,9
	2	6,6	7,2	7,8	7,9	5,3	5,4	5,9	5,6	6,3	6,9	6,7	6,8
	3	6,3	6,6	7,1	7,4	4,9	5,4	5,3	5,1	6,3	6,5	6,2	6,3
	Povp.	<b>6,5</b>	<b>7,2</b>	<b>7,7</b>	<b>7,6</b>	<b>5,3</b>	<b>5,5</b>	<b>5,5</b>	<b>5,5</b>	<b>6,4</b>	<b>6,9</b>	<b>6,5</b>	<b>6,7</b>
Raz. s posed. [mm]		115	115	110	110	125	120	115	115	115	120	115	115
Razlez [mm]		220	215	210	205	230	220	215	210	220	215	210	205

Preglednica B.4: Rezultati mešanic s stabilizatorjem.

Mešanica		MG1A				MG1B				MG1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	157,3	133,0	126,4	123,1	221,2	181,0	160,2	162,1	281,5	236,3	195,7	164,4
	2	141,4	124,7	114,0	112,6	193,6	166,8	151,7	146,1	256,8	212,1	180,6	154,8
	3	133,0	120,6	110,8	110,5	179,8	159,9	139,8	137,0	236,9	198,0	170,2	146,5
	Povp.	<b>143,9</b>	<b>126,1</b>	<b>117,1</b>	<b>115,4</b>	<b>198,2</b>	<b>169,2</b>	<b>150,5</b>	<b>148,4</b>	<b>258,4</b>	<b>215,5</b>	<b>182,2</b>	<b>155,3</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	5,1	4,0	3,0	3,1	6,7	4,6	3,8	3,6	11,1	6,6	4,5	3,6
	2	4,1	3,5	3,0	3,2	5,7	4,4	3,5	3,4	7,6	5,6	4,3	3,5
	3	3,6	3,0	2,6	2,6	5,3	3,8	3,4	3,3	7,4	4,8	3,5	3,2
	Povp.	<b>4,3</b>	<b>3,5</b>	<b>2,9</b>	<b>3,0</b>	<b>5,9</b>	<b>4,3</b>	<b>3,6</b>	<b>3,5</b>	<b>8,7</b>	<b>5,6</b>	<b>4,1</b>	<b>3,4</b>
Raz. s posed. [mm]		115	135	135	155	110	115	125	130	105	110	120	125
Razlez [mm]		225	245	240	255	210	235	240	245	180	170	225	235

Preglednica B.5: Rezultati mešanic z različnimi V/C razmerji.

Mešanica		MV1A				MV1B				MV1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	215,9	244,1	248,3	261,6	142,9	147,1	149,7	150,3	115,6	116,7	110,4	111,4
	2	209,1	241,1	242,5	255,4	140,0	140,3	144,4	148,5	110,8	111,7	107,2	113,8
	3	195,7	234,1	232,4	246,3	134,0	137,1	137,5	141,8	107,5	112,4	109,3	112,2
	Povp.	<b>206,9</b>	<b>239,8</b>	<b>241,1</b>	<b>254,4</b>	<b>139,0</b>	<b>141,5</b>	<b>143,9</b>	<b>146,9</b>	<b>111,3</b>	<b>113,6</b>	<b>108,9</b>	<b>112,5</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	8,8	9,5	8,7	8,1	6,4	6,2	5,5	5,3	5,4	4,8	4,0	4,3
	2	8,2	8,3	8,1	7,9	5,8	5,8	5,2	5,1	5,2	4,4	4,2	4,1
	3	7,7	7,9	8,2	7,6	5,6	5,5	5,0	4,8	4,6	3,9	3,9	3,8
	Povp.	<b>8,2</b>	<b>8,6</b>	<b>8,4</b>	<b>7,9</b>	<b>5,9</b>	<b>5,8</b>	<b>5,2</b>	<b>5,1</b>	<b>5,0</b>	<b>4,4</b>	<b>4,0</b>	<b>4,1</b>
Raz. s posed. [mm]		120	125	120	120	130	130	130	140	145	160	155	160
Razlez [mm]		220	225	220	220	230	240	240	250	260	260	260	255

Preglednica B.6: Rezultati mešanic z različnimi količinami žlindre.

Mešanica		MZ1A				MZ1B				MZ1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	64,8	83,2	102,0	126,4	40,7	75,9	103,6	122,6	25,8	49,9	72,4	87,7
	2	67,6	82,6	101,6	123,0	46,2	75,0	105,1	126,1	29,9	51,8	76,0	89,9
	3	73,1	86,5	101,9	125,4	46,3	75,4	107,7	124,4	29,8	51,2	76,6	84,9
	Povp.	<b>68,5</b>	<b>84,1</b>	<b>101,9</b>	<b>124,9</b>	<b>44,4</b>	<b>75,4</b>	<b>105,5</b>	<b>124,4</b>	<b>28,5</b>	<b>51,0</b>	<b>75,0</b>	<b>87,5</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	8,1	8,3	7,9	7,7	6,4	7,6	8,1	7,7	6,8	7,7	8,7	7,6
	2	7,2	7,2	7,0	7,5	5,7	7,1	7,4	7,1	6,0	7,1	7,9	6,9
	3	7,0	6,8	6,8	7,3	6,4	6,8	6,9	7,1	5,8	7,2	7,7	6,7
	Povp.	<b>7,4</b>	<b>7,4</b>	<b>7,2</b>	<b>7,5</b>	<b>6,2</b>	<b>7,2</b>	<b>7,4</b>	<b>7,3</b>	<b>6,2</b>	<b>7,3</b>	<b>8,1</b>	<b>7,1</b>
Raz. s posed. [mm]		170	165	155	150	190	160	150	140	215	185	155	150
Razlez [mm]		270	265	265	250	295	270	255	245	300	290	260	260

Preglednica B.7: Rezultati mešanic z različnimi količinami mikro silike.

Mešanica		MM1A				MM1B				MM1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	63,7	118,0	162,9	212,2	177,4	251,5	310,4	354,0	31,2	70,1	110,5	138,8
	2	69,6	119,1	160,2	211,5	181,1	249,4	308,1	358,3	37,1	72,5	111,5	138,9
	3	76,2	122,0	163,9	212,9	190,9	245,5	307,3	351,2	39,5	75,2	107,7	139,8
	Povp.	<b>69,8</b>	<b>119,7</b>	<b>162,3</b>	<b>212,2</b>	<b>183,1</b>	<b>248,8</b>	<b>308,6</b>	<b>354,5</b>	<b>35,9</b>	<b>72,6</b>	<b>109,9</b>	<b>139,2</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	7,4	7,3	7,8	8,2	8,2	6,9	6,2	5,8	7,8	8,2	8,6	8,6
	2	7,2	7,0	7,4	8,0	7,6	6,5	6,0	5,2	7,0	8,1	8,5	8,3
	3	7,0	6,7	6,6	7,3	7,0	6,5	5,3	5,2	7,1	7,9	8,3	8,6
	Povp.	<b>7,2</b>	<b>7,0</b>	<b>7,3</b>	<b>7,8</b>	<b>7,6</b>	<b>6,6</b>	<b>5,8</b>	<b>5,4</b>	<b>7,3</b>	<b>8,1</b>	<b>8,5</b>	<b>8,5</b>
Raz. s posed. [mm]		180	150	140	125	120	110	110	110	195	180	165	145
Razlez [mm]		265	245	235	210	215	200	195	185	285	270	255	240

Preglednica B.8: Rezultati mešanic z različnimi količinami tufa.

Mešanica		MT1A				MT1B				MT1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	28,1	70,4	111,0	159,8	179,2	498,3	747,6	801,4	20,3	31,0	43,9	52,2
	2	32,0	71,3	113,3	161,7	211,3	526,6	699,1	790,7	21,9	28,7	40,7	54,7
	3	35,9	73,1	122,1	165,4	248,0	561,6	676,3	-	26,1	27,7	37,1	55,7
	Povp.	<b>32,0</b>	<b>71,6</b>	<b>115,5</b>	<b>162,3</b>	<b>212,8</b>	<b>528,8</b>	<b>707,7</b>	<b>796,1</b>	<b>22,7</b>	<b>29,1</b>	<b>40,6</b>	<b>54,2</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	6,2	7,5	8,8	9,2	12,5	10,6	7,3	5,6	3,8	3,6	3,5	4,4
	2	6,9	7,5	8,3	9,0	11,8	8,0	8,0	5,6	4,0	4,1	3,5	3,7
	3	7,0	7,4	7,6	8,5	10,9	7,5	8,4	-	3,4	4,5	4,3	3,6
	Povp.	<b>6,7</b>	<b>7,5</b>	<b>8,2</b>	<b>8,9</b>	<b>11,7</b>	<b>8,7</b>	<b>7,9</b>	<b>5,6</b>	<b>3,7</b>	<b>4,1</b>	<b>3,7</b>	<b>3,9</b>
Raz. s posed. [mm]		220	175	150	145	120	110	105	105	285	270	250	225
Razlez [mm]		295	260	240	220	210	175	150	145	325	320	315	290

»Ta stran je namenoma prazna«

**PRILOGA C: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO ICAR RHEOMETER NA  
 OBIČAJNIH BETONIH**

Preglednica C.1: Rezultati mešanic s superplastifikatorjem 1 in CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R.

Mešanica		CR1				CR1A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	-	-	-	-	746,4	814,1	791,5	933,7
	2	-	-	-	-	-	-	777,5	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>Povp.</b>	-	-	-	-	<b>746,4</b>	<b>814,1</b>	<b>784,5</b>	<b>933,7</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	-	-	-	-	19,1	23,9	29,6	37,2
	2	-	-	-	-	-	-	35,6	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>Povp.</b>	-	-	-	-	<b>19,1</b>	<b>23,9</b>	<b>32,6</b>	<b>37,2</b>
<b>Posed [mm]</b>		70	-	-	-	150	-	105	75
<b>Razlez [mm]</b>		410	-	-	-	500	-	470	460
Mešanica		CR1B				CR1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	196,4	475,8	695,5	657,7	60,9	76,9	154,4	149,3
	2	-	481,5	560,0	750,1	74,4	113,4	199,8	193,1
	3	-	-	548,8	791,4	-	-	-	-
	<b>Povp.</b>	<b>196,4</b>	<b>478,7</b>	<b>601,4</b>	<b>733,1</b>	<b>67,7</b>	<b>95,2</b>	<b>177,1</b>	<b>171,2</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	23,6	21,8	19,9	39,9	9,7	14,2	12,9	18,9
	2	-	24,1	33,8	40,5	9,8	10,6	13,1	17,7
	3	-	-	28,8	36,4	-	-	-	-
	<b>Povp.</b>	<b>23,6</b>	<b>23,0</b>	<b>27,5</b>	<b>38,9</b>	<b>9,8</b>	<b>12,4</b>	<b>13,0</b>	<b>18,3</b>
<b>Posed [mm]</b>		225	170	145	120	240	240	240	210
<b>Razlez [mm]</b>		540	490	480	480	670	660	595	590



Preglednica C.2: Rezultati mešanic s superplastifikatorjem 1 in CEM I 42.5 R.

Mešanica		CL1				CL1A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	727,8	667,4	767,7	901,5	734,8	1004,5	1224,8	991,4
	2	656,7	827,0	888,2	888,9	540,2	1177,5	947,5	1086,4
	3		715,7			866,9	1090,2	981,7	
	Povp.	<b>692,3</b>	<b>736,7</b>	<b>828,0</b>	<b>895,2</b>	<b>714,0</b>	<b>1090,7</b>	<b>1051,3</b>	<b>1038,9</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	53,7	51,4	44,9	45,0	24,2	22,4	29,2	42,9
	2	46,9	41,2	41,9	51,7	26,1	30,3	28,5	32,0
	3		39,3			24,9	29,6	26,9	
	Povp.	<b>50,3</b>	<b>44,0</b>	<b>43,4</b>	<b>48,4</b>	<b>25,1</b>	<b>27,4</b>	<b>28,2</b>	<b>37,5</b>
Posed [mm]		110	110	90	55	150	90	70	45
Razlez [mm]		430	460	435	410	470	420	400	380
Mešanica		CL1B				CL1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	468,1	460,4	801,0	1272,4	356,4	280,1	721,8	692,9
	2	383,5	559,8	1026,0	946,2	173,4	313,5	583,5	583,8
	3	396,9	760,1	1170,0	761,6	191,2	419,3	398,2	824,5
	Povp.	<b>416,2</b>	<b>593,4</b>	<b>999,0</b>	<b>993,4</b>	<b>240,3</b>	<b>337,6</b>	<b>567,8</b>	<b>700,4</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	17,7	29,0	30,5	16,3	13,8	23,6	13,8	29,5
	2	25,1	28,3	23,0	21,6	23,7	25,8	20,2	33,7
	3	26,0	23,8	22,4	22,9	26,9	17,5	36,4	24,6
	Povp.	<b>22,9</b>	<b>27,0</b>	<b>25,3</b>	<b>20,3</b>	<b>21,5</b>	<b>22,3</b>	<b>23,5</b>	<b>29,3</b>
Posed [mm]		165	120	120	95	190	180	160	110
Razlez [mm]		510	480	440	390	545	490	475	430

Preglednica C.3: Rezultati mešanic z aerantom.

Mešanica		CRA1A				CRA1B				CRA1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	322,8	798,1	830,4	885,4	215,6	356,0	471,6	663,4	287,2	478,0	592,6	683,7
	2	431,2	604,7	697,9	891,5	185,9	371,7	484,1	679,3	339,8	479,7	526,8	759,8
	3	540,5	815,7	749,7	1040,3	220,5	359,7	520,4	633,2	337,6	462,9	675,6	972,3
	Povp.	<b>431,5</b>	<b>739,5</b>	<b>759,3</b>	<b>939,1</b>	<b>207,3</b>	<b>362,5</b>	<b>492,0</b>	<b>658,6</b>	<b>321,5</b>	<b>473,5</b>	<b>598,3</b>	<b>805,3</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	21,4	19,0	20,6	19,8	10,5	9,4	11,6	10,5	16,7	10,6	15,8	20,9
	2	21,1	24,7	25,9	36,7	18,5	11,5	10,6	11,3	19,8	10,5	19,5	17,8
	3	20,2	19,5	20,4	20,7	17,8	9,6	13,9	10,3	18,3	15,8	17,0	16,7
	Povp.	<b>20,9</b>	<b>21,1</b>	<b>22,3</b>	<b>25,7</b>	<b>15,6</b>	<b>10,2</b>	<b>12,0</b>	<b>10,7</b>	<b>18,3</b>	<b>12,3</b>	<b>17,4</b>	<b>18,5</b>
Posed [mm]		100	130	90	75	165	170	160	150	165	160	145	100
Razlez [mm]		400	440	430	390	580	520	500	465	520	510	480	505

Preglednica C.4: Rezultati mešanic s stabilizatorjem.

Mešanica		CG1A				CG1B				CG1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	351,7	304,2	368,5	323,0	453,8	396,6	412,8	470,9	522,7	412,7	434,1	516,6
	2	394,0	319,5	350,8	360,2	545,5	483,1	457,9	439,0	410,4	666,4	553,6	420,9
	3	342,6	314,4	298,8	336,9	404,1	344,1	387,9	407,9	411,9	500,3	491,9	395,2
	Povp.	<b>362,8</b>	<b>312,7</b>	<b>339,4</b>	<b>340,0</b>	<b>467,8</b>	<b>407,9</b>	<b>419,5</b>	<b>439,3</b>	<b>448,3</b>	<b>526,5</b>	<b>493,2</b>	<b>444,2</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	18,5	19,2	13,4	16,9	13,7	10,8	9,6	11,2	17,8	17,6	16,4	13,5
	2	16,4	15,6	15,4	12,1	17,6	10,3	13,0	12,1	20,9	16,8	16,1	17,6
	3	19,3	18,3	18,3	17,6	15,9	14,3	15,2	16,7	19,8	14,0	11,6	22,4
	Povp.	<b>18,1</b>	<b>17,7</b>	<b>15,7</b>	<b>15,5</b>	<b>15,7</b>	<b>11,8</b>	<b>12,6</b>	<b>13,3</b>	<b>19,5</b>	<b>16,1</b>	<b>14,7</b>	<b>17,8</b>
Posed [mm]		190	190	185	185	185	190	180	170	175	185	170	165
Razlez [mm]		530	535	530	520	500	530	515	505	475	510	505	520

Preglednica C.5: Rezultati mešanic z različnimi V/C razmerji.

Mešanica		CV1A				CV1B				CV1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	462,2	547,1	805,5	717,5	423,3	453,7	493,6	592,4	207,6	235,2	380,7	271,5
	2	474,8	742,2	677,5	804,7	420,5	429,7	597,2	504,2	267,8	240,7	255,0	344,4
	3	569,8	514,8	756,0	942,2	369,3	373,1	510,5	581,8	213,1	216,2	221,8	263,3
	Povp.	<b>502,3</b>	<b>601,4</b>	<b>746,3</b>	<b>821,5</b>	<b>404,4</b>	<b>418,8</b>	<b>533,8</b>	<b>559,5</b>	<b>229,5</b>	<b>230,7</b>	<b>285,8</b>	<b>293,1</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	32,7	27,0	23,4	34,3	25,0	20,8	20,9	19,7	15,6	12,8	10,3	14,8
	2	33,7	26,0	26,0	33,8	27,3	19,8	20,1	25,2	13,4	14,0	13,9	9,9
	3	24,7	30,3	30,9	20,2	27,7	22,4	27,2	22,0	15,3	16,4	19,4	17,5
	Povp.	<b>30,4</b>	<b>27,8</b>	<b>26,8</b>	<b>29,4</b>	<b>26,7</b>	<b>21,0</b>	<b>22,7</b>	<b>22,3</b>	<b>14,8</b>	<b>14,4</b>	<b>14,5</b>	<b>14,1</b>
Posed [mm]		160	115	90	75	160	155	140	105	210	200	195	155
Razlez [mm]		480	480	460	430	485	480	480	470	545	525	515	510

Preglednica C.6: Rezultati mešanic z različnimi količinami žlindre.

Mešanica		CZ1A				CZ1B				CZ1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	228,8	354,8	711,5	629,4	356,8	321,3	545,6	529,8	216,5	265,1	425,1	485,7
	2	278,3	352,7	484,9	901,0	442,5	417,4	453,9	551,1	248,3	336,1	359,1	436,3
	3	236,3	343,1	387,4	714,6	292,4	481,1	407,9	654,6	292,1	354,6	341,3	377,4
	Povp.	<b>247,8</b>	<b>350,2</b>	<b>527,9</b>	<b>748,3</b>	<b>363,9</b>	<b>406,6</b>	<b>469,1</b>	<b>578,5</b>	<b>252,3</b>	<b>318,6</b>	<b>375,2</b>	<b>433,1</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	28,1	28,3	22,2	44,6	23,6	24,8	20,0	30,2	29,4	31,2	23,7	26,2
	2	28,6	32,3	33,8	31,3	31,7	24,6	24,7	21,3	29,6	34,7	35,5	26,9
	3	28,4	28,2	49,6	43,4	29,9	22,2	27,9	29,3	30,9	35,7	32,2	34,3
	Povp.	<b>28,4</b>	<b>29,6</b>	<b>35,2</b>	<b>39,8</b>	<b>28,4</b>	<b>23,9</b>	<b>24,2</b>	<b>26,9</b>	<b>30,0</b>	<b>33,9</b>	<b>30,5</b>	<b>29,1</b>
Posed [mm]		180	160	125	100	170	160	135	95	190	170	155	115
Razlez [mm]		535	510	485	400	525	520	510	450	545	510	490	500

Preglednica C.7: Rezultati mešanic z različnimi količinami mikro silike.

Mešanica		CM1A				CM1B				CM1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	602,4	949,4	943,0	935,2	825,0	856,9	930,0	-	274,8	442,7	613,5	851,1
	2	544,4	704,7	912,8	812,1	1174,6	809,4	867,4	-	316,2	577,0	521,0	783,7
	3	524,8	666,5	680,9	758,7	655,7	933,1	1107,5	-	307,0	442,1	978,9	643,1
	Povp.	<b>557,2</b>	<b>773,5</b>	<b>845,6</b>	<b>835,3</b>	<b>885,1</b>	<b>866,5</b>	<b>968,3</b>	-	<b>299,3</b>	<b>487,3</b>	<b>704,5</b>	<b>759,3</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	29,4	25,6	30,9	31,5	51,9	34,2	34,2	-	25,0	19,4	25,3	42,2
	2	38,8	25,4	31,6	25,6	24,0	38,8	53,6	-	28,7	25,8	30,5	35,9
	3	37,6	33,1	39,1	37,4	47,8	33,0	29,5	-	29,6	31,9	23,2	44,7
	Povp.	<b>35,3</b>	<b>28,0</b>	<b>33,9</b>	<b>31,5</b>	<b>41,2</b>	<b>35,3</b>	<b>39,1</b>	-	<b>27,8</b>	<b>25,7</b>	<b>26,3</b>	<b>40,9</b>
Posed [mm]		110	105	95	65	87	65	60	50	150	110	95	85
Razlez [mm]		465	440	415	395	430	420	380	365	490	470	445	425

Preglednica C.8: Rezultati mešanic z različnimi količinami tufa.

Mešanica		CT1A				CT1B				CT1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	304,4	623,4	904,2	1156,1	1476,1	-	-	-	77,2	276,7	377,1	410,5
	2	293,0	540,5	753,4	999,5	-	-	-	-	77,5	256,9	375,9	355,8
	3	330,3	583,3	934,3	969,6	-	-	-	-	104,7	324,9	387,2	444,2
	Povp.	<b>309,2</b>	<b>582,4</b>	<b>864,0</b>	<b>1041,7</b>	<b>1476,1</b>	-	-	-	<b>86,5</b>	<b>286,2</b>	<b>380,1</b>	<b>403,5</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	19,0	21,0	20,6	25,3	19,7	-	-	-	33,0	33,6	32,8	39,3
	2	24,5	27,2	32,4	34,9	-	-	-	-	35,0	32,6	34,7	50,0
	3	28,5	24,1	26,6	42,6	-	-	-	-	28,4	29,3	38,6	39,4
	Povp.	<b>24,0</b>	<b>24,1</b>	<b>26,5</b>	<b>34,3</b>	<b>19,7</b>	-	-	-	<b>32,1</b>	<b>31,8</b>	<b>35,4</b>	<b>42,9</b>
Posed [mm]		170	130	95	70	50	30	-	-	250	200	165	115
Razlez [mm]		485	445	430	390	370	315	-	-	635	500	450	440

»Ta stran je namenoma prazna«

**PRILOGA D: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO ICAR RHEOMETER NA  
MALTAH EKVIVALENTNIH OBIČAJNEMU BETONU**

Preglednica D.1: Rezultati mešanic s superplastifikatorjem 1 in CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R.

Mešanica		MR1				MR1A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	542,6	535,3	746,8	585,1	384,3	316,7	359,8	430,1
	2	504,1	620,5	687,2	517,4	363,2	306,4	305,5	390,3
	3	456,0	600,4	572,4	502,7	308,9	414,4	332,1	432,5
	<b>Povp.</b>	<b>500,9</b>	<b>585,4</b>	<b>668,8</b>	<b>535,1</b>	<b>352,1</b>	<b>345,8</b>	<b>332,5</b>	<b>417,6</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	9,2	8,6	5,9	6,6	6,9	7,1	6,8	7,4
	2	8,6	6,6	6,1	6,3	7,1	6,4	6,9	6,5
	3	8,0	6,4	6,7	6,7	6,3	5,8	6,1	6,0
	<b>Povp.</b>	<b>8,6</b>	<b>7,2</b>	<b>6,2</b>	<b>6,5</b>	<b>6,8</b>	<b>6,4</b>	<b>6,6</b>	<b>6,6</b>
<b>Raz. s posed. [mm]</b>		110	110	110	110	125	120	116	115
<b>Razlez [mm]</b>		200	200	195	190	220	205	220	205
Mešanica		MR1B				MR1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	144,9	186,1	223,4	297,2	7,0	14,8	25,1	20,3
	2	121,2	185,8	185,8	240,3	8,5	2,1	23,2	27,8
	3	158,8	196,6	211,0	263,8	7,5	17,1	17,8	30,6
	<b>Povp.</b>	<b>141,6</b>	<b>189,5</b>	<b>206,7</b>	<b>267,1</b>	<b>7,7</b>	<b>11,3</b>	<b>22,0</b>	<b>26,2</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	4,4	5,3	5,4	5,5	2,3	2,7	3,3	2,9
	2	4,9	5,1	5,1	5,6	3,8	3,0	2,6	2,8
	3	5,1	5,5	5,9	5,5	2,3	3,3	2,9	3,9
	<b>Povp.</b>	<b>4,8</b>	<b>5,3</b>	<b>5,5</b>	<b>5,5</b>	<b>2,8</b>	<b>3,0</b>	<b>2,9</b>	<b>3,2</b>
<b>Raz. s posed. [mm]</b>		175	155	140	135	260	245	230	210
<b>Razlez [mm]</b>		270	255	230	220	320	310	300	290

Preglednica D.2: Rezultati mešanic s superplastifikatorjem 1 in CEM I 42.5 R.

Mešanica		ML1				ML1A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	495,0	540,7	631,6	482,5	238,9	276,9	323,8	343,5
	2	429,0	499,1	581,6	502,2	292,0	320,3	282,6	373,7
	3	523,5	510,4	461,1	602,9	283,2	315,0	261,0	350,1
	Povp.	<b>482,5</b>	<b>516,7</b>	<b>558,1</b>	<b>529,2</b>	<b>271,4</b>	<b>304,1</b>	<b>289,1</b>	<b>355,8</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	8,4	7,3	5,7	6,1	7,6	7,4	6,6	6,4
	2	8,2	6,8	5,6	4,8	8,5	6,7	6,3	6,0
	3	6,9	6,3	6,0	5,1	7,5	7,0	6,1	5,8
	Povp.	<b>7,8</b>	<b>6,8</b>	<b>5,8</b>	<b>5,3</b>	<b>7,9</b>	<b>7,0</b>	<b>6,3</b>	<b>6,1</b>
Raz. s posed. [mm]		105	115	111	110	110	125	115	120
Razlez [mm]		200	215	210	205	215	220	225	220
Mešanica		ML1B				ML1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	125,5	114,2	179,4	256,6	17,6	15,4	37,5	63,8
	2	121,5	136,7	159,5	192,6	6,5	12,1	68,6	75,5
	3	116,6	123,1	169,1	203,8	10,3	32,3	30,4	77,3
	Povp.	<b>121,2</b>	<b>124,7</b>	<b>169,3</b>	<b>217,7</b>	<b>11,5</b>	<b>19,9</b>	<b>45,5</b>	<b>72,2</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	5,7	6,1	5,9	5,4	4,2	4,4	4,7	5,4
	2	5,9	5,8	5,8	5,3	4,4	4,9	4,8	5,2
	3	5,9	5,7	5,6	5,5	4,3	3,9	5,1	5,4
	Povp.	<b>5,8</b>	<b>5,9</b>	<b>5,8</b>	<b>5,4</b>	<b>4,3</b>	<b>4,4</b>	<b>4,9</b>	<b>5,3</b>
Raz. s posed. [mm]		175	155	145	140	240	235	195	185
Razlez [mm]		275	250	250	240	315	315	280	280

Preglednica D.3: Rezultati mešanic z aerantom.

Mešanica		MRA1A				MRA1B				MRA1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	300,3	352,7	475,7	595,6	264,1	380,0	480,2	541,2	309,2	321,0	471,1	635,0
	2	387,3	331,8	435,4	581,4	310,0	344,4	535,0	531,6	324,0	320,1	392,0	467,8
	3	377,1	360,7	479,4	465,8	270,7	348,4	405,4	458,9	327,3	347,9	413,6	444,9
	Povp.	<b>354,9</b>	<b>348,4</b>	<b>463,5</b>	<b>547,6</b>	<b>281,6</b>	<b>357,6</b>	<b>473,5</b>	<b>510,6</b>	<b>320,2</b>	<b>329,7</b>	<b>425,6</b>	<b>515,9</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	5,9	6,3	6,1	5,3	4,7	4,5	3,7	3,7	5,9	6,2	5,3	4,4
	2	5,7	5,4	6,1	5,5	4,6	4,5	3,7	3,3	5,8	5,8	5,8	4,7
	3	5,8	5,4	5,6	5,8	4,6	4,7	4,4	3,7	5,1	5,5	5,4	5,1
	Povp.	<b>5,8</b>	<b>5,7</b>	<b>5,9</b>	<b>5,5</b>	<b>4,6</b>	<b>4,6</b>	<b>3,9</b>	<b>3,6</b>	<b>5,6</b>	<b>5,8</b>	<b>5,5</b>	<b>4,7</b>
Raz. s posed. [mm]		115	115	110	110	125	120	115	115	115	120	115	115
Razlez [mm]		220	215	210	205	230	220	215	210	220	215	210	205

Preglednica D.4: Rezultati mešanic s stabilizatorjem.

Mešanica		MG1A				MG1B				MG1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	264,8	206,1	213,9	173,9	351,9	307,8	271,4	233,4	574,7	361,8	341,9	229,2
	2	237,0	216,8	207,8	174,4	377,6	298,6	264,2	216,9	396,7	356,0	276,3	205,4
	3	242,7	154,5	214,4	193,0	372,2	230,6	241,9	185,2	364,1	313,4	297,8	205,5
	Povp.	<b>248,2</b>	<b>192,5</b>	<b>212,0</b>	<b>180,4</b>	<b>367,2</b>	<b>279,0</b>	<b>259,2</b>	<b>211,8</b>	<b>445,2</b>	<b>343,7</b>	<b>305,3</b>	<b>213,4</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	4,6	2,7	2,6	1,6	7,2	3,0	2,6	2,5	11,9	6,1	2,5	2,0
	2	3,4	2,1	1,9	1,7	5,1	2,1	2,7	2,1	9,5	5,0	3,1	2,7
	3	3,2	4,4	1,9	1,4	4,1	2,4	2,1	2,1	8,6	4,6	2,4	2,5
	Povp.	<b>3,7</b>	<b>3,1</b>	<b>2,1</b>	<b>1,6</b>	<b>5,5</b>	<b>2,5</b>	<b>2,5</b>	<b>2,2</b>	<b>10,0</b>	<b>5,2</b>	<b>2,7</b>	<b>2,4</b>
Raz. s posed. [mm]		115	135	135	155	110	115	125	130	105	110	120	125
Razlez [mm]		225	245	240	255	210	235	240	245	180	170	225	235

Preglednica D.5: Rezultati mešanic z različnimi V/C razmerji.

Mešanica		MV1A				MV1B				MV1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	407,6	419,5	325,1	388,3	218,4	203,7	174,5	164,7	156,1	141,6	134,5	129,0
	2	340,8	295,9	370,4	294,2	216,1	216,1	159,2	205,5	174,5	140,0	131,4	159,7
	3	309,7	324,0	330,4	306,0	220,0	193,5	152,4	214,0	121,9	127,7	-	137,0
	Povp.	<b>352,7</b>	<b>346,5</b>	<b>342,0</b>	<b>329,5</b>	<b>218,2</b>	<b>204,4</b>	<b>162,0</b>	<b>194,7</b>	<b>150,8</b>	<b>136,4</b>	<b>133,0</b>	<b>141,9</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	6,7	6,9	5,8	5,9	5,8	4,7	4,9	4,0	4,2	3,1	2,8	2,5
	2	7,2	6,8	5,9	5,7	5,7	5,7	4,3	4,0	4,2	3,1	2,8	2,5
	3	6,4	6,4	6,0	5,9	4,9	4,5	3,9	3,9	3,7	2,5	-	2,4
	Povp.	<b>6,8</b>	<b>6,7</b>	<b>5,9</b>	<b>5,8</b>	<b>5,5</b>	<b>5,0</b>	<b>4,4</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>2,9</b>	<b>2,8</b>	<b>2,5</b>
Raz. s posed. [mm]		120	125	120	120	130	130	130	140	145	160	155	160
Razlez [mm]		220	225	220	220	230	240	240	250	260	260	260	255



Preglednica D.6: Rezultati mešanic z različnimi količinami žlindre.

Mešanica		MZ1A				MZ1B				MZ1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	87,5	118,0	127,5	161,3	59,9	108,7	150,8	178,8	35,8	68,1	88,3	133,2
	2	95,8	123,2	116,4	150,5	74,1	74,5	145,0	186,7	27,3	28,6	119,8	147,0
	3	77,1	95,8	124,9	172,7	73,7	121,5	161,1	165,9	19,0	52,0	82,5	144,2
	Povp.	<b>86,8</b>	<b>112,3</b>	<b>122,9</b>	<b>161,5</b>	<b>69,2</b>	<b>101,6</b>	<b>152,3</b>	<b>177,1</b>	<b>27,4</b>	<b>49,6</b>	<b>96,9</b>	<b>141,5</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	6,9	6,2	5,5	5,6	5,2	5,7	5,5	5,6	4,6	5,2	5,2	6,0
	2	6,7	6,5	5,0	5,8	5,3	5,7	6,0	5,4	5,8	5,9	6,0	6,1
	3	6,3	5,9	5,1	5,9	5,5	5,6	5,5	5,6	5,6	4,5	5,5	5,9
	Povp.	<b>6,6</b>	<b>6,2</b>	<b>5,2</b>	<b>5,8</b>	<b>5,3</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>5,5</b>	<b>5,3</b>	<b>5,2</b>	<b>5,6</b>	<b>6,0</b>
Raz. s posed. [mm]		170	165	155	150	190	160	150	140	215	185	155	150
Razlez [mm]		270	265	265	250	295	270	255	245	300	290	260	260

Preglednica D.7: Rezultati mešanic z različnimi količinami mikro silike.

Mešanica		MM1A				MM1B				MM1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	103,4	140,9	219,0	281,7	256,3	416,9	494,4	610,5	48,6	113,8	153,1	193,3
	2	106,3	192,3	188,3	264,3	265,9	366,8	400,5	551,2	56,9	107,4	135,4	183,5
	3	89,0	177,7	245,2	296,4	254,3	385,7	481,7	465,2	51,9	51,9	144,0	191,1
	Povp.	<b>99,6</b>	<b>170,3</b>	<b>217,5</b>	<b>280,8</b>	<b>258,8</b>	<b>389,8</b>	<b>458,9</b>	<b>542,3</b>	<b>52,5</b>	<b>91,0</b>	<b>144,2</b>	<b>189,3</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	6,0	4,8	5,5	5,9	5,9	5,1	3,5	2,4	6,8	6,8	6,2	5,6
	2	6,0	5,8	5,2	5,5	6,1	5,1	3,8	2,5	6,9	6,5	5,8	6,1
	3	5,9	5,2	5,1	5,1	5,8	4,8	3,9	4,0	6,5	6,5	6,0	6,2
	Povp.	<b>6,0</b>	<b>5,3</b>	<b>5,3</b>	<b>5,5</b>	<b>5,9</b>	<b>5,0</b>	<b>3,7</b>	<b>3,0</b>	<b>6,7</b>	<b>6,6</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>
Raz. s posed. [mm]		180	150	140	125	120	110	110	110	195	180	165	145
Razlez [mm]		265	245	235	210	215	200	195	185	285	270	255	240

Preglednica D.8: Rezultati mešanic z različnimi količinami tufa.

Mešanica		MT1A				MT1B				MT1C			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	36,8	68,2	149,8	262,1	409,1	787,3	1180,7	1339,3	17,0	19,2	27,7	12,1
	2	47,9	77,5	141,9	187,9	389,3	812,4	1290,2	1298,3	23,1	20,2	14,8	49,5
	3	-	86,0	176,0	204,8	516,3	1161,1	1351,2	1510,1	15,6	26,7	-	46,9
	Povp.	<b>42,4</b>	<b>77,2</b>	<b>155,9</b>	<b>218,3</b>	<b>438,2</b>	<b>920,3</b>	<b>1274,0</b>	<b>1382,6</b>	<b>18,6</b>	<b>22,0</b>	<b>23,4</b>	<b>36,2</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	5,3	5,6	6,7	6,7	12,2	8,2	1,5	2,1	4,7	3,8	3,9	4,6
	2	5,8	5,1	6,5	6,4	10,2	8,3	1,4	2,5	5,6	3,9	3,2	4,0
	3	-	5,0	5,7	6,5	8,8	4,2	5,6	1,7	4,3	3,6	-	4,4
	Povp.	<b>5,6</b>	<b>5,2</b>	<b>6,3</b>	<b>6,5</b>	<b>10,4</b>	<b>6,9</b>	<b>2,8</b>	<b>2,1</b>	<b>4,9</b>	<b>3,8</b>	<b>3,6</b>	<b>4,3</b>
Raz. s posed. [mm]		220	175	150	145	120	110	105	105	285	270	250	225
Razlez [mm]		295	260	240	220	210	175	150	145	325	320	315	290

»Ta stran je namenoma prazna«

**PRILOGA E: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO CONTEC VISCOMETER 5  
NA BETONIH SCC**

Preglednica E.1: Rezultati mešanic, prva preglednica.

Mešanica		SCCR1				SCCR2				SCCR3			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	229,9	284,3	318,1	375,0	26,1	36,7	36,8	40,9	22,3	27,5	20,7	30,2
	2	247,6	254,0	312,3	329,5	30,9	34,9	41,5	37,3	21,0	21,7	24,7	45,4
	3	194,0	266,2	311,0	335,0	31,4	36,2	38,6	40,1	18,7	29,7	46,9	51,0
	Povp.	<b>223,9</b>	<b>268,2</b>	<b>313,8</b>	<b>346,5</b>	<b>29,4</b>	<b>35,9</b>	<b>39,0</b>	<b>39,5</b>	<b>20,7</b>	<b>26,3</b>	<b>30,8</b>	<b>42,2</b>
$\mu_1$ [Pa·s]	1	183,5	203,7	234,8	213,1	26,9	28,5	34,8	30,2	20,4	19,3	17,4	21,0
	2	171,0	202,1	193,2	204,6	27,3	29,8	34,3	25,3	20,7	19,9	15,6	19,4
	3	89,9	195,3	195,6	217,2	28,0	28,8	34,5	30,3	21,5	19,8	8,8	18,0
	Povp.	<b>148,1</b>	<b>200,4</b>	<b>207,9</b>	<b>211,6</b>	<b>27,4</b>	<b>29,0</b>	<b>34,5</b>	<b>28,6</b>	<b>20,9</b>	<b>19,7</b>	<b>13,9</b>	<b>19,5</b>
$\mu_2$	Povp.	143,9	-	-	-	38,6	-	-	-	29,7	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		370	340	340	330	690	630	640	620	790	760	760	750

Preglednica E.2: Rezultati mešanic, druga preglednica

Mešanica		SCCM1				SCCM2				SCCM3			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	43,2	33,9	26,9	25,3	22,8	35,5	26,7	28,1	49,0	36,7	25,1	33,1
	2	27,6	37,9	33,4	75,1	25,3	25,5	33,9	45,7	29,8	24,8	20,9	33,5
	3	52,4	37,5	48,5	28,5	26,2	24,8	25,0	24,1	28,8	22,8	24,4	34,7
	Povp.	<b>41,1</b>	<b>36,4</b>	<b>36,3</b>	<b>43,0</b>	<b>24,8</b>	<b>28,6</b>	<b>28,5</b>	<b>32,6</b>	<b>35,9</b>	<b>28,1</b>	<b>23,5</b>	<b>33,8</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	21,0	21,4	23,6	30,3	22,2	23,4	25,3	28,5	28,1	28,3	32,7	32,0
	2	27,4	21,6	21,8	19,7	21,7	25,4	24,7	26,6	34,8	31,7	37,3	37,0
	3	23,5	20,0	18,1	29,9	21,9	25,9	27,2	31,0	35,7	31,0	34,0	38,6
	Povp.	<b>24,0</b>	<b>21,0</b>	<b>21,2</b>	<b>26,7</b>	<b>21,9</b>	<b>24,9</b>	<b>25,7</b>	<b>28,7</b>	<b>32,9</b>	<b>30,4</b>	<b>34,7</b>	<b>35,9</b>
$\mu_2$	Povp.	34,5	-	-	-	30,7	-	-	-	46,3	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		700	740	730	720	700	720	720	720	700	710	700	700

Preglednica E.3: Rezultati mešanic, tretja preglednica.

Mešanica		SCCM4				SCCR4				SCCR4A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	40,9	36,9	30,2	41,9	46,1	54,4	61,1	70,4	40,0	46,3	51,6	64,9
	2	47,4	37,1	49,7	60,2	49,1	51,4	58,5	70,8	41,5	44,8	44,9	92,4
	3	29,2	32,3	54,7	37,9	49,1	52,3	61,0	73,0	61,5	50,0	50,8	84,8
	Povp.	<b>39,2</b>	<b>35,4</b>	<b>44,9</b>	<b>46,7</b>	<b>48,1</b>	<b>52,7</b>	<b>60,2</b>	<b>71,4</b>	<b>47,7</b>	<b>47,1</b>	<b>49,1</b>	<b>80,7</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	27,4	29,7	31,7	34,4	24,9	26,8	29,1	33,0	19,5	20,3	22,6	26,6
	2	23,9	34,1	34,6	32,7	26,3	27,0	27,0	34,8	21,6	22,1	25,2	23,0
	3	29,3	31,4	27,1	36,2	27,3	28,8	29,5	34,8	18,6	21,0	24,7	24,7
	Povp.	<b>26,9</b>	<b>31,7</b>	<b>31,1</b>	<b>34,4</b>	<b>26,2</b>	<b>27,5</b>	<b>28,5</b>	<b>34,2</b>	<b>19,9</b>	<b>21,1</b>	<b>24,2</b>	<b>24,8</b>
$\mu_2$	Povp.	35,0	-	-	-	33,0	-	-	-	25,2	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		650	660	620	630	670	580	550	550	710	640	620	610

Preglednica E.4: Rezultati mešanic, četrta preglednica.

Mešanica		SCCR4B				SCCR4C				SCCR4D			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	54,8	73,7	101,4	99,6	34,5	113,6	154,0	191,2	45,9	51,7	46,4	48,5
	2	67,0	64,2	99,2	86,1	51,6	99,4	158,2	111,5	44,2	48,4	44,8	50,3
	3	63,8	159,7	99,4	149,7	53,2	123,6	167,6	101,4	53,5	52,4	49,3	47,1
	Povp.	<b>61,9</b>	<b>99,2</b>	<b>100,0</b>	<b>111,8</b>	<b>46,4</b>	<b>112,2</b>	<b>159,9</b>	<b>134,7</b>	<b>47,9</b>	<b>50,9</b>	<b>46,8</b>	<b>48,7</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	31,1	33,4	40,4	41,7	34,5	36,4	41,4	41,2	19,9	22,4	21,9	24,6
	2	29,5	33,8	38,5	46,3	36,4	36,3	32,7	57,0	23,2	23,0	22,3	24,1
	3	29,9	19,0	37,1	33,7	39,3	34,4	31,5	59,1	20,2	21,7	21,3	25,2
	Povp.	<b>30,2</b>	<b>28,7</b>	<b>38,7</b>	<b>40,6</b>	<b>36,8</b>	<b>35,7</b>	<b>35,2</b>	<b>52,4</b>	<b>21,1</b>	<b>22,4</b>	<b>21,8</b>	<b>24,6</b>
$\mu_2$	Povp.	37,1	-	-	-	50,6	-	-	-	26,0	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		630	580	540	510	600	540	510	470	670	620	610	600

**PRILOGA F: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO CONTEC VISCOMETER 5  
NA MALTAH EKVIVALENTNIH SCC BETONOM**

Preglednica F.1: Rezultati mešanic, prva preglednica.

Mešanica		SCCMR1				SCCMR2				SCCMR3			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	32,4	34,8	30,0	28,8	18,5	18,1	18,9	17,8	15,4	15,8	18,6	16,1
	2	23,5	24,7	29,6	25,9	21,4	18,0	22,5	27,2	18,3	15,5	20,4	18,8
	3	26,8	28,0	25,3	25,9	27,4	20,6	17,6	18,9	15,7	20,6	19,3	-
	Povp.	<b>27,5</b>	<b>29,1</b>	<b>28,3</b>	<b>26,9</b>	<b>22,5</b>	<b>18,9</b>	<b>19,7</b>	<b>21,3</b>	<b>16,5</b>	<b>17,3</b>	<b>19,4</b>	<b>17,5</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	48,2	60,8	50,7	53,9	10,9	14,1	12,2	11,8	2,5	3,8	3,6	3,6
	2	51,4	61,1	49,9	54,9	10,7	13,2	11,7	10,7	2,7	4,2	3,0	3,8
	3	49,5	58,4	50,8	52,5	10,3	12,1	11,2	10,3	3,0	3,5	3,5	-
	Povp.	<b>49,7</b>	<b>60,1</b>	<b>50,5</b>	<b>53,8</b>	<b>10,6</b>	<b>13,1</b>	<b>11,7</b>	<b>10,9</b>	<b>2,7</b>	<b>3,8</b>	<b>3,4</b>	<b>3,7</b>
$\mu_2$	Povp.	80,6	-	-	-	22,2	-	-	-	5,8	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		-	-	-	-	-	-	320	320	350	360	370	350
Mini razlez s posedom [mm]		280	260	260	270	410	400	400	400	460	470	450	460

Preglednica F.2: Rezultati mešanic, druga preglednica.

Mešanica		SCCMM1				SCCMM2				SCCMM3			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	21,4	27,4	24,3	21,3	28,8	24,2	28,3	24,5	20,0	20,1	21,5	19,8
	2	28,2	22,3	19,7	23,1	23,9	21,6	25,3	23,0	17,5	21,2	20,6	19,7
	3	26,4	21,0	17,9	23,1	26,2	22,2	27,9	23,4	19,3	19,0	14,8	19,3
	Povp.	<b>25,3</b>	<b>23,6</b>	<b>20,6</b>	<b>22,5</b>	<b>26,3</b>	<b>22,7</b>	<b>27,2</b>	<b>23,6</b>	<b>18,9</b>	<b>20,1</b>	<b>19,0</b>	<b>19,6</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	15,0	10,2	8,7	8,8	13,2	9,2	6,4	7,2	11,0	10,2	9,9	10,1
	2	13,8	10,3	8,6	8,0	13,4	10,1	6,7	6,7	11,3	9,2	9,0	9,4
	3	12,5	10,0	9,0	7,7	10,9	8,9	6,2	7,6	10,0	8,9	9,6	9,2
	Povp.	<b>13,7</b>	<b>10,2</b>	<b>8,8</b>	<b>8,2</b>	<b>12,5</b>	<b>9,4</b>	<b>6,4</b>	<b>7,2</b>	<b>10,8</b>	<b>9,4</b>	<b>9,5</b>	<b>9,6</b>
$\mu_2$	Povp.	19,2	-	-	-	15,3	-	-	-	12,8	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		280	300	300	310	290	310	290	280	270	280	300	320
Mini razlez s posedom [mm]		310	370	380	390	320	390	380	380	360	370	390	400

Preglednica F.3: Rezultati mešanic, tretja preglednica.

Mešanica		SCCMM4				SCCMR4				SCCMR4A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	38,5	31,2	25,1	25,1	16,0	19,3	24,3	25,1	25,3	20,0	27,2	26,9
	2	31,0	30,1	26,4	27,1	16,8	19,1	23,8	25,5	20,7	21,9	18,9	22,2
	3	33,5	23,0	21,7	23,8	17,8	18,1	23,5	26,1	28,1	23,8	23,8	23,1
	Povp.	<b>34,4</b>	<b>28,1</b>	<b>24,4</b>	<b>25,3</b>	<b>16,9</b>	<b>18,8</b>	<b>23,9</b>	<b>25,6</b>	<b>24,7</b>	<b>21,9</b>	<b>23,3</b>	<b>24,1</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	18,7	11,7	12,4	9,7	13,8	11,0	9,8	10,8	6,8	6,8	7,1	6,2
	2	16,2	10,5	10,8	7,9	13,3	11,3	10,2	10,7	7,2	6,1	7,2	6,8
	3	14,1	11,7	11,0	9,0	12,9	11,6	9,9	10,5	6,6	6,0	6,1	10,7
	Povp.	<b>16,3</b>	<b>11,3</b>	<b>11,4</b>	<b>8,9</b>	<b>13,3</b>	<b>11,3</b>	<b>10,0</b>	<b>10,7</b>	<b>6,9</b>	<b>6,3</b>	<b>6,8</b>	<b>7,9</b>
$\mu_2$	Povp.	18,4	-	-	-	28,1	-	-	-	11,2	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		200	280	300	300	300	300	280	270	310	300	290	270
Mini razlez s posedom [mm]		270	350	380	370	410	390	370	370	410	400	380	380

Preglednica F.4: Rezultati mešanic, četrta preglednica.

Mešanica		SCCMR4B				SCCMR4C				SCCMR4D			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	22,1	29,3	35,6	25,5	30,4	46,6	49,5	48,0	28,9	26,7	29,3	30,9
	2	23,4	25,5	33,5	31,2	38,4	47,4	47,6	51,3	29,0	29,9	27,1	23,9
	3	27,2	26,2	30,4	25,5	37,9	48,6	46,3	50,0	26,8	29,2	26,8	24,4
	Povp.	<b>24,3</b>	<b>27,0</b>	<b>33,1</b>	<b>27,4</b>	<b>35,6</b>	<b>47,5</b>	<b>47,8</b>	<b>49,7</b>	<b>28,2</b>	<b>28,6</b>	<b>27,7</b>	<b>26,4</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	6,9	7,1	8,6	8,9	24,7	26,3	23,3	22,9	10,8	11,8	11,6	9,5
	2	7,0	7,6	7,9	7,5	22,8	25,3	23,1	21,4	11,1	10,6	10,9	9,4
	3	6,3	7,1	8,0	8,4	22,7	23,2	21,4	20,9	11,0	10,9	10,1	9,0
	Povp.	<b>6,7</b>	<b>7,3</b>	<b>8,2</b>	<b>8,3</b>	<b>23,4</b>	<b>24,9</b>	<b>22,6</b>	<b>21,8</b>	<b>11,0</b>	<b>11,1</b>	<b>10,9</b>	<b>9,3</b>
$\mu_2$	Povp.	10,4	-	-	-	36,0	-	-	-	14,9	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		290	300	290	280	260	230	230	240	270	270	270	270
Mini razlez s posedom [mm]		410	390	380	370	330	290	290	300	370	350	360	360

**PRILOGA G: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO ICAR RHEOMETER NA  
BETONIH SCC**

Preglednica G.1: Rezultati mešanic, prva preglednica.

Mešanica		SCCR1				SCCR2				SCCR3			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	171,9	-	-	-	28,5	44,3	36,5	41,2	13,8	9,1	11,0	12,3
	2	167,0	-	-	-	29,6	37,5	43,7	45,5	13,1	14,2	19,6	28,7
	3	-	-	-	-	38,9	34,2	18,7	34,8	11,9	10,5	9,3	19,2
	Povp.	<b>169,5</b>	-	-	-	<b>32,3</b>	<b>38,7</b>	<b>33,0</b>	<b>40,5</b>	<b>12,9</b>	<b>11,3</b>	<b>13,3</b>	<b>20,1</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	185,8	-	-	-	31,2	34,2	34,9	34,6	20,6	24,6	23,5	22,3
	2	198,1	-	-	-	39,7	36,5	42,2	39,2	28,2	25,7	22,1	24,2
	3	-	-	-	-	38,3	38,4	38,3	42,5	27,4	29,8	26,2	24,5
	Povp.	<b>192,0</b>	-	-	-	<b>36,4</b>	<b>36,4</b>	<b>38,5</b>	<b>38,8</b>	<b>25,4</b>	<b>26,7</b>	<b>23,9</b>	<b>23,7</b>
$\mu_2$	Povp.	234,1	-	-	-	42,1	-	-	-	21,1	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		370	340	340	330	690	630	640	620	790	760	760	750

Preglednica G.2: Rezultati mešanic, druga preglednica

Mešanica		SCCM1				SCCM2				SCCM3			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	20,3	19,4	13,0	14,9	19,9	14,9	17,1	18,7	16,8	10,6	11,7	16,4
	2	18,0	18,9	19,7	10,4	29,3	24,0	14,0	23,2	16,0	18,8	16,0	14,7
	3	19,9	29,2	21,2	20,9	31,4	16,9	25,6	20,4	21,1	15,4	16,3	17,5
	Povp.	<b>19,4</b>	<b>22,5</b>	<b>18,0</b>	<b>15,4</b>	<b>26,9</b>	<b>18,6</b>	<b>18,9</b>	<b>20,8</b>	<b>18,0</b>	<b>15,0</b>	<b>14,7</b>	<b>16,2</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	27,2	25,7	32,7	30,5	38,2	34,0	32,3	36,4	35,1	35,6	37,6	38,4
	2	30,0	28,4	33,9	31,5	31,2	33,0	35,1	30,3	36,3	38,5	36,2	38,2
	3	27,8	28,6	28,7	29,6	33,4	34,7	32,4	31,0	36,3	38,9	37,9	37,5
	Povp.	<b>28,3</b>	<b>27,6</b>	<b>31,8</b>	<b>30,5</b>	<b>34,3</b>	<b>33,9</b>	<b>33,3</b>	<b>32,6</b>	<b>35,9</b>	<b>37,7</b>	<b>37,2</b>	<b>38,0</b>
$\mu_2$	Povp.	26,4	-	-	-	32,2	-	-	-	32,8	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		700	740	730	720	700	720	720	720	700	710	700	700



Preglednica G.3: Rezultati mešanic, tretja preglednica.

Mešanica		SCCM4				SCCR4				SCCR4A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	23,6	26,0	31,3	26,5	45,7	54,6	60,1	63,0	37,5	41,5	42,9	50,7
	2	26,0	25,0	26,3	20,5	47,3	48,5	51,3	67,8	41,4	48,0	42,7	50,1
	3	21,3	24,3	21,2	33,9	46,5	49,4	51,5	63,4	46,3	45,3	50,9	54,1
	Povp.	<b>23,6</b>	<b>25,1</b>	<b>26,3</b>	<b>26,9</b>	<b>46,5</b>	<b>50,8</b>	<b>54,3</b>	<b>64,7</b>	<b>41,8</b>	<b>44,9</b>	<b>45,5</b>	<b>51,6</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	40,5	37,6	36,3	40,2	26,4	21,8	29,3	35,6	23,1	24,8	24,7	28,3
	2	37,2	38,2	51,1	45,7	27,3	27,5	32,9	37,0	25,4	24,3	29,8	32,5
	3	40,2	36,4	41,1	40,1	29,1	30,7	39,5	36,7	25,4	27,6	28,5	30,9
	Povp.	<b>39,3</b>	<b>37,4</b>	<b>42,8</b>	<b>42,0</b>	<b>27,6</b>	<b>26,7</b>	<b>33,9</b>	<b>36,4</b>	<b>24,6</b>	<b>25,6</b>	<b>27,7</b>	<b>30,6</b>
$\mu_2$	Povp.	39,8	-	-	-	28,3	-	-	-	23,1	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		650	660	620	630	670	580	550	550	710	640	620	610

Preglednica G.4: Rezultati mešanic, četrta preglednica.

Mešanica		SCCR4B				SCCR4C				SCCR4D			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	49,2	58,6	60,5	81,6	92,9	63,9	88,8	107,1	47,0	53,9	41,9	51,3
	2	61,9	56,4	62,0	86,7	106,6	84,9	104,1	106,2	56,6	54,7	42,4	57,2
	3	57,7	49,1	74,9	82,1	56,9	63,1	88,3	111,4	49,9	54,1	47,3	48,9
	Povp.	<b>56,3</b>	<b>54,7</b>	<b>65,8</b>	<b>83,5</b>	<b>85,5</b>	<b>70,6</b>	<b>93,7</b>	<b>108,3</b>	<b>51,2</b>	<b>54,2</b>	<b>43,9</b>	<b>52,5</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	39,1	42,2	47,5	46,2	45,9	47,1	51,1	61,0	32,0	20,4	26,9	26,8
	2	39,1	44,8	51,3	52,3	56,4	51,6	54,0	75,8	29,1	25,3	29,8	28,9
	3	44,7	45,4	43,6	55,3	54,2	61,0	62,0	71,7	29,5	26,6	36,4	29,6
	Povp.	<b>41,0</b>	<b>44,1</b>	<b>47,5</b>	<b>51,2</b>	<b>52,2</b>	<b>53,2</b>	<b>55,7</b>	<b>69,5</b>	<b>30,2</b>	<b>24,1</b>	<b>31,0</b>	<b>28,4</b>
$\mu_2$	Povp.	42,0	-	-	-	57,2	-	-	-	31,1	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		630	580	540	510	600	540	510	470	670	620	610	600

**PRILOGA H: REZULTATI VSEH MERITEV Z NAPRAVO ICAR RHEOETER NA  
MALTAH EKVIVALENTNIH BETONOM SCC**

Preglednica H.1: Rezultati mešanic, prva preglednica.

Mešanica		SCCMR1				SCCMR2				SCCMR3			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	43,6	28,8	25,8	25,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	57,2	13,9	10,4	15,4	116,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3	74,1	15,6	14,5	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Povp.	<b>58,3</b>	<b>19,4</b>	<b>16,9</b>	<b>20,2</b>	<b>39,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	44,9	47,4	51,7	42,9	13,5	12,1	14,5	13,0	5,3	5,4	5,8	4,0
	2	44,2	43,6	40,0	39,3	13,6	11,6	13,1	12,0	5,8	5,8	5,2	5,4
	3	42,7	42,3	41,3	-	12,2	11,2	13,5	11,4	5,7	6,5	4,8	5,1
	Povp.	<b>43,9</b>	<b>44,4</b>	<b>44,3</b>	<b>41,1</b>	<b>13,1</b>	<b>11,6</b>	<b>13,7</b>	<b>12,1</b>	<b>5,6</b>	<b>5,9</b>	<b>5,3</b>	<b>4,9</b>
$\mu_2$	Povp.	75,5	-	-	-	21,1	-	-	-	7,5	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		-	-	-	-	-	-	320	320	350	360	370	350
Mini razlez s posedom [mm]		280	260	260	270	410	400	400	400	460	470	450	460

Preglednica H.2: Rezultati mešanic, druga preglednica

Mešanica		SCCMM1				SCCMM2				SCCMM3			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	26,3	0,0	0,0	0,0	10,8	0,0	0,0	0,0	11,9	0,0	8,7	0,0
	2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
	3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
	Povp.	<b>8,9</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>4,5</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>4,0</b>	<b>0,0</b>	<b>2,9</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	11,7	9,1	8,6	6,9	10,0	7,4	6,5	5,9	10,9	9,0	9,3	11,1
	2	11,2	8,8	7,7	6,9	9,0	7,0	6,5	7,0	9,6	9,8	10,2	9,8
	3	11,5	8,2	7,5	7,4	9,1	6,5	6,6	7,2	10,1	9,0	9,4	9,7
	Povp.	<b>11,5</b>	<b>8,7</b>	<b>7,9</b>	<b>7,1</b>	<b>9,4</b>	<b>7,0</b>	<b>6,5</b>	<b>6,7</b>	<b>10,2</b>	<b>9,3</b>	<b>9,6</b>	<b>10,2</b>
$\mu_2$	Povp.	12,8	-	-	-	9,9	-	-	-	10,4	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		280	300	300	310	290	310	290	280	270	280	300	320
Mini razlez s posedom [mm]		310	370	380	390	320	390	380	380	360	370	390	400

Preglednica H.3: Rezultati mešanic, tretja preglednica.

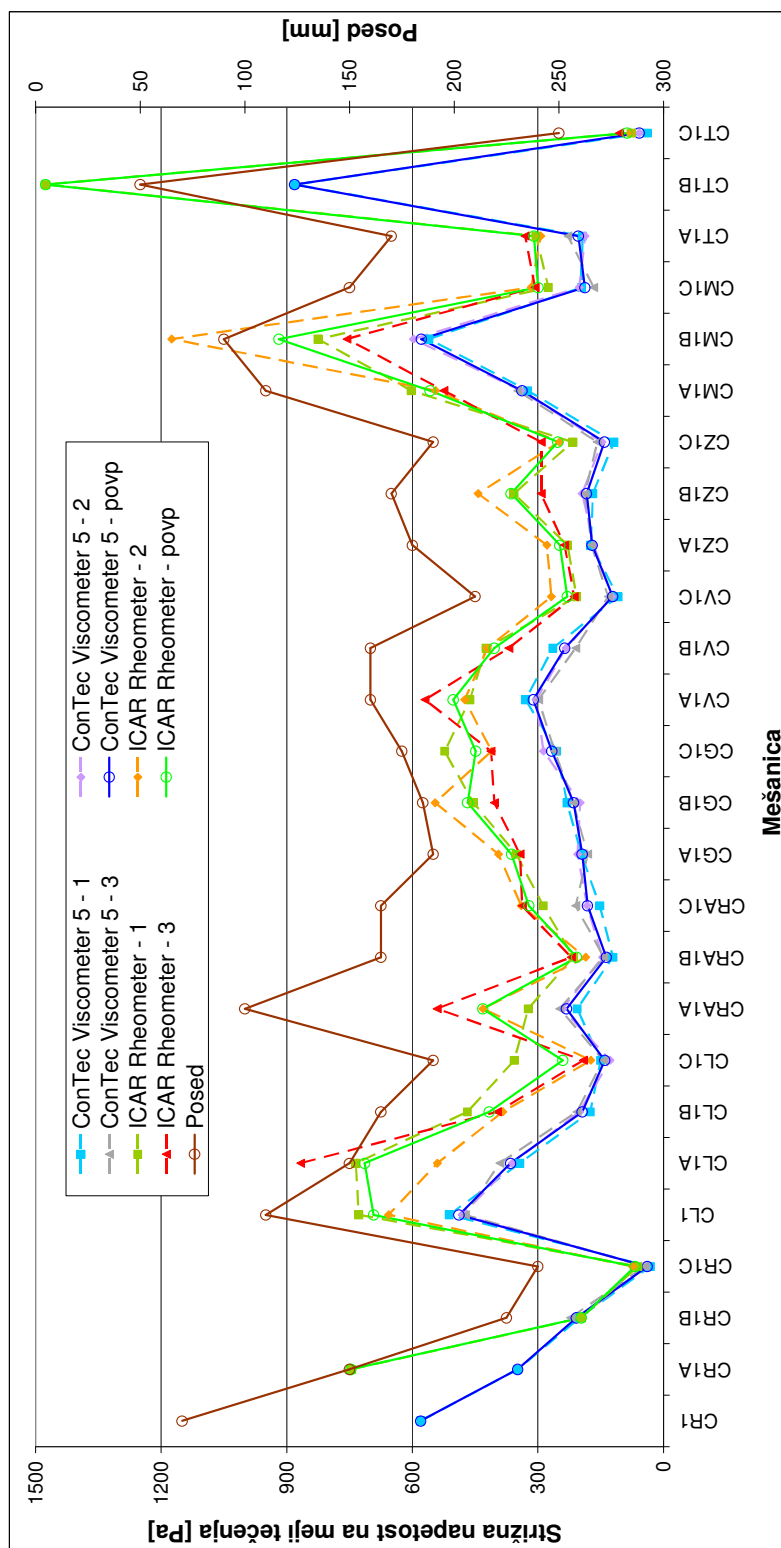
Mešanica		SCCMM4				SCCMR4				SCCMR4A			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	34,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Povp.	<b>11,6</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	12,9	9,6	9,9	9,9	12,1	10,0	9,6	8,4	8,2	6,4	5,5	5,9
	2	12,3	10,4	11,0	10,1	11,2	10,1	9,4	8,9	6,8	6,5	5,6	5,1
	3	11,0	10,3	8,2	10,5	11,2	9,2	8,9	9,0	6,7	6,2	5,9	5,6
	Povp.	<b>12,1</b>	<b>10,1</b>	<b>9,7</b>	<b>10,1</b>	<b>11,5</b>	<b>9,8</b>	<b>9,3</b>	<b>8,8</b>	<b>7,2</b>	<b>6,4</b>	<b>5,7</b>	<b>5,5</b>
$\mu_2$	Povp.	11,2	-	-	-	17,2	-	-	-	9,9	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		200	280	300	300	300	300	280	270	310	300	290	270
Mini razlez s posedom [mm]		270	350	380	370	410	390	370	370	410	400	380	380

Preglednica H.4: Rezultati mešanic, četrta preglednica.

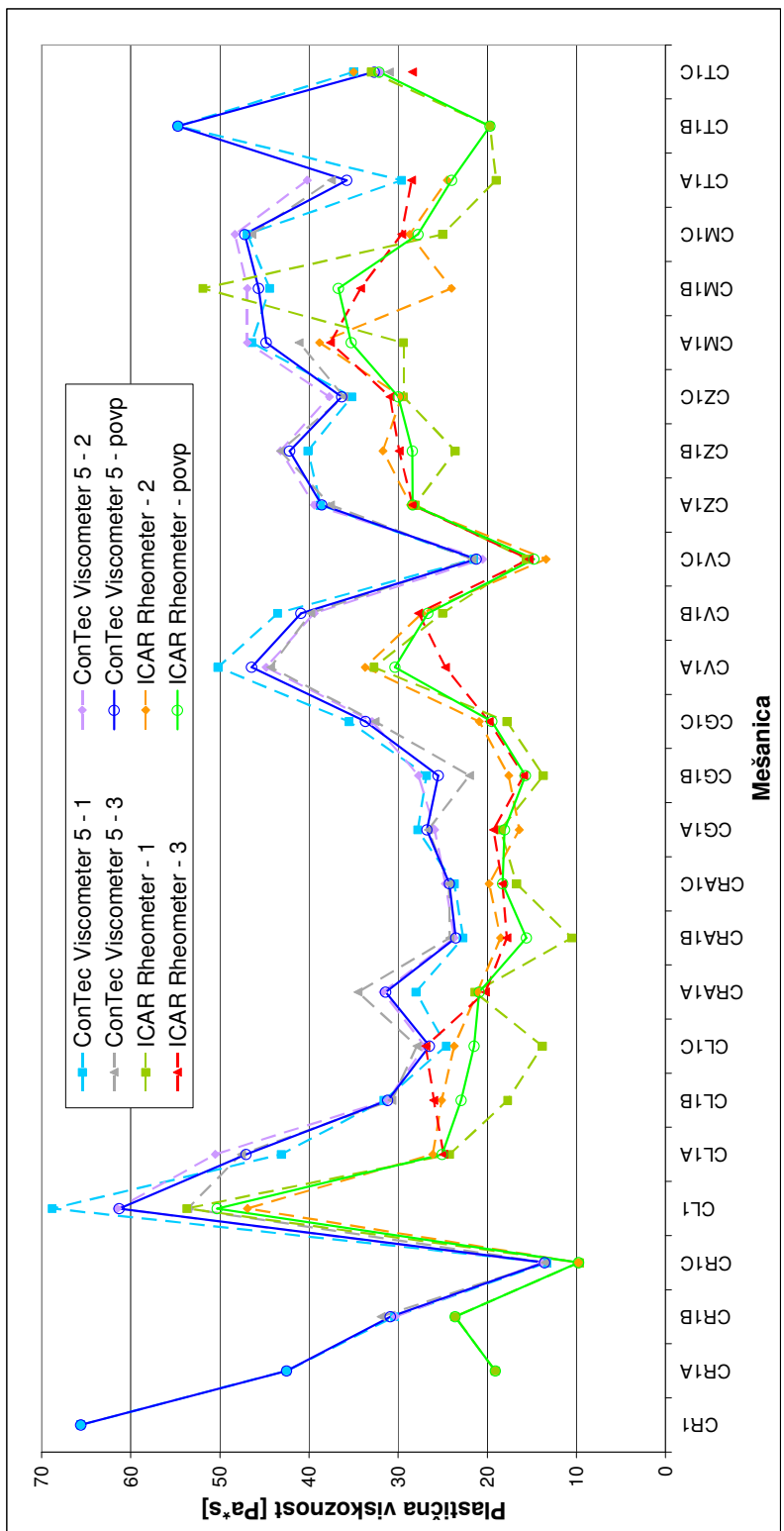
Mešanica		SCCMR4B				SCCMR4C				SCCMR4D			
Čas [min]		0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
$\tau_0$ [Pa]	1	123,5	0,0	2,1	3,3	144,1	36,7	44,4	38,0	11,0	7,1	4,4	1,8
	2	0,0	0,2	0,0	1,8	42,3	37,4	47,8	42,4	9,7	0,0	8,7	4,0
	3	0,0	0,0	0,5	-	48,5	39,5	37,3	30,6	8,5	0,4	6,3	3,2
	Povp.	<b>41,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>	<b>2,5</b>	<b>78,3</b>	<b>37,9</b>	<b>43,2</b>	<b>37,0</b>	<b>9,7</b>	<b>2,5</b>	<b>6,5</b>	<b>3,0</b>
$\mu$ [Pa·s]	1	7,7	7,0	6,1	6,7	19,3	17,5	16,6	14,8	8,8	8,5	8,0	7,2
	2	7,4	7,0	7,2	7,1	17,0	16,5	15,6	14,8	8,4	8,4	7,5	7,4
	3	7,2	7,2	6,4	-	16,1	16,4	15,5	15,1	8,2	8,0	7,8	7,8
	Povp.	<b>7,4</b>	<b>7,1</b>	<b>6,6</b>	<b>6,9</b>	<b>17,5</b>	<b>16,8</b>	<b>15,9</b>	<b>14,9</b>	<b>8,5</b>	<b>8,3</b>	<b>7,8</b>	<b>7,5</b>
$\mu_2$	Povp.	8,2	-	-	-	25,1	-	-	-	9,8	-	-	-
Raz. s posed. [mm]		290	300	290	280	260	230	230	240	270	270	270	270
Mini razlez s posedom [mm]		410	390	380	370	330	290	290	300	370	350	360	360

## PRILOGA I: GRAFIKONI »MEŠANICA ZA MEŠANICO« IN ČASOVNE PRIMERJAVE MED BETONOM IN NJEMU EKVIVALENTNO MALTO

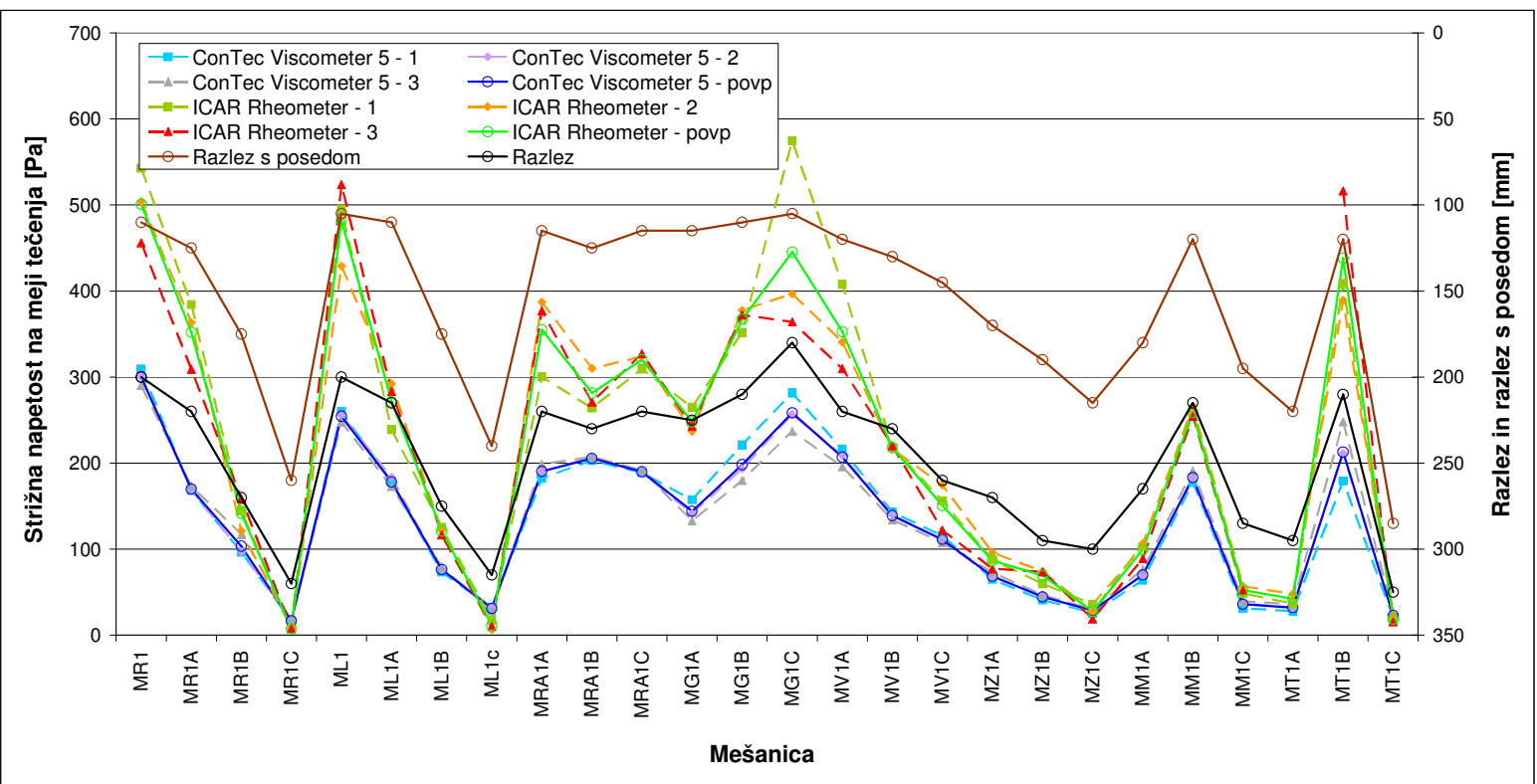
### GRAFIKONI »MEŠANICA ZA MEŠANICO«.



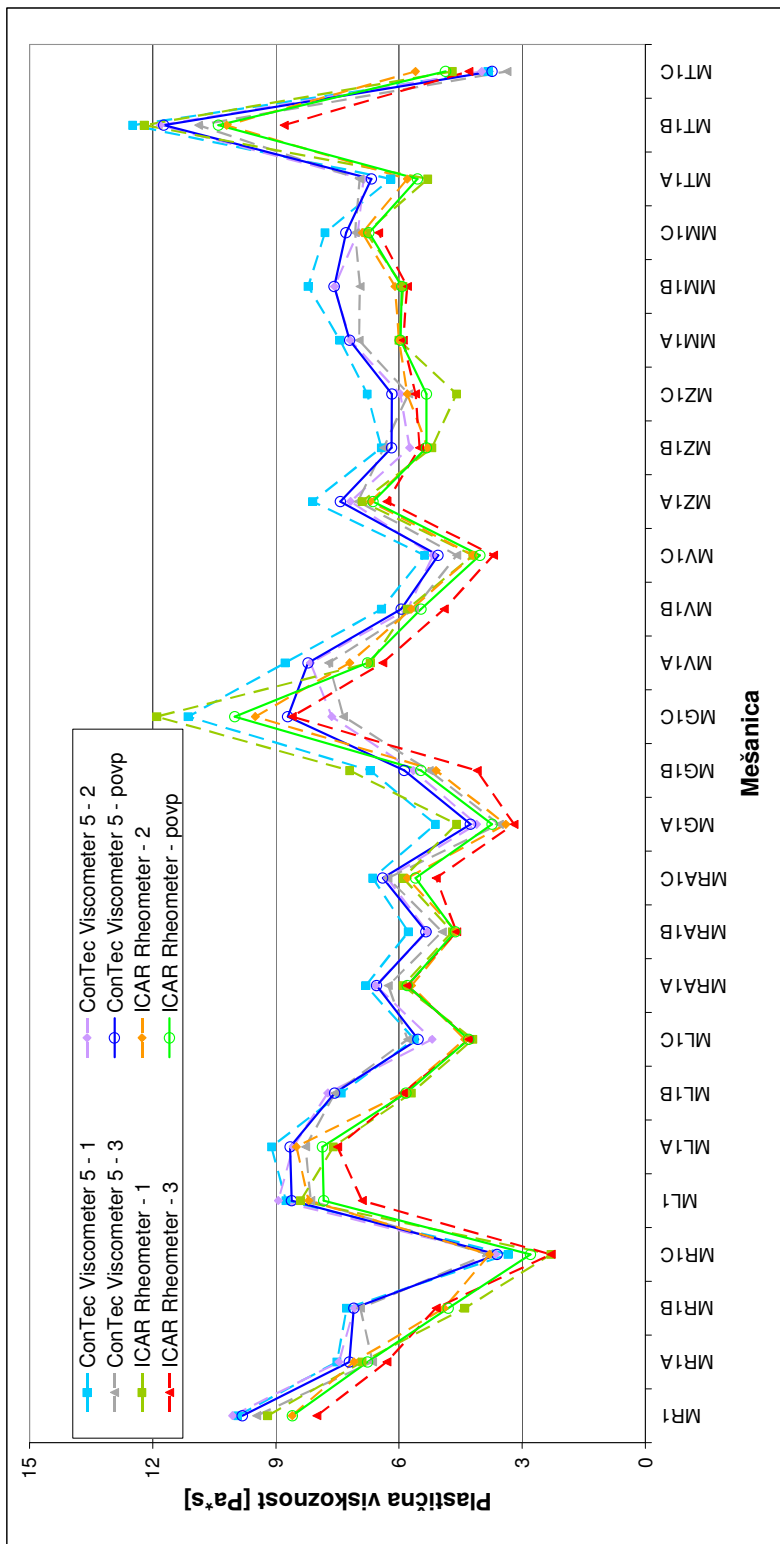
Slika I-1: »Mešanica za mešanico« za  $\tau_0$ , običajni betoni.



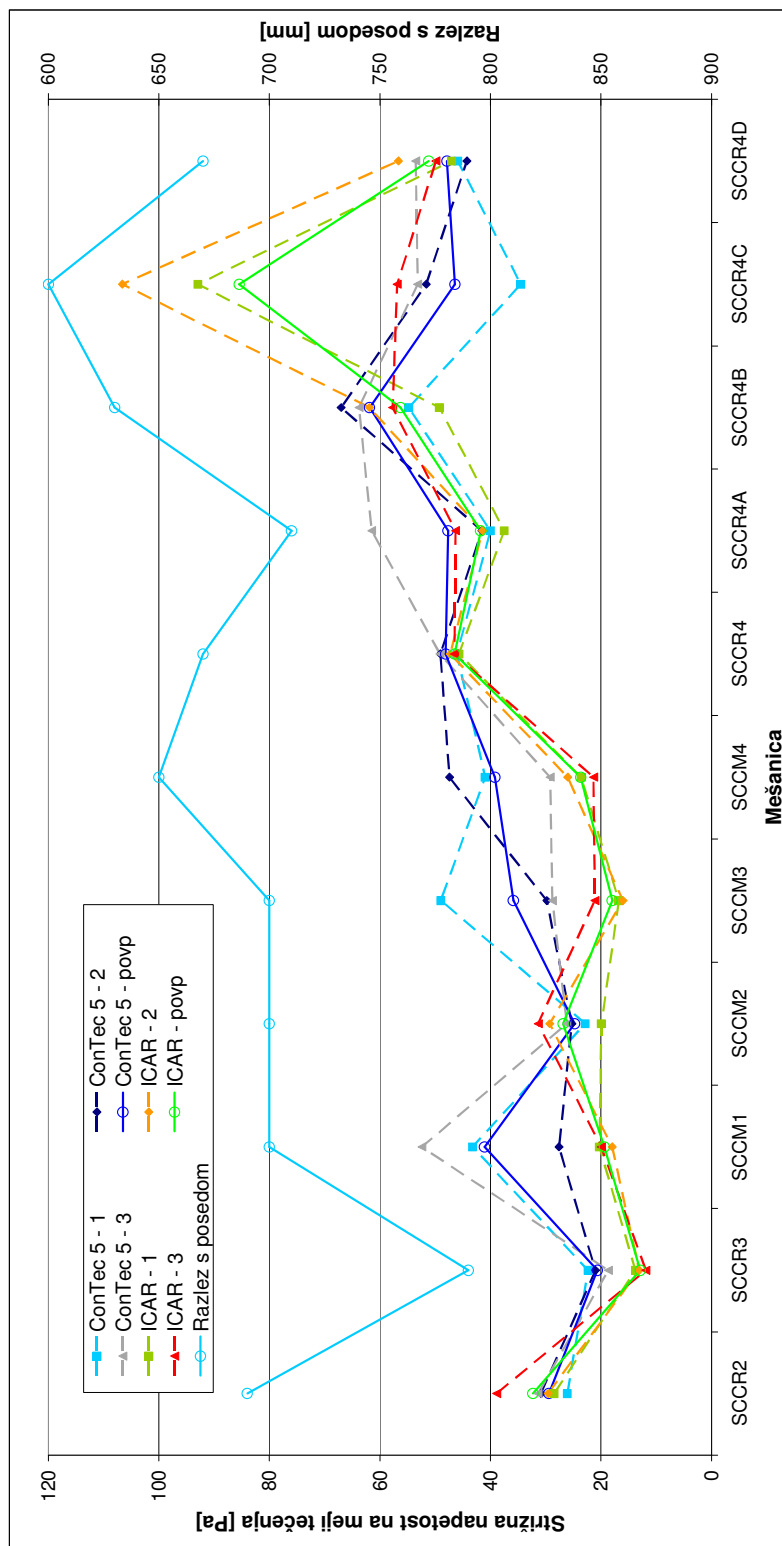
Slika I-2: »Mešanica za mešanico« za  $\mu$ , običajni betoni.



Slika I-3: »Mešanica za mešanico« za  $\tau_0$ , običajne malte.

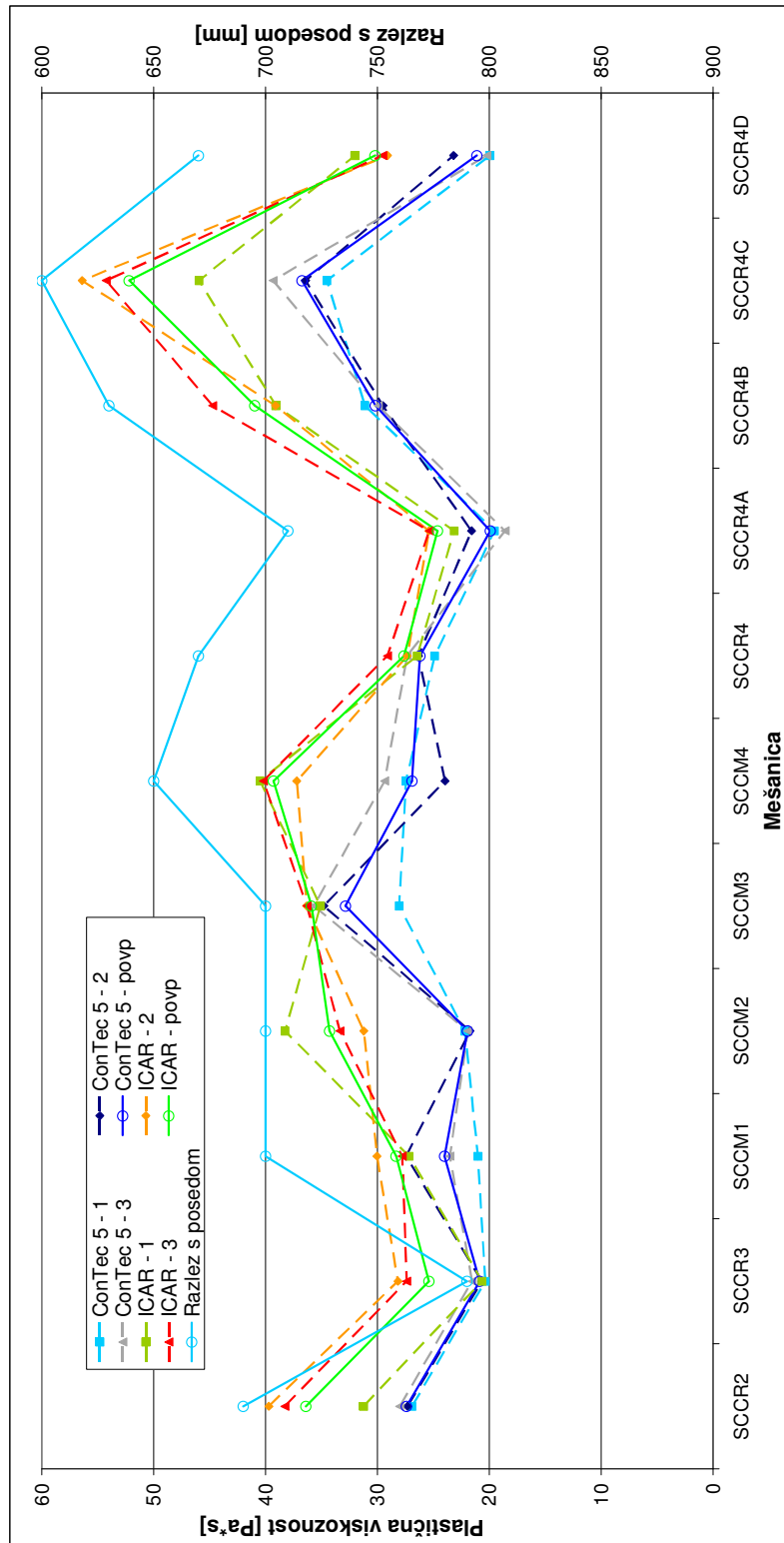


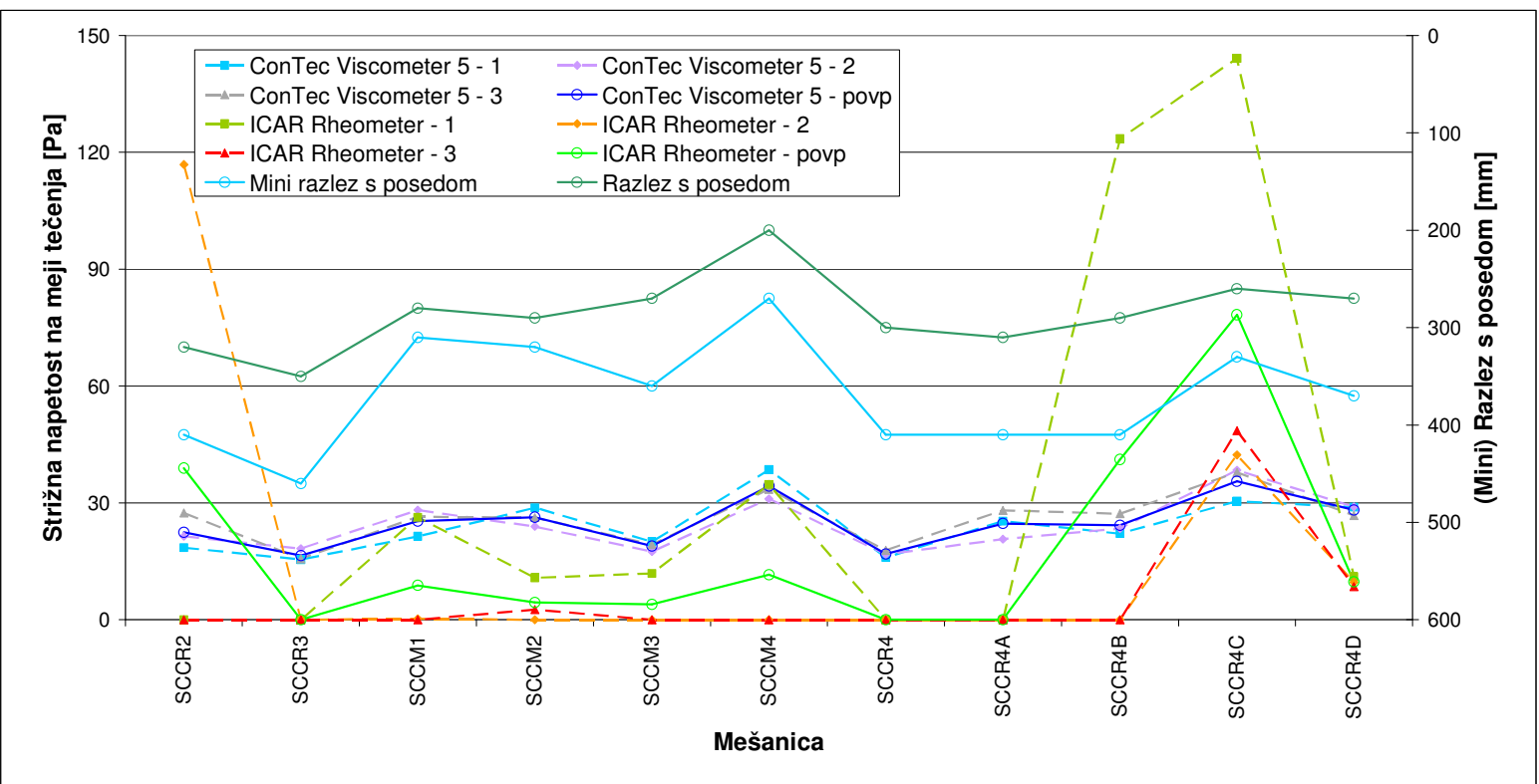
Slika I-4: »Mešanica za mešanico« za  $\mu$ , običajne malte.



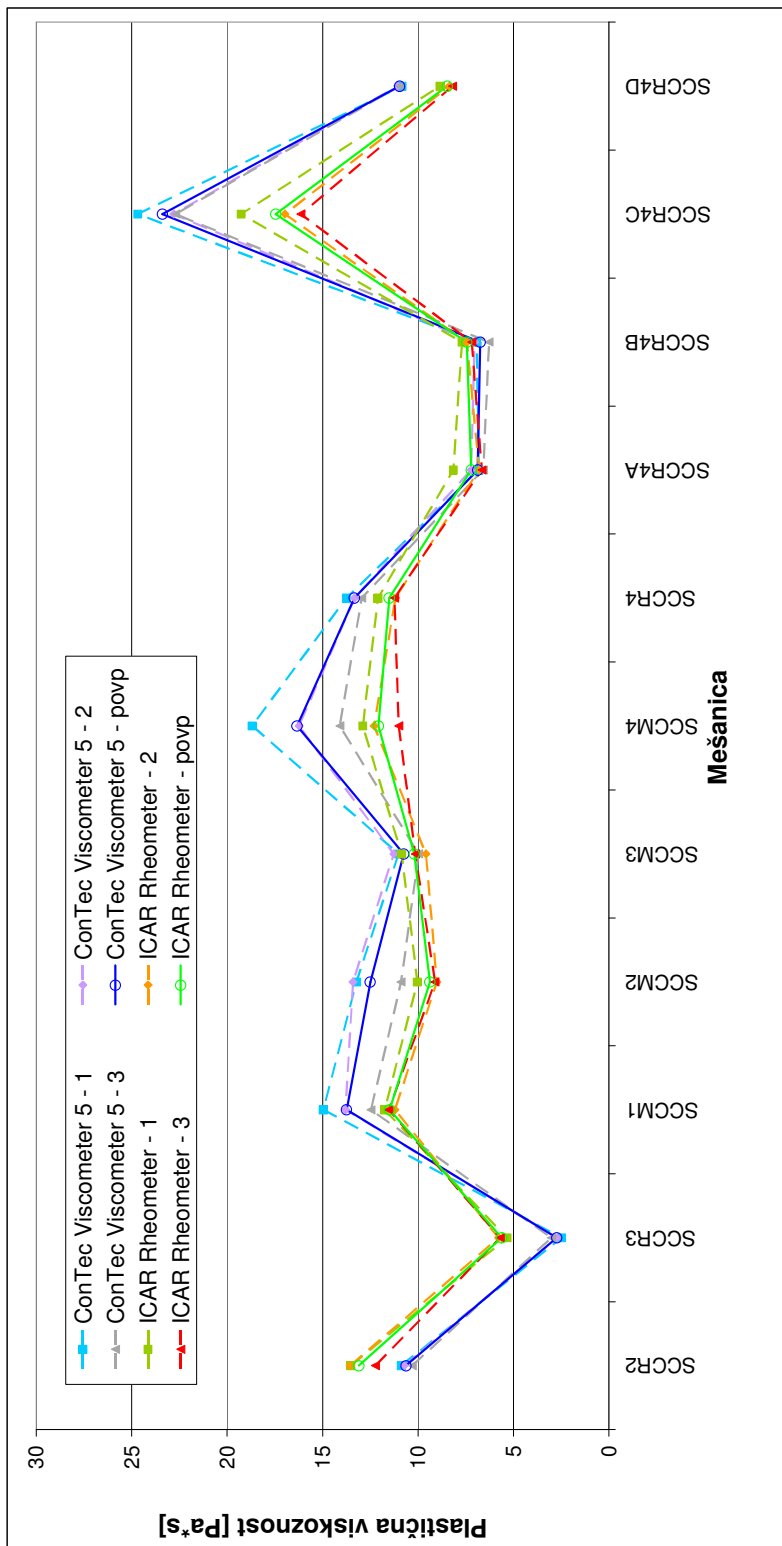
Slika I-5: »Mešanica za mešanico« za  $\tau_0$ , betoni SCC.



Slika I-6: »Mešanica za mešanico« za  $\mu$ , betoni SCC.

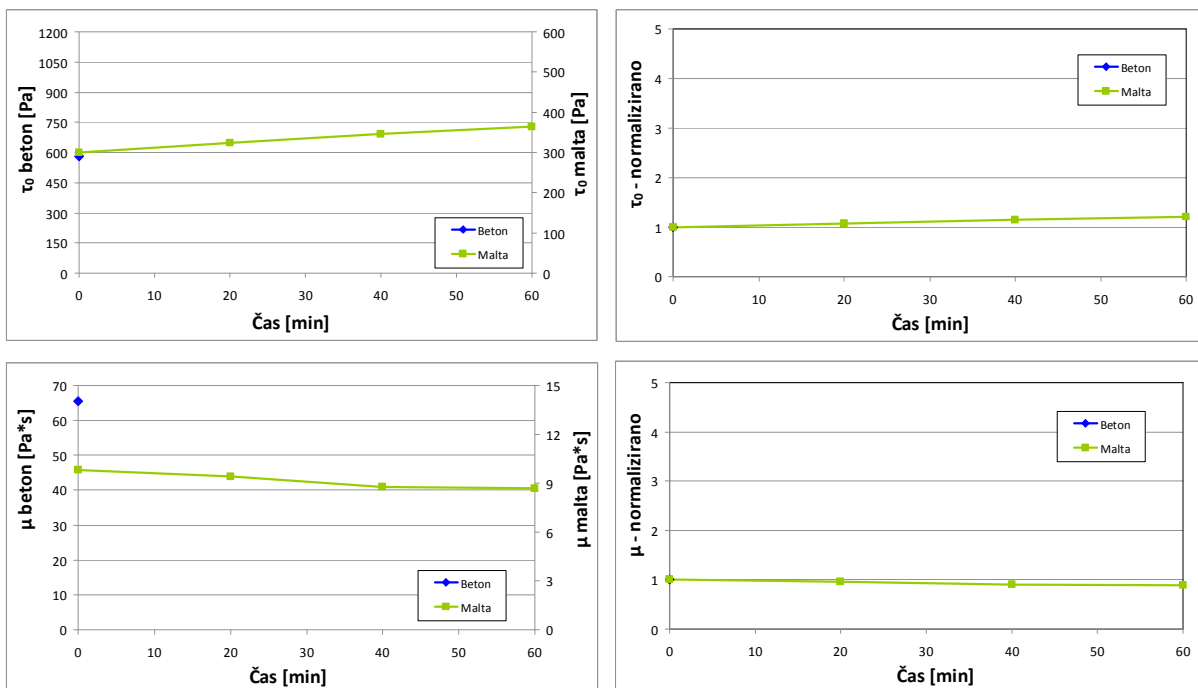


Slika I-7: »Mešanica za mešanico« za  $t_0$ , malte SCC.

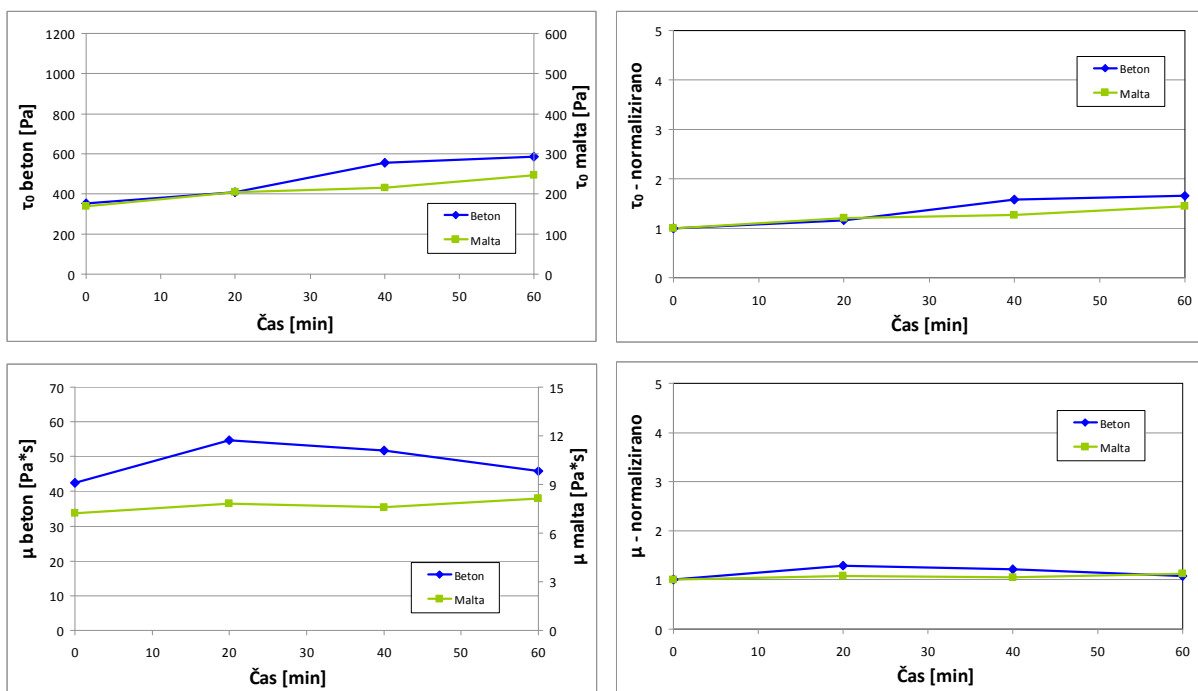


Slika I-8: »Mešanica za mešanico« za  $\mu$ , malte SCC.

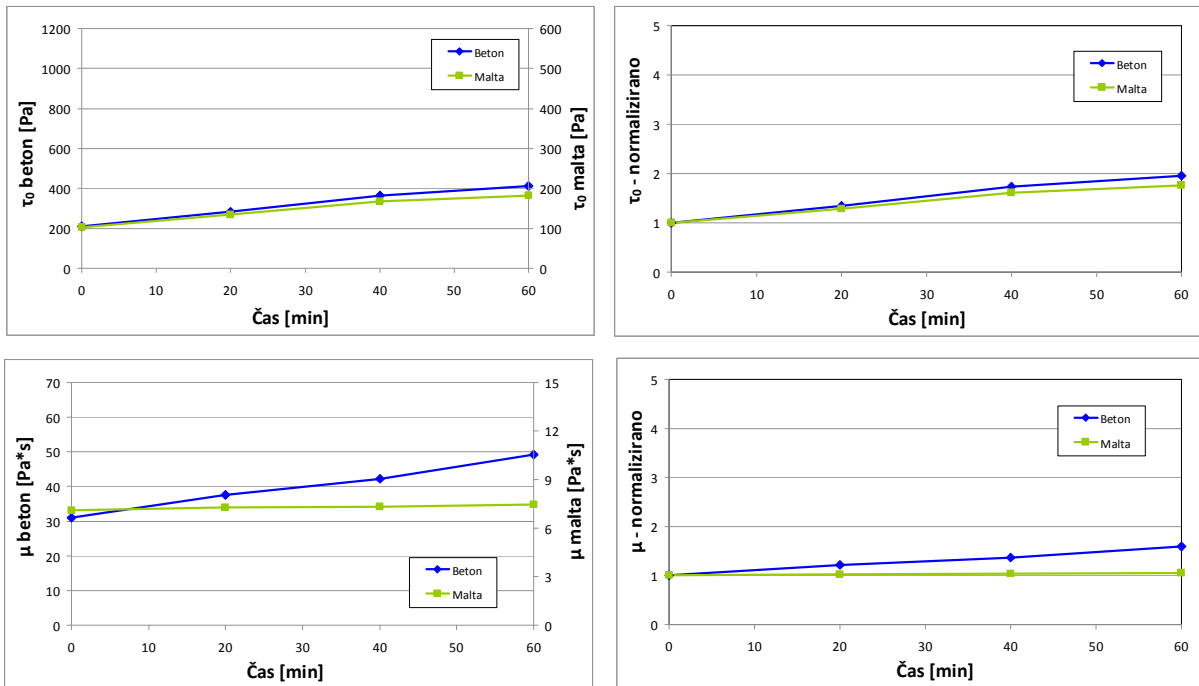
GRAFIKONI ČASOVNE PRIMERJAVE MED BETONI IN NJIM EKVIVALENTNIM MALTAM.



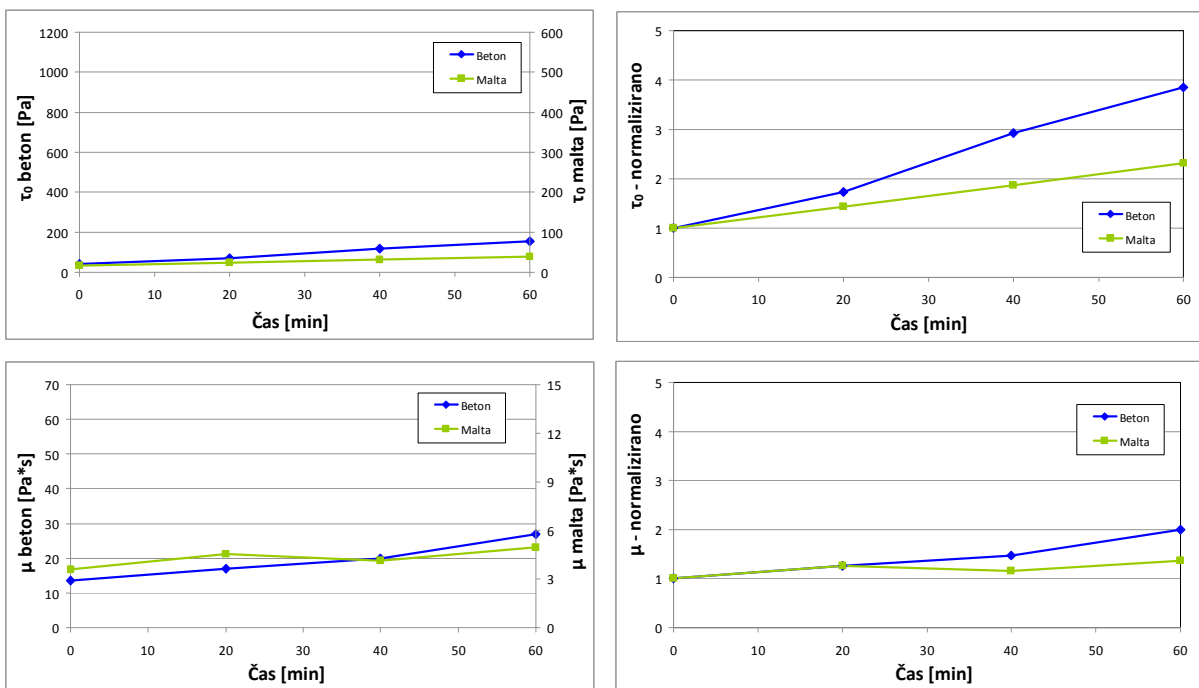
Slika I-9: CR1



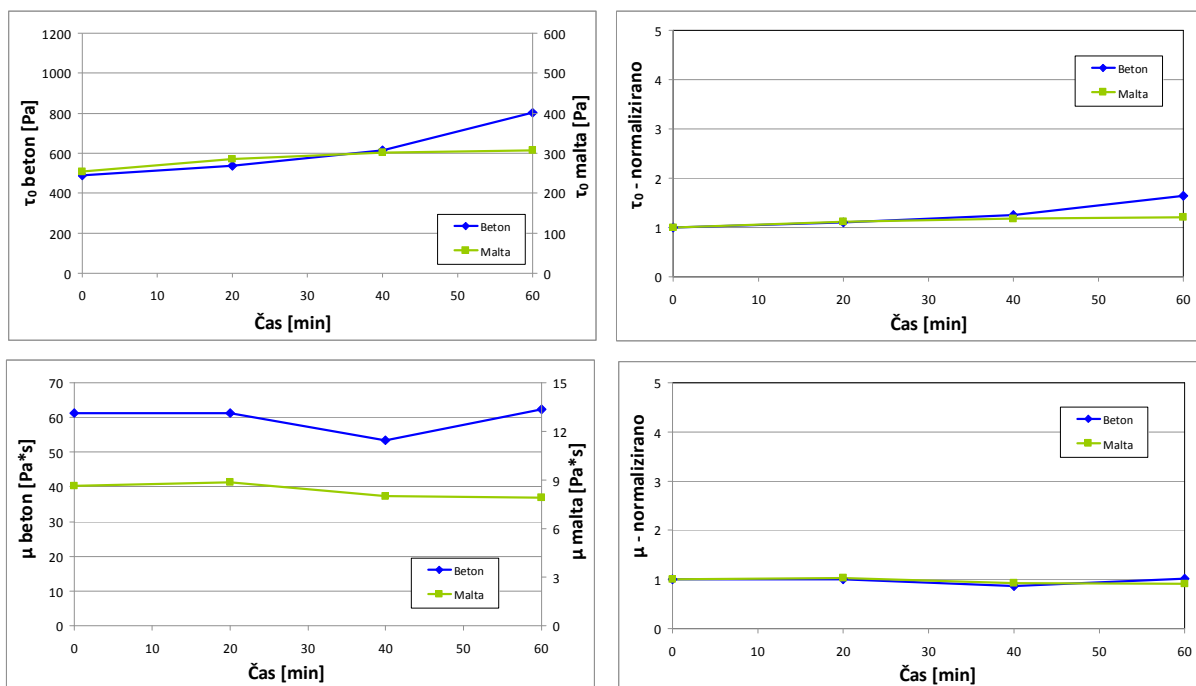
Slika I-10: CR1A



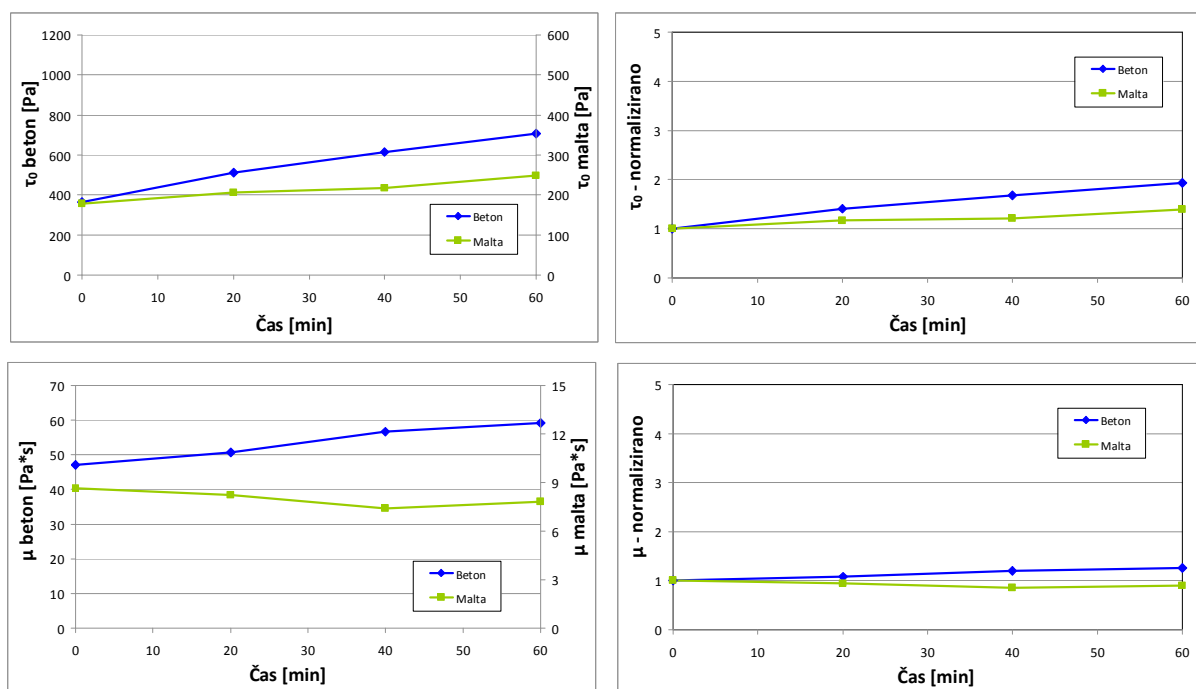
Slika I-11: CR1B



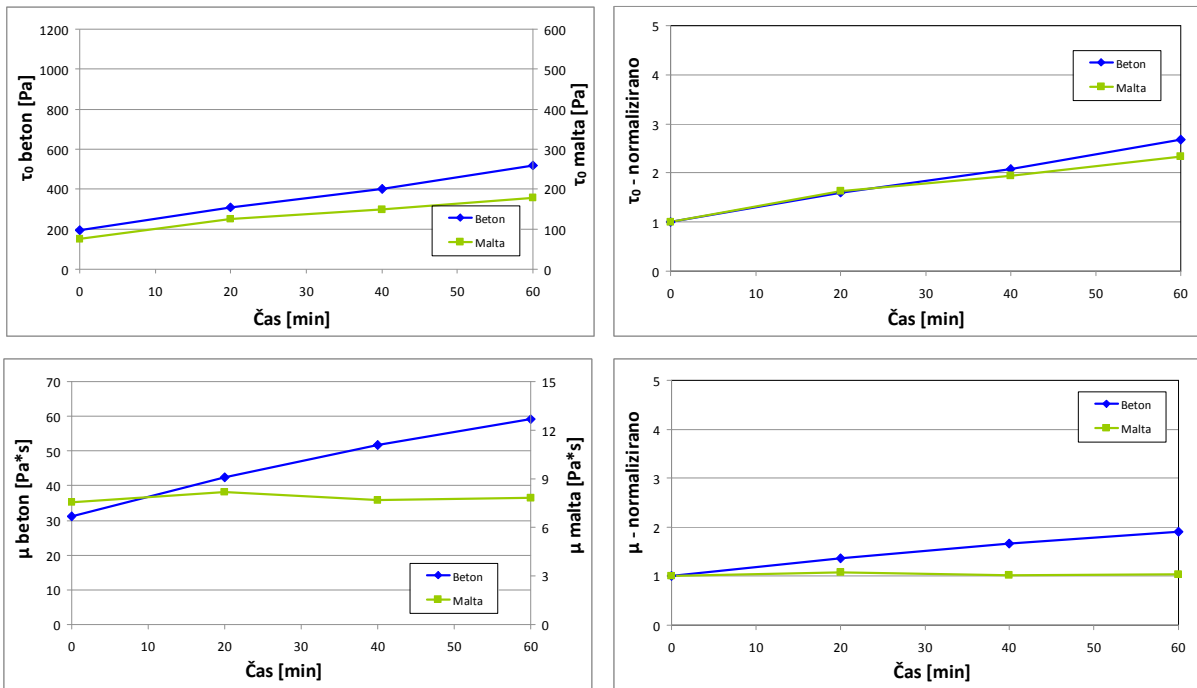
Slika I-12: CR1C



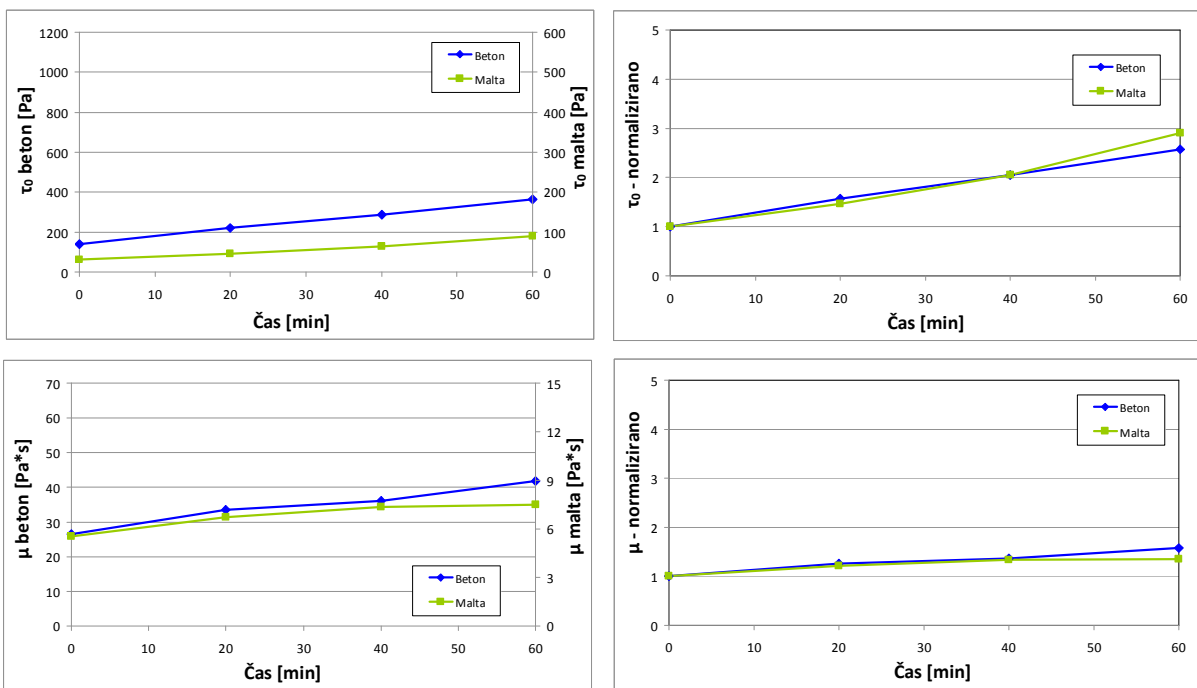
Slika I-13: CL1



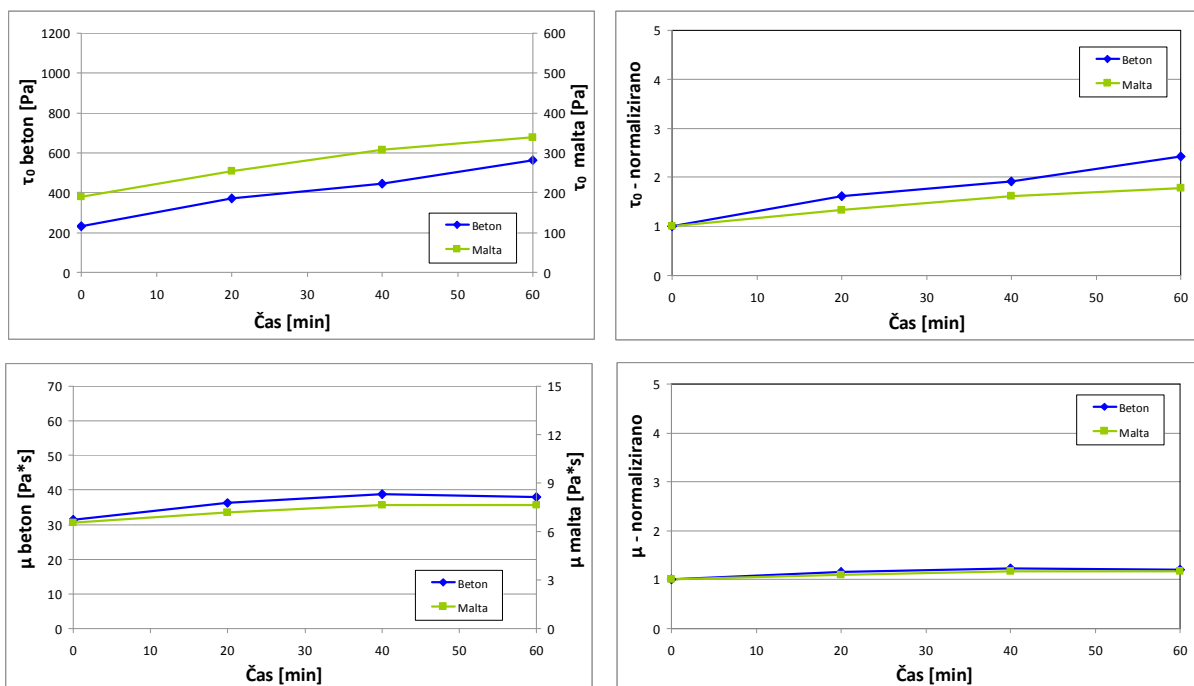
Slika I-14: CL1A



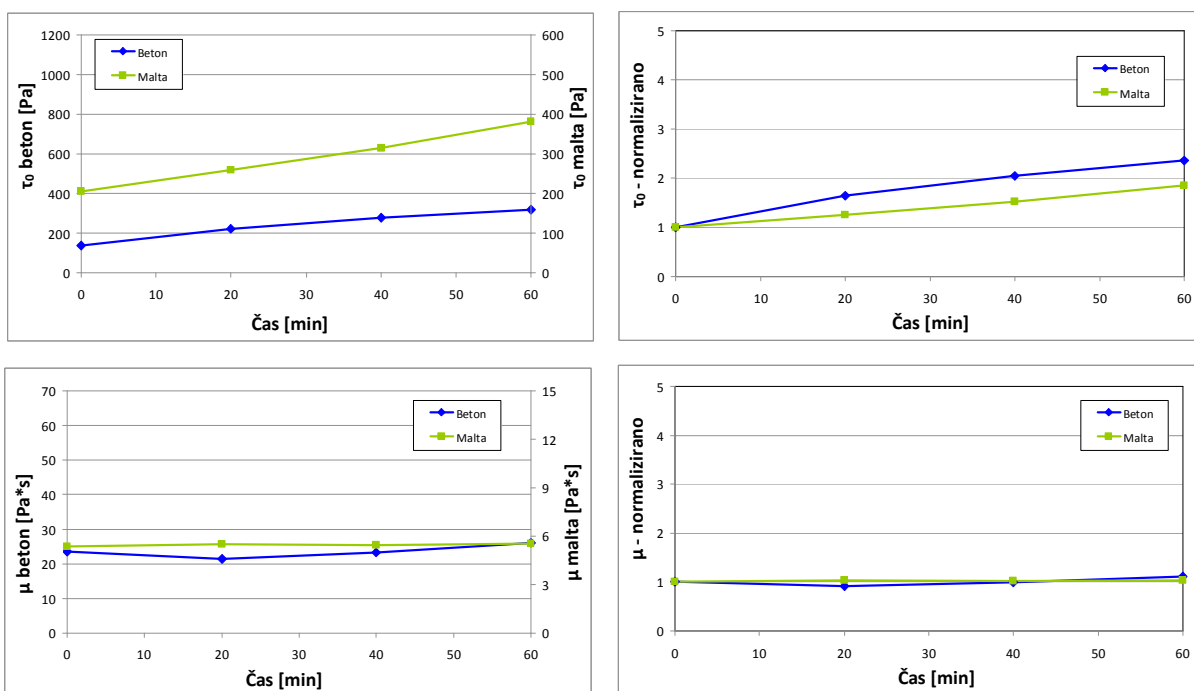
Slika I-15: CL1B



Slika I-16: CLIC

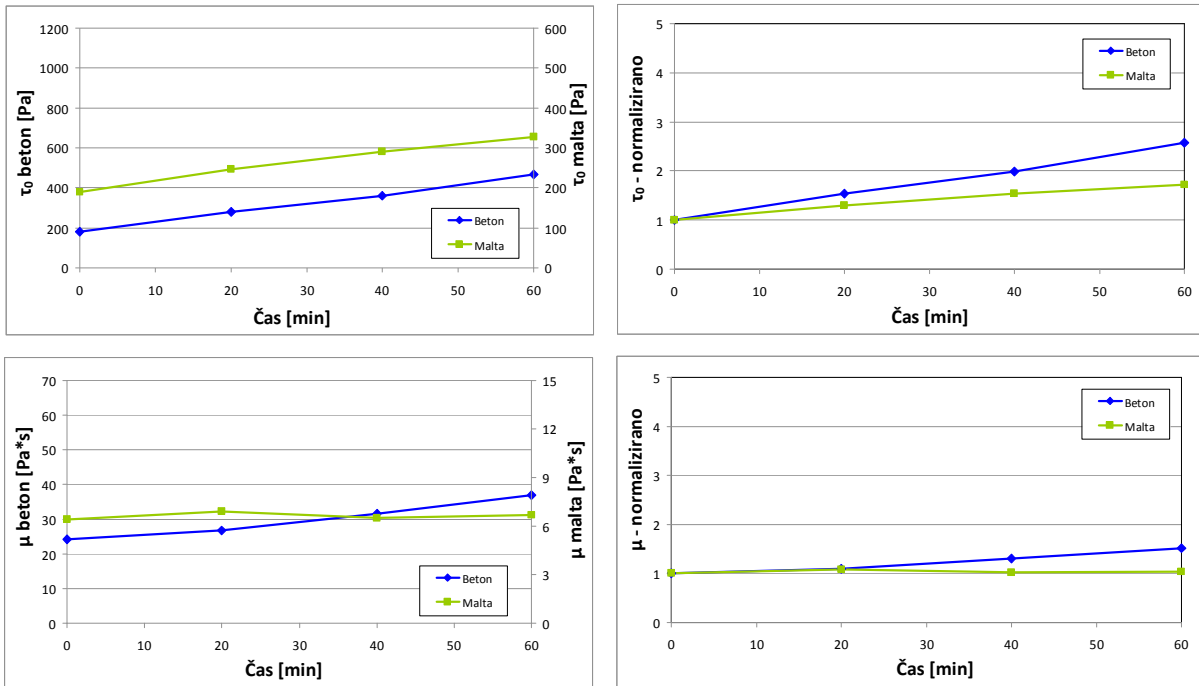


Slika I-17: CRA1A

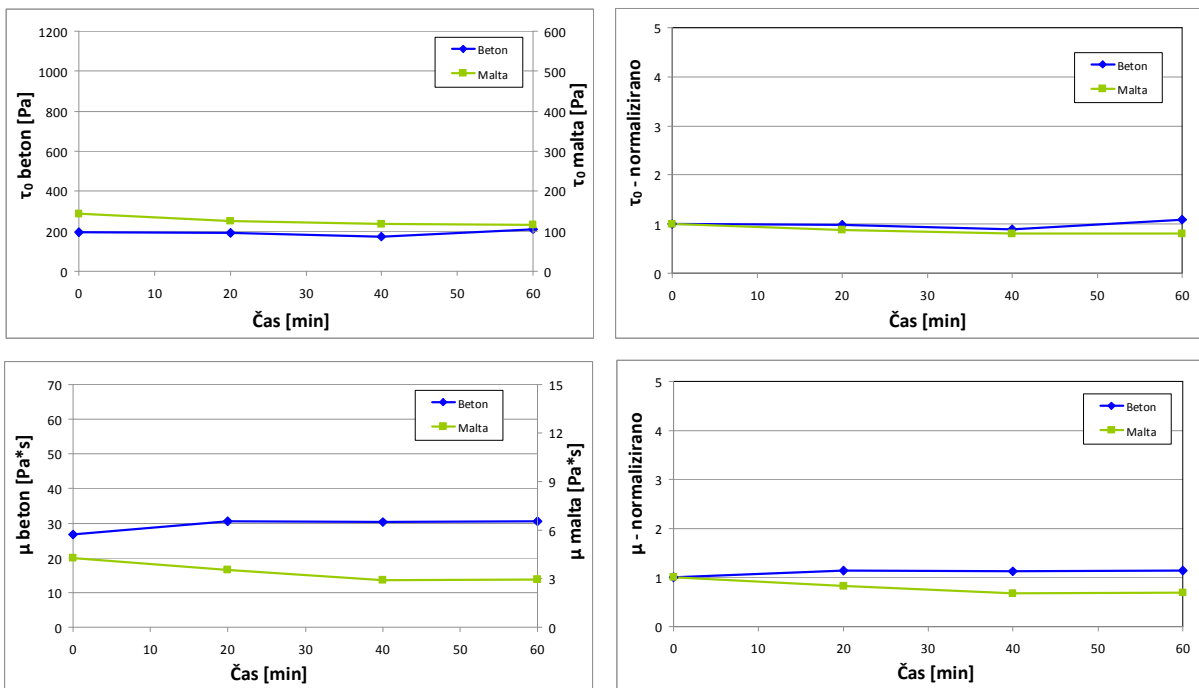


Slika I-18: CRA1B

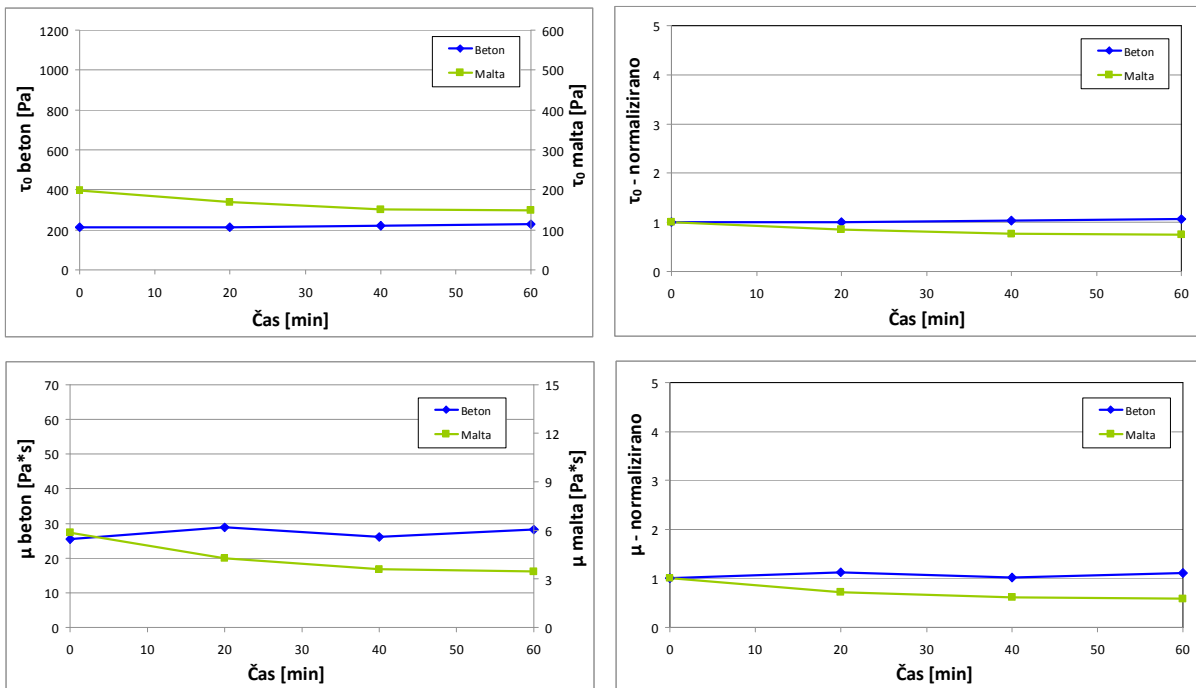




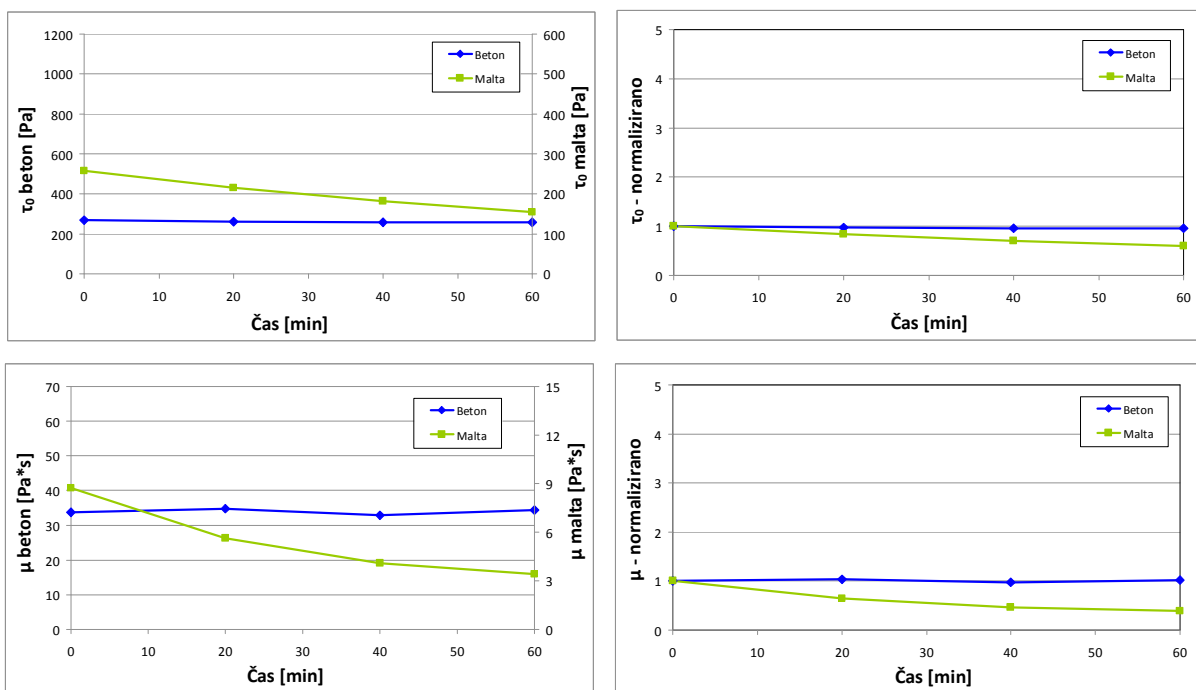
Slika I-19: CRA1C



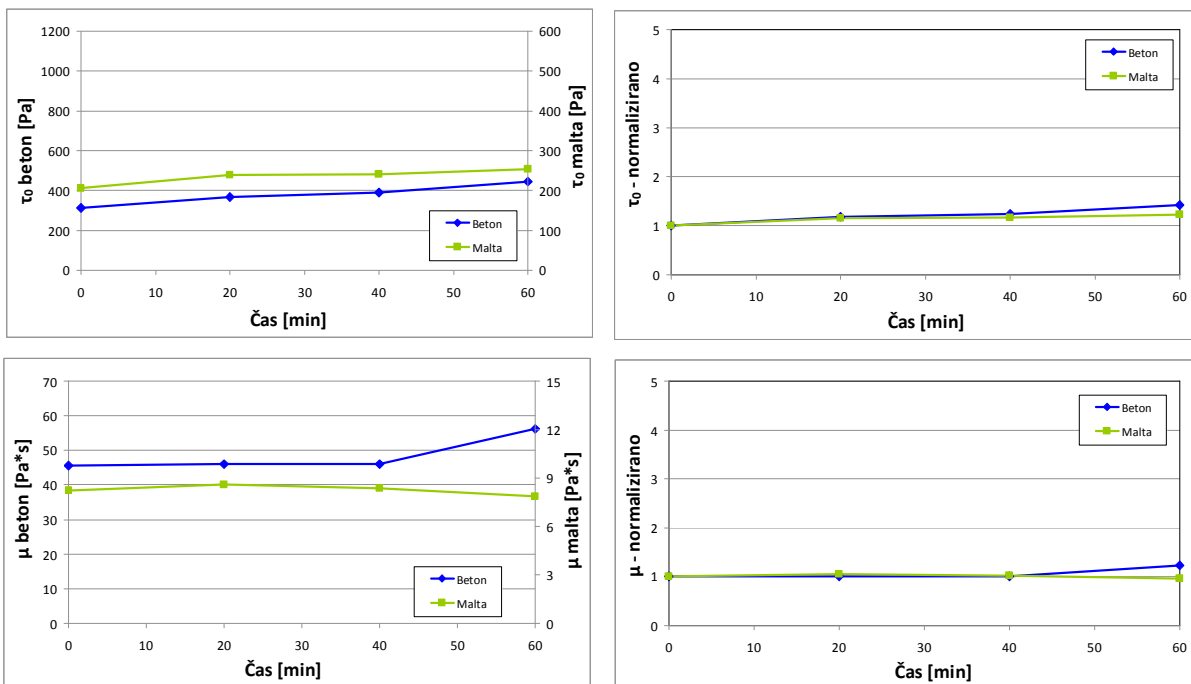
Slika I-20: CG1A



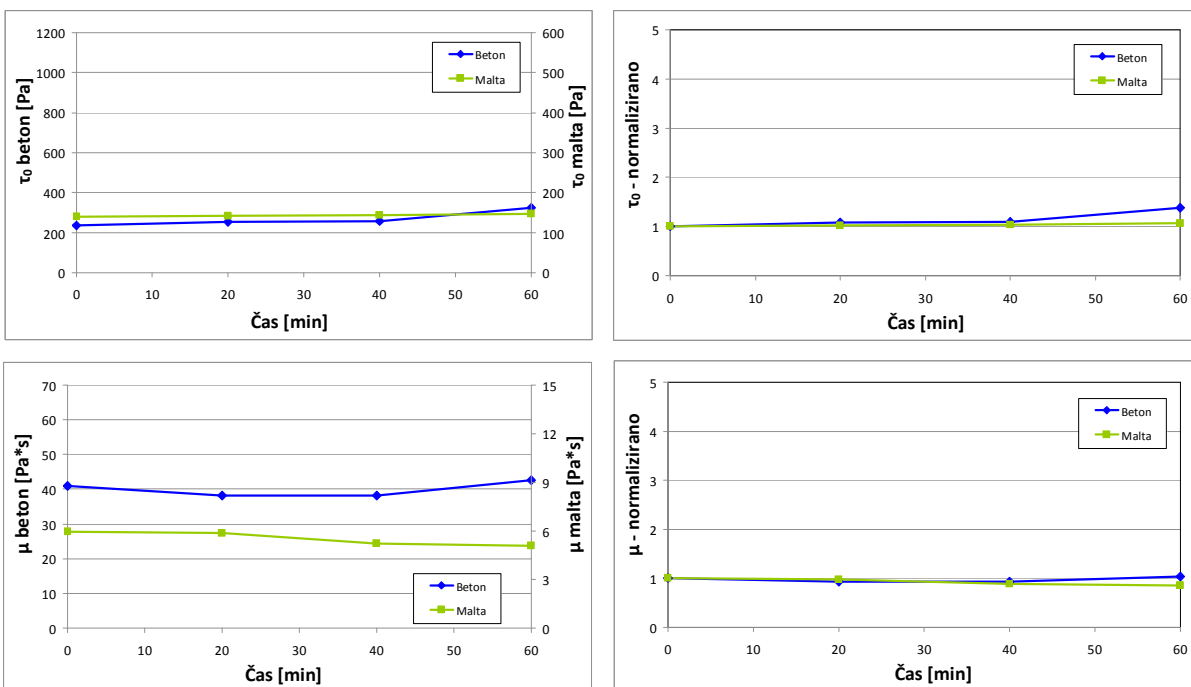
Slika I-21: CG1B



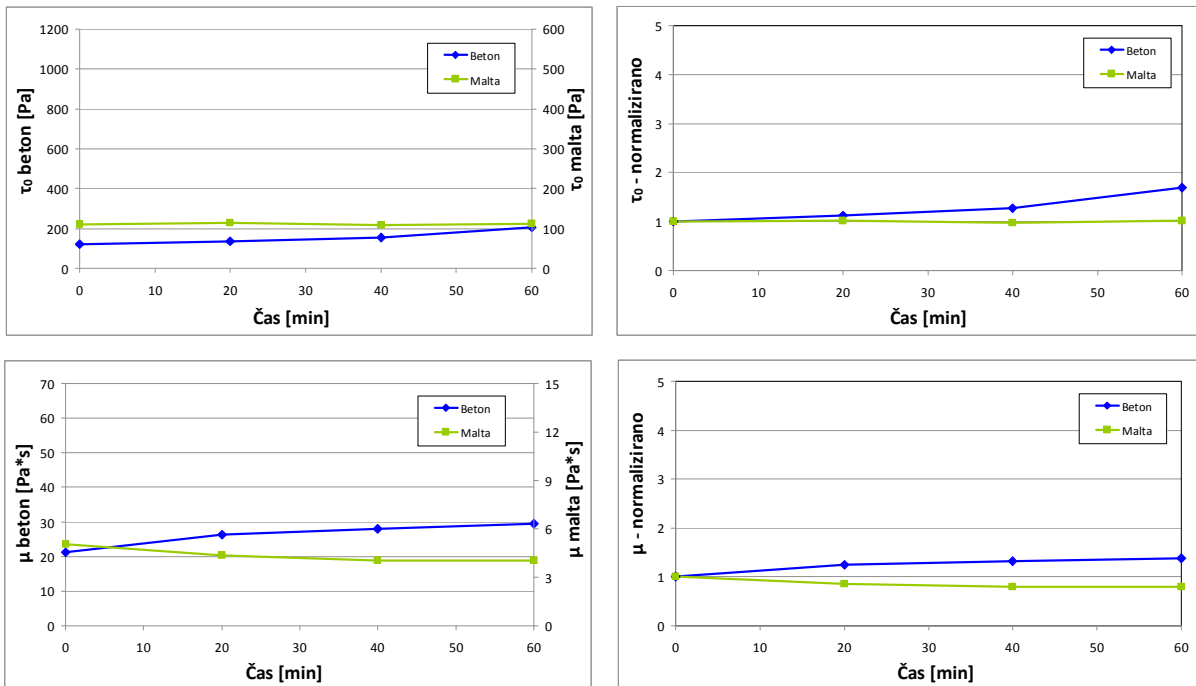
Slika I-22: CG1C



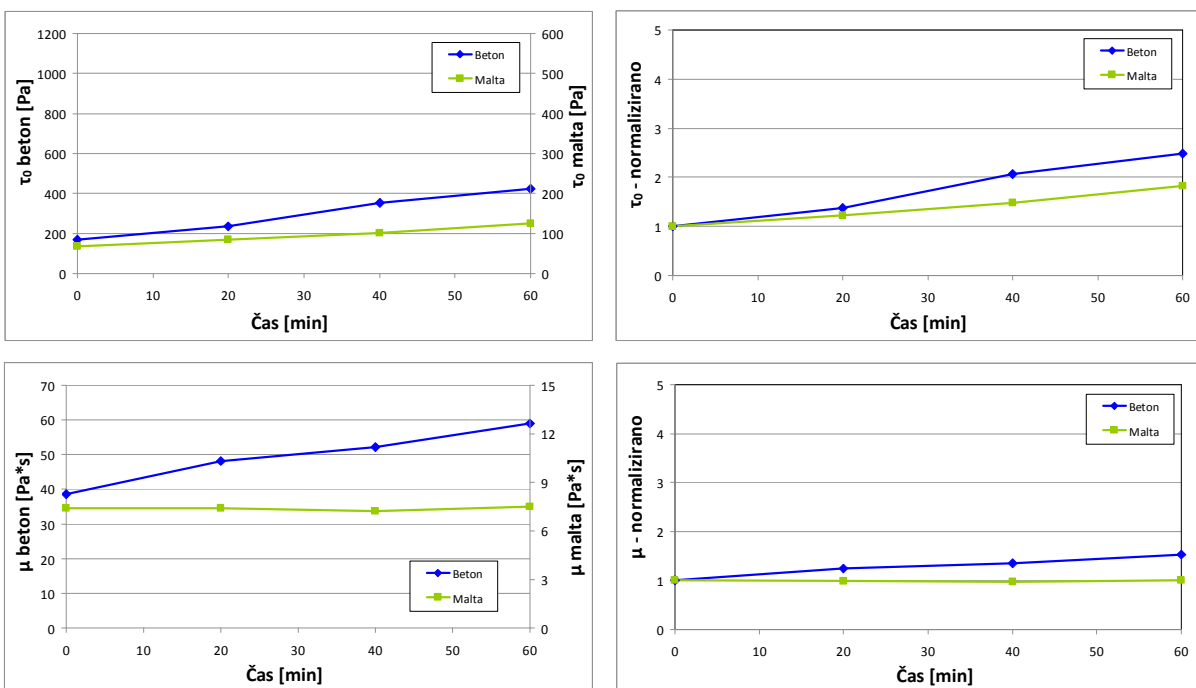
Slika I-23: CV1A



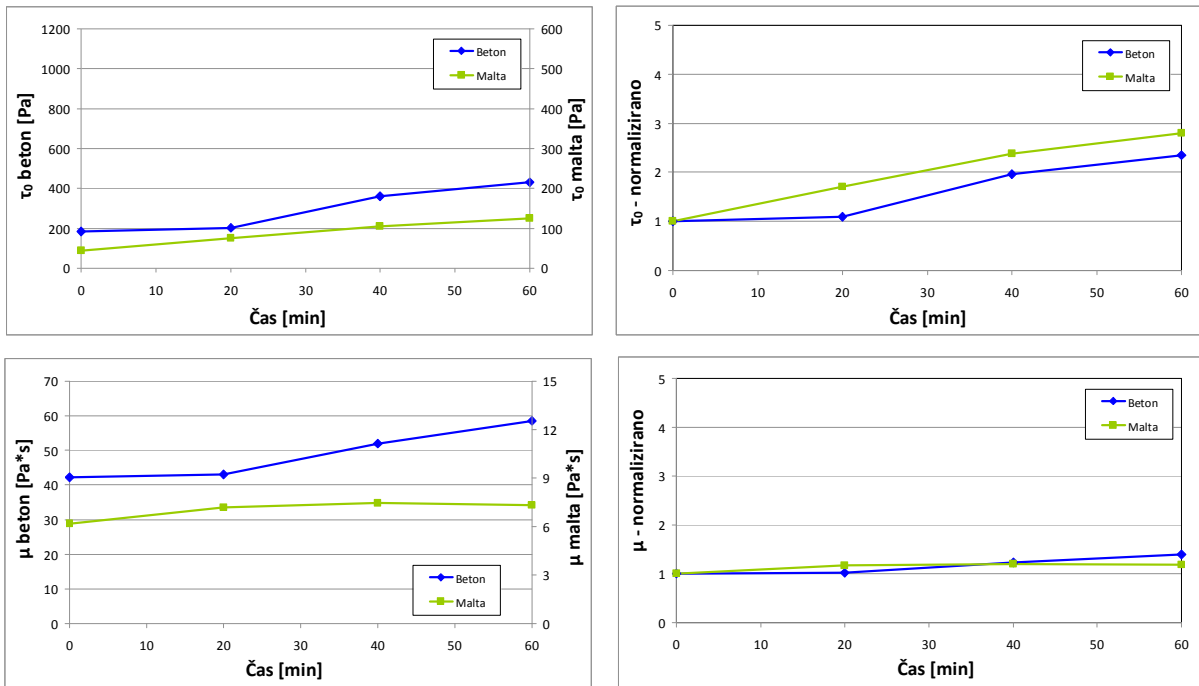
Slika I-24: CV1B



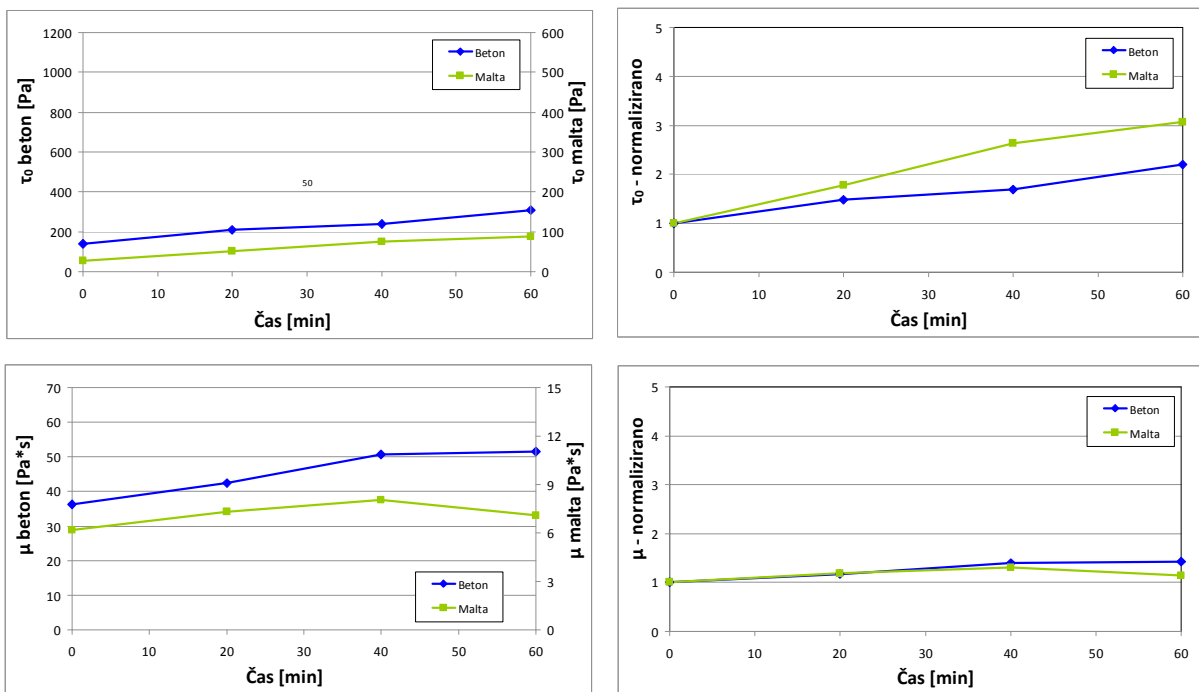
Slika I-25: CV1C



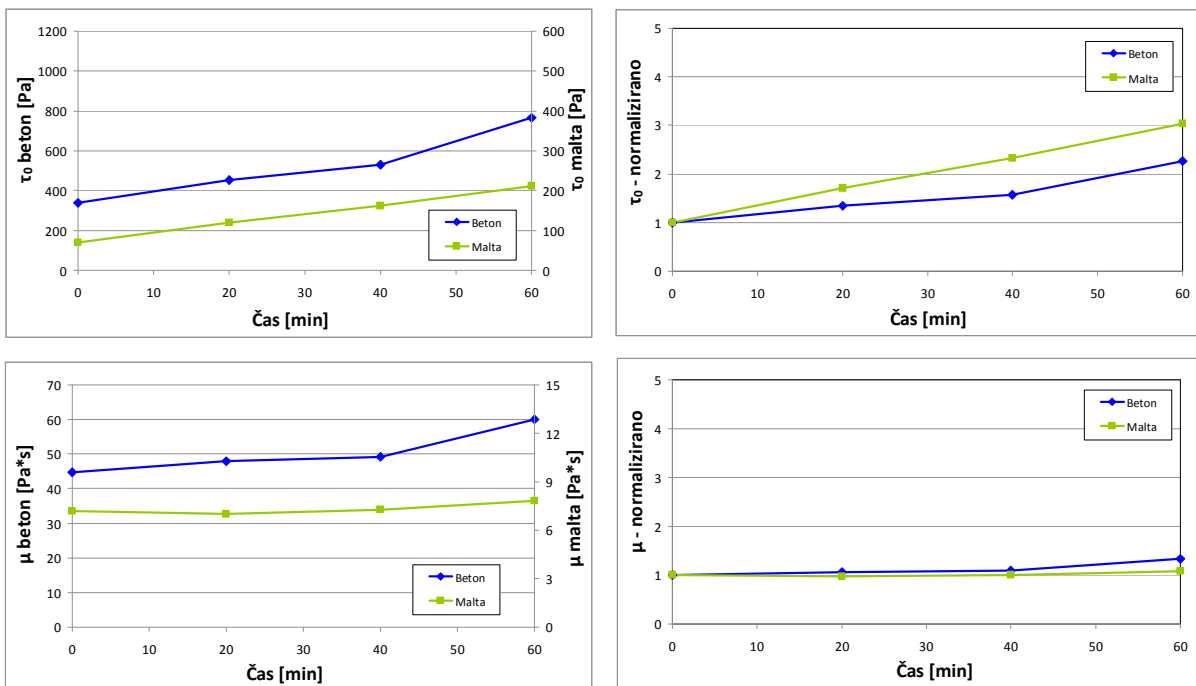
Slika I-26: CZ1A



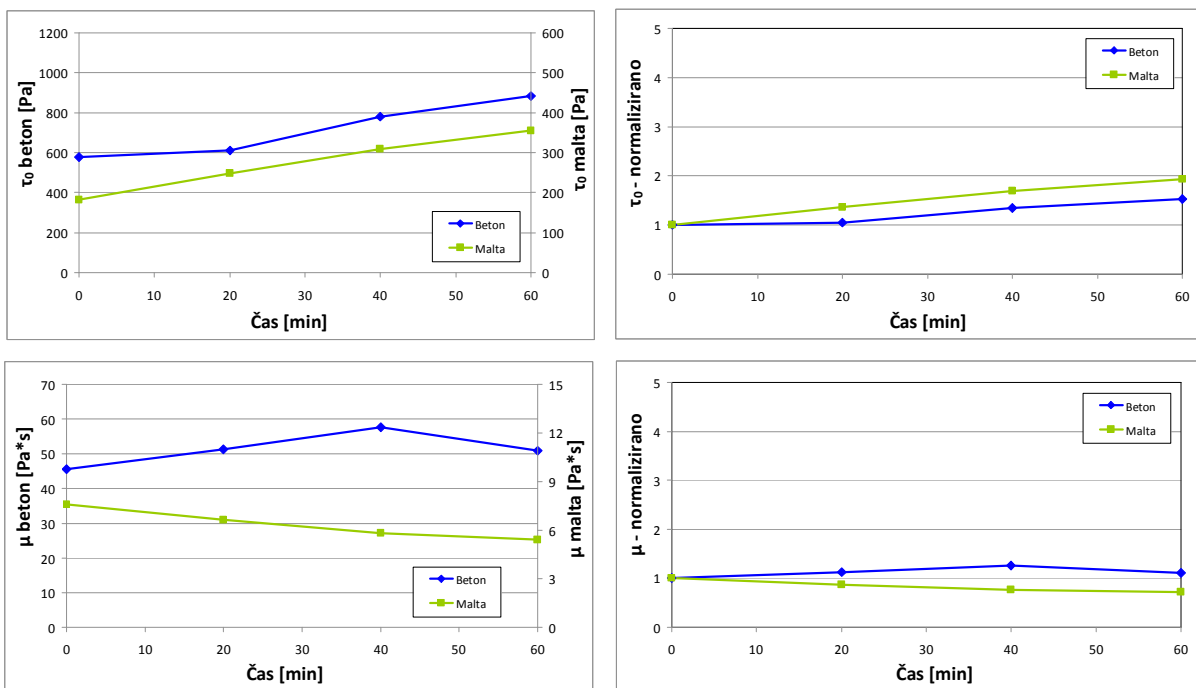
Slika I-27: CZ1B



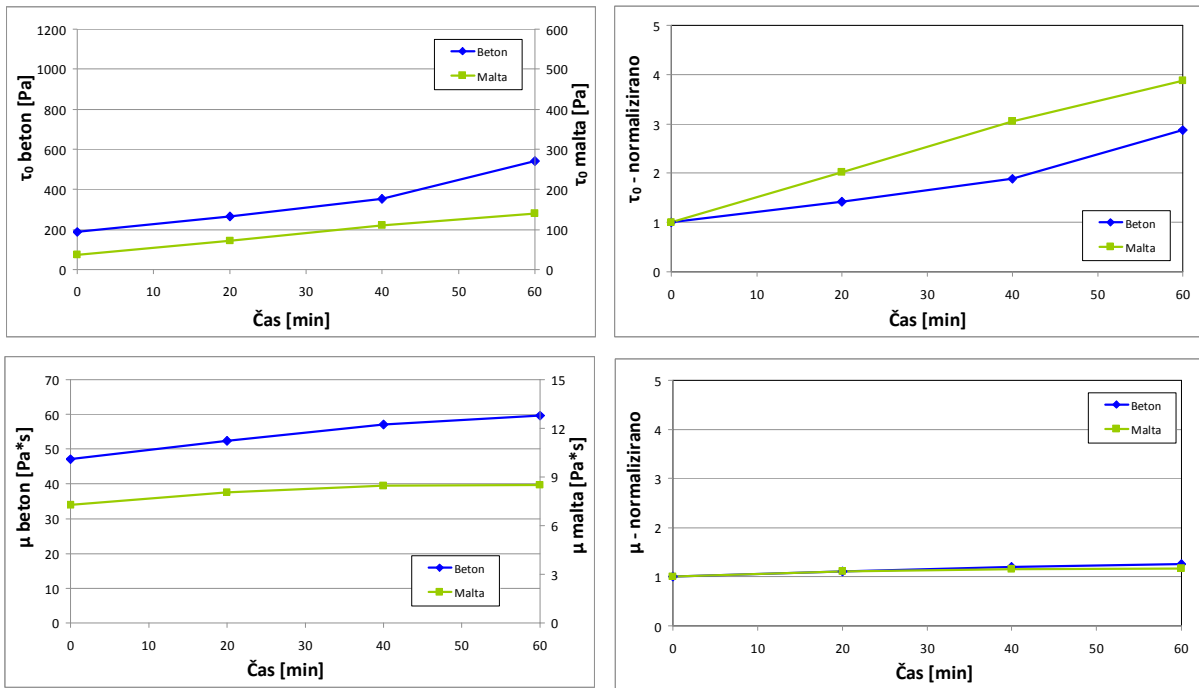
Slika I-28: CZ1C



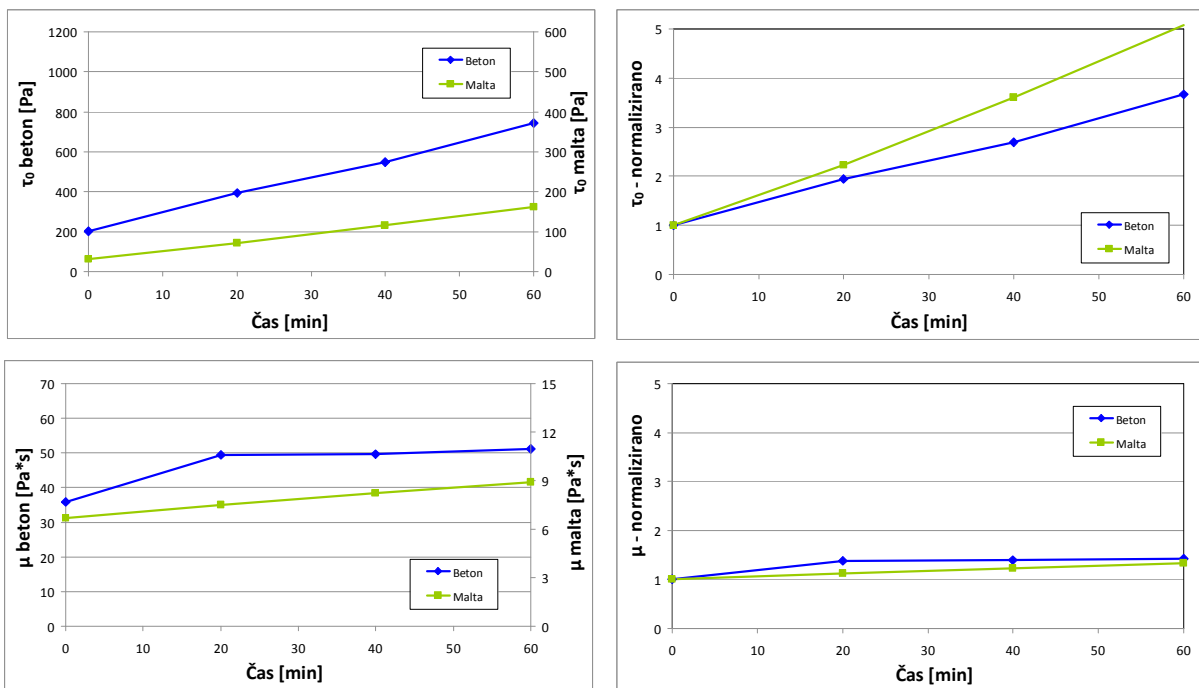
Slika I-29: CM1A



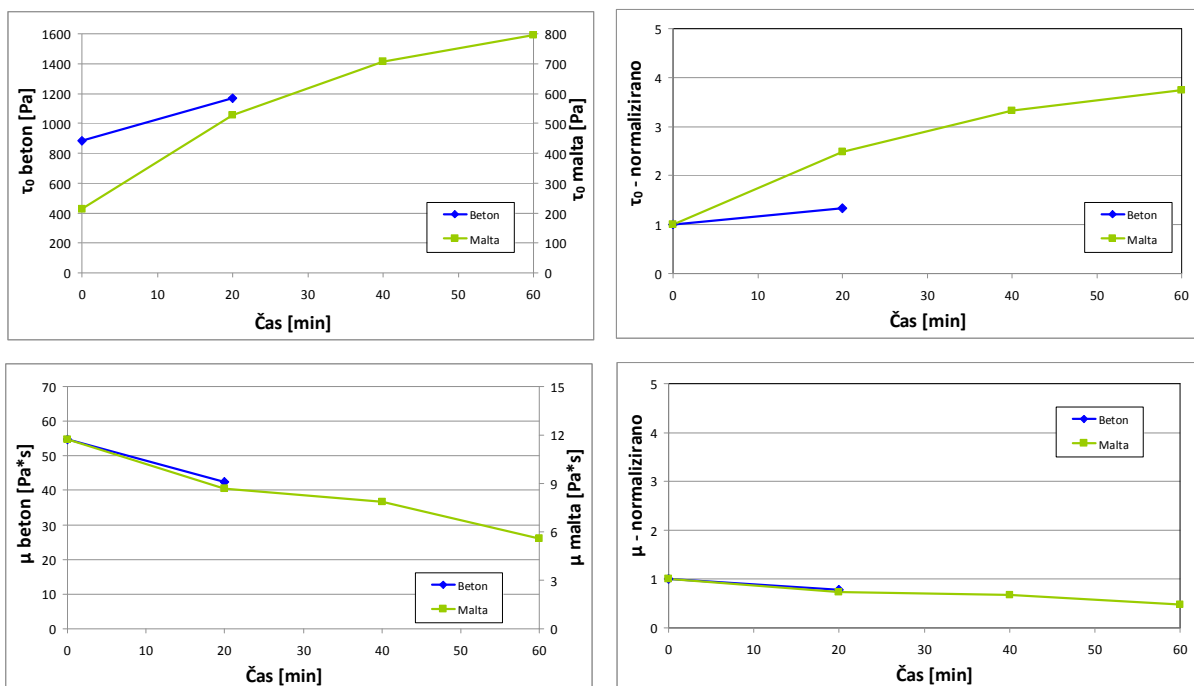
Slika I-30: CM1B



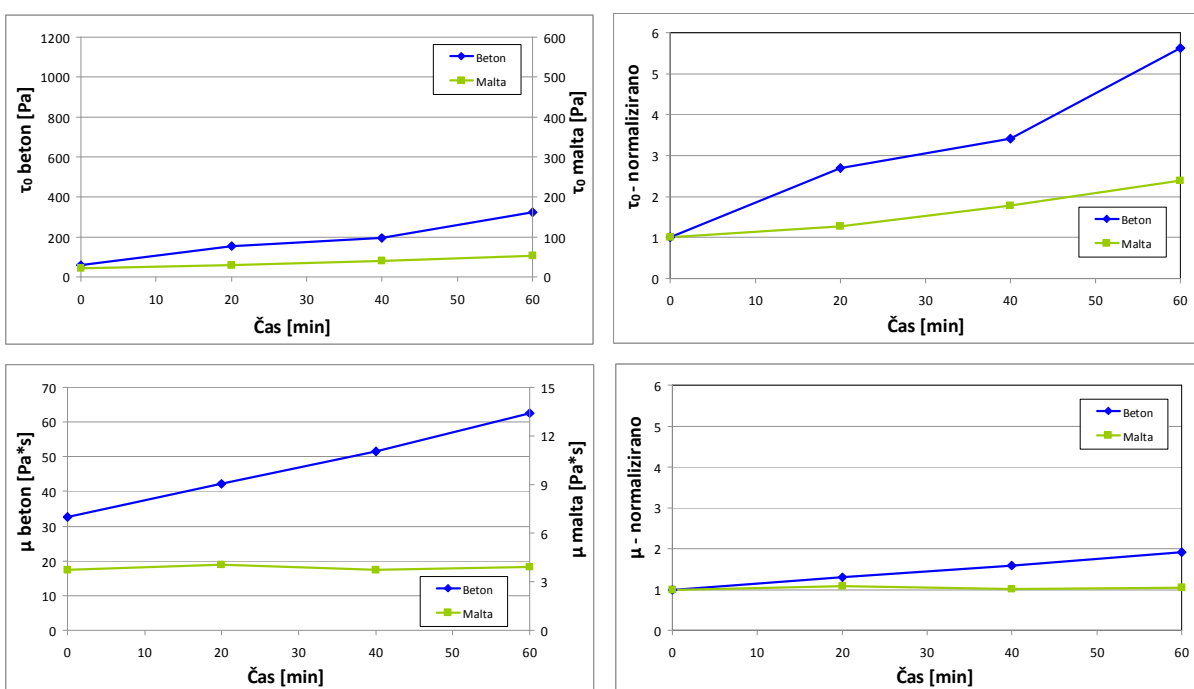
Slika I-31: CM1C



Slika I-32: CT1A

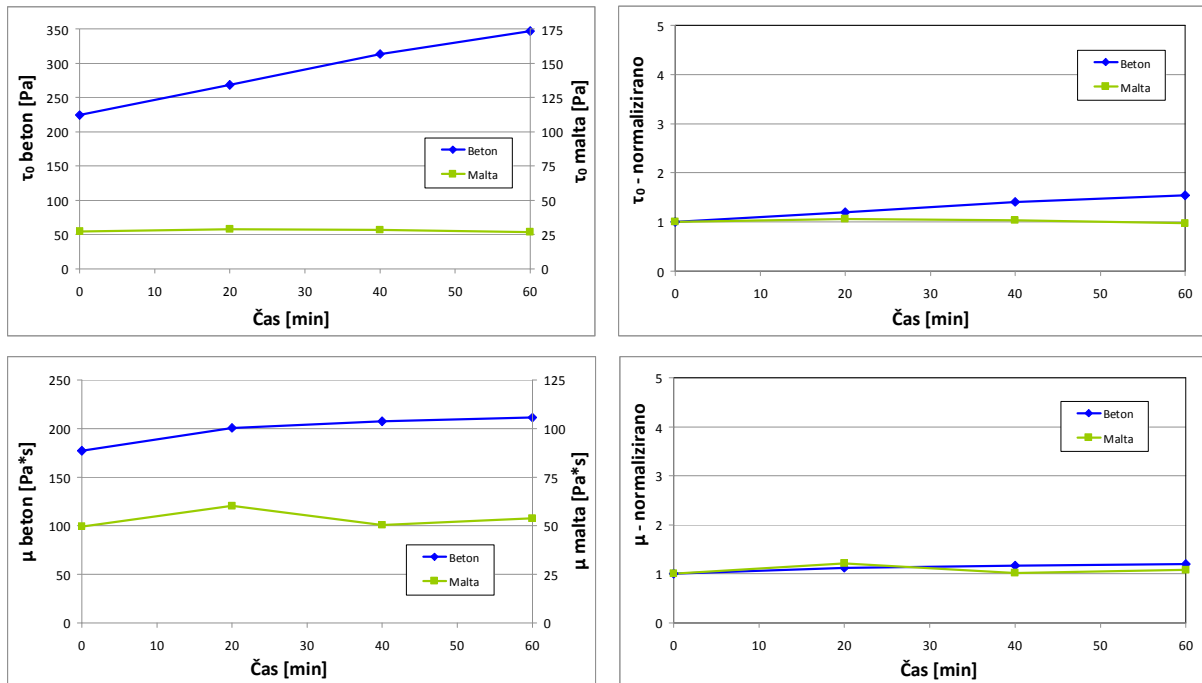


Slika I-33: CT1B

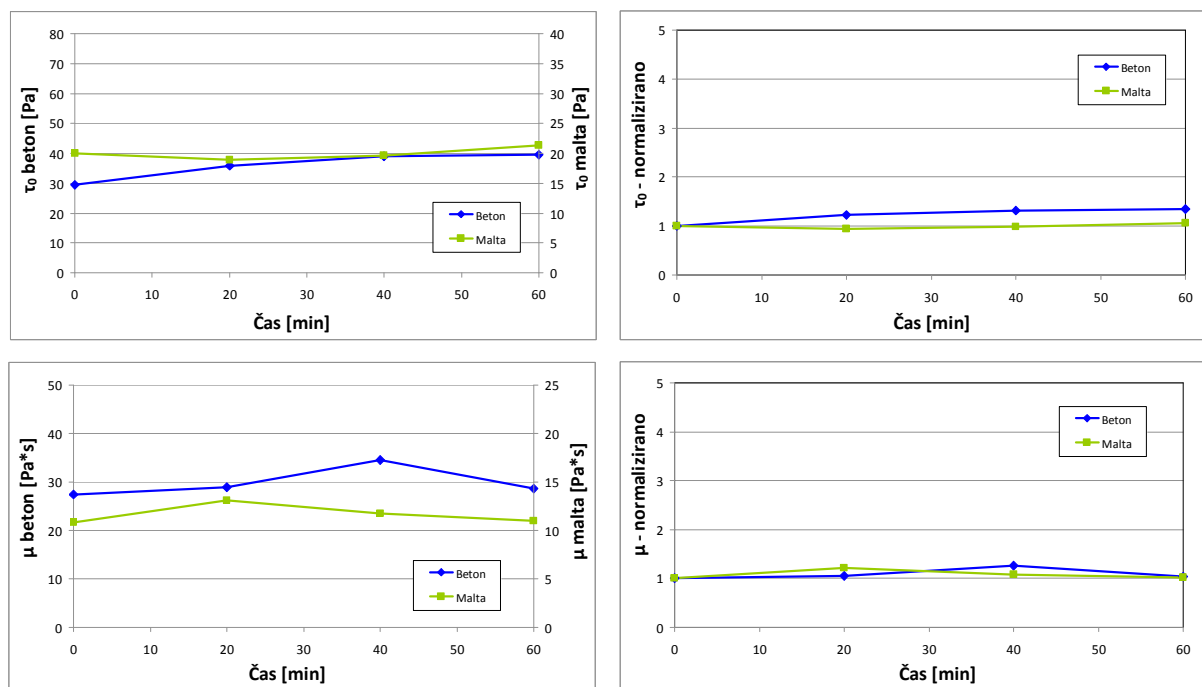


Slika I-34: CT1C

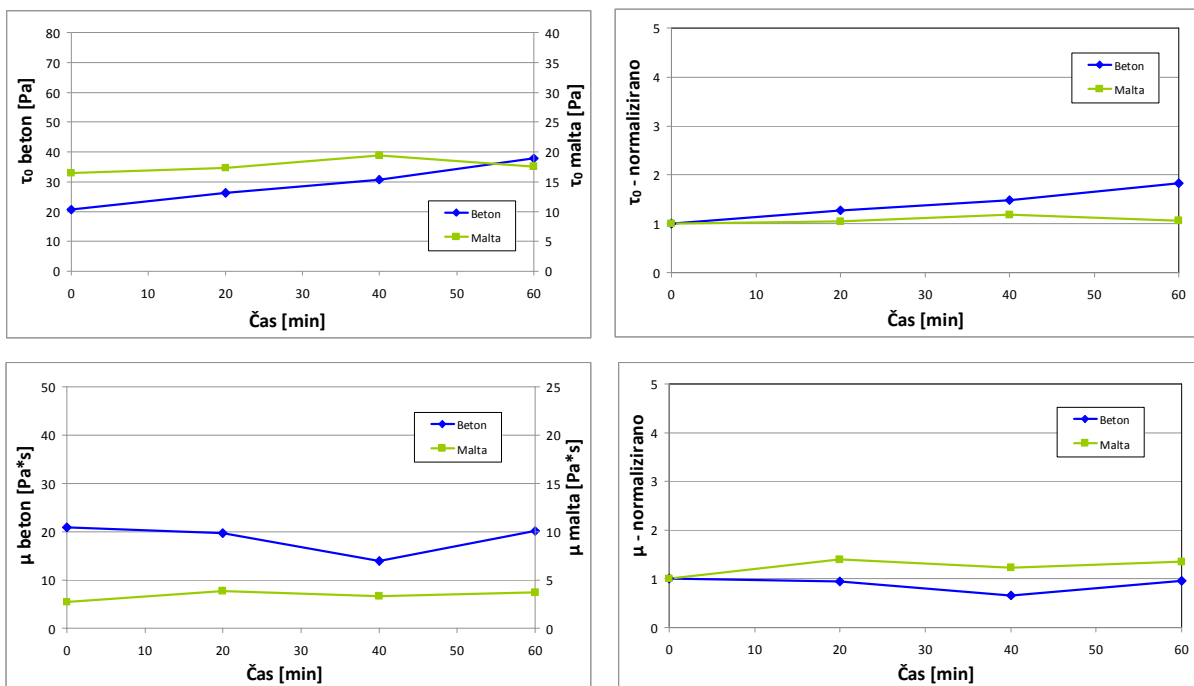




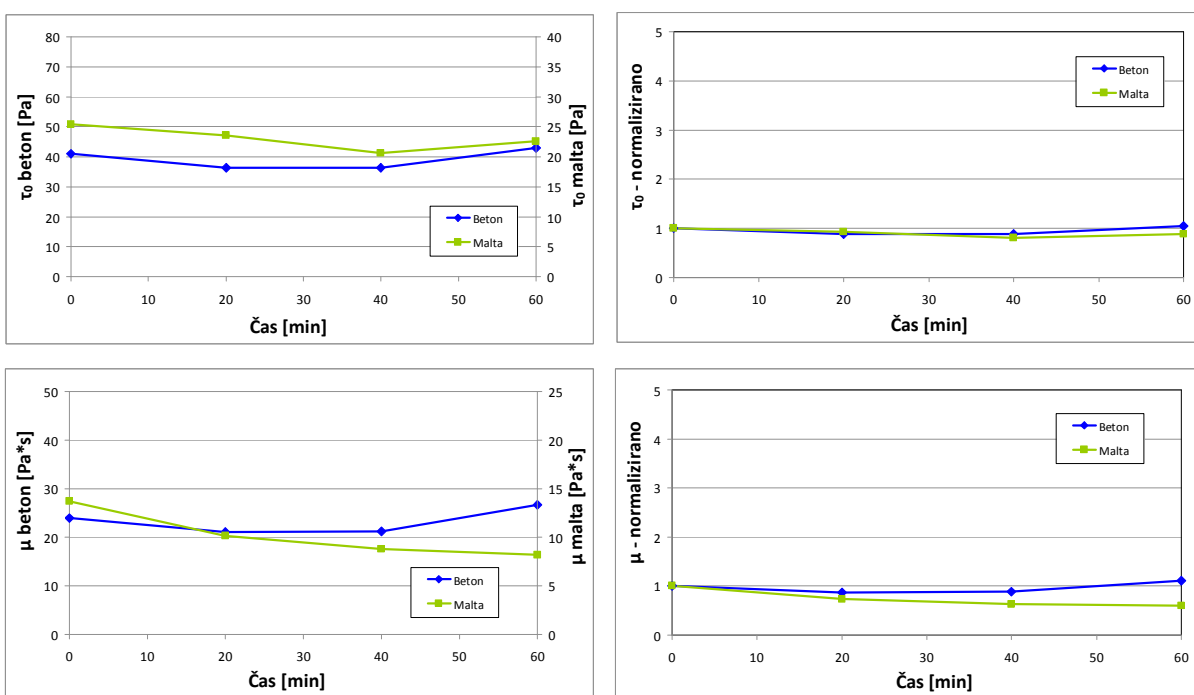
Slika I-35: SCCR1



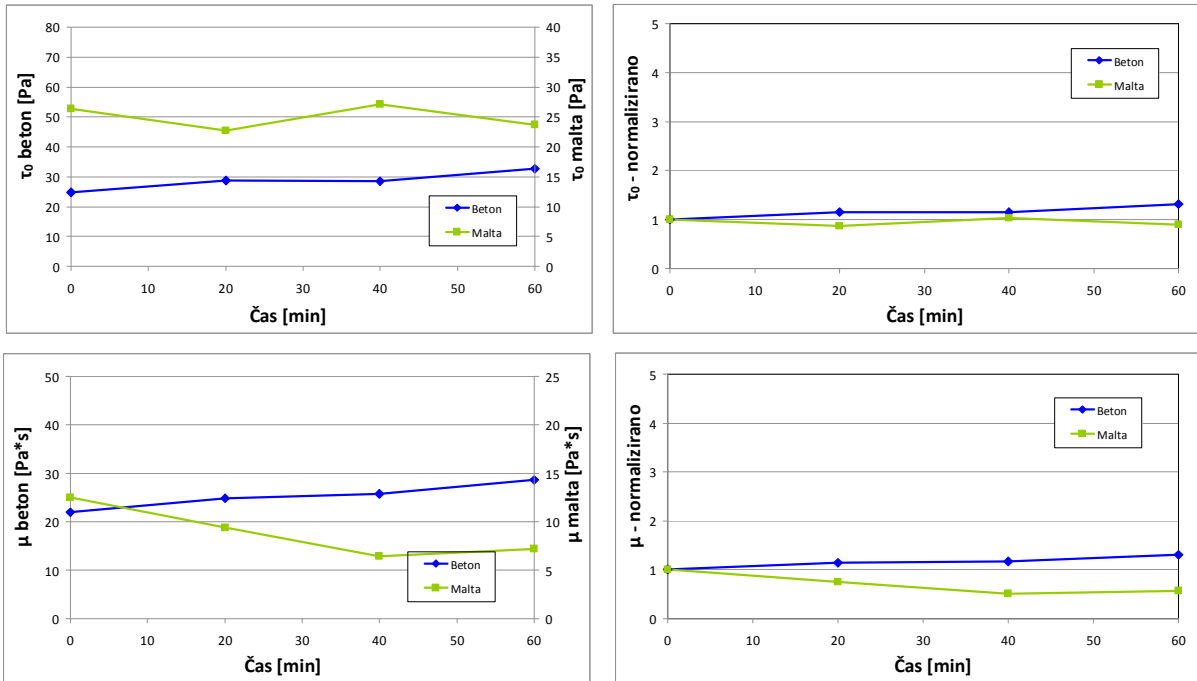
Slika I-36: SCCR2



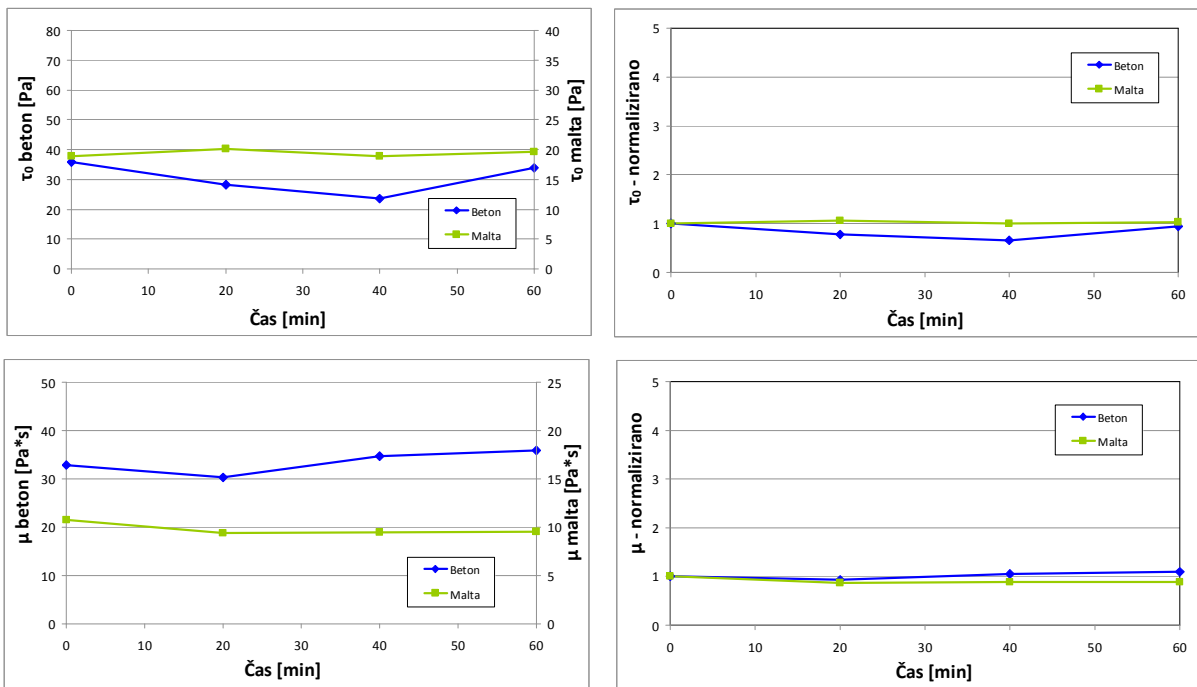
Slika I-37: SCCR3



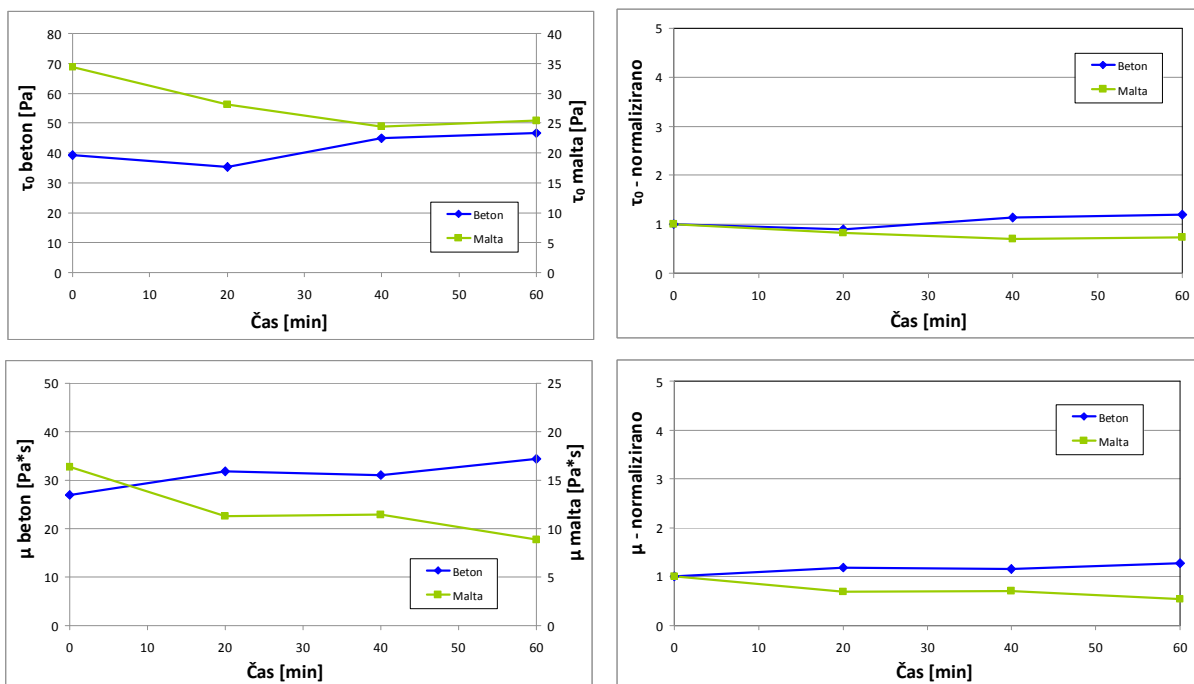
Slika I-38: SCCM1



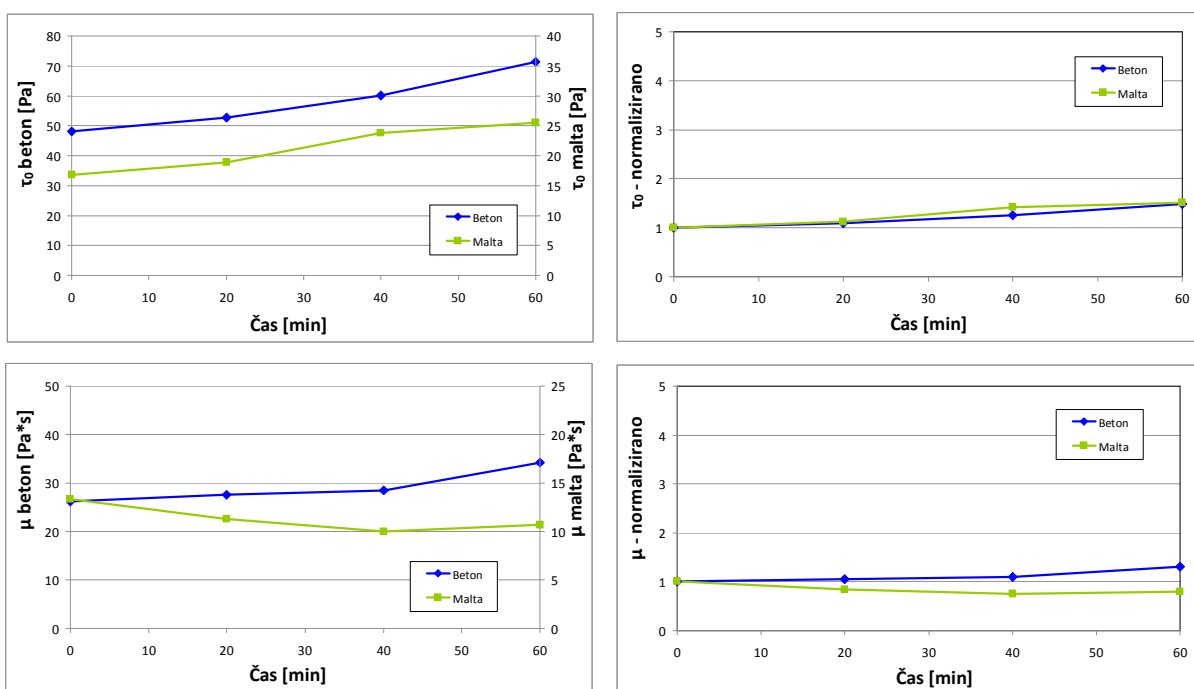
Slika I-39: SCCM2



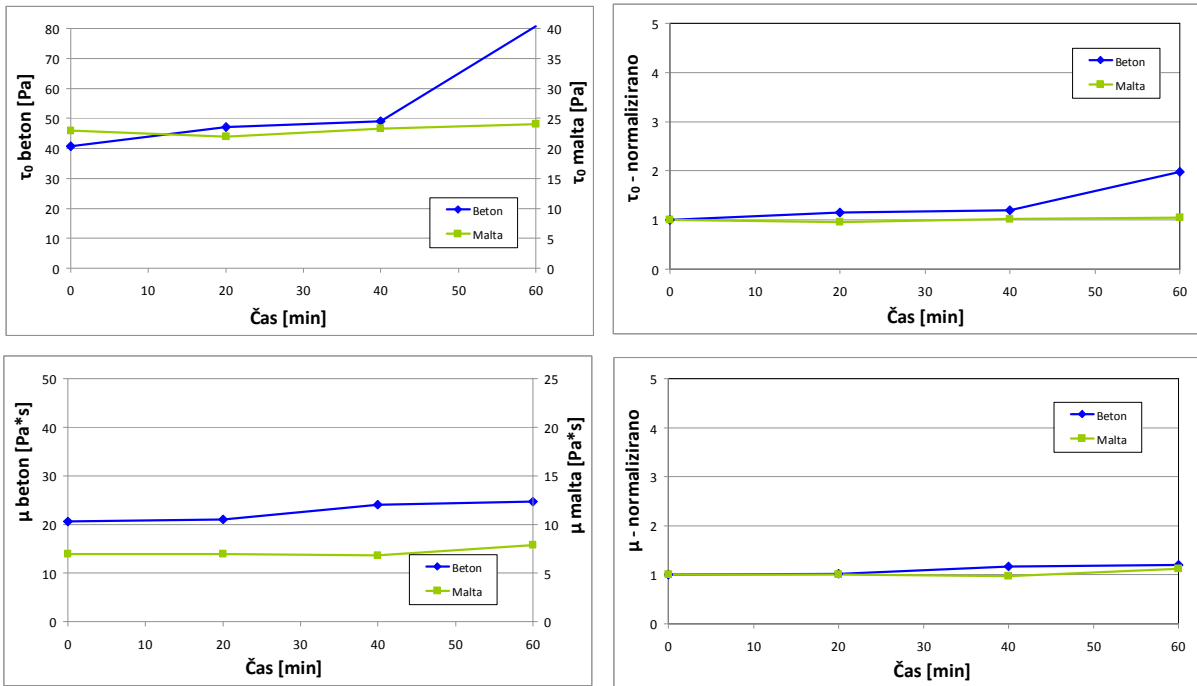
Slika I-40: SCCM3



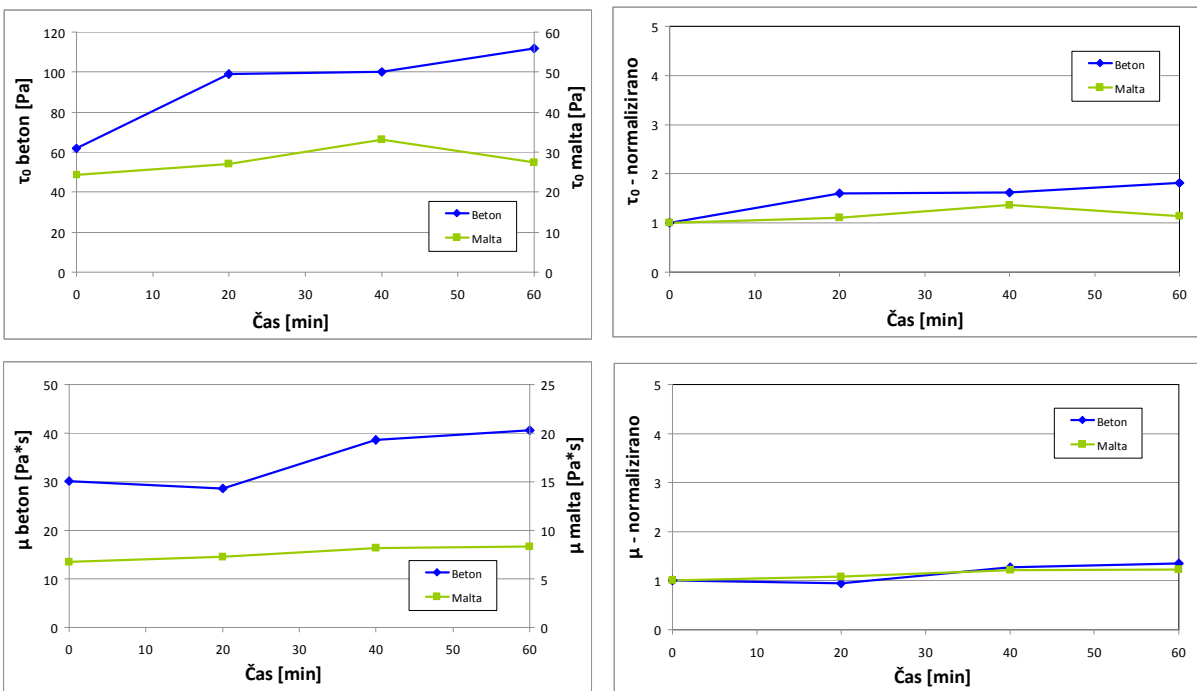
Slika I-41: SCCM4



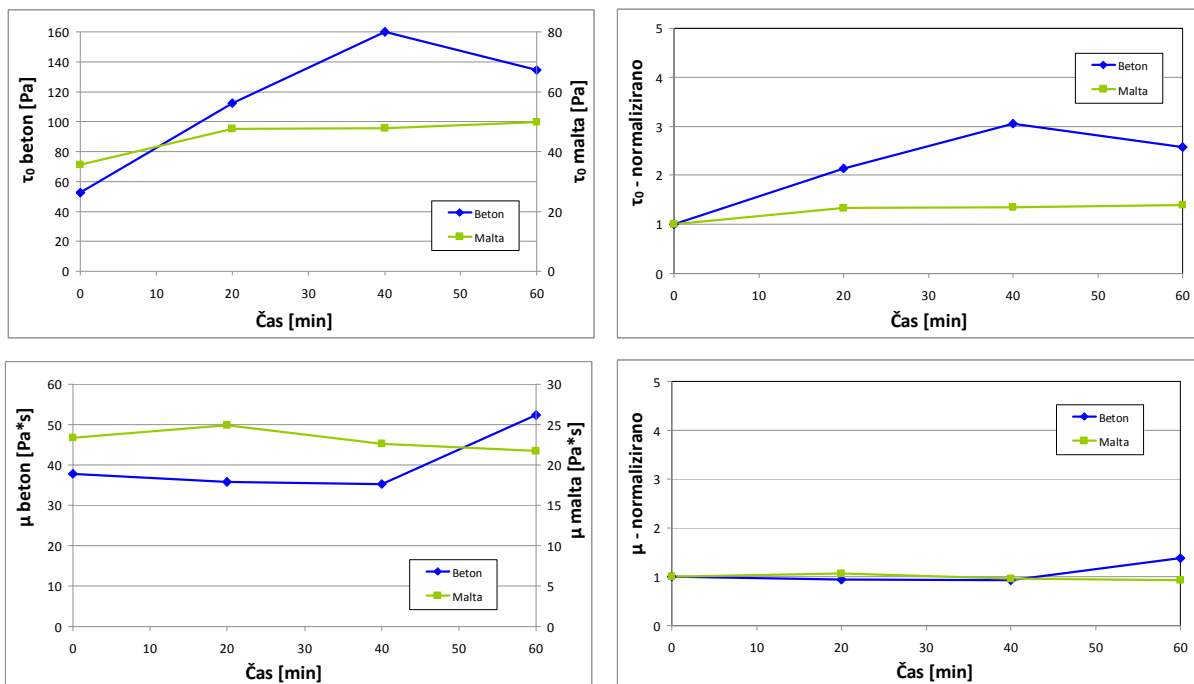
Slika I-42: SCCR4



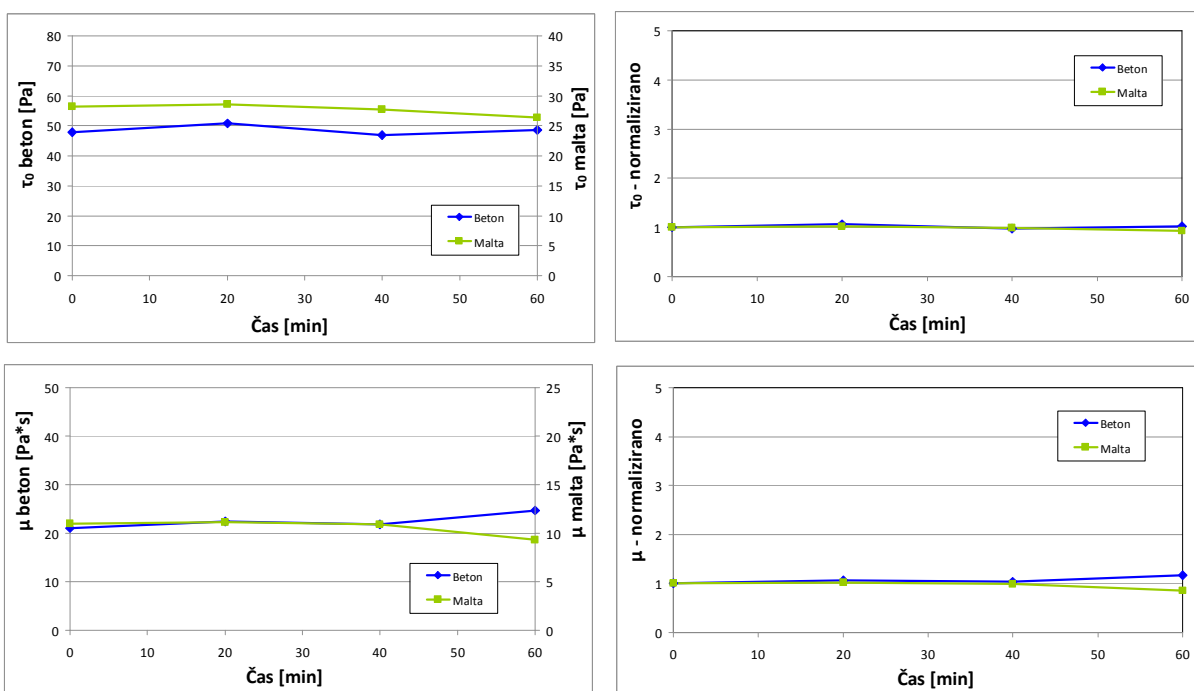
Slika I-43: SCCR4A



Slika I-44: SCCR4B



Slika I-45: SCCR4C



Slika I-46: SCCR4D