

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Maver, J., 2014. Reologija svežih samozgoščevalnih betonov in malt z enako razvito površino agregatnih zrn. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V., somentor Hočevar, A.): 69 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Maver, J., 2014. Reologija svežih samozgoščevalnih betonov in malt z enako razvito površino agregatnih zrn. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V., co-supervisor Hočevar, A.): 69 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

JOŽE MAVER

**REOLOGIJA SVEŽIH SAMOZGOŠČEVALNIH
BETONOV IN MALT Z ENAKO RAZVITO POVRŠINO
AGREGATNIH ZRN**

Diplomska naloga št.: 499/SOG

**RHEOLOGY OF FRESH SELF-COMPACTING
CONCRETES AND MORTARS WITH THE SAME
SPECIFIC SURFACE OF AGGREGATE GRAINS**

Graduation thesis No.: 499/SOG

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Somentor:

dr. Andraž Hočevar

Član komisije:

viš. pred. dr. Peter Lipar

Ljubljana, 03. 03. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica za napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA

Podpisani Jože Maver izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Reologija svežih samozgoščevalnih betonov in malt z enako razvito površino agregatnih zrn«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 30.1.2014

(Podpis kandidata/-ke)

BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 666.9:691.32(043.2)
- Avtor:** Jože Maver
- Mentor:** izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, univ. dipl. ing. grad.
- Somentor:** dr. Andraž Hočevar, univ. dipl. ing. grad.
- Naslov:** Reologija svežih samozgoščevalnih betonov in malt z enako razvito površino agregatnih zrn
- Tip dokumenta:** Diplomaska naloga – visokošolski strokovni študij
- Obseg:** 69 str., 15 pregl., 18 sl., 88 graf., 8 en.
- Ključne besede:** Reologija svežih cementnih mešanic, samozgoščevalni beton, vodocementno razmerje, polikarboksilatni superplastifikator, polifosfonatni superplastifikator, strižna napetost na meji tečenja, plastična viskoznost, razlez s posedom, koaksialni reometer

Izvleček

V sklopu diplomske naloge smo opravili preiskave reoloških lastnosti in obdelavnosti na svežih samozgoščevalnih betonih. Glavni namen raziskave je bil preučiti vpliv netočnega dodajanja vode na stabilnost betona. Spremembe v konsistenci svežega betona smo primerjali s spremembami reoloških lastnosti svežega betona. Količino vode smo spreminjali v štirih stopnjah glede na referenčno mešanico. Vse mešanice so bile sestavljene iz mineralnega agregata, cementa, vode in kemijskega dodatka ali dodatkov - dveh superplastifikatorjev v tekoči obliki (na polikarboksilatni in polifosfonatni osnovi) ter gostila v obliki prahu. Raziskave smo opravili s pomočjo reometra ConTec Viscometer 5 in standardne metode razleza s posedom. Cilj raziskave je bil obdržati konsistenco svežega betona v enem konsistenčnem razredu. Enako smo preverili vpliv na lastnosti sveže malte, ki je formulirana na podlagi betonske mešanice z uporabo CEM metode. Na koncu smo dobljene rezultate povezali tudi z rezultati tlačne trdnosti samo-zgoščevalnega betona in malte pri starosti 7 in 28 dni.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

- UDK:** 666.9:691.32(043.2)
- Author:** Jože Maver
- Supervisor:** Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.
- Cosupervisor:** Andraž Hočevar, Ph. D.
- Title:** Rheology of fresh self-compacting concretes and mortars with the same specific surface of aggregate grains
- Documenty type:** Graduation Thesis – Higher professional studies
- Notes:** 69 p., 15 tab., 18 fig., 88 graph., 8 eq.
- Keywords:** Rheology of fresh cement mixtures, self-compacting concrete, water-to-cement ratio, polycarboxylate superplasticizer, polyphosphonate superplasticizer, yield value, plastic viscosity, slump-flow, coaxial rheometer

Abstract

The thesis investigates the rheological properties and workability of fresh self consolidating concrete mixtures. The purpose of the study is to investigate the impact of inaccurate addition of water on the stability of concrete. Changes in the consistency of fresh concrete mixture were compared with the changes of rheological properties of fresh concrete mixture. The amount of water was added in four stages, relative to the reference mixture. All mixtures were composed of mineral aggregate, cement, water and admixtures - two liquid superplasticizers (based on polycarboxylate and polyphosphonate) and a powder thickener. Studies were performed using the rheometer Contec Viscometer 5 and standard slump-flow test. The goal in our study was to keep the consistency of all fresh concrete mixtures in one consistency class. We also studied the same impact on the properties of fresh mortar mixtures formulated using CEM method. The results were correlated with compressive strength of the SCC and mortar samples after 7 and 28 days.

ZAHVALA

Za nasvete, strokovno pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge se najlepše zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov univ. dipl. inž. grad., somentorju dr. Andražu Hočevanju univ. dipl. inž. grad., ter tudi Franciju Čeponu, dipl. ing. gradb., ki se je vedno odzval in bil v pomoč pri laboratorijskih preiskavah.

Zahvaljujem se tudi svoji družini, ki mi je omogočila študij in me celoten čas spodbujala ter mi vedno stala ob strani.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA	II
BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	IV
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
KAZALO GRAFIKONOV	X
KAZALO ENAČB	XIV
1 UVOD	1
2 SESTAVINE CEMENTNIH KOMPOZITOV	2
2.1 Mineralni agregat	2
2.2 Cement	5
2.3 Voda	8
2.4 Dodatki betonu	10
2.4.1 Kemijski dodatki	10
2.4.2 Mineralni dodatki	11
3 SAMOZGOŠČEVALNI BETON (SCC – self-consolidating concrete) IN REOLOGIJA	12
3.1 Lastnosti svežega samozgoščevalnega betona (Bokan Bosiljkov, 2007)	12
3.2 Lastnosti samozgoščevalnega betona v strjenem stanju	13
3.3 Reologija	14
3.4 Osnovni pojmi viskometrije (Wallevik, 2009)	15
3.5 Reometer	18
3.6 Preizkus razleza s posedom	22
4 EKSPERIMENTALNO DELO	23

4.1	Uporabljeni material	26
4.1.1	Agregat	26
4.1.2	Cement	27
4.1.3	Voda	27
4.1.4	Kemijski dodatki	27
4.2	Projektiranje mešanic	28
4.2.1	Metoda CEM	29
4.3	Rezultati meritev z reometrom	30
4.3.1	Rezultati meritev z reometrom in razlez s posedom za SCC beton	31
4.3.2	Rezultati meritev z reometrom in mini testa razleza s posedom za samozgoščevalno malto	42
4.4	Analiza rezultatov	53
4.4.1	Analiza rezultatov za SCC beton	53
4.4.2	Analiza rezultatov za SCC malte po CEM metodi	58
4.5	Primerjava rezultatov meritve SCC betona in njemu ekvivalentne SCC malte	61
4.6	Ocena obdelavnosti in robustnosti mešanic	64
5	Zaključek	66
VIRI		67

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Sestava minerala cementnega klinkerja	5
Preglednica 2: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1:2011	7
Preglednica 3: Trdnostni razredi cementov	8
Preglednica 4: Določene kemijske lastnosti vode (SIST EN 1008:2003)	9
Preglednica 5: Zahteve in preskusni postopki za predhoden pregled vode za pripravo betona (SIST EN 1008:2003).....	9
Preglednica 6: Presevky vseh frakcij v %.....	26
Preglednica 7: Karakteristike cementa (Hočevar, 2013).....	27
Preglednica 8: Preglednica 2: Sestava mešanic samozgoščevalnega betona.....	29
Preglednica 9: Sestava mešanic samozgoščevalne malte	30
Preglednica 10: Točke, pri katerih reometer meri odpornost striženja glede na hitrosti vrtenja posode.....	30
Preglednica 11: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za SCC betone v času 0 minut	53
Preglednica 12: Konsistenčni razredi glede na razlez s posedom za samozgoščevalne betone (SIST EN 206-9:2010).....	53
Preglednica 13: Povprečne tlačne trdnosti vzorcev posameznih mešanic.....	57
Preglednica 14: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za SCC malte po CEM metodi v času 0 minut	58
Preglednica 15: Povprečne tlačne in upogibne trdnosti za posamezno mešanico SCC malt po metodi CEM	60

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov (Žarnić, 2005)	4
Slika 2: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16mm (SIST EN 1026:2008)	4
Slika 3: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerju (Žarnić, 2005)	6
Slika 4: Segregacija SCC, test raleza s posedom	13
Slika 5: Segregacija betona v strjenem stanju	13
Slika 6: Shematski prikaz razlik v količini materialov pri samozgoščevalnem (zgoraj) in običajnem vibriranem betonu (spodaj) (Bokan Bosiljkov, 2007)	14
Slika 7: Telo s stranico x, y, z (Wallevik, 2009)	15
Slika 8: Strižna napetost na ploskvi A (Wallevik, 2009)	15
Slika 9: Deformirano telo zaradi delovanja strižne sile (Wallevik, 2009)	15
Slika 10: ConTec Viscometer 5 s pripadajočimi valji za preizkušanje betona in malte	19
Slika 11: Miza za razlez s kalupom za beton (levo) in malto (desno)	22
Slika 12: Postopek tehtanja sestavin za posamezno mešanico	24
Slika 13: Pripravljene sestavine SCC betona za mešanje	24
Slika 14: Merjenje razleza s posedom samozgoščevalnega betona	25
Slika 15: Meritev reometra ene ponovitve in končana meritev z vsemi podatki	25
Slika 16: Vzorci SCC betona v kalupu	56
Slika 17: Preizkušanci SCC betonov	56
Slika 18: Upogibni in tlačni preizkus SCC malt	60

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerju (Žarnić, 2005)	5
Grafikon 2: Modeli za opis tekočin (Hočevar, 2013)	16
Grafikon 3: Reološke lastnosti Binhamovega telesa in Newtonove tekočine (Bokan Bosiljkov V., 2007)	17
Grafikon 4: Vpliv superplastifikatorja in vode na reološka parametra (Bokan Bosiljkov V., 2007)	17
Grafikon 5: Povezava med merjenimi vrednosti reometra in Binghamovimi parametri (Banfill, P., Beaupré, D., Chapdelaine, F., de Larrard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Wallevik J.E., 2000)	20
Grafikon 6: Standardni merilni test betona in upor proti striženju zaradi hitrosti vrtenja (Wallevik, 2009)	20
Grafikon 7: Sejalne krivulje (presevek [%] glede na odprtino sita)	26
Grafikon 8: Učinek kemičnih dodatkov na τ_0/μ (Wallevik, 2009)	28
Grafikon 9: Tokovna krivulja mešanice SCCR1-1, čas 0 minut.....	31
Grafikon 10: Tokovna krivulja mešanice SCCR1-2, čas 20 minut.....	31
Grafikon 11: Tokovna krivulja mešanice SCCR1-3, čas 40 minut.....	32
Grafikon 12: Tokovna krivulja mešanice SCCR1-4, čas 60 minut.....	32
Grafikon 13: Tokovna krivulja mešanice SCCR2-1, čas 0 minut.....	32
Grafikon 14: Tokovna krivulja mešanice SCCR2-2, čas 20 minut.....	33
Grafikon 15: Tokovna krivulja mešanice SCCR2-3, čas 40 minut.....	33
Grafikon 16: Tokovna krivulja mešanice SCCR2-4, čas 60 minut.....	33
Grafikon 17: Tokovna krivulja mešanice SCCR3-1, čas 0 minut.....	34
Grafikon 18: Tokovna krivulja mešanice SCCR3-2, čas 20 minut.....	34
Grafikon 19: Tokovna krivulja mešanice SCCR3-3, čas 40 minut.....	34
Grafikon 20: Tokovna krivulja mešanice SCCR3-4, čas 60 minut.....	35
Grafikon 21: Tokovna krivulja mešanice SCCR4-1, čas 0 minut.....	35
Grafikon 22: Tokovna krivulja mešanice SCCR4-2, čas 20 minut.....	35
Grafikon 23: Tokovna krivulja mešanice SCCR4-3, čas 40 minut.....	36
Grafikon 24: Tokovna krivulja mešanice SCCR4-4, čas 60 minut.....	36
Grafikon 25: Tokovna krivulja mešanice SCCR4A-1, čas 0 minut	36
Grafikon 26: Tokovna krivulja mešanice SCCR4A-2, čas 20 minut	37
Grafikon 27: Tokovna krivulja mešanice SCCR4A-3, čas 40 minut	37
Grafikon 28: Tokovna krivulja mešanice SCCR4A-4, čas 60 minut	37
Grafikon 29: Tokovna krivulja mešanice SCCR4B-1, čas 0 minut	38

Grafikon 30: Tokovna krivulja mešanice SCCR4B-2, čas 20 minut	38
Grafikon 31: Tokovna krivulja mešanice SCCR4B-3, čas 40 minut	38
Grafikon 32: Tokovna krivulja mešanice SCCR4B-4, čas 60 minut	39
Grafikon 33: Tokovna krivulja mešanice SCCR4C-1, čas 0 minut	39
Grafikon 34: Tokovna krivulja mešanice SCCR4C-2, čas 20 minut	39
Grafikon 35: Tokovna krivulja mešanice SCCR4C-3, čas 40 minut	40
Grafikon 36: Tokovna krivulja mešanice SCCR4C-4, čas 60 minut	40
Grafikon 37: Tokovna krivulja mešanice SCCR4D-1, čas 0 minut	40
Grafikon 38: Tokovna krivulja mešanice SCCR4D-2, čas 20 minut	41
Grafikon 39: Tokovna krivulja mešanice SCCR4D-3, čas 40 minut	41
Grafikon 40: Tokovna krivulja mešanice SCCR4D-4, čas 60 minut	41
Grafikon 41: Tokovna krivulja mešanice SCCMR1-1, čas 0 minut	42
Grafikon 42: Tokovna krivulja mešanice SCCMR1-2, čas 20 minut	42
Grafikon 43: Tokovna krivulja mešanice SCCMR1-3, čas 40 minut	43
Grafikon 44: Tokovna krivulja mešanice SCCMR1-4, čas 60 minut	43
Grafikon 45: Tokovna krivulja mešanice SCCMR2-1, čas 0 minut	43
Grafikon 46: Tokovna krivulja mešanice SCCMR2-2, čas 20 minut	44
Grafikon 47: Tokovna krivulja mešanice SCCMR2-3, čas 40 minut	44
Grafikon 48: Tokovna krivulja mešanice SCCMR2-4, čas 60 minut	44
Grafikon 49: Tokovna krivulja mešanice SCCMR3-1, čas 0 minut	45
Grafikon 50: Tokovna krivulja mešanice SCCMR3-2, čas 20 minut	45
Grafikon 51: Tokovna krivulja mešanice SCCMR3-3, čas 40 minut	45
Grafikon 52: Tokovna krivulja mešanice SCCMR3-4, čas 60 minut	46
Grafikon 53: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4-1, čas 0 minut	46
Grafikon 54: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4-2, čas 20 minut	46
Grafikon 55: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4-3, čas 40 minut	47
Grafikon 56: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4-4, čas 60 minut	47
Grafikon 57: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4A-1, čas 0 minut	47
Grafikon 58: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4A-2, čas 20 minut	48
Grafikon 59: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4A-3, čas 40 minut	48
Grafikon 60: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4A-4, čas 60 minut	48
Grafikon 61: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4B-1, čas 0 minut	49
Grafikon 62: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4B-2, čas 20 minut	49
Grafikon 63: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4B-3, čas 40 minut	49
Grafikon 64: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4B-4, čas 60 minut	50
Grafikon 65: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4C-1, čas 0 minut	50
Grafikon 66: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4C-2, čas 20 minut	50

Grafikon 67: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4C-3, čas 40 minut	51
Grafikon 68: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4C-4, čas 60 minut	51
Grafikon 69: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4D-1, čas 0 minut	51
Grafikon 70: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4D-2, čas 20 minut	52
Grafikon 71: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4D-3, čas 40 minut	52
Grafikon 72: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4D-4, čas 60 minut	52
Grafikon 73: Levi grafikon kaže razlez s posedom in strižne napetosti na meji tečenja betonov SCC z dodatkom SP1 v času 0 minut, desni pa razlez s posedom in plastične viskoznosti betonov SCC z dodatkom SP1 v času 0 minut.....	54
Grafikon 74: Učinek vode na τ_0 - μ parametra (Wallevik, 2009).....	55
Grafikon 75: Levi grafikon kaže razlez s posedom in strižne napetosti na meji tečenja betonov SCC z dodatkom SP2 v času 0 minut, desni pa razlez s posedom in plastične viskoznosti betonov SCC z dodatkom SP2 v času 0 minut.....	55
Grafikon 76: Povprečne tlačne trdnosti SCC betona z dodatkom SP1 glede na v/c razmerje	57
Grafikon 77: Povprečne tlačne trdnosti SCC betona z dodatkom SP2 glede na v/c razmerje	57
Grafikon 78: : Levi grafikon kaže razlez s posedom in strižne napetosti na meji tečenja SCC malt z dodatkom SP1 v času 0 minut, desni pa razlez s posedom in plastične viskoznosti SCC malt z dodatkom SP1 v času 0 minut.....	58
Grafikon 79: Levi grafikon kaže razlez s posedom in strižne napetosti na meji tečenja SCC malt z dodatkom SP1 v času 0 minut, desni pa razlez s posedom in plastične viskoznosti SCC malt z dodatkom SP1 v času 0 minut.....	59
Grafikon 80: Povprečne tlačne in upogibne trdnosti za posamezno mešanico SCC malt z dodatkom SP1 po metodi CEM.....	60
Grafikon 81: Povprečne tlačne in upogibne trdnosti za posamezno mešanico SCC malt z dodatkom SP2 po metodi CEM.....	61
Grafikon 82: Korelacija strižnih napetosti na meji tečenja med SCC betoni in njim ekvivalentnimi SCC maltami	61
Grafikon 83: Korelacija plastične viskoznosti med SCC betoni in njim ekvivalentnimi SCC maltami.....	62
Grafikon 84: Korelacija razleza s posedom med SCC betoni in njim ekvivalentnimi SCC maltami.....	62
Grafikon 85: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in razlezom s posedom SCC betonov.....	62
Grafikon 86: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in razlezom s posedom SCC malt.....	63

Grafikon 87: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in mini razlezom s posedom SCC malt	63
Grafikon 88: Območje željene obdelovalnosti in vpliv dveh različnih superplastifikatorjev v mešanici z enakim vodocementnim razmerjem na reološke lastnosti mešanice (Hočevar, 2013)	65

KAZALO ENAČB

Enačba 1: Strižna napetost	15
Enačba 2: Strižna hitrost	16
Enačba 3: Funkcija viskoznosti	16
Enačba 4: Osnovna Reiner-Rivlinova enačba	21
Enačba 5: Povezava med kotno hitrostjo Ω in hitrostjo vrtenja N	21
Enačba 6: Enačbi za izračun Strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti	21
Enačba 7: Mera konsistence po metodi dveh pravokotnih povprečij premerov razlezne mešanice	22
Enačba 8: Enačba za izračun specifične površine podfrakcije in enačba za izračun količine fine frakcije v malti CEM (Hočevar, 2013)	29

1 UVOD

Zidove iz betona kot kompozitnega materiala so vivali že Grki v 3. st. pr. n. š., Rimljani pa so kasneje za pravi beton začeli uporabljati mešanico apna, peska in vulkanskega peska - pucolana. Šele sredi 18. stoletja so prvič iznašli hidravlični cement, ga s postopki izboljševali in kasneje, sredi 19. st., izdelali moderni portland cement, podoben portland cementu, kot ga poznamo danes. Zaradi novih tehnologij gradnje je bilo potrebno s časom razvijati tudi nove materiale. Tako je postal beton z mineralnimi in kemijskimi dodatki zelo kompleksna suspenzija, katere lastnosti v svežem in strjenem stanju lahko prilagajamo glede na zahtevo uporabe.

To diplomsko delo je ena izmed raziskav v okviru doktorske disertacije somentrija dr. Andraža Hočevarja pod mentorstvom prof. dr. Violete Bokan Bosiljkov. Diplomsko delo gradi tudi na zaključkih predhodnih diplomskih nalog, ki so se prav tako ukvarjale s preiskavami obdelavnosti in reoloških lastnosti z uporabo reometra ConTec Viscometer 5. Tako Andrejka (Andrejka, 2012) v svoji diplomski nalogi pravi, navajam: »Raziskave o svežem betonu so potrdile dejstvo, da je beton izjemno zapleten kompozit, ki kljub letom raziskav še vedno ponuja številne uganke in bo temu z razvojem vedno novih mineralnih in kemijskih dodatkov ter tehnologij verjetno tako tudi v prihodnje. Reometer ponuja boljšo možnost analize lastnosti svežega betona kot standardni metodi poseda in razleza, vendar ima prav tako svoje omejitve. Pri raziskavah v okviru diplomske naloge se je pokazalo, da reometer daje boljše rezultate pri mešanicah z nižjo strižno napetostjo na meji tečenja in pri bolj tekočih mešanicah. Od tod sklepam, da je njegova uporaba bolj smiselna v preučevanju in kontroli SCC ter lahkogradljivih betonov«

V tej diplomski nalogi smo se ukvarjali s preskušanjem vpliva netočnega doziranja količine vode na stabilnost betona ter primerjali spremembe v konsistenci svežega betona s spremembami reoloških lastnosti svežega betona. Spremembo količine vode v mešanici smo izvedli v 4 stopnjah glede na referenčno mešanico in tako simulirali netočno doziranje vode v betonarni in vpliv na lastnosti svežega betona. Cilj je bil obdržati konsistenco svežega betona v enem konsistenčnem razredu. Enako smo preverili tudi vpliv na lastnosti sveže malte, ki je formulirana na podlagi betonske mešanice z uporabo metode CEM.

2 SESTAVINE CEMENTNIH KOMPOZITOV

2.1 Mineralni agregat

Agregati predstavljajo 60-80 % (pri betonih nizke trdnosti tudi 85 %) celotne prostornine betona. Lastnosti agregatov so odvisne od zahtevanih lastnosti betonskih mešanic v svežem in strjenem stanju. Na splošno lahko definiramo agregat kot čist, trd in inerten material, ki ga vgrajujemo v betonske mešanice. Njegova vloga v betonu je sledeča:

- znižuje ceno betona; je sorazmerno poceni, ker postopek pridobivanja ni drag, saj obsega izkop, pranje in sejanje ter transport do mesta uporabe,
- ustrezno sestavljen po frakcijah ustvari koheziven beton, ki ga je lahko obdelovati v svežem stanju,
- znižuje hidratacijsko temperaturo betona, ker je običajno kemično inerten in deluje kot odvajalec toplote nastale s hidratacijo cementa,
- zmanjšuje krčenje betona, ker na večino agregatov voda ne deluje in zato lahko omejujemo krčenje cementne paste med hidratacijo (Žarnić, 2005).

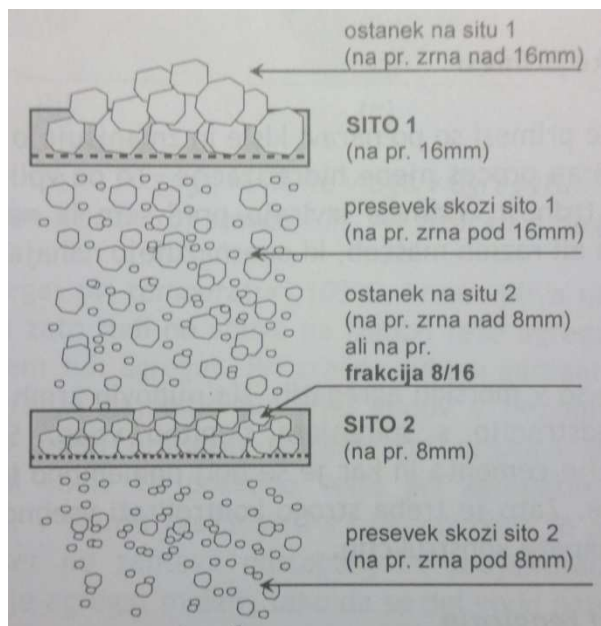
Ker je večinoma bolj odporen na obrus kot cementni kamen, lahko z njim uravnavamo površinsko odpornost, pri posebnih zahtevah pa se lahko uporabijo tudi na obrabo odporni agregati iz trdnih magmatskih kamenin. Tako lahko z agregatom uravnavamo barvitost betonske površine in odbojnost svetlobe ter kontroliramo gostoto in uravnavamo požarno odpornost betona.

Mineralni agregat kot osnova betonov se razlikuje glede na način pridobivanja. Lomljenec, ki nastane z drobljenjem večjih kosov kamna, ima ostre robove in pogosto manj trdna zrna zaradi notranjih razpok. Gramoz, ki je aluvialnega izvora, ima oble robove in je raznolike mineralne sestave, v odvisnosti od izvora rečnih nanosov (Žarnić, 2005). Zaobljena zrna aluvialnega agregata imajo prednost, saj povzročajo veliko manj koncentriranih napetosti v strjenem betonu pod obremenitvijo in spremembo temperature. Omogočajo tudi lažje vgrajevanje in s tem posledično, zaradi manjše porabe vode oz. nizkega vodocementnega razmerja, večjo trdnost. Na drugi strani pa ostroroba zrna zdrobljenega agregata z zagotovitvijo sosednjih zrn prispevajo k boljšim mehanskim lastnostim. Lomljenec je v Sloveniji, kljub dodatni predelavi, običajno cenejši, zato ima v praksi prednost in se ga porabi več.

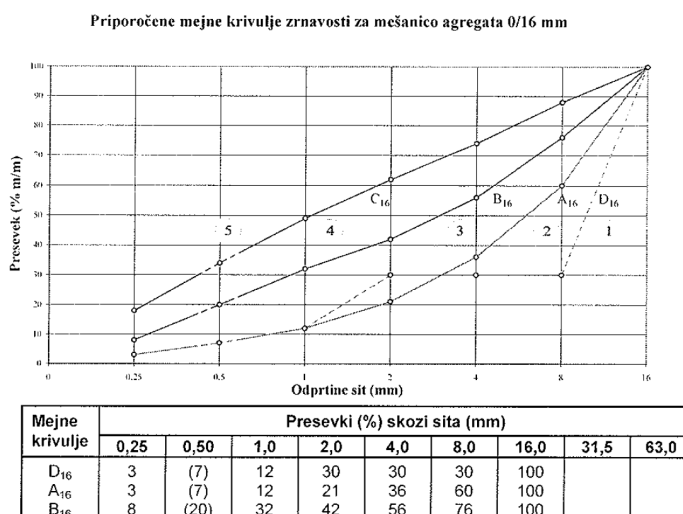
Agregat mora biti čist in mora izpolnjevati celo vrsto zahtev, da je primeren za uporabo v betonu. Preverjajo se naslednje lastnosti:

- mineraloško petrografska sestava in ugotavljanje prisotnosti snovi, ki bi lahko kakorkoli vplivale na hidratacijo in strjevanje betona ter na mehanske lastnosti in obstojnost strjenega betona. Vse morajo biti v določenih mejah. V primeru armiranega betona pa je pomembno tudi, da ne povzročajo korozije armature,
- prisotnost organskih snovi (humus, masti, ...), ki zavirajo hidratacijo,
- obvitost posameznih zrn z glino, kar onemogoča dobro povezavo med cementno pasto in zrni agregata, agregat naj bi bil brez glinastih delcev, ki zmanjšujejo sposobnost sprijemanja cementne paste z mineralnim agregatom in tako vplivajo na znižanje trdnosti strjenega betona,
- slaba odpornost zrn proti drobljenju, velika dovzetnost zrn za vpijanje vode,
- slaba oblika zrn (ploščata in podolgovata zrna),
- slaba odpornost na mraz (zmrzovanje-tajanje) negativno vpliva na mehanske lastnosti strjenega betona,
- še posebno pozorni pa moramo biti na prisotnost amorfnega silicijevega dioksida. Ta povzroča alkalno-silikatno reakcijo v betonu, pri kateri prihaja do notranjih napetosti, posledično razpok in postopnega razpadanja betona (Hočevár, A. 2007).

V procesu projektiranja sveže mešanice betona je sestavljanje frakcij agregata eno od najbolj občutljivih in pomembnih faz dela, saj je pomembno razmerje grobih in finih frakcij agregata. Z večjim razmerjem grobih frakcij izboljšamo mehanske lastnosti in zmanjšamo potrebo po cementni pasti, s tem pa se poveča možnost segregacije, izločanja vode in poslabša vgradljivost. Pri izbiri primerne zrnave sestave frakcij agregata za betonske mešanice si lahko pomagamo z mejnimi zrnaveznimi krivuljami, ki jih priporoča standard (SIST EN 1026:2008). Za določitev velikosti posameznih frakcij vzorec presejemo skozi niz sit, ki so postavljena ena na drugo od največjega do najmanjšega. Material, ki se preseje in ostane na situ imenujemo frakcija in označimo z d/D (d – velikost odprtine na katerem se je material zaustavil; D – velikost odprtine sita nad sitom d ; $d/D \geq 1,4$).



Slika 1: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov (Žarnić, 2005)



Slika 2: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16mm (SIST EN 1026:2008)

Poleg zrnovostne sestave, oblike zrn agregata, gostote, površinske teksture in trdnosti agregata ima pomembno vlogo tudi količina vlage in kakovost agregata. Pri kakovosti agregata je potrebna pozornost zaradi prisotnosti različnih primesi, ki jih delimo na:

- praškaste delce – so delci, ki padejo skozi sito z odprtino 0,075 mm. Imajo veliko specifično površino, zato je potrebno zaradi zagotavljanja ustrezne vgradljivosti pri pripravi betonske mešanice dodati večjo količino vode,

- organske primesi – zaradi kislosti zmanjšajo alkalnost cementne paste, ki je nujna za proces njene hidratacije. To vpliva na njeno vezanje in končno trdnost,
- soli – pospešujejo zgodnje faze hidratacije in korozijo armature,
- snovi, ki reagirajo (opal, silikatno steklo, kalcedon, tridinit, kristobalit, kremen, sulfidi, ...).

2.2 Cement

Cement je zmlet neorganski material, prvič pridobljen s patentiranim postopkom (Joseph Aspdin, l. 1824) iz mineralov, ki jih vsebujejo naravni lapor, apnenec in glina. Te osnovne surovine se po izkopu mokro ali suho melje in transportira v silose, kjer se mineralna mešanica s pomočjo kemijske analize dopolni z manjkajočimi minerali. Z vlaženjem se tako nastala surovinska moka spremeni v trde granule premera približno 15 mm, kar omogoča kroženje zraka in plamena v rotacijskih pečeh. Predno surovino žgejo v rotacijski peči, se ta s protitočno gibajočimi se dimi iz peči segreva v izmenjevalcu toplote. Rotacijska peč je z ognjevzdržnim materialom obložen cylinder, premera do 5 m in tudi do 150 m dolžine, postavljena pod rahlim nagibom. Med obratovanjem se suče okoli svoje vzdolžne osi, žganje pa poteka v treh intervalih. Produkt žganja je močno porozen v granule zbit pepel, t. i. cementni klinker, ki se hladi na sobno temperaturo in zmelje v fini prah – portland cement. Med mletjem se lahko dodajajo različne snovi (sadra, žindra, naravni ali umetni pucolani, apnenec, elektrofiltrski pepel), ki dajejo končne lastnosti različnim vrstam cementa. Tako pridobljen cement skladiščimo v silosih in odpremimo do strank po železnici ali cesti, v vrečah ali pa v cisterni v razsutem stanju.

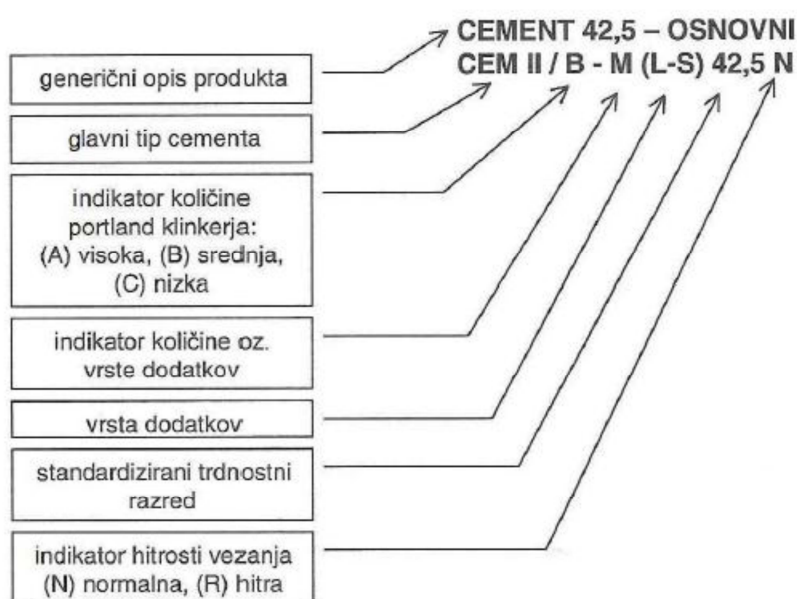
Preglednica 1: Sestava minerala cementnega klinkerja

Oznaka	Ime	Delež [%]
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	trikalcijev silikat	40 - 70
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	dikalcijev silikat	5 - 30
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	trikalcijev aluminat	7 - 15
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	tetrakalcijev aluminat	

Grafikon 1: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerju (Žarnić, 2005)

Alit (trikalcijev silikat) je najpomembnejši mineral običajnih portland cementnih klinkerjev, ki močno reagira, pospeši proces hidratacije, sprošča veliko toplote in pri strjevanju prispeva k visokim trdnostim. Belit (dikalcijev silikat) počasi, postopno strjuje in počasi pridobiva na trdnosti, pri tem pa sprošča bistveno manj hidratacijske toplote kot alit. Celit (trikalcijev aluminat) na začetku hidratacije hitro reagira, sprošča veliko toplote, prispeva k zgodnjim trdnostim betona in je občutljiv na sulfatno korozijo. Ferit (tetrakalcijev aluminat fetrit) strjuje počasi in je bolj odporen na sulfatno korozijo ter cementu daje značilno sivo barvo (Žarnić, 2005).

Sistem označevanja in pomen oznak obravnava slovenski standard SIST EN 197-1:2011.



Slika 3: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerju (Žarnić, 2005)

Z generičnim opisom cementa lahko proizvajalec imenuje svoj cement, medtem ko je ostali del oznake standardiziran. Glede na sestavo glavnih sestavin standard SIST EN 197-1:2011 loči 27 vrst običajnih cementov, ki so razporejeni v eno izmed petih glavnih skupin:

Preglednica 2: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1:2011

Glavne vrste cementa	Vrste običajnih cementov	Glavne in dodatne sestavine	Delež dodatnih mineralnih sestavin [%]
CEM I	portlandski cement	klinker [K]; manj pomembne sestavine	CEM I
CEM II	portlandski mešani cement	klinker [K]; granulirana plavžna žindra [S]; mokrosilika [D ^d]; pucolan (naravni [P], naravni kalcinirani [Q]); elektrofiltrski pepel (silicijski [V], kalcijski [W]); žgani skrilavec [T]; apnenec ([L], [LL]); manj pomembne sestavine	CEM II/A 6 - 20 CEM II/B 21 - 35
CEM III	žlindrin cement	klinker [K]; granulirana plavžna žindra [S]; manj pomembne sestavine	CEM III/A 36 - 65 CEM III/B 66 - 80 CEM III/C 81 - 95
CEM IV	pucolanski cement	klinker [K]; mokrosilika [D ^d]; pucolan (naravni [P], naravni kalcinirani [Q]); elektrofiltrski pepel (silicijski [V], kalcijski [W]); manj pomembne sestavine	CEM IV/A 11 - 35 CEM IV/B 36 - 55
CEM V	mešani cement	klinker [K]; granulirana plavžna žindra [S]; pucolan (naravni [P], naravni kalcinirani [Q]); elektrofiltrski pepel (silicijski [V]); manj pomembne sestavine	CEM V/A 36 - 60 CEM V/B 61 - 80
<ul style="list-style-type: none"> - vrednost v preglednici se nanašajo na vsoto glavnih in manj pomembnih sestavin, - delež mikrosilike je omejen na 10% - manj pomembne sestavine so neorganski mineralni materiali ali sestavine, ki v cementu niso glavne sestavine. Proizvajalec mora na zahtevo dati podatke o manj pomembnih sestavinah v cementu. Delež je omejen na 5 %. 			

Preglednica 3: Trdnostni razredi cementov

Trdnostni razred	Tlačna trdnost [MPa]				Čas začetka vezanja [min]	Prostorninska obstojnost (ekspanzija) [min]
	Zgodnja trdnost		Trdnost po 28. dneh			
	2. dan	7. dan	Min	Max		
32,5 N	-	≥ 10,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	-				

2.3 Voda

Voda je nujna in ena izmed osnovnih sestavin vsake betonske mešanice, saj je le z njeno prisotnostjo možna hidratacija cementa. Voda za pripravo betona ne sme vsebovati sestavin, ki lahko negativno vplivajo na proces hidratacije cementa (čas vezanja) in končno trdnost, kot tudi takšne snovi, ki so lahko vzrok za korozijo armature v armirano betonskih konstrukcijah, ki povzročijo spremembo barve cementnega kamna, površinsko izločanje soli, prostorninsko nestabilnost cementnega kamna in s tem zmanjšano trajnost konstrukcije.

Pitna voda praktično vedno izpolnjuje te pogoje, tako da se lahko uporablja za izdelavo betona brez dokazil ter je ni potrebno preizkušati. Na splošno velja, da je primernost vode za pripravo betona odvisna od njenega izvora. Poznane so naslednje vrste vod:

- pitna voda – te vode ni potrebno preskušati, velja za primerno za uporabo v betonu,
- voda, pridobljena iz procesov v industriji betona – ta voda je običajno primerna za uporabo v betonu, mora pa ustrezati zahtevam iz dodatka A (SIST EN 1008:2008),
- podtalnica – ta voda je običajno primerna za uporabo v betonu, vendar mora biti preskušena,
- naravna površinska voda in industrijska odpadna voda – ta voda je običajno primerna za uporabo v betonu, vendar mora biti preskušena,
- morska voda – ta voda se lahko uporablja za beton brez vgrajene armature, ni pa primerna za pripravo armiranega ali prednapetega betona.

- komunalna voda – ni primerna za uporabo v betonu (SIST EN 1008:2003).

S standardom so določene tudi kemijske lastnosti vode (SIST EN 1008:2003):

Preglednica 4: Določene kemijske lastnosti vode (SIST EN 1008:2003)

Kloridi (Cl ⁻)	Prednapeti beton ali zalivna masa	< 500 mg/l
	Beton z armaturo ali vgrajeno kovino	< 1000 mg/l
	Beton brez armature ali vgrajene kovine	< 4500 mg/l
Sulfati (SO ₄ ²⁻)		< 2000 mg/l
Alkalijske		< 1500 mg/l
Škodljivo onesnaženje	Sladkorji	< 100 mg/l
	Fosfati (P ₂ O ₅)	< 100 mg/l
	Nitrati (N ₃ ⁻)	< 500 mg/l
	Svinec (Pb ²⁺)	< 100 mg/l
	Cink (Zn ²⁺)	< 100 mg/l

Za preizkuse izdelanih z neznano ali znano vodo lahko z metodo po predhodni ocenitvi preverjamo prisotnost humusnih snovi in s pomočjo kemičnih poskusov na primerjalnih prizmah preizkušamo vpliv vode na čas vezanja in trdnost cementne paste. V kolikor sestava vode po predhodni analizi ne ustreza eni ali več zahtevam, je potrebno poročilo o primernosti vode za pripravo betona.

Preglednica 5: Zahteve in preskusni postopki za predhodni pregled vode za pripravo betona (SIST EN 1008:2003)

		Zahteva	Preskusni postopek
1	Olja in masti	Ne več kot vidni sledovi.	6.1.1
2	Detergenti	Morebitna pena mora izginiti v 2 minutah.	6.1.1
3	Barva	Voda, ki ni iz virov, navedenih v točki 3.2: barva se oceni kvalitativno kot blede rumena ali motna.	6.1.1
4	Izločene snovi	Voda iz virov, navedenih v točki 3.2.	A.4
		Voda iz drugih virov: največ 4 ml sedimenta	6.1.1
5	Vonj	Voda iz virov, navedenih v točki 3.2.	6.1.1
		Brez vonja, razen vonja, ki je dovoljen za pitno vodo, rahel vonj po cementu in, kadar je prisoten žlindrin cement, rahel vonj po žveplovodiku. Voda iz drugih virov. Brez vonja, razen vonja, ki je dopusten za pitno vodo. Po dodatku solne kisline ne sme smrdeti po žveplovodiku.	
6	Kislina	pH ≥ 4	6.1.1
7	Humusne snovi	Barva se po dodatku NaOH oceni kvalitativno kot rumenkasto rjava ali motna.	6.1.2

2.4 Dodatki betonu

Po definiciji standarda ASTM C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates in tehničnega komiteja ACI Committee 116 je dodatek definiran kot material, ki je drugačen kot voda, agregat, cement in vlakna in ki se ga kot sestavni del betona ali malte dodaja v betonsko mešanico tik pred ali med samim mešanjem. Dodatki spreminjajo lastnosti betona ali malte v svežem ali strjenem stanju in povečujejo učinkovitost cementa ter ekonomičnost betonske mešanice. Zato se uporabljajo za doseganje tistih lastnosti betona v svežem in strjenem stanju, ki so potrebne za njegovo izdelavo, transport in vgrajevanje ter za njegovo dolgotrajno rabo v določenem okolju. Ločimo dve skupini dodatkov in to so kemijski in mineralni dodatki. (A. Zajc, 2007)

2.4.1 Kemijski dodatki

S kemijskimi dodatki je možno projektiranje in izdelava betonov z željnimi lastnostmi v svežem in strjenem stanju. Dodajajo se v promilih ali procentih na maso cementa, vendar niso nadomestilo cementa. Če so dodatki med seboj kompatibilni, se lahko med seboj kombinirajo. Odgovarjati morajo produktnemu standardu SIST EN 934-2:2002.

Vrste kemijskih dodatkov:

- aeranti: v svežo betonsko mešanico uvedejo drobne mehurčke, ki zagotavljajo obstojnost betona proti učinku zmrzovanja, izboljšuje njegovo obdelavnost, zmanjšujejo nagnjenost k segregaciji in zaradi fine poroznosti zmanjšujejo trdnost betona v strjenem stanju,
- pospeševalci: v sveži betonski mešanici se jih lahko zaradi povečane hitrosti hidratacije cementa uporablja do priporočljive temperature -7°C brez škodljivih stranskih efektov, saj vplivajo na obstojnost proti zmrzovanju. Zaradi skrajšanega začetka in konca hidratacije povečujejo zgodnjo in zmanjšujejo končno trdnost, zmanjšajo pozitiven učinek aeracije, vgrajevanje betona je težje in povečano je krčenje ob sušenju betona,
- superplastifikatorji in plastifikatorji: so dodatki za zmanjševanje potrebne vode za pripravo betona. Zaradi manjšega vodocementnega razmerja zagotavljajo višjo trdnost betona, kar za manjšo količino cementa znižuje stroške betona,

- zavlačevalci: močno zavrejo ali ustavijo proces hidratacije, kar zagotavlja nespremenjeno konsistenco betona pri daljših transportih do gradbišča. Hidratacijo se reaktivira z uporabo pospeševalca, kar ne spremeni lastnosti svežega in strjenega betona,
- pigmenti,
- razni ostali kemijski dodatki za izboljšanje črpnosti svežega betona, dodatki za nastanek plinske poroznosti, dodatki za injekcijske mase, gostilci, fungicidni in insekticijski dodatki, inhibitorji, dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah, ekspanzorji, dodatki za zmanjšanje ekspanzije zaradi alkalnosilikatne reaktivnosti, ...

2.4.2 Mineralni dodatki

So hidravlični dodatki, s katerimi zmanjšamo potrebo po cementu in s tem zmanjšamo hidratacijsko toploto ter krčenje, izboljšamo kohezijo in odpornost na segregacijo. Delimo jih na (Kavčič, 2007):

- TIP I – so nepucolanski dodatki, kot apnenčeva in dolomitna kamena moka. Presevek na situ 0,063 mm mora biti večji od 70 %,
- TIP II – so pucolanski dodatki. Elektrofitrski pepel izboljšuje kohezivnost in zmanjšuje občutljivost na vsebovanost vode v mešanici, mikrosilika izboljšuje kohezivnost in segregacijsko odpornost, granulirana plavžna žindra pa zmanjšuje hidratacijsko toploto in je običajno že sestavni del cementov CEM II in CEM III (F. Kavčič, 2007).

Če cement že vsebuje mineralne dodatke, je dodatna uporaba mineralnih dodatkov tipa II mogoča, če se primernost uporabe ugotovi s preiskavami in potrdi z začetnim poskusom. Predhodno je treba preveriti združljivost že vsebovanih in v mešanico betona dodanih mineralnih dodatkov, tudi če so iste vrste, a različnega porekla. Mineralni dodatki za beton, malte in injekcijske mase, ki so v neposrednem stiku z jeklom za prednapenjanje, morajo biti dokazano neškodljivi za jeklo (SIST EN 1026, 2008).

3 SAMOZGOŠČEVALNI BETON (SCC – self-consolidating concrete) IN REOLOGIJA

Prav samozgoščevalni betoni so tipična skupina betonov, katerih razvoj je omogočil razvoj kemijskih dodatkov, natančneje razvoj superplastifikatorjev nove generacije na bazi polikarboksilatov z dovolj dolgim časom delovanja, v manjši meri pa tudi razvoj dodatkov za reguliranje viskoznosti. Samozgoščevalnost je izraz izključno za lastnosti v svežem stanju, kot je sposobnost tečenja in deformiranja zaradi lastne teže. Pri samozgoščevalnih betonih mora pasta še vedno preprečevati pogrezanje grobega agregata (ne sme priti do segregacije). Samozgoščevalni beton je po definiciji beton, ki je samo zaradi delovanja lastne teže in lastne sposobnosti tečenja sposoben popolnoma zapolniti opaž poljubne oblike, tesno oblitati nameščeno armaturo, se odzračiti in znivelirati, ne da bi pri tem segregiral. (Bokan Bosiljkov, 2007).

3.1 Lastnosti svežega samozgoščevalnega betona (Bokan Bosiljkov, 2007)

V številnih razvojno-raziskovalnih projektoih so bile identificirane tri ključne lastnosti svežega samozgoščevalnega betona, s katerimi opišemo njegovo obdelavnost:

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

Sposobnost tečenja je določena s sposobnostjo in hitrostjo deformiranja sveže betonske mešanice zaradi delovanja lastne teže. Sposobnost deformiranja določa, kako daleč od mesta praznjenja lahko beton steče, hitrost deformiranja pa, kako hitro se to zgodi. Sposobnost deformiranja dosežemo z uporabo superplastifikatorja, ki zmanjša napetost na meji tečenja, zmanjša trenje med trdnimi delci in z uravnoveženim prostorninskim razmerjem med vodo in finimi delci. Dobra sposobnost tečenja je dosežena, ko sta sposobnost deformiranja in hitrost deformiranja v ravnotežju.

Sposobnost prehajanja je sposobnost svežega samozgoščevalnega betona, da prehaja med ozkimi predeli v opažu in predeli z gosto armaturo brez blokiranja zaradi nakopičenja agregatnih zrn. Ustrezno sposobnost prehajanja dosežemo s povečano kohezivnostjo (katero dosežemo z nizkim razmerjem med vodo in finimi delci ali z uporabo dodatka za reguliranje viskoznosti), z zagotavljanjem ustrezne svetle odprtine in lastnosti grobega

agregata (tj. z nizko prostornino grobega agregata in izbiro ustreznega največjega zrna agregata, ki naj ne bi bilo večje od 22 mm).

Odpornost na segregacijo je sposobnost suspenzije delcev, da obdrži svojo homogenost med mešanjem, transportom in vgrajevanjem. Pri samozgoščevalnem betonu se segregacija pojavi kot izcejanje vode, ločitev paste od agregata, ločitev grobega agregata in neenakomerna porazdelitev zračnih por. Segregiranje preprečimo z ustreznim razmerjem vhodnih sestavin, omejeno vsebnost agregata, zmanjšanjem največjega zrna agregata, uporabe paste z nizkim razmerjem med vodo in finimi delci, z uporabo dodatka za reguliranje viskoznosti in s pravilnim mešanjem. Pri preizkusu razleza s posedom sta jasna indikatorja segregacije betonske mešanice kot neenakomerne, v središču nekoliko večja količina nabranega agregata in okoli izrazit obroč cementne paste.



Slika 4: Segregacija SCC, test raleza s posedom

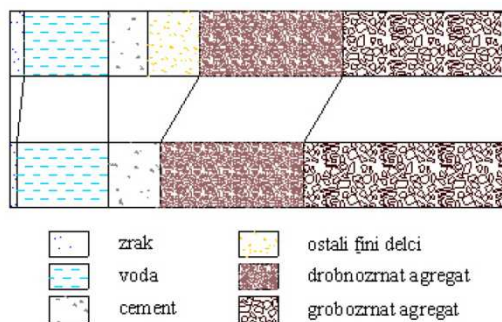


Slika 5: Segregacija betona v strjenem stanju

3.2 Lastnosti samozgoščevalnega betona v strjenem stanju

Samozgoščevalni beton z enakim vodocementnim ali vodovezivnim razmerjem bo imel praviloma nekoliko višjo tlačno trdnost kot tradicionalno vibriran beton. To je zaradi bolj

homogene strukture in izboljšane kvalitete statičnega območja med agregatnimi zrn grobega agregata in vezivom, ki je posledica odsotnosti vibriranja. Samozgoščevalni beton in vibrirani beton, ki sta narejena iz enakih materialov, imata enako količino cementa in enako vodocementno razmerje, le da samozgoščevalni beton vsebuje še fino apnenčevo moko, ki vpliva na zgodnjo tlačno trdnost. Lezenje in krčenje betona potekata v cementnem kamnu, zato lahko zaradi večje prostornine cementnega kamna pri samozgoščevalnem betonu pričakujemo večji koeficient lezenja kot pri tradicionalnem vibriranem betonu enake trdnosti in izrazito večje krčenje samozgoščevalnega betona v prvih nekaj dneh trajanja krčenja. Hitrost krčenja se pozneje umiri tako, da je po 21. dneh krčenje samozgoščevalnega betona le za okrog 15 % večje od krčenja običajnega vibriranega betona. Te razlike so dovolj majhne, da so zajete z varnostnimi predpostavkami v preglednicah in izrazih, ki jih podaja Evrokod 2. Obstojnost betona in armiranobetonskih konstrukcij sta tesno povezani s prepustnostjo površinskega sloja betona, ki naj bi omejil vstop škodljivih substanc v betonski element. Zato je obstojnost betona odvisna tako od izbire osnovnih materialov in sestave betonske mešanice, kot od stopnje nadzora med vgrajevanjem, zgoščevanjem, zaključno obdelavo in nego (Bokan Bosiljkov, 2007).

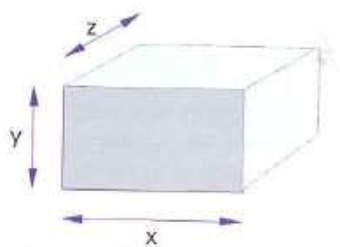


Slika 6: Shematski prikaz razlik v količini materialov pri samozgoščevalnem (zgoraj) in običajnem vibriranem betonu (spodaj) (Bokan Bosiljkov, 2007)

3.3 Reologija

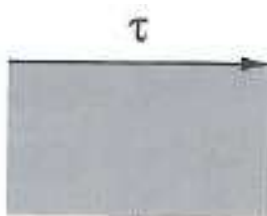
Reologija je po definiciji veda, ki preučuje tečenje in deformiranje snovi. Raziskuje povezavo med silo, deformacijo in časom različnih snovi - od elastičnih snovi do tekočin. Ena od podskupin reologije je viskometrija, katera preiskuje povezavo med hitrostjo in napetostjo in je definirana kot upor proti tečenju oziroma upor tekočine proti deformaciji (Wallevik, 2009).

3.4 Osnovni pojmi viskometrije (Wallevik, 2009)



Slika 7: Telo s stranico x, y, z (Wallevik, 2009)

Slika 7 prikazuje tridimenzionalno telo s stranico x, y in z, z zgornjo površino ploskve $A = x \cdot z$.



Slika 8: Strižna napetost na ploskvi A (Wallevik, 2009)

Če sila F deluje na ploskev A v smeri ravnine (slika 8), povzroči strižno napetost τ .

$$\tau = \frac{F}{A}$$

(Wallevik, 2009)

Enačba 1: Strižna napetost



Slika 9: Deformirano telo zaradi delovanja strižne sile (Wallevik, 2009)

Zaradi delovanja strižne sile na zgornji ploskvi telesa se v času dt telo deformira za dx (Slika 9). Deformacijo lahko zapišemo tudi s strižno deformacijo γ . Strižna hitrost ($\dot{\gamma}$) je sprememba strižne deformacije v času dt :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

(Wallevik, 2009)

Enačba 2: Strižna hitrost

Če strižno napetost delimo s strižno hitrostjo, dobimo viskoznost μ ali funkcijo viskoznosti $\mu(\dot{\gamma})$.

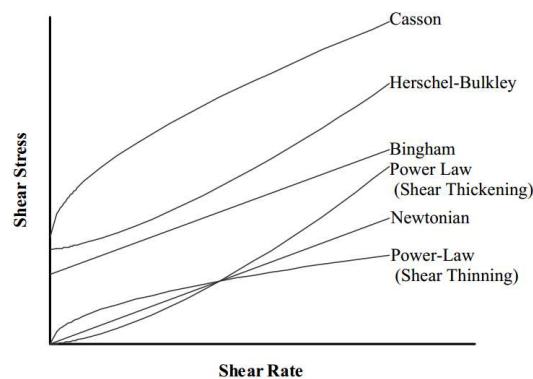
$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

(Wallevik, 2009)

Enačba 3: Funkcija viskoznosti

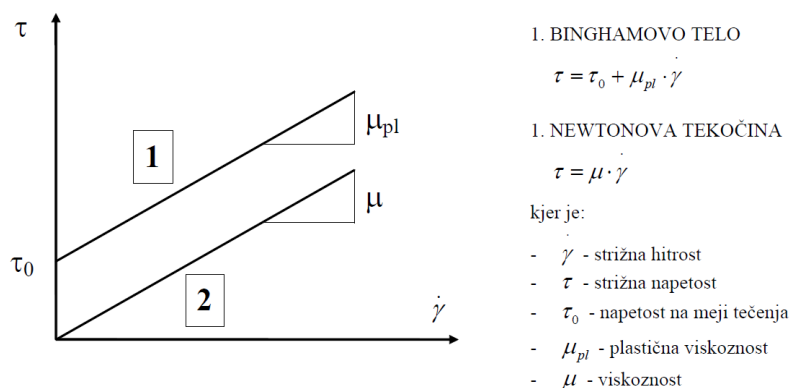
Glede na lastnosti tečenja klasificiramo tekočine ali suspenzije v štiri skupine:

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



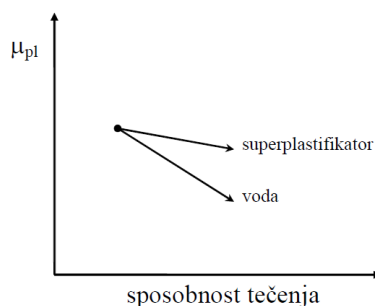
Grafikon 2: Modeli za opis tekočin (Hočevar, 2013)

Na grafikonu 2 so prikazani modeli za opis tekočin. V svoji diplomski nalogi bom obravnaval le Newtonov in Binghamov model za opis tekočin, saj slednji dovolj dobro opiše tečenje svežega betona.



Grafikon 3: Reološke lastnosti Binhamovega telesa in Newtonove tekočine (Bokan Bosiljkov V., 2007)

Za newtonske tekočine velja, da je njihovo obnašanje najlažje opisati, saj je za vse strižne hitrosti viskoznost konstantna. To so predvsem preproste tekočine npr. voda, gorivo in olje. Že površno opazovanje betona nam pove, da beton ni newtonska tekočina, saj potrebuje vsaj minimalno kritično napetost, tako imenovano napetost na meji tečenja (τ_0), da steče. Binghamov model torej upošteva napetost na meji tečenja (τ_0) in ohrani linearno odvisnost med strižno napetostjo svežega betona (τ) in strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$), pri čemer je naklon premice enak plastični viskoznosti (μ_{pl}) (Hočevar, 2011). Iz Binghamovega reološkega modela je razvidno, da je sposobnost tečenja odvisna od velikosti napetosti na meji tečenja: čim nižja je napetost na meji tečenja, tem večja je sposobnost tečenja. Pri samozgoščevalnem betonu moramo zagotoviti ekstremno sposobnost tečenja, zato težimo k zelo nizki napetosti na meji tečenja in se v bistvu želimo čim bolj približati newtonski tekočini. To dosežemo z vključitvijo relativno velike količine superplastifikatorja v betonsko mešanico, ki pri enakem povečanju sposobnosti tečenja zniža plastično viskoznost betona bistveno manj kot voda (Bokan Bosiljkov V., 2007).



Grafikon 4: Vpliv superplastifikatorja in vode na reološka parametra (Bokan Bosiljkov V., 2007)

Strižne deformacije lahko merimo s štirimi modeli obnašanja materiala:

- **tok med dvema vzporednima ploščama:** teoretično je idealen model za dejansko merjenje viskoznih lastnosti tekočin ali suspenzij.
- **krožni tok med dvema koaksialnima cilindroma:** zaradi njegove možnosti za pridobitev natančnih podatkov je najbolj pogosto uporabljen model v viskometriji, čeprav ima v praksi nekaj pomanjkljivosti, kot so efekt na gladini in dnu, zdrs na zunanjem in notranjem delu cilindra, konstantna strižna hitrost pri vsaki krožni hitrosti in natančnost v geometriji.
- **tok skozi kapilare in cevi:** Niso primerne za ne-newtonsko tekočino, saj ni mogoče določiti materialnih lastnosti, kot so strižna napetost na meji tečenja in elastične lastnosti.
- **krožni tok med dvema vzporednima ploščama:** primerno za ocenjevanje elasto-plastičnega obnašanja.

3.5 Reometer

Reometer je naprava, ki meri strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala. Ker so bili primarno razviti za merjenje na polimernih in enakomernih tekočinah, niso bili primerni za beton, saj ta vsebuje velike trde delce agregata. Raziskovalci so razvili veliko različnih reometrov za preiskave svežih betonov, kateri so razdeljeni v tri osnovne tipe:

- koaksialni valjasti reometer: deluje na principu vrtenja zunanjega ali notranjega valja, medtem, ko drug mirujoči valj z merilno krono meri upor, ki ga povzroča tekočina. Površini obeh valjev sta narebreni, da preprečujeta zdrs materiala,
- reometer z vzporednimi ploščami: deluje na principu vrtenja dveh horizontalnih plošč, ki strižeta beton med njima,
- mešalni reometer z rotorjem: deluje na principu meritev navora, potrebnega za vrtenje rotorja z lopaticami, ki predstavljajo notranji valj. Površina zunanjega valja je narebrena, kar preprečuje zdrs materiala. Obstaja več različnih oblik lopatic. Ker omogočajo izvedbo manjših naprav, so primerni za uporabo na terenu (Banfill, P., Beaupré, D., Chapdelaine, F., de Larrard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Wallevik J.E., 2000).

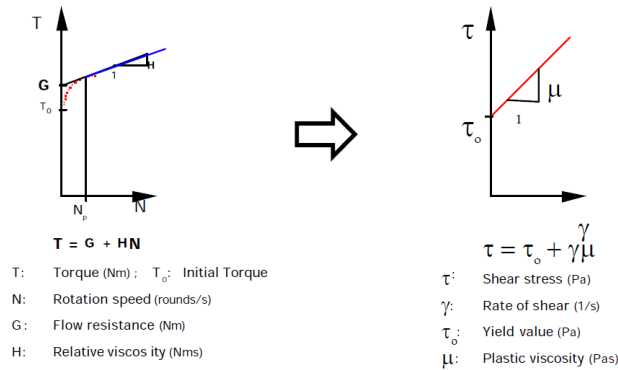
Pri svoji diplomski nalogi sem eksperimentalni del preiskav opravil z reometrom ConTec Viscometer 5. ConTec Viscometer 5 je koaksialni valjasti reometer, ki z mirujočim merilnim

notranjim valjem meri navor, vrteči zunanji valj (posoda z vzorcem) pa povzroča strižne napetosti po principu krožnega toka. Zunanji valj se prvih 5 s vrti s hitrostjo 0,49 obrata/s, da se v mešanici vzpostavi ravnotežje, potem pa se hitrost postopoma, v osmih korakih (vsak korak traja 5 s), zmanjšuje (0,49, 0,42, 0,36, 0,29, 0,22, 0,15, 0,08, 0,01) do 0,01 obrata/s. Deveto vrednost meritve dobimo, ko se na koncu meritve valj zavrti z 0,33 obrata/s. Naprava ima pomanjkljivosti, a jih zaradi svoje zasnove upošteva in delno odpravi. Vseeno je pri vsaki raziskavi potreben tehten razmislek o dobljenih rezultatih in o kakršnihkoli instrumentalnih in/ali eksperimentalnih napakah v meritvi, ki bi lahko vplivale na rezultat (Wallevik, 2006).



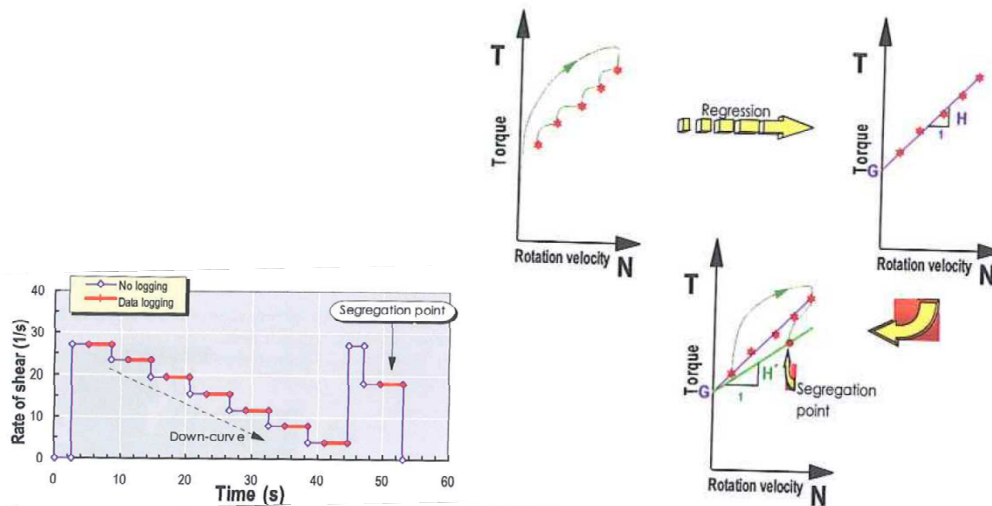
Slika 10: ConTec Viscometer 5 s pripadajočimi valji za preizkušanje betona in malte

Glavna enota in elementi reometra ConTec Viscometer 5 (slika 10) sestavljajo merilna glava (I), notranji merilni (II) in zunanji (III) valj ter rotacijski disk s pogonskim motorjem (IV). Bolj natančen opis reometra je v knjigi *Introduction to Rheology of Fresh Concrete*, katere avtor je prof. Olafur H. Wallevik (2009). V času meritve se podatki beležijo in shranjujejo na računalnik s pomočjo programske opreme FreshWin, katera upošteva Binghamov model tekočine.



Grafikon 5: Povezava med merjenimi vrednosti reometra in Binghamovimi parametri (Banfill, P., Beaupré, D., Chapdelaine, F., de Larrard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Wallevik J.E., 2000)

Rezultati meritve z reometrom so podani z diagramom navor T – rotacijska hitrost N , strižna napetost na meji tečenja in plastična viskoznost torej nista neposredno določeni. Z metodo linearne regresije reometru programska oprema FreshWin določi konstanti G in H , iz katerih z Reiner-Rivlinovo enačbo izračuna začetno strižno napetost (τ_0) in plastično viskoznost (μ_{pl}) (Wallevik, 2009). T predstavlja navor (upor proti striženju), N hitrost vrtenja, H je mera za odpornost betona proti naraščajoči hitrosti gibanja (koeficient viskoznosti) in G je mera za silo, ki je potrebna za začetek gibanja betona (navor na meji tečenja) (Wallevik, 2009; Hočevnar, Kavčič, 2010).



Grafikon 6: Standardni merilni test betona in upor proti striženju zaradi hitrosti vrtenja (Wallevik, 2009)

Osnovna Reiner-Rivlinova enačba (Wallevik, 2009):

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

(Wallevik, 2009)

Enačba 4: Osnovna Reiner-Rivlinova enačba

Kjer je:

Ω : Kotna hitrost zunanlega valja oz. posode [rad/s]

T : izmerjeni moment na notranjem valju [Nm]

h : Višina notranjega valja v vzorcu [m]

r_0 : polmer notranjega valja [m]

r_1 : polmer zunanlega valja oz. posode [m]

Med kotno hitrostjo Ω in med hitrostjo vrtenja N velja povezava:

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

(Wallevik, 2009)

Enačba 5: Povezava med kotno hitrostjo Ω in hitrostjo vrtenja N

Osnovno Reiner-Rivlinovo enačbo pretvorimo v dve ločeni enačbi za izračun posameznega reološkega parametra τ_0 in μ (Hočevnar, 2013):

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

$$\mu = H \cdot \frac{\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_0^2}}{8\pi^2 \cdot h}$$

(Hočevnar, 2013)

Enačba 6: Enačbi za izračun strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti

3.6 Preizkus razleza s posedom

Je enostavna in ena izmed najbolj pogostih metod, ki se uporablja za oceno obdelavnosti tekoče in plastične mešanice. Rezultat je pokazatelj sposobnost tečenja in zapolnjevanja samozgoščevalnih betonov. Tipične vrednosti testa razleza s posedom za samozgoščevalne betone so med 600 mm in 750 mm (Collepari, 2010).



Slika 11: Miza za razlez s kalupom za beton (levo) in malto (desno)

Kalup za beton ima standardne dimenzije - višino stožca 300 ± 2 mm, spodnji notranji premer 200 ± 2 mm, in zgornji notranji premer 100 ± 2 mm. Kalup za malte je višine 150 ± 1 mm, spodnjega notranjega premera 100 ± 1 mm in zgornjega notranjega premera 50 ± 1 mm. Ravno podlago je pri naših preiskavah predstavljala stresalna miza minimalne velikosti 900 mm x 900 mm. Zaradi samozgoščevalnih lastnosti samozgoščevalnega betona in malte ni potrebno polnjenje v plasteh in nabijanje s standardno kovinsko palico. Zaradi sile vzgona je potrebno le čvrsto držanje stožca na mizi in enakomerna hitrost polnjenja. Po dvigu stožca se mešanica hitro posede, razleze in ustavi, ko so strižne napetosti (posledica gravitacije) manjše, kot je napetosti na meji tečenja. Po tej metodi je mera konsistence povprečje največje mere premera razleza (d_1) in mere, ki je pravokotna na mero največjega razleza (d_2).

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

Enačba 7: Mera konsistence po metodi dveh pravokotnih povprečij premerov razlezene mešanice.

Ker je razlez s posedom pri dveh različnih mešanicah z različnima vrednostnima τ_0 in μ lahko enak, je potrebna korelacija z meritvami reometra. Korelacija je močno odvisna od sestavin in vrste mešanice in temelji na statistični empirični osnovi (Wallevik, 2006). Bolj, kot je mešanica tekoča, večjo vlogo ima plastična viskoznost oz. bolj je pri samozgoščevalnih betonih pomembno razmerje med plastično viskoznostjo in napetostjo na meji tečenja. Če je to razmerje večje od 10, postanejo empirične metode nezanesljive za oceno primerne obdelavnosti betona (Wallevik, 2009).

4 EKSPERIMENTALNO DELO

V eksperimentalnem delu diplomske naloge sem se ukvarjal s preskušanjem vpliva netočnega doziranja količine vode na stabilnost betona. Spremembe v konsistenci svežega betona sem primerjal s spremembami reoloških lastnosti svežega betona. Količino vode v mešanici sem spreminjal v 4 stopnjah glede na količino vode v referenčni mešanici. Cilj je bil obdržati konsistenco svežega betona v enem konsistenčnem razredu. Enak pristop sem imel tudi pri preverjanju vpliva spreminjanja količine vode na lastnosti sveže malte, ki je formulirana na podlagi betonske mešanice z uporabo metode CEM.

Za namen preiskave je bilo zasnovanih 8 betonskih mešanic in 8 mešanic malt. Vpliv različnega vodocemetnega razmerja v mešanici na reološke lastnosti svežih mešanic smo ugotavljali s preiskavo razleza s posedom in s preiskavo s koaksialnim reometrom ConTec Viscometer 5. Vse preiskave so bile opravljene v Konstrukcijsko - prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

Vse sestavine za beton in malto smo mešali po standardnem postopku. Zaradi različnega razmerja količin betona (40 l) in malt (5 l), si postopka mešanja sestavin, zaradi neenakih uporabljenih mešalcev, nista podobna. Vse suhe sestavine za samozgoščevalni beton smo najprej 1 minuto suho mešali. Nato smo med mešanjem dodali polovico vode, razredčen superplastifikator v 0,3 dl vode, in nato preostanek vode, s katero smo sprali embalažo, v kateri je bil pripravljen dodatek. Po končanem dodajanju vseh sestavin smo z mešanjem nadaljevali še 1 minuto, nato mešanje ustavili za 1 minuto in preverili, ali se material enakomerno meša. Z zidarsko žlico smo ročno odstranili suh material, ki se je oprijel na dno in stene mešalca. Po tem smo mešanje nadaljevali še 2 minuti. Skupaj je učinkovito mešanje trajalo 5 minut.



Slika 12: Postopek tehtanja sestavin za posamezno mešanico



Slika 13: Pripravljene sestavine SCC betona za mešanje

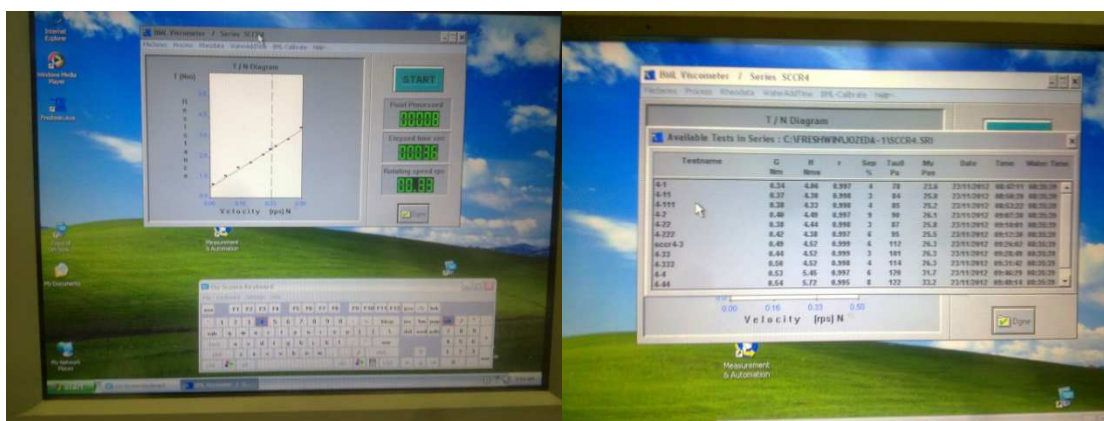
Malte smo mešali po drugačnem vrstnem redu. V mešalec smo vsuli vso količino cementa in med mešanjem dodajali vodo in superplastifikator po enakem postopku kot pri betonu. Za tem smo dodali še kameni agregat in nadaljevali z mešanjem 1 minuto. Po mešanju smo preverili mešanico. Z zidarsko žlico smo ročno odstranili suh material, ki se je oprijel posode mešalca in nadaljevali z mešanjem še 2 minuti. Skupni efektivni čas trajanja mešanja je bil enak kot pri betonu. Pri obeh postopkih mešanja smo po končanem dodajanju vode vnesli v reometer čas dodane vode. Postopek mešanja po dodani vodi in do preskusa z reometrom je trajal povprečno 7 minut.

Ko smo zaključili z mešanjem, smo takoj opravili meritve na svežem betonu. Vzporedno z obdelavnostjo betona in malte, s preskusom razleza s posedom, smo merili tudi reološke

lastnosti v reometru. Pri poskusu razleza s posedom smo izvedli le eno ponovitev. V posodo reometra naložen beton ali malto smo postavili na merilno mesto reometra, ki je stal na stalnem mestu. Beton in malto smo pred prvim preizkusom premešali s standardno, posodi pripadajočo ploščato jekleno palico, da smo zaradi prenašanja in vibracij zagotovili bolj homogen material ter s tem preprečili morebitno zgoščevanje. Po prvi meritvi smo na merilni kroni izmerili višino notranjega valja v vzorcu (h). To je razdalja med najnižjo točko notranjega merilnega valja in najvišjo točko vzorca v posodi in definira višino rotirajoče se mešanice, ki deluje na merilni valj. V reometru smo izvedli 4 ponovitve meritev v časovnem intervalu 0 min, 20 min, 40 min, in 60 min. Pri vsakem intervalu smo izvedli 3 ponovitve meritev in pred vsako ponovitvijo smo beton ali malto vedno premešali s ploščato jekleno palico.



Slika 14: Merjenje razleza s posedom samozgoščevalnega betona



Slika 15: Meritev reometra ene ponovitve in končana meritev z vsemi podatki

Po vseh končanih meritvah smo SCC beton vlili v 6 kalupov dimenzij 15 x 15 x 15 cm, pri SCC maltah pa smo mešanico vlili v dva standardna kalupa za dimenzijo preizkušanca 16 x 4 x 4 cm. Mešanice betona in malte smo vlili v kalupe brez dodatnih vibracij. Po 24 h smo vzorce razkalupili in jih zračno negovali na sobni temperaturi. Prvim trem vzorcem smo

merili trdnost po 7. dneh, ostalim trem pa po 28. dneh. Pri vzorcih SCC malt smo merili tudi upogibno trdnost.

4.1 Uporabljeni material

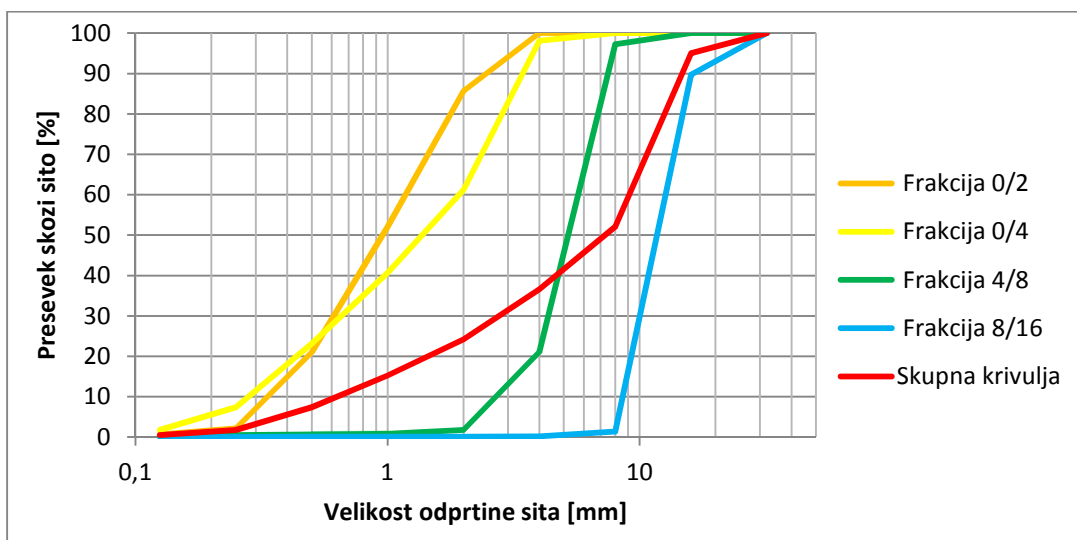
4.1.1 Agregat

Za izdelavo betonov smo uporabili zračno suh apnenčev drobljen agregat z gostoto 2700 kg/m³ frakcij 0/2 mm, 0/4 mm, 4/8 mm in 8/16 mm. Za izdelavo malt smo uporabili le frakcijo 0/2 mm.

Za vse uporabljene frakcije mineralnega agregata smo s sejhalno analizo določili zrnavostno sestavo frakcije. Rezultati analize so podani v preglednici 6 in na grafikonu 6.

Preglednica 6: Presevky vseh frakcij v %

	Presevek skozi sito [%], velikost odprtine sita [mm]									
	0	0,13	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Frakcija 0/2	0	0,67	2,14	21	52,1	85,7	100	100	100	100
Frakcija 0/4	0	1,76	7,4	23,2	40,7	61,2	98,1	100	100	100
Frakcija 4/8	0	0,32	0,53	0,64	0,85	1,81	21,1	97,2	100	100
Frakcija 8/16	0	0,04	0,04	0,09	0,11	0,15	0,17	1,41	89,7	100



Grafikon 7: Sejhalne krivulje (presevek [%] glede na odprtino sita)

4.1.2 Cement

Uporabili smo cement z oznako CEM I 42,5 R. To je portlandski cement trdnostnega 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo. Vsebuje minimalno 95% klinkerja in sadro, ki učinkuje kot regulator vezanja.

Preglednica 7: Karakteristike cementa (Hočevar, 2013)

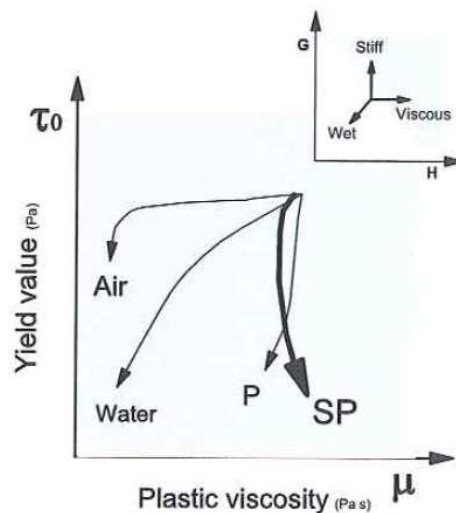
	CEM I 42,5 R
Vsebovanost sulfata	2,99%
Vsebovanost klorida	-
Tlačna trdnost, 2 dni	36,6 MPa
Tlačna trdnost, 28 dni	59,7 MPa
Čas začetka vezanja	150 min
Prostorninska obstojnost	< 1 mm
Standardna konsistenca	29,0 %
Specifična površina	3760 cm ² /g
Gostota	3,08 g/cm ³

4.1.3 Voda

Za naše preiskave smo uporabili pitno voda iz vodovodnega omrežja Ljubljane.

4.1.4 Kemijski dodatki

Uporabili smo dva različna superplastifikatorja nove generacije v tekoči obliki, narejena na osnovi polikarboksilatov (SP1) in polifosfonatov (SP2) ter stabilizator (ST) v praškasti obliki. Z uporabo superplastifikatorja lahko močno zmanjšamo vsebovanost vode, ne da bi s tem spremenili obdelavnost. Glede na dosedanje izkušnje je potrebno polifosfonatni superplastifikator, v primerjavi s polikarboksilatnim superplastifikatorjem, dodati v razmerju 3/2.



Grafikon 8: Učinek kemičnih dodatkov na τ_0/μ (Wallevik, 2009)

Superplastifikator se absorbira na površino cementnih zrn in jih tako obda z ovojem. Ker ovoj povzroča elektro-sterični odboj cementnih delcev in s tem preprečuje njihovo združevanje, ima superplastifikator pomemben vpliv na hitrost hidratacije, na samo reakcijo hidratacije pa ne. Ovoj superplastifikatorja okoli cementnega zrna zavira absorpcijo vode, s tem se podaljša začetni čas hidratacije cementa in občutno podaljša obdelavnost mešanice (Gašperič, 2013). Zaradi razpršenosti cementnih delcev je količina vode v mešanici manjša, zato se trdnost v strjenem stanju poveča, hkrati pa je cementni kamen manj porozen, stopnja krčenja in količina razpok pa manjša. Tak beton je bolj obstojen, saj je bolj odporen proti prodoru agresivnih snovi. Zavedati se je potrebno, da ob pretirani uporabi superplastifikatorja lahko pride do nezaželenih učinkov, saj so betonske mešanice z uporabo superplastifikatorja polikarboksilatnega tipa zaenkrat manj robustne in precej občutljive na spremembo njihove sestave.

4.2 Projektiranje mešanic

Sama priprava vhodnih sestavin zahteva zajem z mesta deponiranja in natančno tehtanje posameznih materialov. Ker je bil agregat zračno suh, smo morali upoštevati vodovpojnost, s katero se poveča količina dodane vode k mešanici. Efektivno vodocementno razmerje smo označili z V/C_{ef} . Količina superplastifikatorja in stabilizatorja je podana in izračunana kot odstotek mase cementa.

Vse količine sestavin pri mešanicah SCCR1-4 so izračunane in ustrezajo sestavi 1 m^3 betona. Mešanica SCCR4 je referenčna mešanica, pri ostalih mešanicah betona, SCCR4A-

D, pa smo simulirali netočno doziranje vode s ± 5 l in ± 10 l, tako da te mešanice ne ustrezajo sestavi 1 m³ betona, saj se med vsemi sestavinami spreminja le količina vode.

Preglednica 8: Preglednica 2: Sestava mešanic samozgoščevalnega betona

Sestavine	Mešanice SCC betona							
	R1	R2	R3	R4	R4A	R4B	R4C	R4D
Agregat [kg]	1552	1488	1422	1481	1481	1481	1481	1481
Kamena moka [kg]	216,5	216,5	216,5	216,5	216,5	216,5	216,5	216,5
CEM I 42,5 R [kg]	400	400	400	400	400	400	400	400
V/C	0,46	0,52	0,58	0,52	0,53	0,51	0,50	0,55
V/C _{ef}	0,44	0,50	0,56	0,51	0,52	0,49	0,48	0,53
Voda [kg]	184	208	232	208	213	203	198	218
SP1 [%]	0,70	0,70	0,70					
SP2 [%]				1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
ST			0,10					

4.2.1 Metoda CEM

Namen CEM metode (concrete equivalent mortar) je, da poiščemo betonu ekvivalentno malto, ki ima primerljive reološke lastnosti ter si s tem zagotovimo hitrejše, manj fizično naporne in cenovno ugodnejše preiskave mešanic. Pri mešanicah betona in malte mora biti skupna specifična površina agregatnih zrn vseh frakcij ter količina cementa in drugih dodatkov enaka, kot so bile v betonu. Spremenimo le količino vode, da ohranimo vodocementno razmerje. S pomočjo mase agregata izračunamo količino agregata frakcije 0/2 v malti tako, da prištejemo nadomestek v obliki frakcije 0/2 za vsa večja zrna, ki so v betonu. To velja, v kolikor grobe frakcije ne vsebujejo preveč finih delcev, drugače je potrebno grobo frakcijo presejati in v mešanico malte dodati odsejane fine delce (Hočevnar, 2013).

$$S_{x/y} = \frac{A}{V \rho} ; \quad m_{0/2_CEM} = m_{0/2} + \frac{m_{0/4} S_{0/4} + m_{4/8} S_{4/8} + m_{8/16} S_{8/16}}{S_{0/2}}$$

Enačba 8: Enačba za izračun specifične površine podfrakcije in enačba za izračun količine fine frakcije v malti CEM (Hočevnar, 2013)

Preglednica 9: Sestava mešanic samozgoščevalne malte

Sestavine	Mešanice malt CEM iz SCC							
	MR1	MR2	MR3	MR4	MR4A	MR4B	MR4C	MR4D
Agregat [kg]	14,052	13,470	12,886	13,405	13,405	13,405	13,405	13,405
Kamena moka [kg]	3,032	3,032	3,032	3,032	3,032	3,032	3,032	3,032
CEM I 42,5 R [kg]	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Voda [kg]	2,576	2,912	3,248	2,912	2,928	2,842	2,772	3,032
SP1 [g]	60, 42	60, 42	60, 42					
SP2 [g]				99,26	99,26	99,26	99,26	99,26
ST			5,60					

Malte enakovredne betonu, po metodi CEM, vrednotimo s klasičnim preskusom obdelavnosti. Razlez s posedom samozgoščevalnega betona primerjamo z razlezom s posedom pripadajoče mešanice malte po metodi CEM.

4.3 Rezultati meritev z reometrom

Meritve z reometrom zabeležene s pomočjo programa FreshWin smo zaradi lažje obdelave podatkov pretvorili v Excelovo datoteko. Podatke smo obdelali tako, da smo pri vsaki ponovitvi v enem časovnem intervalu naredili povprečje izmerjene odpornosti na striženje (T) glede na standardno hitrost vrtenja (N) posode.

Preglednica 10: Točke, pri katerih reometer meri odpornost striženja glede na hitrosti vrtenja posode

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

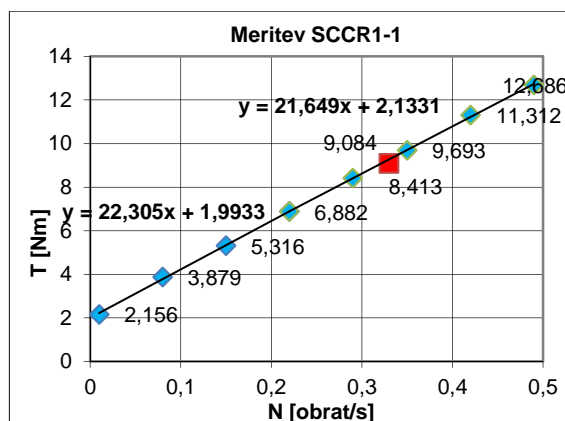
Na grafikonih je z modro oznako in pripadajočo vrednostjo strižne odpornosti prikazanih 8 regresijskih T/N točk in dodatna rdeča kontrola segregacije. S pomočjo zajetih spodnjih (zadnjih) štirih točk smo z regresijsko premico opisali ter odčitali presečišče premice z ordinatno osjo in tako določili moment na meji tečenja G. Z zgornjimi (prvimi) petimi točkami

smo prav tako opisali z enačbo regresijske premice in s tem določili koeficient viskoznosti H , ki predstavlja naklon spodnje in zgornje regresijske premice. Poleg grafikonov so zapisani podatki dobljenih vrednosti s pomočjo grafikonov, izračun posameznega reološkega parametra τ_0 in μ in vrednost razleza s posedom.

4.3.1 Rezultati meritev z reometrom in razlez s posedom za SCC beton

vzorec SCCR1-1

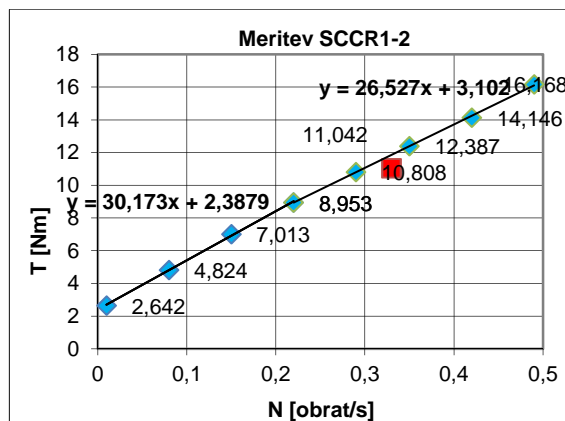
- G= 1,993 N·m
- H_1 = 22,305 N·m·s
- H_2 = 21,649 N·m·s
- τ_0 = 223,858 Pa
- μ_1 = 148,134 Pa·s
- μ_2 = 143,777 Pa·s
- SF= 370mm



Grafikon 9: Tokovna krivulja mešanice SCCR1-1, čas 0 minut

vzorec SCCR1-2

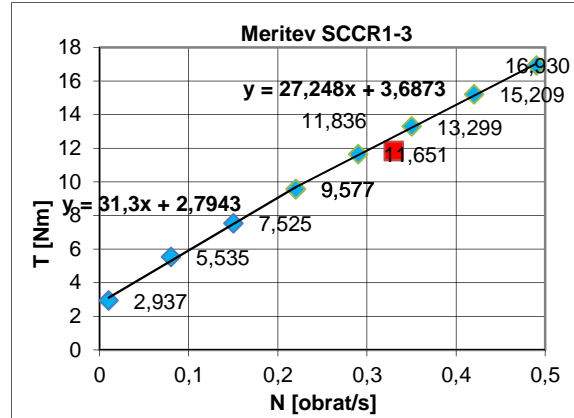
- G= 2,388 N·m
- H_1 = 30,173 N·m·s
- H_2 = 26,527 N·m·s
- τ_0 = 268,173 Pa
- μ_1 = 200,388 Pa·s
- μ_2 = 176,174 Pa·s
- SF= 340mm



Grafikon 10: Tokovna krivulja mešanice SCCR1-2, čas 20 minut

vzorec SCCR1-3

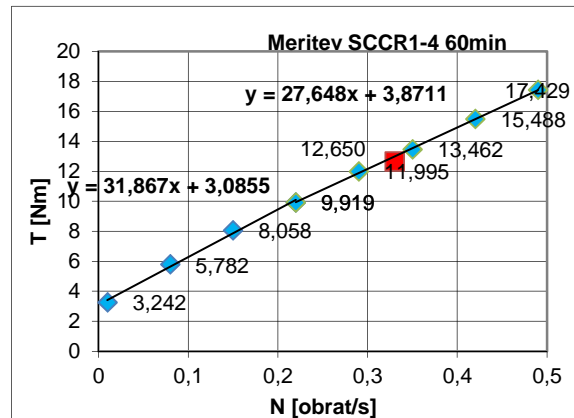
G= 2,7943 N·m
 H_1 = 31,300 N·m·s
 H_2 = 27,248 N·m·s
 τ_0 = 313,824 Pa
 μ_1 = 207,853 Pa·s
 μ_2 = 180,962 Pa·s
 SF= 340mm



Grafikon 11: Tokovna krivulja mešanice SCCR1-3, čas 40 minut

vzorec SCCR1-4

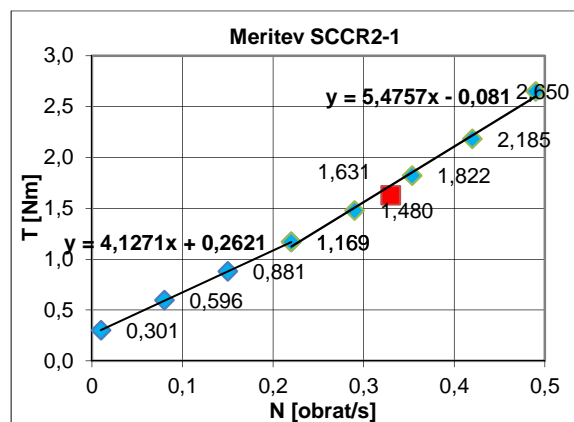
G= 3,086 N·m
 H_1 = 31,867 N·m·s
 H_2 = 27,648 N·m·s
 τ_0 = 346,518 Pa
 μ_1 = 211,638 Pa·s
 μ_2 = 183,619 Pa·s
 SF= 330mm



Grafikon 12: Tokovna krivulja mešanice SCCR1-4, čas 60 minut

vzorec SCCR2-1

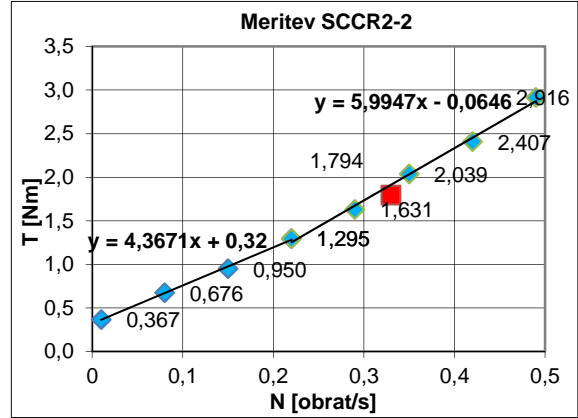
G= 0,262 N·m
 H_1 = 4,127 N·m·s
 H_2 = 5,476 N·m·s
 τ_0 = 29,435 Pa
 μ_1 = 27,409 Pa·s
 μ_2 = 36,366 Pa·s
 SF= 690mm



Grafikon 13: Tokovna krivulja mešanice SCCR2-1, čas 0 minut

vzorec SCCR2-2

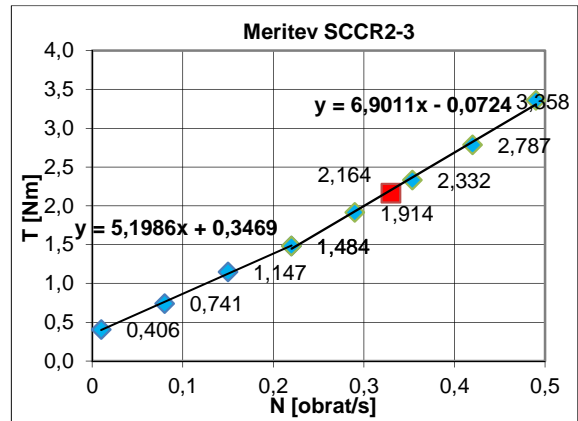
G= 0,320 N·m
 H₁= 4,367 N·m·s
 H₂= 5,995 N·m·s
 τ₀= 35,938 Pa
 μ₁= 29,003 Pa·s
 μ₂= 39,813 Pa·s
 SF= 630mm



Grafikon 14: Tokovna krivulja mešanice SCCR2-2, čas 20 minut

vzorec SCCR2-3

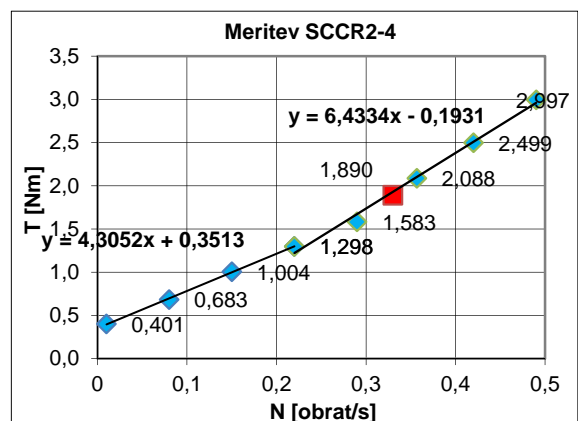
G= 0,347 N·m
 H₁= 5,199 N·m·s
 H₂= 6,9019 N·m·s
 τ₀= 38,959 Pa
 μ₁= 34,525 Pa·s
 μ₂= 45,832 Pa·s
 SF= 640mm



Grafikon 15: Tokovna krivulja mešanice SCCR2-3, čas 40 minut

vzorec SCCR2-4

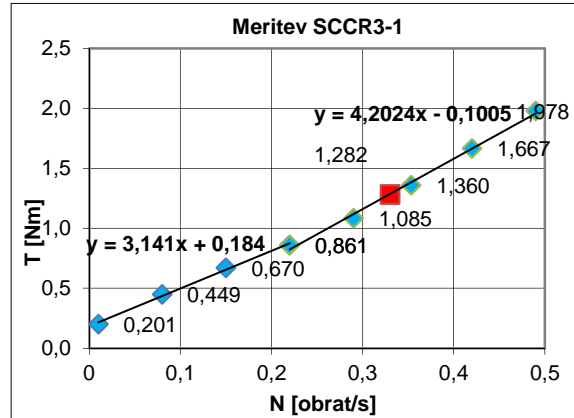
G= 0,351 N·m
 H₁= 4,305 N·m·s
 H₂= 6,433 N·m·s
 τ₀= 39,453 Pa
 μ₁= 28,582 Pa·s
 μ₂= 42,726 Pa·s
 SF= 620mm



Grafikon 16: Tokovna krivulja mešanice SCCR2-4, čas 60 minut

vzorec SCCR3-1

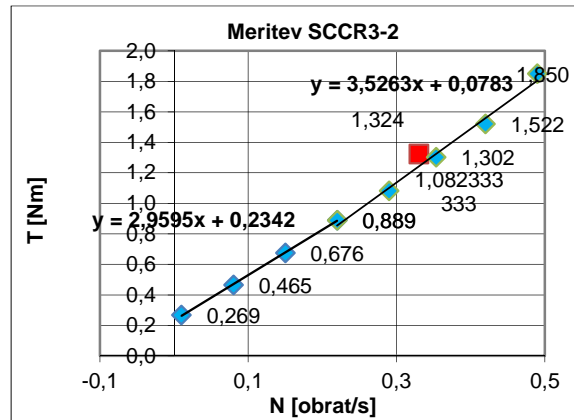
G= 0,184 N·m
 $H_1= 3,141 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 4,202 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 20,664 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 20,860 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 27,909 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 SF= 790mm



Grafikon 17: Tokovna krivulja mešanice SCCR3-1, čas 0 minut

vzorec SCCR3-2

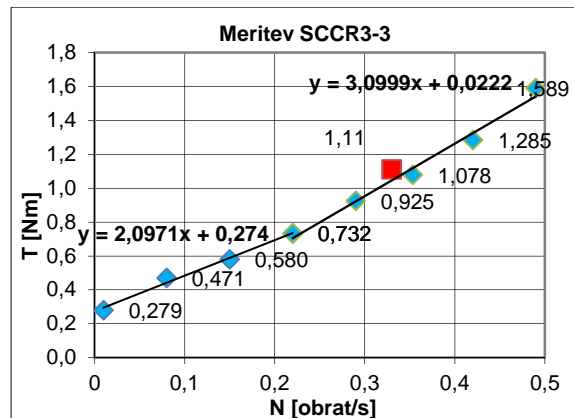
G= 0,234 N·m
 $H_1= 2,960 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 3,526 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 26,302 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 19,654 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 23,419 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 SF= 760mm



Grafikon 18: Tokovna krivulja mešanice SCCR3-2, čas 20 minut

vzorec SCCR3-3

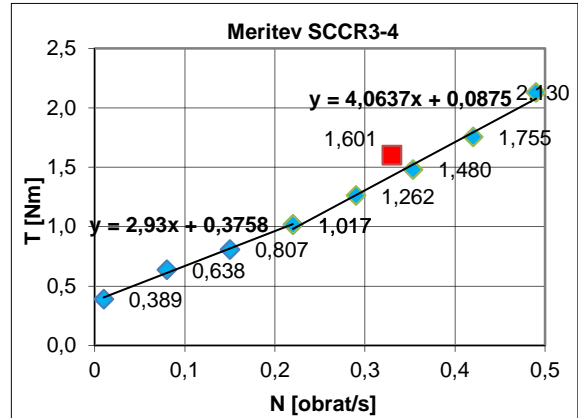
G= 0,274 N·m
 $H_1= 2,097 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 3,100 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 30,772 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 13,927 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 20,587 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 SF= 760mm



Grafikon 19: Tokovna krivulja mešanice SCCR3-3, čas 40 minut

vzorec SCCR3-4

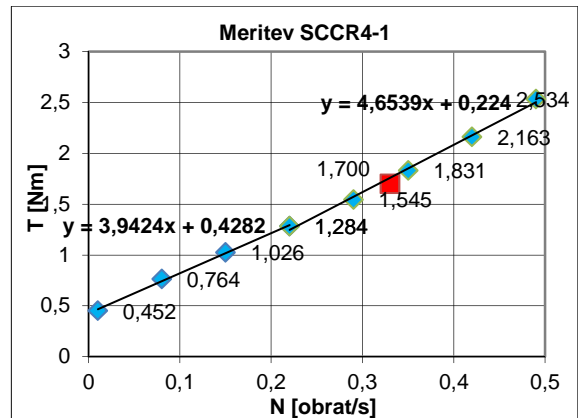
G= 0,3767 N·m
 H₁= 2,930 N·m·s
 H₂= 4,064 N·m·s
 τ₀= 42,204 Pa
 μ₁= 19,459 Pa·s
 μ₂= 26,988 Pa·s
 SF= 750mm



Grafikon 20: Tokovna krivulja mešanice SCCR3-4, čas 60 minut

vzorec SCCR4-1

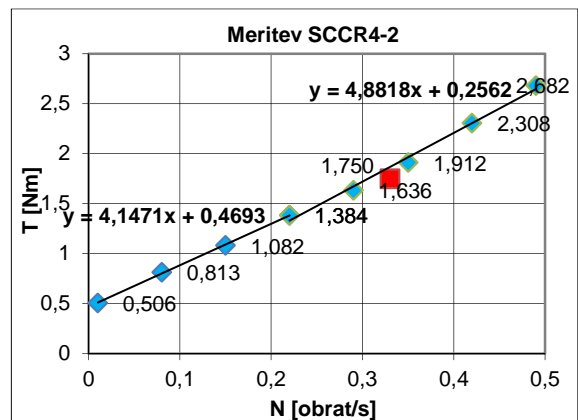
G= 0,428 N·m
 H₁= 3,942 N·m·s
 H₂= 4,654 N·m·s
 τ₀= 48,089 Pa
 μ₁= 26,182 Pa·s
 μ₂= 30,908 Pa·s
 SF= 670mm



Grafikon 21: Tokovna krivulja mešanice SCCR4-1, čas 0 minut

vzorec SCCR4-2

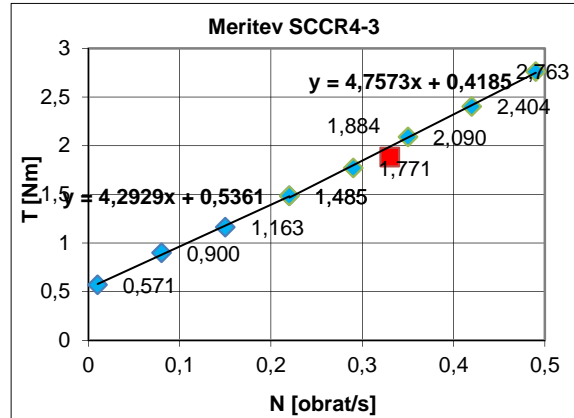
G= 0,469 N·m
 H₁= 4,147 N·m·s
 H₂= 4,882 N·m·s
 τ₀= 52,705 Pa
 μ₁= 27,542 Pa·s
 μ₂= 32,421 Pa·s
 SF= 580mm



Grafikon 22: Tokovna krivulja mešanice SCCR4-2, čas 20 minut

vzorec SCCR4-3

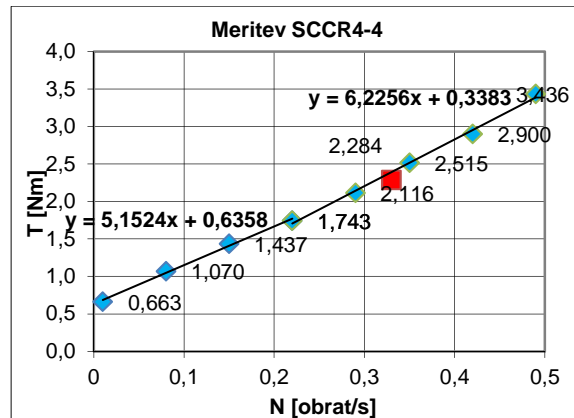
G= 0,536 N·m
 $H_1= 4,293 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 4,757 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 60,207 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 28,510 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 32,594 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 SF= 550mm



Grafikon 23: Tokovna krivulja mešanice SCCR4-3, čas 40 minut

vzorec SCCR4-4

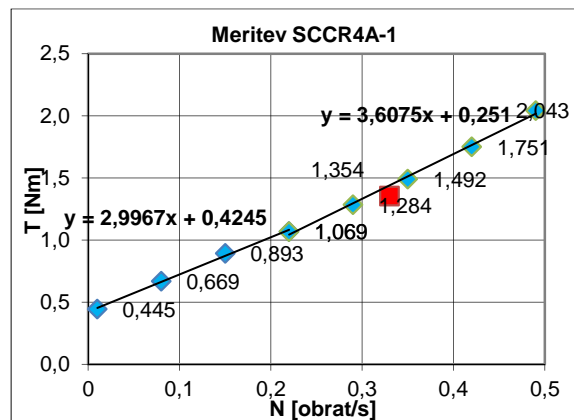
G= 0,636 N·m
 $H_1= 5,152 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 6,226 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 71,404 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 34,219 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 41,346 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 SF= 550mm



Grafikon 24: Tokovna krivulja mešanice SCCR4-4, čas 60 minut

vzorec SCCR4A-1

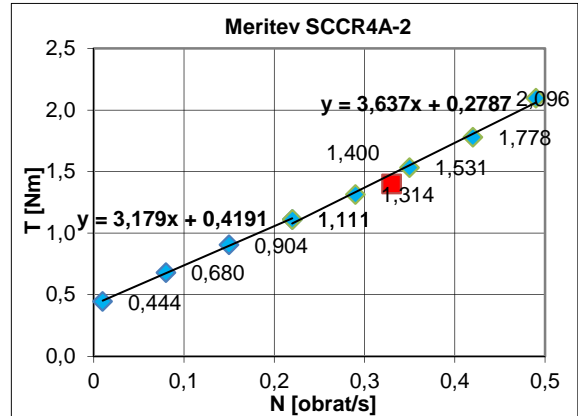
G= 0,425 N·m
 $H_1= 2,997 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 3,608 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 47,674 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 19,902 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 23,958 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 SF= 710mm



Grafikon 25: Tokovna krivulja mešanice SCCR4A-1, čas 0 minut

vzorec SCCR4A-2

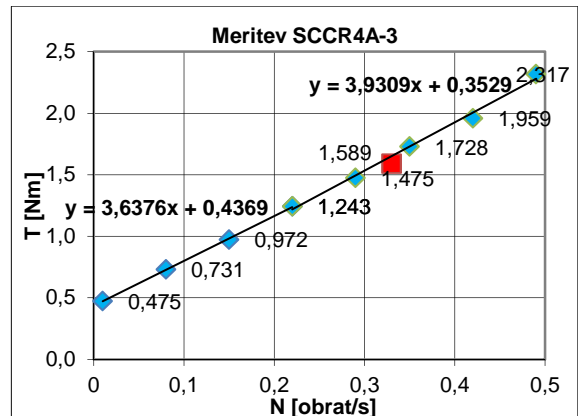
G= 0,419 N·m
 H₁= 3,179 N·m·s
 H₂= 3,637 N·m·s
 τ₀= 47,047 Pa
 μ₁= 21,112 Pa·s
 μ₂= 24,154 Pa·s
 SF= 640mm



Grafikon 26: Tokovna krivulja mešanice SCCR4A-2, čas 20 minut

vzorec SCCR4A-3

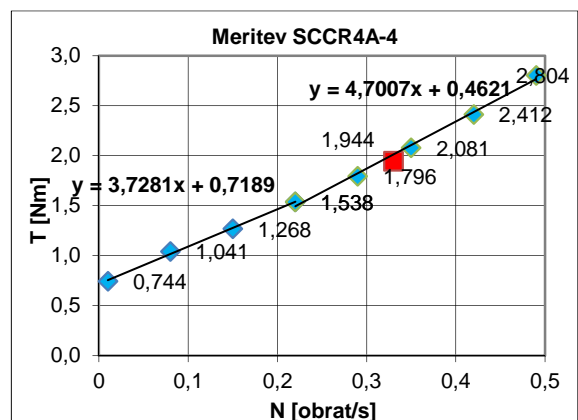
G= 0,437 N·m
 H₁= 3,638 N·m·s
 H₂= 3,931 N·m·s
 τ₀= 49,066 Pa
 μ₁= 24,158 Pa·s
 μ₂= 26,106 Pa·s
 SF= 620mm



Grafikon 27: Tokovna krivulja mešanice SCCR4A-3, čas 40 minut

vzorec SCCR4A-4

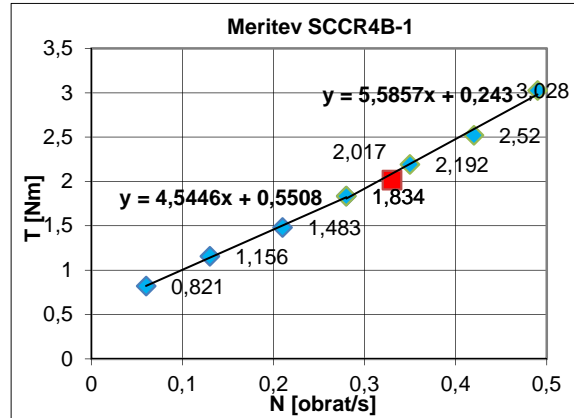
G= 0,719 N·m
 H₁= 3,728 N·m·s
 H₂= 4,701 N·m·s
 τ₀= 80,837 Pa
 μ₁= 24,759 Pa·s
 μ₂= 31,219 Pa·s
 SF= 610mm



Grafikon 28: Tokovna krivulja mešanice SCCR4A-4, čas 60 minut

vzorec SCCR4B-1

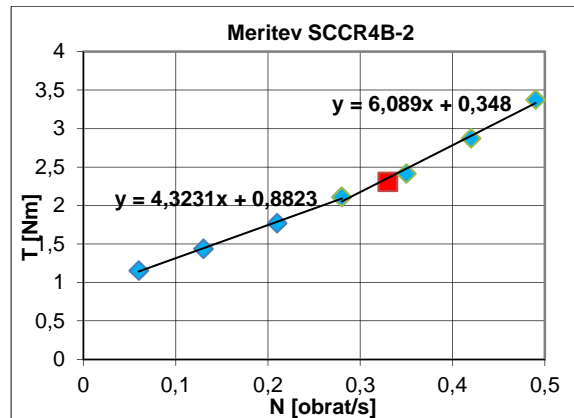
G= 0,551 N·m
 H₁= 4,545 N·m·s
 H₂= 5,586 N·m·s
 τ₀= 61,858 Pa
 μ₁= 30,182 Pa·s
 μ₂= 37,096 Pa·s
 SF= 630mm



Grafikon 29: Tokovna krivulja mešanice SCCR4B-1, čas 0 minut

vzorec SCCR4B-2

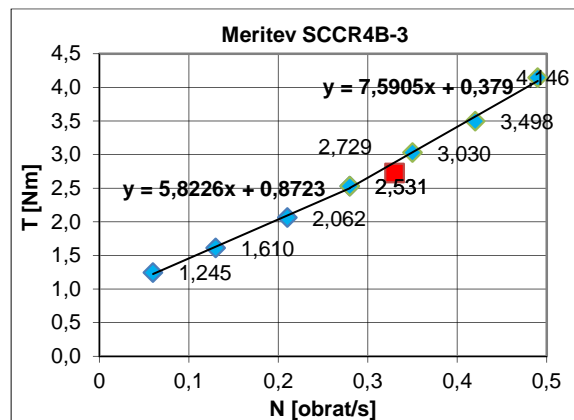
G= 0,882 N·m
 H₁= 4,323 N·m·s
 H₂= 6,089 N·m·s
 τ₀= 99,087 Pa
 μ₁= 28,711 Pa·s
 μ₂= 40,439 Pa·s
 SF= 580mm



Grafikon 30: Tokovna krivulja mešanice SCCR4B-2, čas 20 minut

vzorec SCCR4B-3

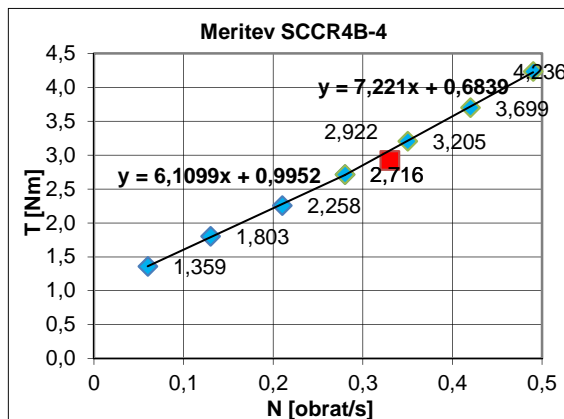
G= 0,872 N·m
 H₁= 5,823 N·m·s
 H₂= 7,591 N·m·s
 τ₀= 97,964 Pa
 μ₁= 38,670 Pa·s
 μ₂= 50,411 Pa·s
 SF= 540mm



Grafikon 31: Tokovna krivulja mešanice SCCR4B-3, čas 40 minut

vzorec SCCR4B-4

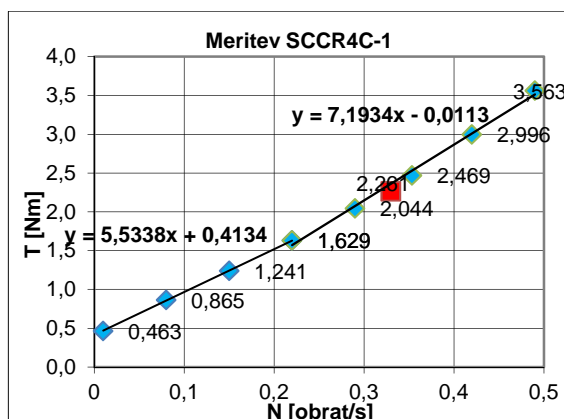
G= 0,995 N·m
 H₁= 6,110 N·m·s
 H₂= 7,221 N·m·s
 τ₀= 111,766 Pa
 μ₁= 40,578 Pa·s
 μ₂= 47,957 Pa·s
 SF= 510mm



Grafikon 32: Tokovna krivulja mešanice SCCR4B-4, čas 60 minut

vzorec SCCR4C-1

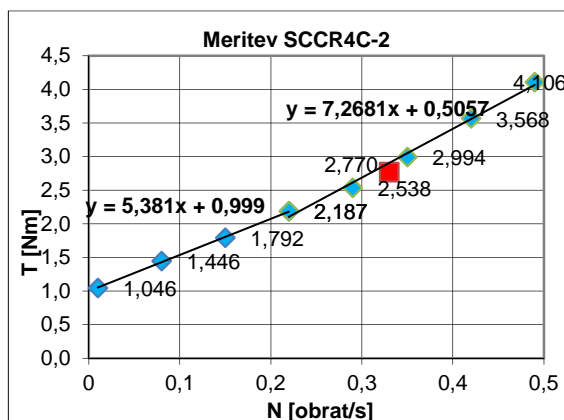
G= 0,413 N·m
 H₁= 5,534 N·m·s
 H₂= 7,139 N·m·s
 τ₀= 46,427 Pa
 μ₁= 36,752 Pa·s
 μ₂= 47,774 Pa·s
 SF= 600mm



Grafikon 33: Tokovna krivulja mešanice SCCR4C-1, čas 0 minut

vzorec SCCR4C-2

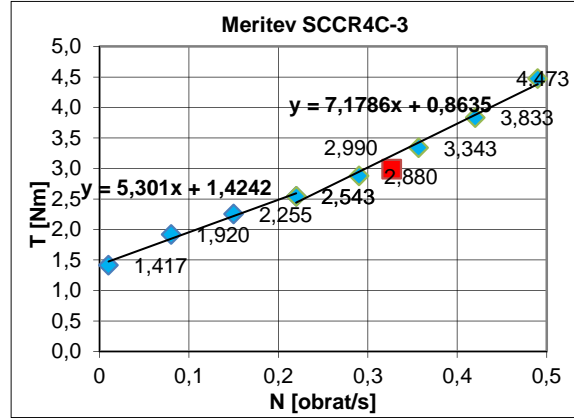
G= 0,999 N·m
 H₁= 5,381 N·m·s
 H₂= 7,268 N·m·s
 τ₀= 112,193 Pa
 μ₁= 35,737 Pa·s
 μ₂= 48,270 Pa·s
 SF= 540mm



Grafikon 34: Tokovna krivulja mešanice SCCR4C-2, čas 20 minut

vzorec SCCR4C-3

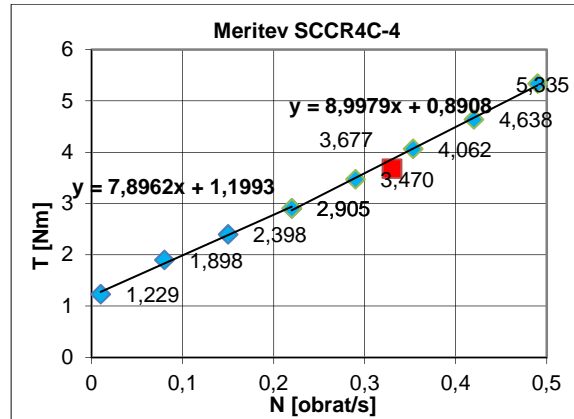
G= 1,424 N·m
 H_1 = 5,301 N·m·s
 H_2 = 7,179 N·m·s
 τ_0 = 159,945 Pa
 μ_1 = 35,206 Pa·s
 μ_2 = 47,675 Pa·s
 SF= 510mm



Grafikon 35: Tokovna krivulja mešanice SCCR4C-3, čas 40 minut

vzorec SCCR4C-4

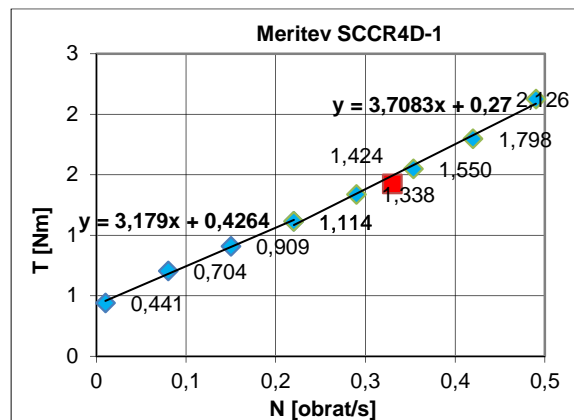
G= 1,199 N·m
 H_1 = 7,896 N·m·s
 H_2 = 8,998 N·m·s
 τ_0 = 134,688 Pa
 μ_1 = 52,441 Pa·s
 μ_2 = 59,758 Pa·s
 SF= 470mm



Grafikon 36: Tokovna krivulja mešanice SCCR4C-4, čas 60 minut

vzorec SCCR4D-1

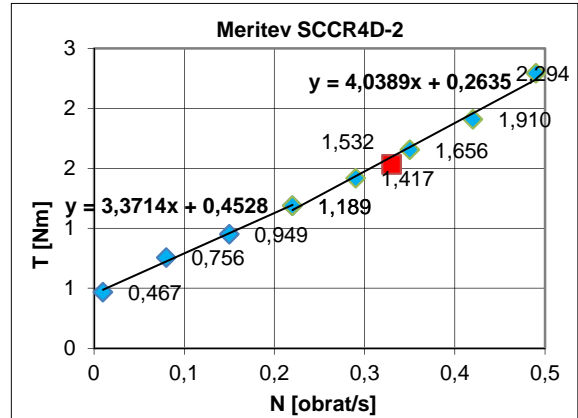
G= 0,426 N·m
 H_1 = 3,179 N·m·s
 H_2 = 3,708 N·m·s
 τ_0 = 47,887 Pa
 μ_1 = 21,113 Pa·s
 μ_2 = 24,628 Pa·s
 SF= 670mm



Grafikon 37: Tokovna krivulja mešanice SCCR4D-1, čas 0 minut

vzorec SCCR4D-2

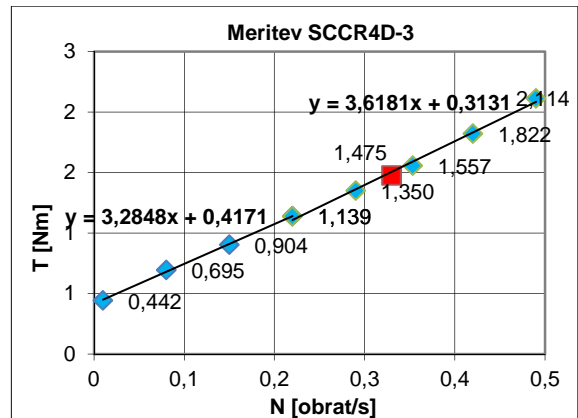
G= 0,453 N·m
 H₁= 3,371 N·m·s
 H₂= 4,039 N·m·s
 τ₀= 50,852 Pa
 μ₁= 22,390 Pa·s
 μ₂= 26,824 Pa·s
 SF= 620mm



Grafikon 38: Tokovna krivulja mešanice SCCR4D-2, čas 20 minut

vzorec SCCR4D-3

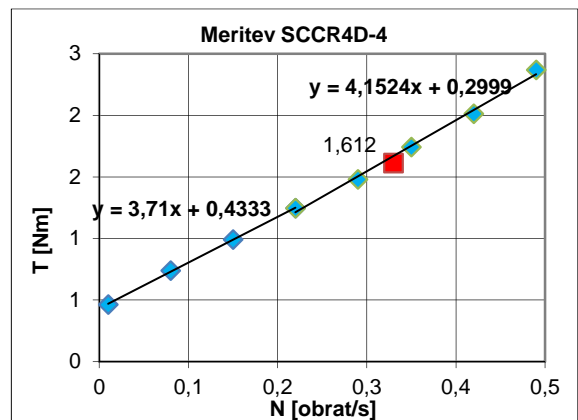
G= 0,417 N·m
 H₁= 3,285 N·m·s
 H₂= 3,618 N·m·s
 τ₀= 46,842 Pa
 μ₁= 21,815 Pa·s
 μ₂= 24,029 Pa·s
 SF= 610mm



Grafikon 39: Tokovna krivulja mešanice SCCR4D-3, čas 40 minut

vzorec SCCR4D-4

G= 0,433 N·m
 H₁= 3,710 N·m·s
 H₂= 4,152 N·m·s
 τ₀= 49,662 Pa
 μ₁= 24,639 Pa·s
 μ₂= 27,577 Pa·s
 SF= 600mm



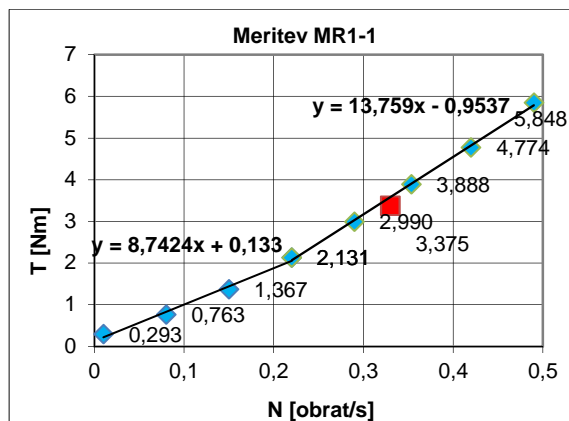
Grafikon 40: Tokovna krivulja mešanice SCCR4D-4, čas 60 minut

4.3.2 Rezultati meritev z reometrom in mini testa razleza s posedom za samozgoščevalno malto

vzorec SCCMR1-1

G= 0,133 N·m
 $H_1= 8,742 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 13,759 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 27,532 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 49,676 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 78,182 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= / mm; SF = 280 mm

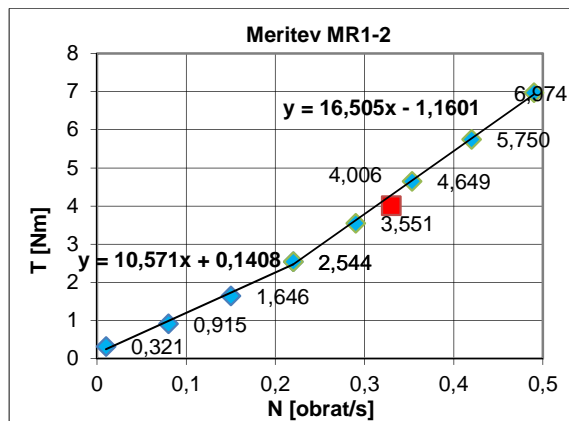


Grafikon 41: Tokovna krivulja mešanice SCCMR1-1, čas 0 minut

vzorec SCCMR1-2

G= 0,141 N·m
 $H_1= 10,571 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 16,505 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 29,147 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 60,067 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 93,785 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= / mm; SF = 260mm

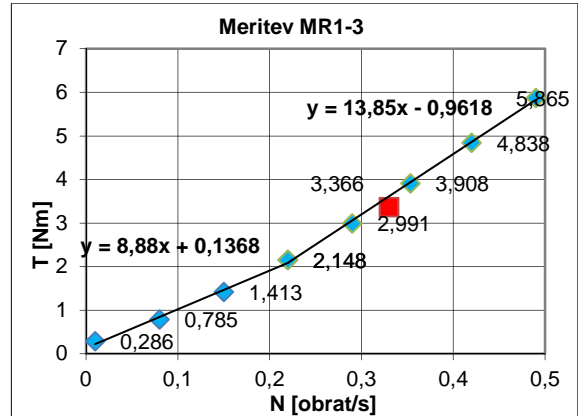


Grafikon 42: Tokovna krivulja mešanice SCCMR1-2, čas 20 minut

vzorec SCCMR1-3

G= 0,137 N·m
 H₁= 8,880 N·m·s
 H₂= 13,850 N·m·s
 τ₀= 28,319 Pa
 μ₁= 50,458 Pa·s
 μ₂= 78,699 Pa·s

mini SF= / mm; SF= 260 mm

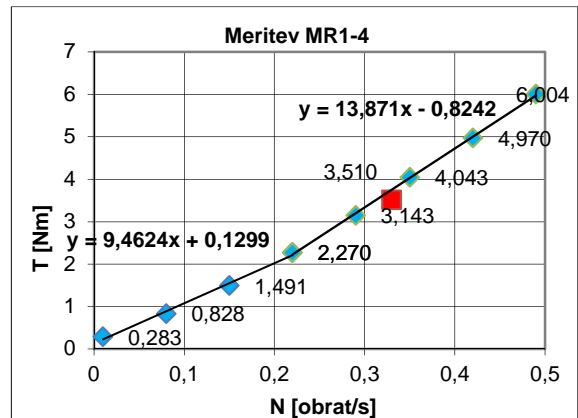


Grafikon 43: Tokovna krivulja mešanice SCCMR1-3, čas 40 minut

vzorec SCCMR1-4

G= 0,130 N·m
 H₁= 9,462 N·m·s
 H₂= 13,871 N·m·s
 τ₀= 26,890 Pa
 μ₁= 53,768 Pa·s
 μ₂= 78,818 Pa·s

mini SF= / mm; SF= 270 mm

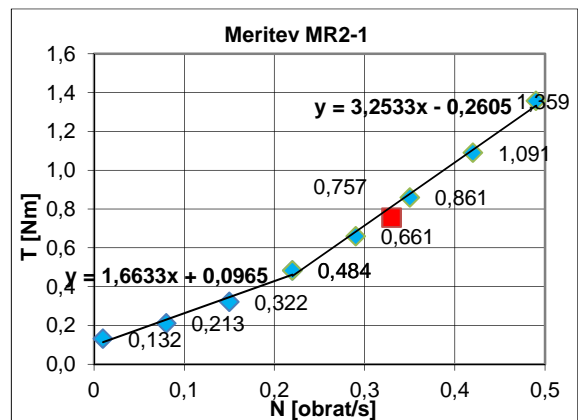


Grafikon 44: Tokovna krivulja mešanice SCCMR1-4, čas 60 minut

vzorec SCCMR2-1

G= 0,097 N·m
 H₁= 1,663 N·m·s
 H₂= 3,253 N·m·s
 τ₀= 22,473 Pa
 μ₁= 10,632 Pa·s
 μ₂= 20,797 Pa·s

mini SF= / mm; SF= 410 mm

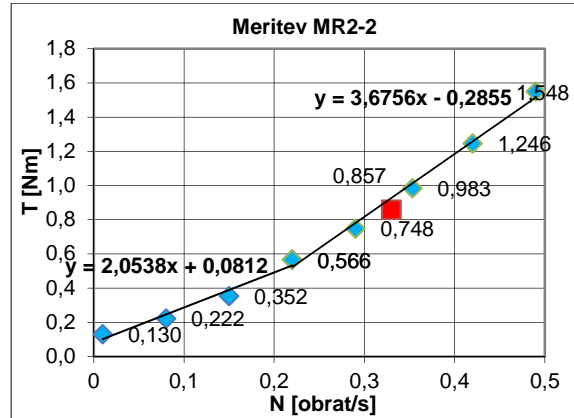


Grafikon 45: Tokovna krivulja mešanice SCCMR2-1, čas 0 minut

vzorec SCCMR2-2

G= 0,081 N·m
 $H_1= 2,054 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 3,674 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 18,910 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 13,129 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 23,296 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= / mm; SF= 400 mm

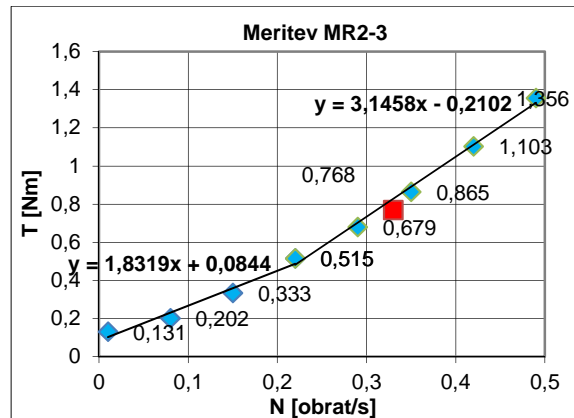


Grafikon 46: Tokovna krivulja mešanice SCCMR2-2, čas 20 minut

vzorec SCCMR2-3

G= 0,085 N·m
 $H_1= 1,832 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 3,146 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 19,655 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 11,710 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 20,110 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= 310 mm; SF= 400 mm

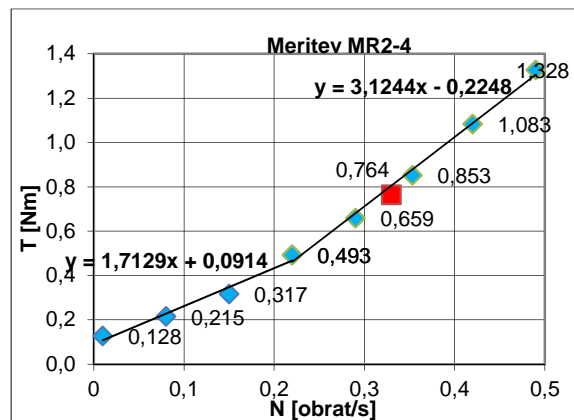


Grafikon 47: Tokovna krivulja mešanice SCCMR2-3, čas 40 minut

vzorec SCCMR2-4

G= 0,091 N·m
 $H_1= 1,713 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 3,124 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 21,286 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 10,950 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 19,973 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= 320 mm; SF= 400 mm

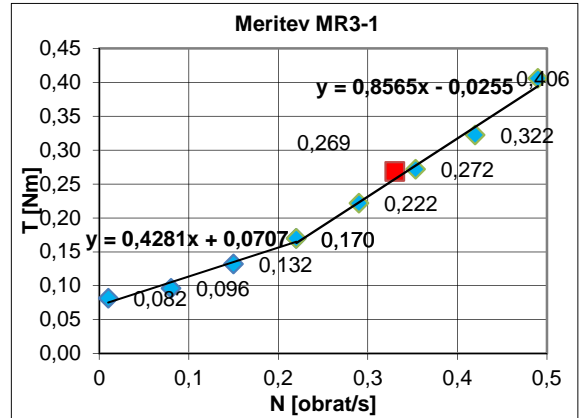


Grafikon 48: Tokovna krivulja mešanice SCCMR2-4, čas 60 minut

vzorec SCCMR3-1

G= 0,071 N·m
 H₁= 0,438 N·m·s
 H₂= 0,857 N·m·s
 τ₀= 16,465 Pa
 μ₁= 2,737 Pa·s
 μ₂= 5,475 Pa·s

mini SF= 350 mm; SF= 460 mm

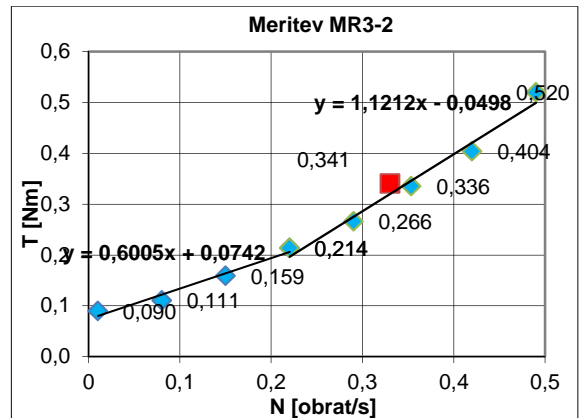


Grafikon 49: Tokovna krivulja mešanice SCCMR3-1, čas 0 minut

vzorec SCCMR3-2

G= 0,074 N·m
 H₁= 0,601 N·m·s
 H₂= 1,121 N·m·s
 τ₀= 17,280 Pa
 μ₁= 3,839 Pa·s
 μ₂= 7,167 Pa·s

mini SF= 360 mm; SF= 475 mm

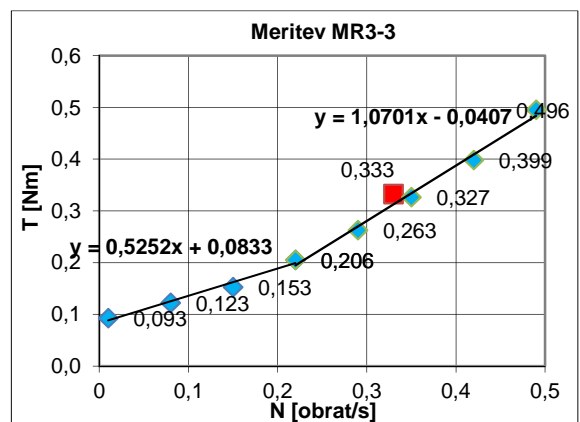


Grafikon 50: Tokovna krivulja mešanice SCCMR3-2, čas 20 minut

vzorec SCCMR3-3

G= 0,083 N·m
 H₁= 0,525 N·m·s
 H₂= 1,070 N·m·s
 τ₀= 19,399 Pa
 μ₁= 3,357 Pa·s
 μ₂= 6,841 Pa·s

mini SF= 370 mm; SF= 445 mm

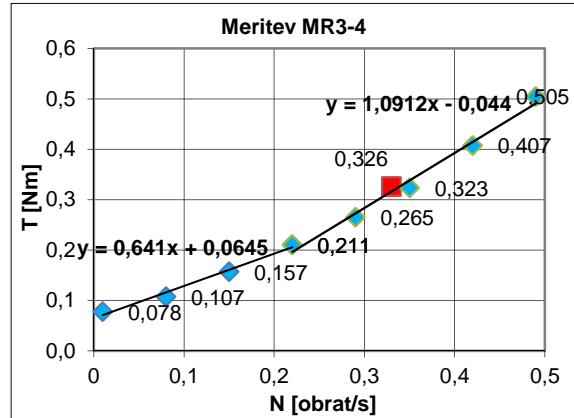


Grafikon 51: Tokovna krivulja mešanice SCCMR3-3, čas 40 minut

vzorec SCCMR3-4

G= 0,064 N·m
 H_1 = 0,641 N·m·s
 H_2 = 1,910 N·m·s
 τ_0 = 15,021 Pa
 μ_1 = 4,098 Pa·s
 μ_2 = 6,976 Pa·s

mini SF= 350 mm; SF= 460 mm

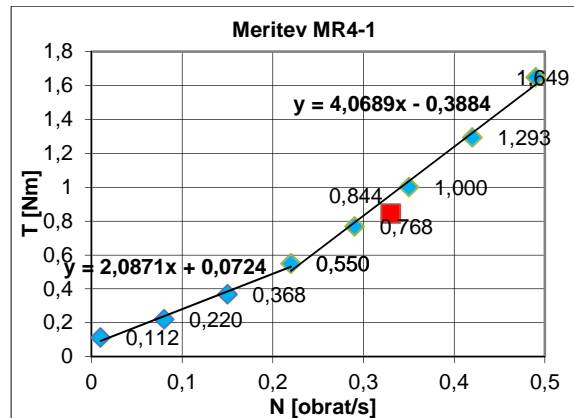


Grafikon 52: Tokovna krivulja mešanice SCCMR3-4, čas 60 minut

vzorec SCCMR4-1

G= 0,072 N·m
 H_1 = 2,087 N·m·s
 H_2 = 4,069 N·m·s
 τ_0 = 16,861 Pa
 μ_1 = 13,342 Pa·s
 μ_2 = 26,011 Pa·s

mini SF= 300 mm; SF= 410 mm

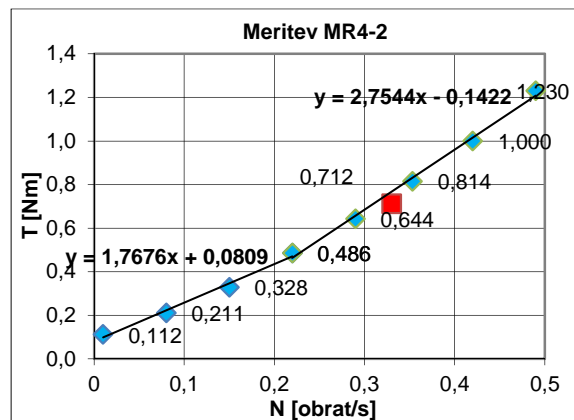


Grafikon 53: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4-1, čas 0 minut

vzorec SCCMR4-2

G= 0,081 N·m
 H_1 = 1,768 N·m·s
 H_2 = 2,754 N·m·s
 τ_0 = 18,840 Pa
 μ_1 = 11,299 Pa·s
 μ_2 = 17,608 Pa·s

mini SF= 300 mm; SF= 390 mm

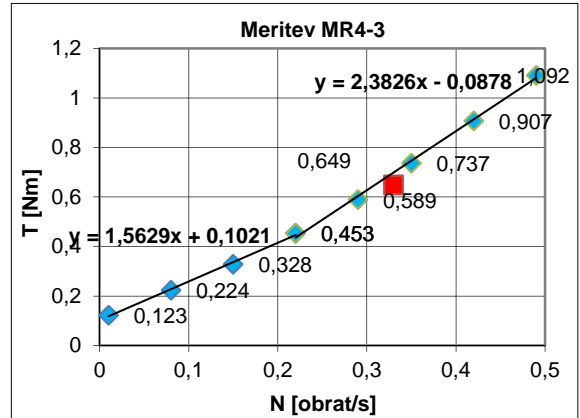


Grafikon 54: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4-2, čas 20 minut

vzorec SCCMR4-3

G= 0,102 N·m
 H₁= 1,563 N·m·s
 H₂= 2,384 N·m·s
 τ₀= 23,778 Pa
 μ₁= 9,991 Pa·s
 μ₂= 15,231 Pa·s

mini SF= 300 mm; SF= 370 mm

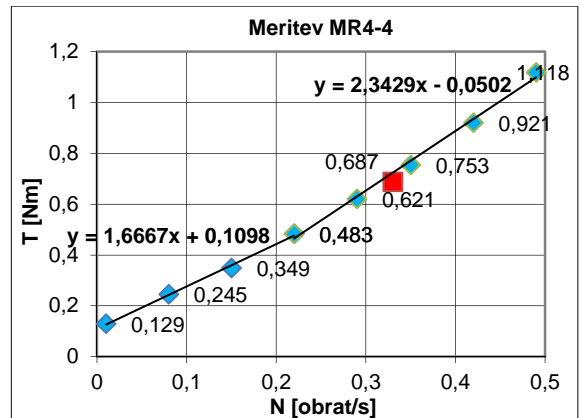


Grafikon 55: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4-3, čas 40 minut

vzorec SCCMR4-4

G= 0,110 N·m
 H₁= 1,667 N·m·s
 H₂= 2,343 N·m·s
 τ₀= 25,571 Pa
 μ₁= 10,654 Pa·s
 μ₂= 14,977 Pa·s

mini SF= 300 mm; SF= 370 mm

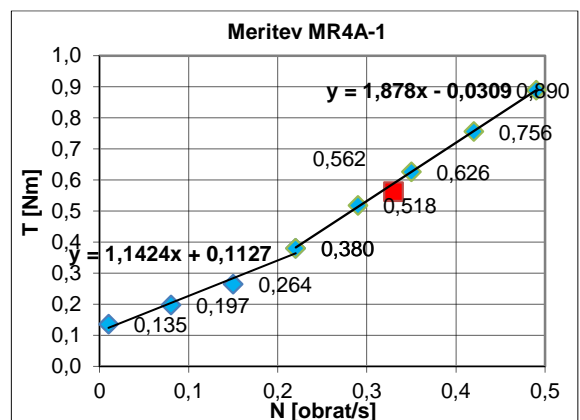


Grafikon 56: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4-4, čas 60 minut

vzorec SCCMR4A-1

G= 0,113 N·m
 H₁= 1,142 N·m·s
 H₂= 1,878 N·m·s
 τ₀= 24,702 Pa
 μ₁= 6,873 Pa·s
 μ₂= 11,299 Pa·s

mini SF= 305 mm; SF= 410 mm

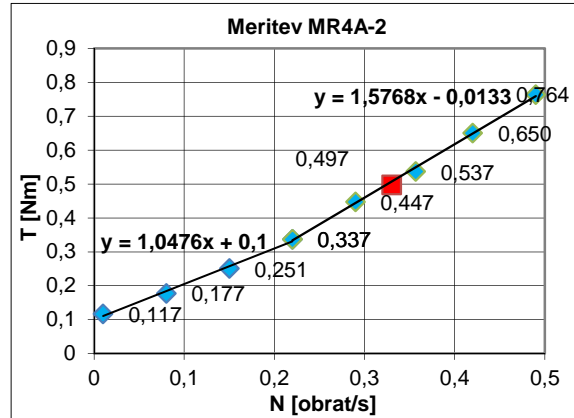


Grafikon 57: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4A-1, čas 0 minut

vzorec SCCMR4A-2

G= 0,100 N·m
 H₁= 1,048 N·m·s
 H₂= 1,577 N·m·s
 τ₀= 21,919 Pa
 μ₁= 6,303 Pa·s
 μ₂= 9,489 Pa·s

mini SF= 295 mm; SF= 395 mm

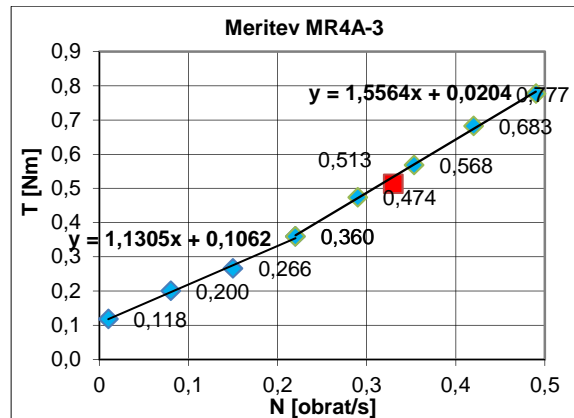


Grafikon 58: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4A-2, čas 20 minut

vzorec SCCMR4A-3

G= 0,106 N·m
 H₁= 1,131 N·m·s
 H₂= 1,556 N·m·s
 τ₀= 23,278 Pa
 μ₁= 6,802 Pa·s
 μ₂= 9,364 Pa·s

mini SF= 290 mm; SF= 380 mm

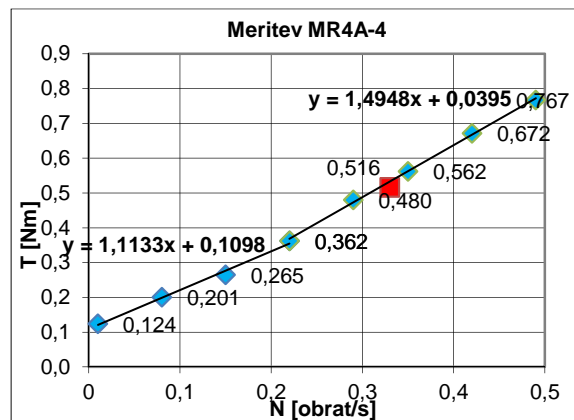


Grafikon 59: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4A-3, čas 40 minut

vzorec SCCMR4A-4

G= 0,110 N·m
 H₁= 1,113 N·m·s
 H₂= 1,495 N·m·s
 τ₀= 24,067 Pa
 μ₁= 6,698 Pa·s
 μ₂= 8,993 Pa·s

mini SF= 270 mm; SF= 380 mm



Grafikon 60: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4A-4, čas 60 minut

vzorec SCCMR4B-1

G= 0,104 N·m

H₁= 1,055 N·m·s

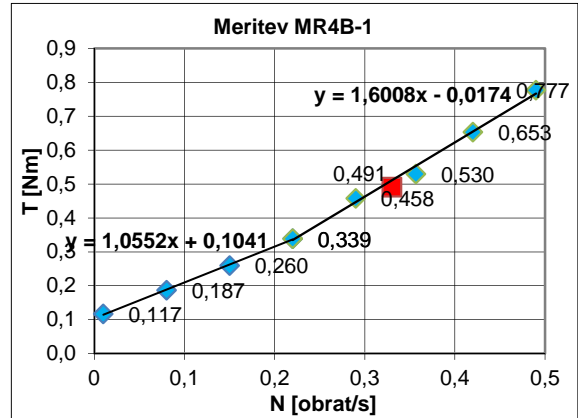
H₂= 1,601 N·m·s

τ₀= 24,243 Pa

μ₁= 6,745 Pa·s

μ₂= 10,233 Pa·s

mini SF= 285 mm; SF= 410 mm



Grafikon 61: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4B-1, čas 0 minut

vzorec SCCMR4B-2

G= 0,116 N·m

H₁= 1,137 N·m·s

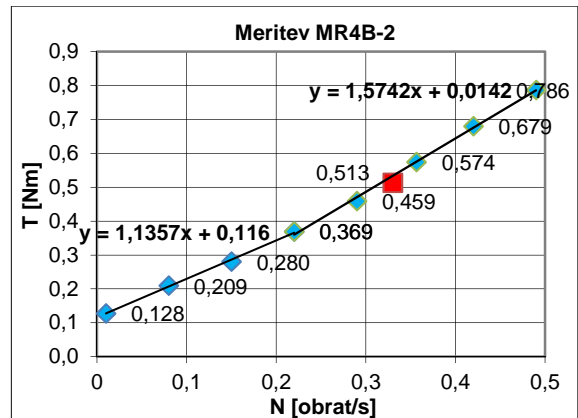
H₂= 1,640 N·m·s

τ₀= 27,015 Pa

μ₁= 7,260 Pa·s

μ₂= 10,063 Pa·s

mini SF= 300 mm; SF= 390 mm



Grafikon 62: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4B-2, čas 20 minut

vzorec SCCMR4B-3

G= 0,142 N·m

H₁= 1,282 N·m·s

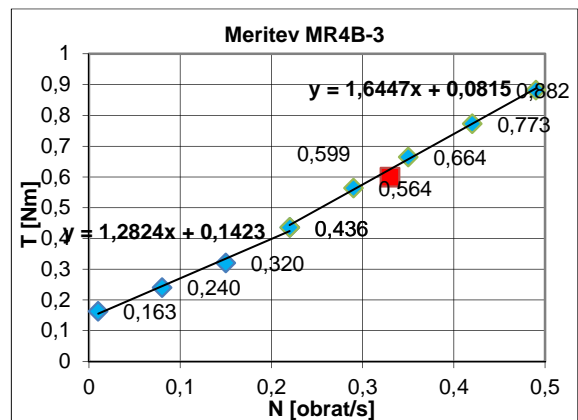
H₂= 1,645 N·m·s

τ₀= 33,139 Pa

μ₁= 8,198 Pa·s

μ₂= 10,514 Pa·s

mini SF= 290 mm; SF= 375 mm

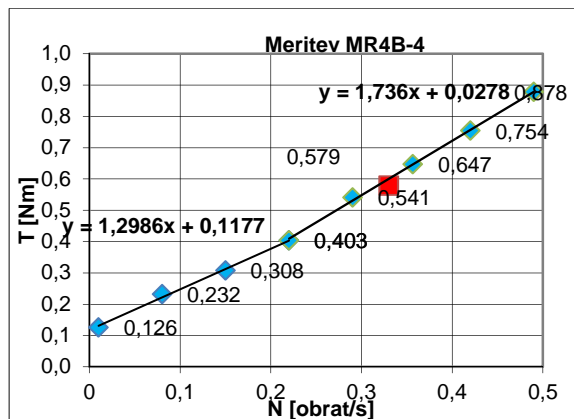


Grafikon 63: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4B-3, čas 40 minut

vzorec SCCMR4B-4

G= 0,118 N·m
 $H_1= 1,299 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 1,736 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 27,411 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 8,301 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 11,097 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= 280 mm; SF= 370 mm

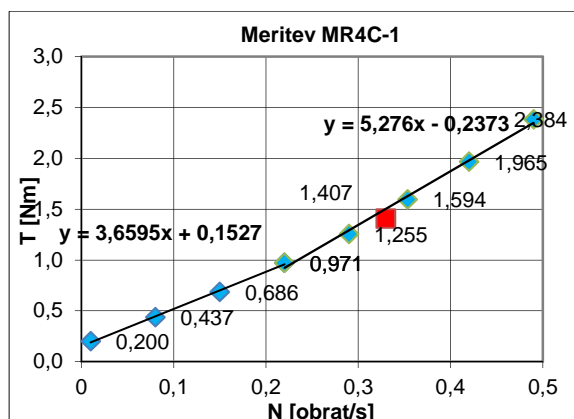


Grafikon 64: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4B-4, čas 60 minut

vzorec SCCMR4C-1

G= 0,153 N·m
 $H_1= 3,660 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 5,276 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 35,561 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 23,393 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 33,727 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= 260 mm; SF= 330 mm

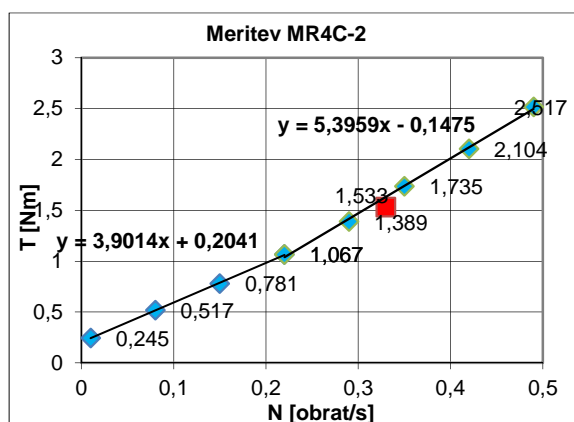


Grafikon 65: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4C-1, čas 0 minut

vzorec SCCMR4C-2

G= 0,204 N·m
 $H_1= 3,901 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 5,396 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 47,532 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 24,940 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 34,493 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= 230 mm; SF= 290 mm



Grafikon 66: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4C-2, čas 20 minut

vzorec SCCMR4C-3

G= 0,205 N·m

H₁= 3,536 N·m·s

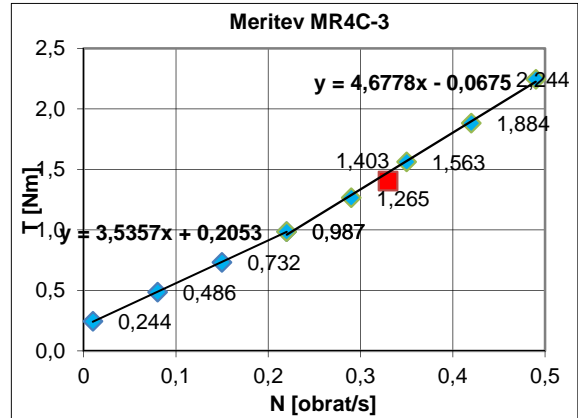
H₂= 4,678 N·m·s

τ₀= 47,811 Pa

μ₁= 22,602 Pa·s

μ₂= 29,903 Pa·s

mini SF= 230 mm; SF= 290 mm



Grafikon 67: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4C-3, čas 40 minut

vzorec SCCMR4C-4

G= 0,214 N·m

H₁= 3,405 N·m·s

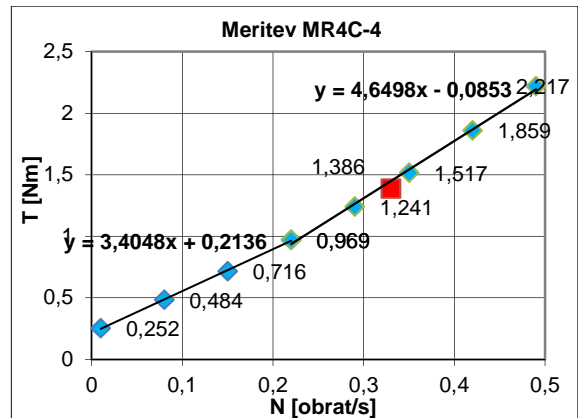
H₂= 4,650 N·m·s

τ₀= 49,744 Pa

μ₁= 21,765 Pa·s

μ₂= 29,724 Pa·s

mini SF= 240 mm; SF= 300 mm



Grafikon 68: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4C-4, čas 60 minut

vzorec SCCMR4D-1

G= 0,121 N·m

H₁= 1,714 N·m·s

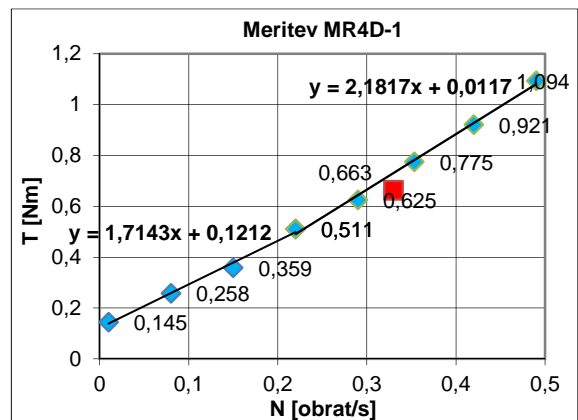
H₂= 2,182 N·m·s

τ₀= 28,226 Pa

μ₁= 10,959 Pa·s

μ₂= 13,947 Pa·s

mini SF= 270 mm; SF= 370 mm

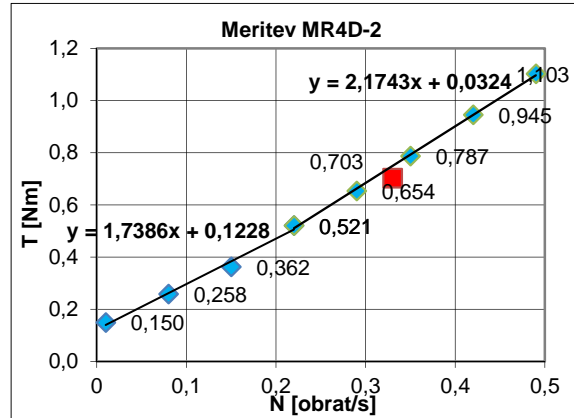


Grafikon 69: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4D-1, čas 0 minut

vzorec SCCMR4D-2

G= 0,123 N·m
 $H_1= 1,739 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 2,174 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 28,598 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 11,114 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 13,899 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= 270 mm; SF= 350 mm

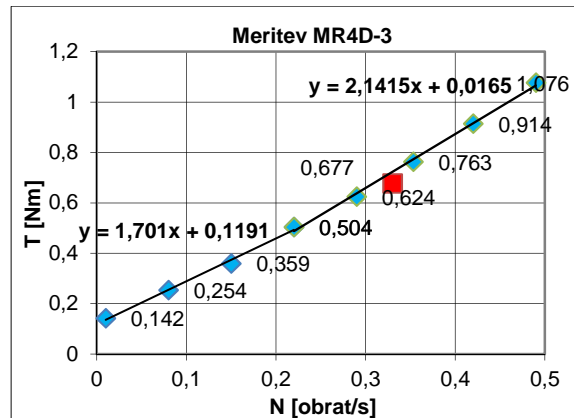


Grafikon 70: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4D-2, čas 20 minut

vzorec SCCMR4D-3

G= 0,119 N·m
 $H_1= 1,701 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 2,142 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 27,737 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 10,874 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 13,690 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= 270 mm; SF= 360 mm

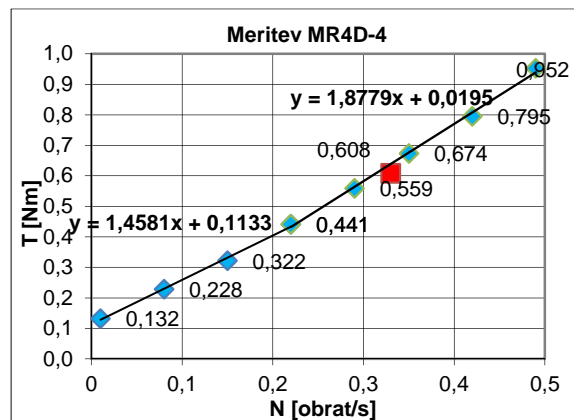


Grafikon 71: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4D-3, čas 40 minut

vzorec SCCMR4D-4

G= 0,113 N·m
 $H_1= 1,458 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $H_2= 1,878 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
 $\tau_0= 26,386 \text{ Pa}$
 $\mu_1= 9,321 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $\mu_2= 12,005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

mini SF= 270 mm; SF= 360 mm



Grafikon 72: Tokovna krivulja mešanice SCCMR4D-4, čas 60 minut

4. 4 Analiza rezultatov

4.4.1 Analiza rezultatov za SCC beton

Najprej smo opravili raziskave na betonskih mešanicah SCCR1-3 z dodatkom superplastifikatorja na osnovi polikarboksilatov, potem pa še na ostalih mešanicah. V nadaljnjih serijah mešanic SCCR4 z dodatkom superplastifikatorja na osnovi polifosfonatov smo postopoma zmanjševali in povečevali vodocementno razmerje in ugotavljali spremembe na obdelavnost in reološke lastnosti sveže mešanice.

Podatki so zaradi lažje preglednosti in analize podani v preglednicah in nato še v obliki grafikonov.

Preglednica 11: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za SCC betone v času 0 minut

	mešanice SCC betona 0 minut							
	R1	R2	R3	R4	R4A	R4B	R4C	R4D
v/c razmerje	0,44	0,5	0,56	0,51	0,52	0,49	0,48	0,53
Razlez s posedom [mm]	370	690	790	670	710	630	600	670
Povprečni τ_0 [Pa]	223,858	29,435	20,664	48,089	47,674	61,858	46,427	47,887
Povprečni μ_1 [Pa·s]	148,134	27,409	20,860	26,183	19,902	30,182	36,752	21,113
Povprečni μ_2 [Pa·s]	143,777	36,366	27,909	30,908	23,958	37,096	47,774	24,628

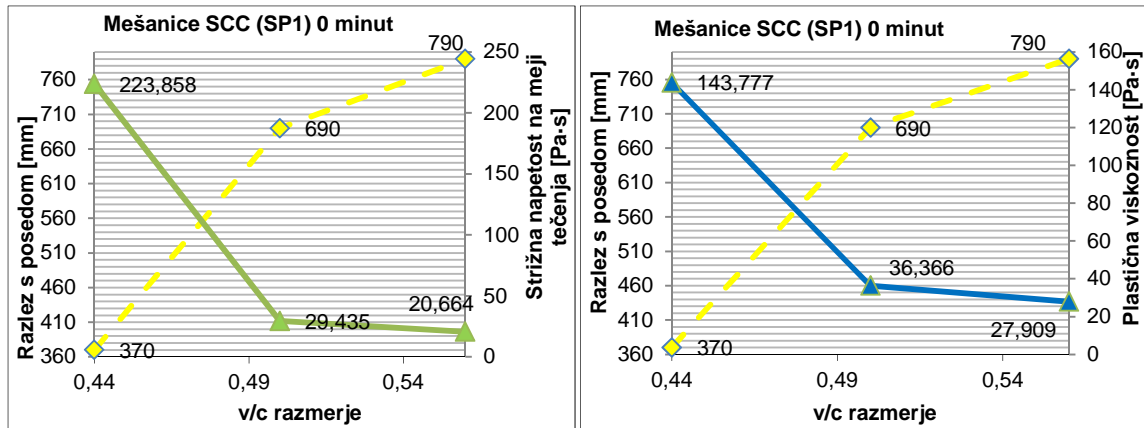
V analizi podatkov smo opazili, da je mešanica SCCR1 dosegla razlez s posedom 370 mm. Ker ima mešanica nižji razlez s posedom, kot je določen z najnižjo mejo 550 mm po standardu SIST EN 206-9:2010, jo izločimo, saj ne spada v skupino SCC betonov.

Preglednica 12: Konsistenčni razredi glede na razlez s posedom za samozgoščevalne betone (SIST EN 206-9:2010)

Class	Slump-flow in mm ^{a, b} (Limit values for individual batches)
SF1	550 to 650
SF2	680 to 760
SF3	760 to 850

^a The specification of a slump-flow class may be replaced by a target value.
^b The classification is not applicable to concrete with a maximum aggregate size exceeding 40 mm.

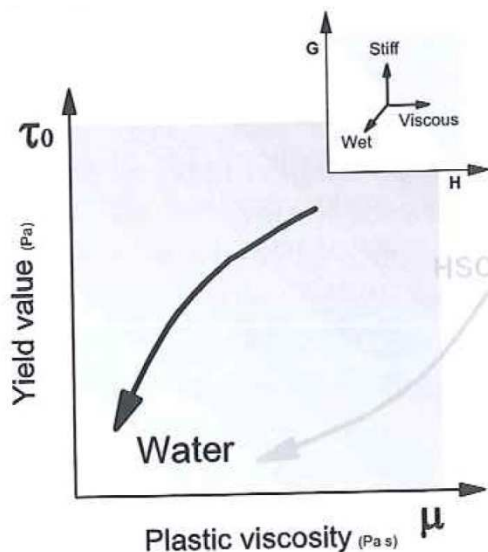
Mešanico SCCR3 smo vizualno ocenili kot zelo tekočo mešanico, ki bi lahko segregirala. Razlez s posedom je takrat meril 860 mm, zato smo mešanici dodali 8 g gostila v prahu. Po novem poskusu meritve razleza s posedom je bila nova vrednost 830 mm. Čeprav je bil beton vidno bolj stabilen, smo dodali dodatnih 8 g gostila v prahu (skupaj 16 g, kar je 0,1 % na količino cementa) in izmerili novo vrednost razleza s posedom, ki je bila 790 mm.



Grafikon 73: Levi grafikon kaže razlez s posedom in strižne napetosti na meji tečenja betonov SCC z dodatkom SP1 v času 0 minut, desni pa razlez s posedom in plastične viskoznosti betonov SCC z dodatkom SP1 v času 0 minut

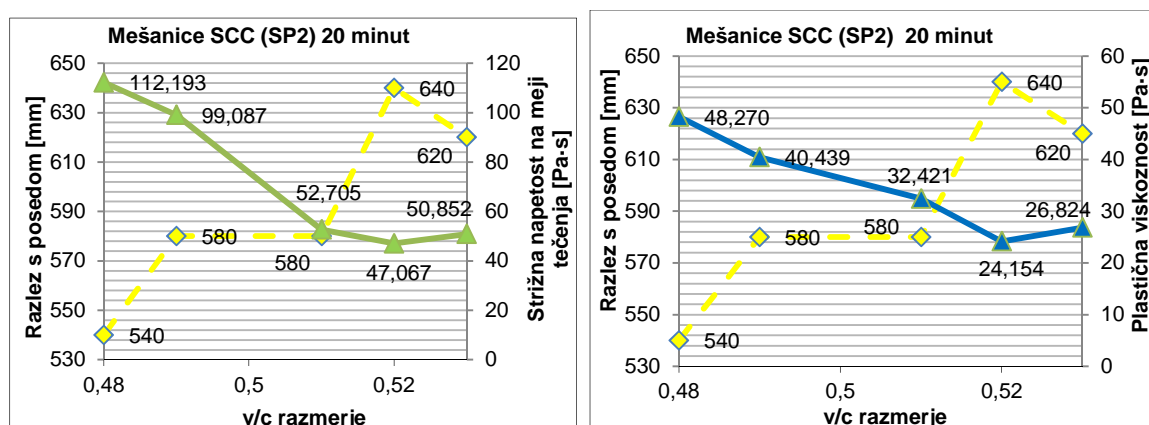
Čeprav je bil razlez s posedom pri mešanici SCCR1 pod mejo standarda za SCC betone, se opazi trend, da se z večanjem v/c razmerja povečuje razlez s posedom, medtem ko vrednost strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti pada. O tem sta v zaključkih svoje diplomske naloge pisala tudi Nejc Gašperič in Jožef Klepec, ki sta dokazovala in potrdila trditve iz tuje literature.

Grafikona 73 prikazujeta strižne napetosti na meji tečenja, plastične viskoznosti in razleze s posedom glede na spreminjanje vodocementnega razmerja. Za lažjo predstavo smo pri mešanicah preuredili podatke glede na vodoravno os, od najmanjšega do največjega vodocementnega razmerja. Vsaka točka na grafikonu pripada eni mešanici betona. Opazimo, da se razlez s posedom z večanjem vodocementnega razmerja povečuje. Strižna napetost na meji tečenja pada oz. je enaka, le pri mešanici SCCR3 na koncu opazimo izrazit skok. Plastična viskoznost se z večanjem v/c razmerja manjša, tako kot smo zasledili v tuji literaturi. Ko se vsebovanost vode v suspenziji poveča, se delci lažje premikajo med seboj. Ko dodamo vodo za mešanje, bo plastična viskoznost znatno manjša, Z dodajanjem vode v beton se parametra $\tau_0 - \mu$ približujeta izhodišču, kot je razvidno iz grafikonu 74 (Wallevik,2009).



Grafikon 74: Učinek vode na τ_0 - μ parametra (Wallevik, 2009)

V seriji mešanic SCCR4 smo, za razliko od mešanic SCCR1 do SCCR3, uporabili superplastifikator na polifosfonatni osnovi (SP2). Opazili smo, da je ta dodatek manj močen, kar je vidno med prvim in drugim merjenjem razleza s posedom. Mešanica pri razlezu s posedom odteče zelo hitro in široko, čeprav ima enako količino moke, kot mešanice SCCR1 do SCCR3 in podobno količino vode kot SCCR2. Količina moke vpliva na viskoznost. Ker je moke enako, ima tako velik vpliv vrsta superplastifikatorja. Referenčni mešanici SCCR4 smo simulirali netočno dodajanje vode. V mešanici SCCR4C z v/c razmerjem 0,48 smo glede na referenčno mešanico odvzeli 10 l vode, mešanici SCCR4B z v/c razmerjem 0,49 smo odvzeli 5 l vode, mešanici SCCR4A z v/c razmerjem 0,52 smo dodali 5 l vode in mešanici SCCR4D z v/c razmerjem 0,53 smo dodali 10 l vode glede na referenčno mešanico.



Grafikon 75: Levi grafikon kaže razlez s posedom in strižne napetosti na meji tečenja betonov SCC z dodatkom SP2 v času 0 minut, desni pa razlez s posedom in plastične viskoznosti betonov SCC z dodatkom SP2 v času 0 minut

Na grafikonu 75 pri seriji mešanic SCCR4 opazimo enak trend rasti razleza glede na reološke lastnosti betona kot pri mešanicah SCCR1 do SCCR3. Z nadaljnjo analizo

rezultatov v drugih časovnih intervalih vidimo in ugotovimo enako kot pri analizi pri času 20 minut. Čeprav se zaradi hidratacije cementa vrednosti razleza s posedom manjšajo in vrednosti plastične viskoznosti povečujejo, so grafikoni za analizo podatkov med seboj podobni. Opazimo le, da se s časom bolj izrazito kaže padanje strižne napetosti na meji tečenja. Pri mešanici SCCR4D z vodocementnim razmerjem 0,53 je očitno zaradi zmanjšane vrednosti razleza in povečane strižne napetosti prišlo do večje količine zajema finih delcev. Na grafikonu je v času 0 odstopala le meritev strižne napetosti mešanice SCCR4C, v naslednjih časovnih intervalih pa je imela pričakovano vrednost.

Poleg merjenja obdelavnosti in reoloških lastnosti mešanic smo zraven zgolj informativno izvedli tudi preiskavo strjenega betona in malt. Vsak vzorec smo pred preizkusom tlačne trdnosti stehali s tehtnico z natančnostjo ± 2 g in glede na dimenzije posameznega vzorca določili prostorninsko maso.



Slika 16: Vzorci SCC betona v kalupu

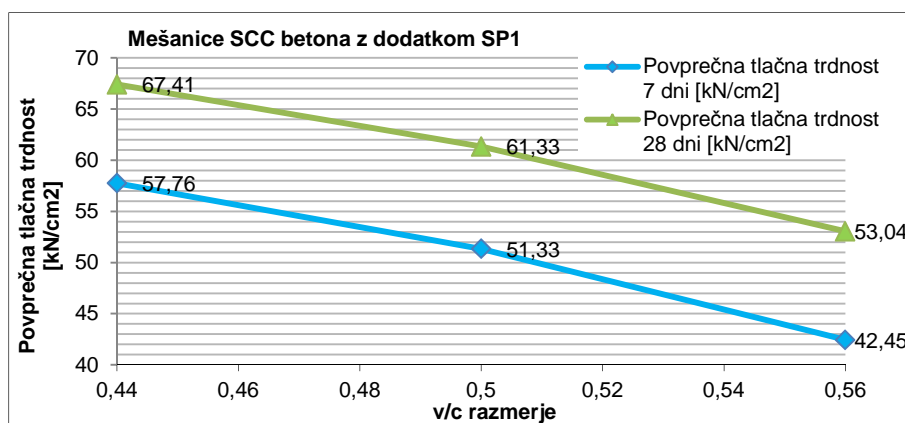
S tlačnim preizkusom v hidravlični stiskalnici smo vzorcem strjenega betona določili porušno silo. Glede na prečni preizkušanca smo s pomočjo porušne sile določili povprečno tlačno trdnost treh vzorcev. V preglednici so podane izračunane povprečne vrednosti tlačnih trdnosti.



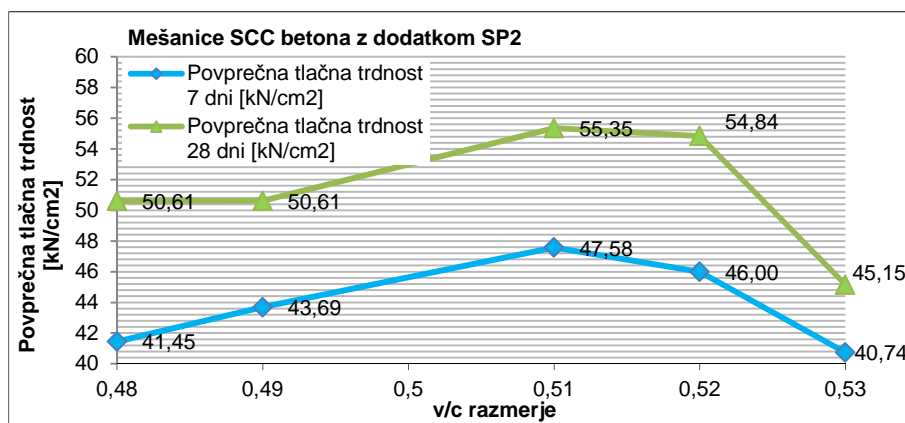
Slika 17: Preizkušanci SCC betonov

Preglednica 13: Povprečne tlačne trdnosti vzorcev posameznih mešanic

	mešanice SCC betona							
	R1	R2	R3	R4C	R4B	R4	R4A	R4D
v/c razmerje	0,44	0,5	0,56	0,48	0,49	0,51	0,52	0,53
Povprečna tlačna trdnost 7 dni [kN/cm ²]	57,76	51,33	42,45	41,45	43,69	47,58	46,00	40,74
Povprečna tlačna trdnost 28 dni [kN/cm ²]	67,41	61,33	53,04	50,61	50,61	55,35	54,84	45,15



Grafikon 76: Povprečne tlačne trdnosti SCC betona z dodatkom SP1 glede na v/c razmerje



Grafikon 77: Povprečne tlačne trdnosti SCC betona z dodatkom SP2 glede na v/c razmerje

Pričakovali smo, da se bo tlačna trdnost z večanjem v/c razmerja zmanjševala. Če ločimo rezultate po dodatku superplastifikatorja že v preglednici 13 opazimo, da se pri vzorcih z dodatkom SP1 tlačne vrednosti z večanjem v/c razmerja manjšajo, pri vzorcih z dodatkom SP2 pa do vrednosti 0,51 v/c razmerja tlačna trdnost narašča, potem pa tlačna trdnost pada. To je lahko posledica naše netočnosti preiskave ali pa posledica vpliva polifosfonatnega superplastifikatorja. Pri mešanici SCCR4D smo vzorce zaradi premehke konsistence razkalupili šele 2. dan po vlivanju v kalupe. Vzorcev nismo vibrirali v kalupih, ampak smo jih

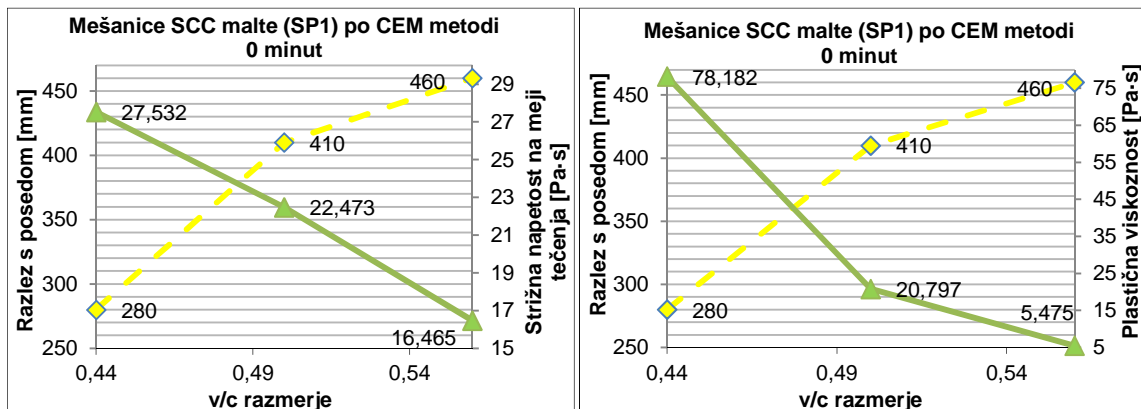
le vlili, tako kot predvideva standard. Pri mešanicah SCCR4B in C so tlačne trdnosti zelo nizke, čeprav so bile mešanice najgostejše. Torej bi lahko obstajala verjetnost, da nista bili mešanici dovolj dobro vgrajeni v kalup.

4.4.2 Analiza rezultatov za SCC malte po CEM metodi

Na isti način, kot SCC betone smo obdelali tudi rezultate za SCC malte, ki so glede na sestavo mešanice ekvivalentne SCC betonom po CEM metodi. Poleg mini razleza s posedom smo vzporedno naredili razlez s posedom. Testa sta si povsem enaka, razlikujeta se le v velikosti opreme. Za razlez s posedom smo uporabili opremo za razlez malte. Stožec ima premer baze 100 mm, premer na vrhu 70 mm in je visok 60 mm. Oprema za mini razlez s posedom je opisana v poglavju 3.6.

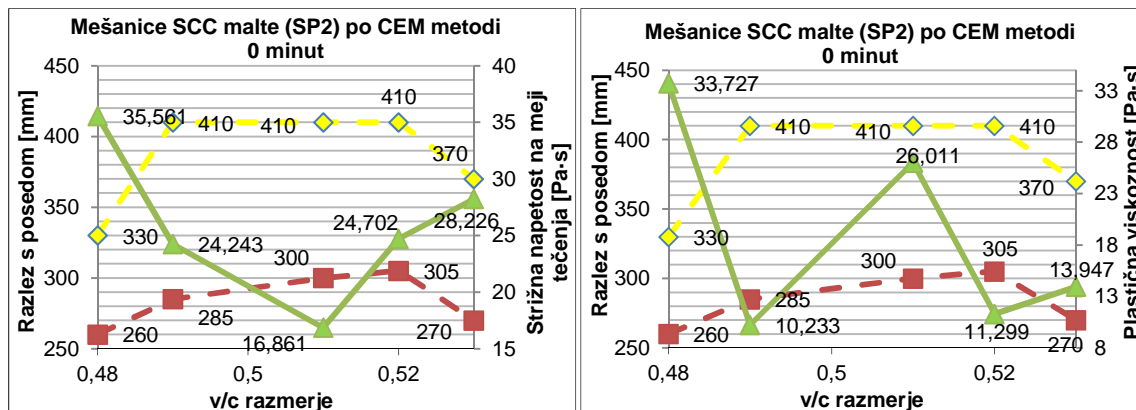
Preglednica 14: Rezultati obdelavnosti in reoloških meritev za SCC malte po CEM metodi v času 0 minut

	mešanice SCC malte po CEM metodi 0 minut							
	MR1	MR2	MR3	MR4C	MR4B	MR4	MR4A	MR4D
v/c razmerje	0,44	0,5	0,56	0,48	0,49	0,51	0,52	0,53
Razlez s posedom [mm]	280	410	460	330	410	410	410	370
mini Razlez s posedom [mm]				260	285	300	305	270
Povprečni τ_0 [Pa]	27,532	22,473	16,465	35,561	24,243	16,861	24,702	28,226
Povprečni μ_1 [Pa·s]	49,676	10,633	2,737	23,393	6,745	13,342	6,873	10,959
Povprečni μ_2 [Pa·s]	78,182	20,797	5,475	33,727	10,233	26,011	11,299	13,947



Grafikon 78: : Levi grafikon kaže razlez s posedom in strižne napetosti na meji tečenja SCC malt z dodatkom SP1 v času 0 minut, desni pa razlez s posedom in plastične viskoznosti SCC malt z dodatkom SP1 v času 0 minut

Na grafikonu 78 opazimo, da je pri SCC betonih z dodatkom SP1 in njim ekvivalentnih maltah po metodi CEM potek razleza s posedom in reoloških lastnosti glede na v/c razmerje enak.



Grafikon 79: Levi grafikon kaže razlez s posedom in strižne napetosti na meji tečenja SCC malt z dodatkom SP1 v času 0 minut, desni pa razlez s posedom in plastične viskoznosti SCC malt z dodatkom SP1 v času 0 minut

Na grafikonu 79 opazimo, da sta obe krivulji testa razleza s posedom pri SCC maltah skoraj vzporedni, torej lahko trdimo, da kljub različni velikosti opreme opisujeta enako obdelavnost malt. Tako kot pri SCC betonu, smo tudi pri SCC malti pričakovali podoben pojav pri strižni napetosti na meji tečenja in plastični viskoznosti glede na povečevanje v/c razmerja. Pri plastični viskoznosti je opazen izrazit skok pri mešanici SCCMR4. Skozi časovne intervale meritev se skok vrednosti podatkov o plastični viskoznosti manjša. Grafikon plastične viskoznosti s časom prehaja v obliko črke »U« in dobiva podobo grafikona strižne napetosti na meji tečenja. V primeru, da zanemarimo tiste rezultate meritev z reometrom, ki glede na en časovni interval odstopajo, dobimo pri analizi enake krivulje, a bolj umirjene skoke posameznega grafikona. Ker so bile vse mešanice SCC malt tekoče, je lahko težava tudi v natančnosti meritev, saj vsebujejo več finih delcev, ki imajo pri maltah še večji vpliv.

Tako kot pri SCC betonu, smo tudi pri SCC maltah po končanih meritvah z reometrom vlili svežo mešanico v 2 kalupa za malto. Po 24 h smo kalup razstavili in na zraku sušili vzorce pri sobni temperaturi. Po 7. dneh smo na prvih treh vzorcih preverili upogibno trdnost in tlačno trdnost, na ostalih treh pa po 28. dneh. Vseh 6 vzorcev za posamezno mešanico smo predhodno stehali na tehtnici z natančnostjo ± 2 g in glede na dimenzije posameznega vzorca določili prostorninsko maso.

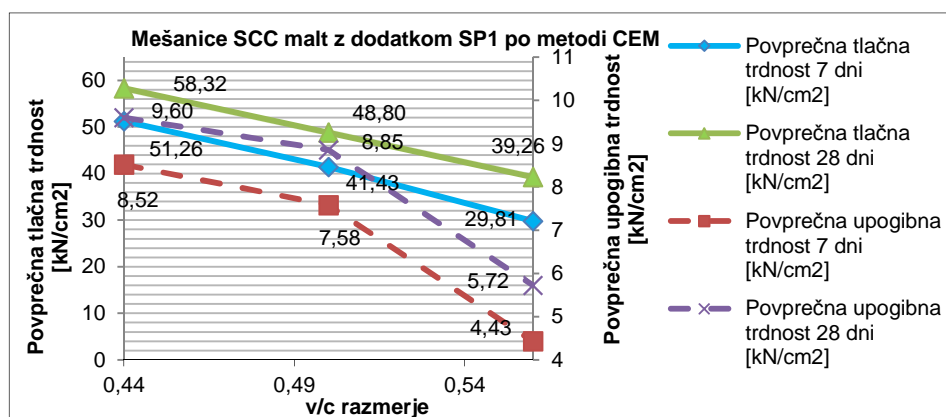
Vsakemu od treh vzorcev preizkušanca smo najprej z upogibnim obremenjevanjem določili upogibno silo in tako razcepili vzorec. Nato smo s hidravlično stiskalnico preizkusili še tlačno trdnost šestih polovic vzorca. V preglednici so podane izračunane povprečne vrednosti tlačnih in upogibnih trdnosti.



Slika 18: Upogibni in tlačni preizkus SCC malt

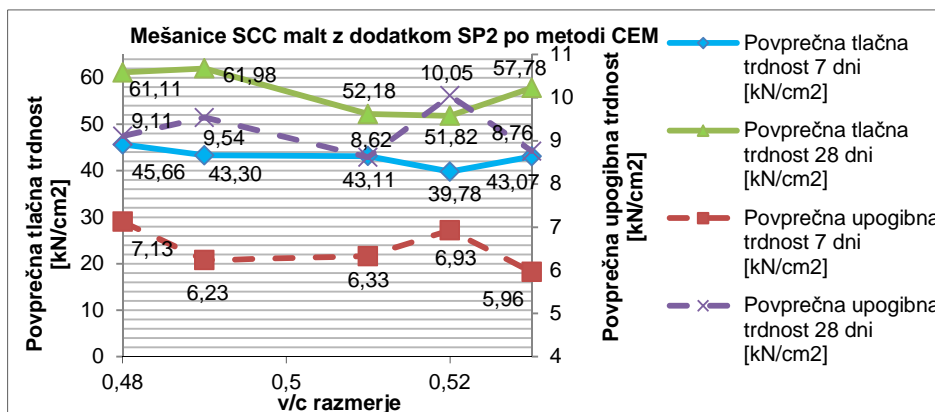
Preglednica 15: Povprečne tlačne in upogibne trdnosti za posamezno mešanico SCC malt po metodi CEM

	mešanice SCC malt							
	MR1	MR2	MR3	MR4C	MR4B	MR4	MR4A	MR4D
v/c razmerje	0,44	0,5	0,56	0,48	0,49	0,51	0,52	0,53
Povprečna tlačna trdnost 7 dni [kN/cm ²]	51,26	41,43	29,81	45,66	43,30	43,11	39,78	43,07
Povprečna tlačna trdnost 28 dni [kN/cm ²]	58,32	48,80	39,26	61,11	61,98	52,18	51,82	57,78
Povprečna upogibna trdnost 7 dni [kN/cm ²]	8,52	7,58	4,43	7,13	6,23	6,33	6,93	5,96
Povprečna upogibna trdnost 28 dni [kN/cm ²]	9,60	8,85	5,72	9,11	9,54	8,62	10,05	8,76



Grafikon 80: Povprečne tlačne in upogibne trdnosti za posamezno mešanico SCC malt z dodatkom SP1 po metodi CEM

Na grafikonu 80 se opazi, da z naraščanjem vodocementnega razmerja v mešanici padajo vrednosti tlačne trdnosti. Pojav je pričakovan in je enak kot v tuji literaturi, kot tudi v ostalih diplomskih nalogah.

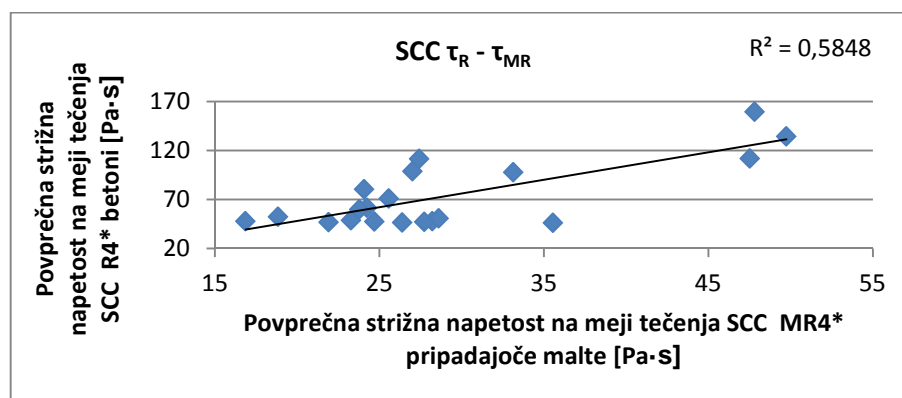


Grafikon 81: Povprečne tlačne in upogibne trdnosti za posamezno mešanico SCC malt z dodatkom SP2 po metodi CEM

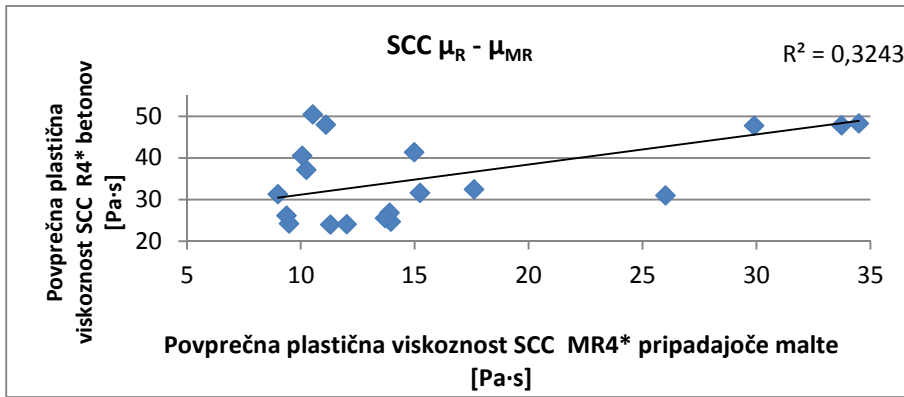
Iz grafikona 81 je opaziti, da se povprečne tlačne vrednosti po 7. dneh z večanjem v/c razmerja znižujejo. Pri SCC betonih z dodatkom SP2 se z večanjem v/c razmerja manjša razmerje vrednosti med tlačnimi trdnosti po 7. in 28. dneh oz. se prirastek trdnosti pri vzorcih po 28. dneh z večanjem v/c razmerja zmanjšuje, glede na vrednost tlačne trdnosti po 7. dneh. To razmerje se pri maltah do referenčne mešanice povečuje in nato spet pada. Vpliv na vrednosti je lahko naša napaka, vpliv superplastifikatorja ali pa nehomogenost finih frakcij, ki so skladiščene v posodah. Upogibna tlačna trdnost po 7. in 28. dneh pada z večanjem v/c razmerja, malenkostno izstopajo le vrednosti mešanice SCCMR4A.

4.5 Primerjava rezultatov meritve SCC betona in njemu ekvivalentne SCC malte

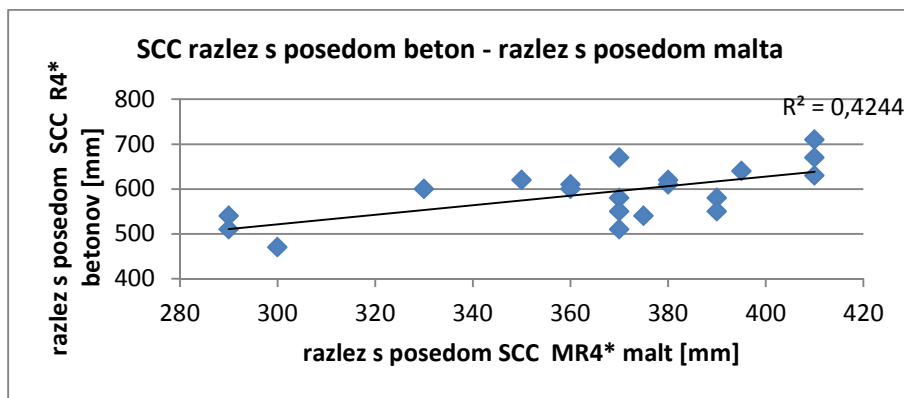
V grafikonih 82 do 87 so zajete vse vrednosti meritev v vseh časovnih intervalih, ki so opisane s korelacijsko vrednostjo. Ena točka pripada analizirani meritvi SCC betona in njemu pripadajoči ekvivalentni SCC malti.



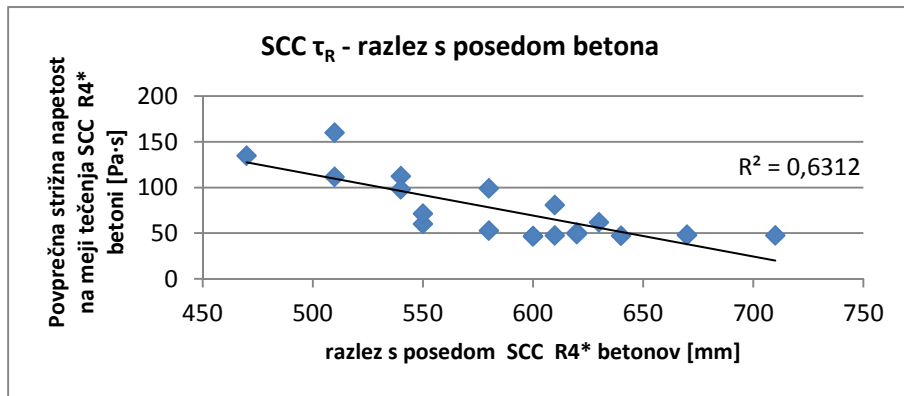
Grafikon 82: Korelacija strižnih napetosti na meji tečenja med SCC betoni in njim ekvivalentnimi SCC maltami



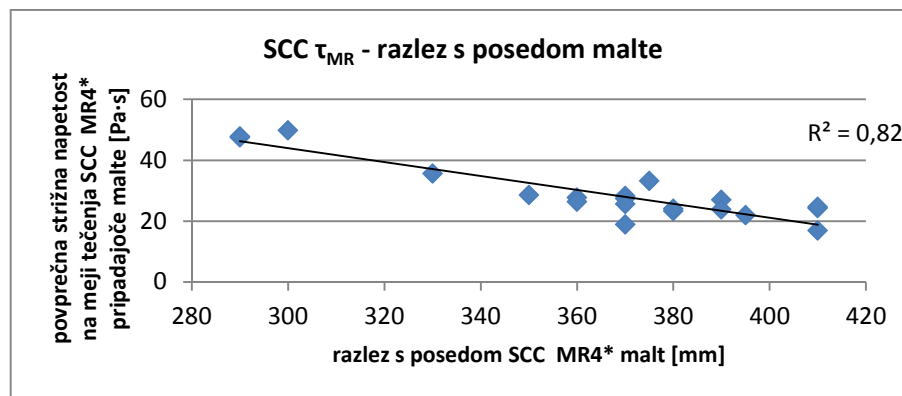
Grafikon 83: Korelacija plastične viskoznosti med SCC betoni in njim ekvivalentnimi SCC maltami



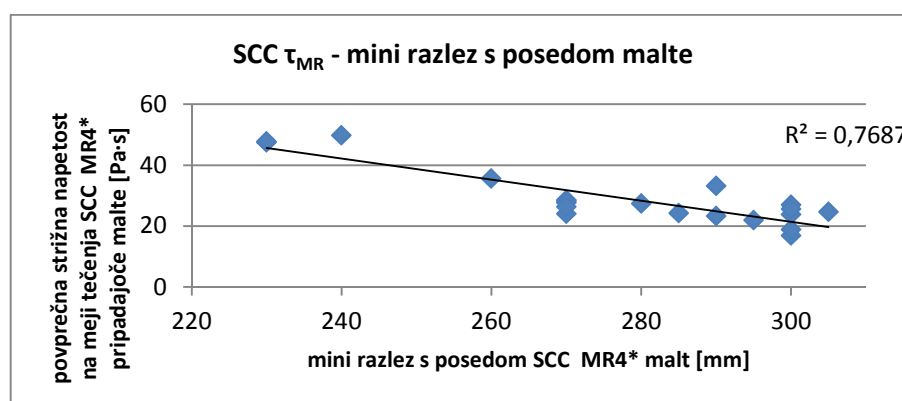
Grafikon 84: Korelacija razleza s posedom med SCC betoni in njim ekvivalentnimi SCC maltami



Grafikon 85: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in razlezom s posedom SCC betonov



Grafikon 86: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in razlezom s posedom SCC malt



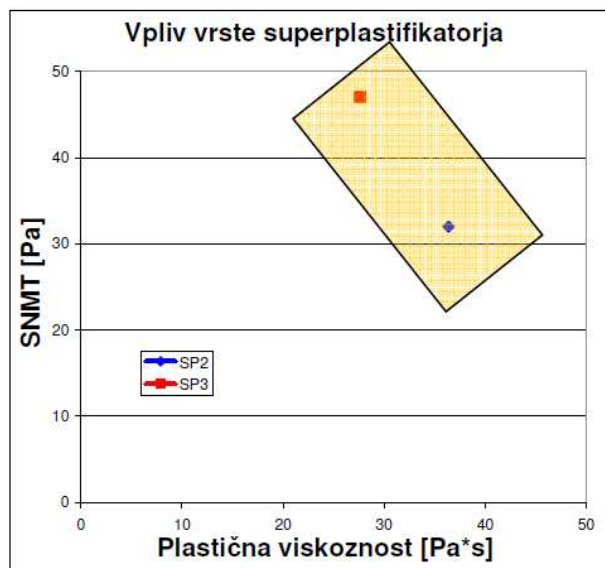
Grafikon 87: Korelacija med strižno napetostjo na meji tečenja in mini razlezom s posedom SCC malt

Korelacijski koeficient strižnih napetosti na meji tečenja znaša 0,585, kar pomeni, da obstaja povezava med strižno napetostjo na meji tečenja SCC betonov in njim ekvivalentnih malt. Opazimo, da je korelacijski koeficient pri plastični viskoznosti precej nizek, saj znaša samo 0,324. Od tod sklepamo, da s takim koeficientom viskoznosti težko opišemo povezavo med SCC betoni in njim ekvivalentnimi maltami. Korelacijski koeficient razleza s posedom je proti korelaciji mini razleza s posedom večji in znaša 0,424 (0,227). V kolikor izločimo referenčno mešanico betona SCCR4 in njej ekvivalentno malto, dobimo večje vrednosti korelacijskih koeficientov. Korelacijski koeficient pri plastični viskoznosti se poveča na 0,4016, korelacijski koeficient razlez s posedom je 0,473, korelacijski koeficient strižne napetosti na meji tečenja pa ostane skoraj nespremenjen in znaša 0,569. Povezava SCC betonov in njim ekvivalente SCC malte je s primerjanjem parametrov reoloških lastnosti in obdelavnostjo svežih mešanic zadovoljivo dobra. Pri SCC betonih je povezava med reološkimi lastnosti in obdelavnostjo zadovoljivo dobra, korelacijski faktor znaša 0,631. Pri SCC maltah je ta povezava precej boljša in znaša 0,82. To pomeni, da bi lahko samo z uporabo reometra poleg reoliških lastnosti dobro opisali tudi obdelavnost.

Lastnosti svežega SCC betona so zelo odvisne od količine finih delcev v mešanici. Ti fini delci so mišljeni prah v frakciji 0/2 in 0/4, ki smo jih uporabljali. Frakcije agregata so shranjene v velikih posodah, v katerih je zaradi dodajanja in odvzemanja materiala sestava zelo neenakomerna. Seveda pa kljub pazljivosti pri zajemanju in dodajanju vhodnega materiala agregata, tega problema nikoli ne moremo povsem izločiti. Omilili bi ga lahko z laboratorijskim pakiranjem agregata, kjer so vse količine frakcije točne in se ne razlikujejo na posamezno serijo vrečke. Pojav dodajanja neenakomerne sestave agregata mešanicam je bil z uporabo dodatka SP2 precej manj izrazit, kot z uporabo katerega drugega superplastifikatorja. Načeloma bi zaradi tega pojava lahko imeli precej večje težave pri meritvah malt, saj so bile vse zelo tekoče in je zato vprašljiva natančnost meritev z reometrom. Malte poleg tega sestavlja praktično le frakcija 0/2, kar pomeni polno prahu, ki lahko vpliva na naš rezultat. Zaradi velike specifične površine praškastih delcev oz. kamene moke, lahko z zadostno količino v mešanici povečamo viskoznost paste.

4.6 Ocena obdelavnosti in robustnosti mešanic

Ker sta uporabljena kemijska dodatka izdelana na različni osnovi, se že v sami mešanici izvajajo različni kemijski procesi. Ti procesi vsekakor različno vplivajo na obdelavnost in reološke lastnosti. Pri mešanici SCCR2 in SCCR4 smo za primerjavo vpliva različne vrste superplastifikatorja načrtovali mešanico z enako obdelavnostjo. Da smo to dosegli, je bilo potrebno mešanici SCCR4 dodati precej večjo količino SP2 (1,15 %) glede na mešanico SCCR2 z dodatkom SP1 (0,7 %). Uporaba izbranih superplastifikatorjev, ki omogočata doseganje ustrezne obdelavnosti in stabilnosti pri različnih reoloških lastnosti, je lep primer uporabe želenega območja obdelavnosti. 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 grafikonu 84, 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 (Hočevar, 2013). V območju zelene obdelavnosti se nahajajo betonske mešanice z ustrezno sposobnostjo tečenja in stabilnostjo za določen namen uporabe (Wallevik, 2009).



Grafikon 88: Območje željene obdelovalnosti in vpliv dveh različnih superplastifikatorjev v mešanici z enakim vodocementnim razmerjem na reološke lastnosti mešanice (Hočevar, 2013)

Robustnost betona se oceni z metodo, ki temelji na dogovoru. S spreminjanjem vodocementnega razmerja pri mešanicah je za robustne mešanice pogojeno, da mora biti razlez s posedom v mejah ± 50 mm glede na referenčno mešanico. Na našo referenčno mešanico SCCR4 z vrednostjo razleza s posedom 670 mm je meja razleza za robustnost med 620 – 720 mm. V to območje padeta razleza s posedom mešanic SCCR4A (710 mm) in SCCR4B (630 mm). V teh dveh mešanicah smo, glede na referenčno mešanico, simulirali netočno dodajanje vode v količini ± 5 l. V primeru, da si izberemo merodajno mešanico SCCR4A ali SCCR4B za oceno robustnosti, so tudi tu znotraj območja ± 50 mm glede na razlez s posedom teh dveh mešanic mešanice, ki se razlikujejo v netočnem dodajanju v količini ± 5 l vode glede na merodajno mešanico. V tem primeru se pojavi, da zajamemo mešanice, ki pripadajo različnim konsistenčnim razredom glede na razlez s posedom za samozgoščevalne betone (SIST EN 206-9:2010), kar pri oceni robustnosti niti ni pomembno. Od tod lahko sklepamo, da je mešanica robustna v razmerju netočnega dodajanja ± 5 l vode.

5 Zaključek

V sklopu te diplomske naloge smo spoznali, da so sveži cementni kompoziti zelo zapleteni materiali. Z razvojem dodatkov k betonu bo potrebno za razlago obnašanja svežih betonskih kompozitov dopolnjevati znanje različnih strok.

V diplomski nalogi smo preučevali kako netočno doziranje vode vpliva na reološke lastnosti in obdelavnost svežih mešanic SCC betonov ter njim ekvivalentne SCC malte. Z ugodno povezavo med SCC betoni in njim ekvivalentnimi SCC maltami, bi lahko s SCC maltami hitreje, lažje in ceneje analizirali parametre reoloških lastnosti in obdelavnosti SCC betonov. S pomočjo analize obdelavnosti in reoloških lastnosti mešanic smo dokazali dokaj dobro povezavo med SCC betoni in njim ekvivalentnimi maltami. Za bolj verjetno napoved vrednosti bi bilo potrebno to raziskavo opraviti na več vzorcih. Preveriti bi bilo smiselno tudi, če so rezultati preiskave pri več enakih mešanicah s polifosfonatnim dodatkom z enakim vodocementnim razmerjem enaki. Tako bi lahko z boljšo natančnostjo in z večjo gotovostjo potrdili predpostavke iz literature. Boljšo povezavo smo dokazali med rezultati analize odelavnosti in reološkimi lastnosti. Od tod lahko sklepamo, da lahko z reometrom ConTEC Viscometer 5 dobro opišemo tudi obdelavnost pri mešanicah malt. Posledica razlike korelacije razleza s posedom in strižne napetosti na meji tečenja med SCC betonom in SCC maltami, bi lahko bila v različni granulaciji agragata.

Med samo preiskavo smo enako kot v diplomskem delu Nejca Gašperiča pri mešanicah z dodatkom polifosfonatnih polimerov opazili, da je potrebno »za enako stopnjo obdelovalnosti v primerjavi s polikarboksilatnim superplastifikatorjem dodati 50 % večjo količino poslifosfatnega superplastifikatorja«. Ta ugotovitev se sklada s priporočilom proizvajalca. Polifosfonatni superplastifikator ima izjemen zavlačevalni vpliv na vezanje in strjevanje sveže cementne suspezije. Približna ocena je, da bi bilo mogoče vgrajevanje take mešanice tudi do 8 ur po mešanju. V 24 urah po zamešanju beton sicer obdrži obliko (je v trdnem agregatnem stanju), vendar je trdnost še zelo nizka oz. praktično nična. Vzorci mešanic izdelanih z dodatkom polifosfonatnega dodatka dosegajo nižjo tlačno trdnost betona v primerjavi s primerjalnim betonom izdelanim z dodatkom polikarboksilatnega superplastifikatorja (Gašperič, 2013).« V našem primeru smo opazili, da smo morali mešanico SCCR4D razkalupiti šele 2. dan po vlišanju, saj je bila mešanica na otip po 1. dnevu še vedno mehka.

Kljub velikemu številu že opravljenih raziskav bodo na tem področju še vedno potekale nove raziskave, saj je še veliko neznanega in nejasnega.

VIRI

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

Bokan Bosiljkov, V. 2007. Samozgoščevalni beton. V: Zajc, A. (redakcija). 14. Slovenski kolokvij o betonih. Posebne lastnosti betonov z dodatki. Zbornik gradiv in referatov, Ljubljana, 29. maj 2007. Ljubljana: IRMA, inštitut za raziskavo materialov in aplikacije. str. 47-59.

Collepari, M. 2010. The new concrete. Cascerete di Villorba, Tintoretto: 436.

Gašperič, N. 2013. Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona. Diplomski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba N. Gašperič): 74 str.

Hočevar, A. 2007. Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer (samozaložba A. Hočevar): 75 str.

Hočevar, A. 2013. Reološke lastnosti cementnih kompozitov v svežem stanju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hočevar): 166 str.

Hočevar, A., Kavčič, F., Bokan Bosiljkov, V., 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: str. 207-216.

Kavčič, F. 2007, Samozgoščevalni betoni (SCC) – presek stanja. SCT tehnični informator 67: 35-43.

Wallevik, O.H. 2009. Introduction to reology of fresh concrete. ICI rheocenter course. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219str.

Zajc, A. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. V: Zajc, A. (redakcija). 14. Slovenski kolokvij o betonih. Posebne lastnosti betonov z dodatki. Zbornik gradiv in referatov, Ljubljana, 29. maj 2007. Ljubljana: IRMA, inštitut za raziskavo materialov in aplikacije. str. 1-7.

Žarnič, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

Standardi

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

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

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

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

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

SIST EN 206-9:2010. Beton – 9. del: Dodatna pravila za samozgoščevalni beton (SCC) = Concrete – Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC). CEN.

Ostali viri

Banfill, P., Beaupré, D., Chapdelaine, F., de Larrard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Wallevik J. E. 2000. Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC. National institute of standards and technology: 147 str.

<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/PDF/b01074.pdf> (Pridobljeno 20. 11. 2013.)

Beton. 2013. <http://sh.wikipedia.org/wiki/Beton#Voda> (Pridobljeno 24. 9. 2013.)

Ferraris, C. F., Brower, L. E. 2000. Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC (Nantes, France) in October, 2000. Pages 157.

<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/PDF/b01074.pdf> (Pridobljeno 20. 11. 2013.)

Segregacija SCC, test z ralezom. 2013.

[http://www.freeway.gov.tw/Upload/201309/A%20review%20of%20SCC%20Application%20in%20%20Taiwan\(paper\).pdf](http://www.freeway.gov.tw/Upload/201309/A%20review%20of%20SCC%20Application%20in%20%20Taiwan(paper).pdf) (Pridobljeno 19. 11. 2013.)

Segregacija betona. 2013.

<http://tecservices.com/Testing/ConcretePetrographyLaboratory.aspx> (Pridobljeno 7.10.2013.)

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

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884606000615>

(Pridobljeno 20. 11. 2013.)

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

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461100010X>

(Pridobljeno 20. 11. 2013.)