

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:

Benko, D., 2014. Preskušanje reoloških lastnosti svežega betona pri različnih razmerjih apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Hočevar, A.): 55 str.

Datum arhiviranja:04-12-2014

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:

Benko, D., 2014. Preskušanje reoloških lastnosti svežega betona pri različnih razmerjih apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Hočevar, A.): 55 pp.

Archiving Date: 04-12-2014

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 STROKOVNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

DANIJEL BENKO

**PRESKUŠANJE REOLOŠKIH LASTNOSTI SVEŽEGA
BETONA PRI RAZLIČNIH RAZMERNOSTI APNENČEVE
MOKE IN KEMIJSKEGA STABILIZATORJA**

Diplomska naloga št.: 77/OG-MK

**TESTING RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRESH
CONCRETE AT DIFFERENT RATIOS OF LIMESTONE
POWDER AND CHEMICAL STABILIZER**

Graduation thesis No.: 77/OG-MK

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednica komisije:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-
Bosiljkov

Somentor:

dr. Andraž Hočevar

Ljubljana, 28. 11. 2014

Fgg diploma

STRAN

ZA

POPRAVKE,

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj

bo

IZJAVE

Podpisani Danijel Benko izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Preskušanje reoloških lastnosti svežega betona pri različnih razmerjih apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 18. 9. 2014

Danijel Benko

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 544:691.3(497.4)(043.2)
- Avtor:** Danijel Benko
- Mentorica:** izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.
- Somentor:** dr. Andraž Hočevar, univ. dipl. ing. grad.
- Naslov:** Preskušanje reoloških lastnosti svežega betona pri različnih razmerjih apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja
- Tip dokumenta:** Diplomaska naloga – visokošolski strokovni študij
- Obseg in oprema:** 55 str., 9 pregl., 14 sl., 27 graf.
- Ključne besede:** svež beton, kemijski stabilizator, apnenčeva moka, samozgoščevalni beton, reologija svežega betona, reometer, plastična viskoznost, strižna napetost na meji tečenja, razlez s posedom

Izveleček

Namen raziskav v diplomskem delu je bil določiti reološke lastnosti in obdelavnost svežega samozgoščevalnega betona, pri katerem smo stabilnost zagotavljali s kombinacijo kemijskega stabilizatorja in apnenčeve moke. Raziskana sta bila reološka parametra, plastična viskoznost in strižna napetost na meji tečenja, ter parameter obdelavnosti, razlez s posedom. Reološki parametri so se začeli raziskovati šele v zadnjem času, potem ko se je z novimi metodami ugotovilo, da je beton pravzaprav Binghamova tekočina. Sprojektirano je bilo večje število betonskih mešanic, katere so se razlikovale v količini vsebovane apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja. Na podlagi dobljenih rezultatov smo poskušali ugotoviti ali stabilizator vpliva na obnašanje sveže betonske mešanice. Sprojektirali smo tudi enako število betonu ekvivalentnih mešanic malt in primerjali dobljene rezultate z rezultati betonskih mešanic. Za določitev viskoznosti in strižne napetosti na meji tečenja je bil uporabljen reometer ConTec Viscometer 5. Za določitev obdelavnosti pa metoda razleza s posedom.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 544:691.3(497.4)(043.2)
Author: Danijel Benko
Supervisor: Assoc. Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.
Cosupervisor: Andraž Hočevar, Ph. D.
Title: Testing of rheological properties of fresh concrete at different ratios of limestone powder and chemical stabilizer
Document type: Graduation Thesis – Higher professional studies
Scope and tools: 55 p., 9 tab., 14 fig., 27 graph.
Keywords: fresh concrete, chemical stabilizer, limestone powder, self compacting concrete, rheology of fresh concrete, rheometer, plastic viscosity, the shear stress, slump flow

Abstract

The purpose of the graduation thesis was to determine the rheological properties and workability of fresh self-compacting concrete, in which stability was ensured through a combination of chemical stabilizer and limestone powder. Tested rheological parameters were plastic viscosity and yield shear stress, and workability parameter slump flow. Rheological parameters, plastic viscosity and yield shear stress have only recently started to be subject of research, after the new testing methods revealed that concrete is actually Bingham liquid. We designed numerous concrete mixtures, which differed in the amount of limestone powder and contained a chemical stabilizer. Based on the results obtained, we tried to determine whether the stabilizer influences the behaviour of fresh concrete. We also designed the same number of concrete equivalent mortar mixtures and compared the results with the results of concrete mixtures. To obtain the values of plastic viscosity and yield shear stress rheometer Contec Viscometer 5 was used. To determine the workability of fresh concrete the slump flow method was used.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad., in somentorju dr. Andraž Hočevar, univ. dipl. ing. grad., za pomoč in izčrpne napotke pri oblikovanju diplomskega dela.

V veliki meri se zahvaljujem svoji družini in puncu Mirjani za več letno podporo, strpnost, potrpežljivost, spodbudo, ki so mi jo nudili v času študija in izdelave diplomskega dela.

Posebna zahvala gre tudi mojemu sinu Niku, kateri je z svojo dobro energijo pripomogel k dokončanju diplomskega dela.

KAZALO VSEBINE:

1 UVOD	1
2 SESTAVA BETONA	2
2.1 Splošno	2
2.2 Cement	2
2.2.1 Hidratacija cementa	3
2.2.2 Vrste cementov glede na sestavo	3
2.2.3 Mehanske zahteve cementa	4
2.3 Voda	5
2.3.1 Vodocementno razmerje	5
2.4 Agregat	6
2.4.1 Maksimalno zrno	6
2.4.2 Zrnavost agregata	7
3 SCC BETON IN CEM MALTA	8
3.1 SCC Beton	8
3.2 CEM malta	9
4 SVEŽ BETON	10
4.1 Mešanje	10
4.2 Obdelavnost	10
4.3 Pomembnost obdelavnosti betona	11
4.4 Konsistenca	12
4.5 Konsolidacija	12
5 REOLOGIJA	13
5.1 Splošno	13

5.2 Zakaj reologija	13
5.4 Modeli za strižne deformacije	15
5.5 Reologija svežega betona	15
5.6 Navor in strižna napetost	16
6 EKSPERIMENTALNO DELO	17
6.1 Uvod	17
6.2.1 Voda	17
6.2.2 Agregat	18
6.2.3 Cement	19
6.2.4 Apnenčeva moka	19
6.2.6 Kemijski plastifikator	20
6.3 Sestavine SCC in CEM mešanic	21
6.3.1 Sestavine SCC	21
6.3.2 Sestavine CEM	22
6.4.1 Metoda razleza s posedom	23
6.4.1.1 Princip meritve	24
6.4.1.2 Potek meritve	25
6.4.2 Reometer	26
6.4.2.1 ConTec Viscometer 5	26
6.4.2.2 Rezultat meritve.....	28
7.1 Rezultati reoloških meritev SCC betonov in CEM malt	29
7.2 Reološka parametra SCC	30
7.2.1 Plastična viskoznost SCC pri povečevanju količine stabilizatorja	30
7.2.2 Strižna napetost na meji tečenja pri povečevanju količine stabilizatorja	32
7.3.1 Plastična viskoznost CEM pri povečevanju količine stabilizatorja	34
7.3.2 Strižna napetost na meji tečenja CEM pri povečevanju količine stabilizatorja	36
7.4 Primerjava reoloških parametrov SCC in CEM	37
7.4.1 Primerjava plastične viskoznosti	37
7.4.2 Primerjava strižne napetosti na meji tečenja	40
7.5 Rezultati meritve obdelavnosti SCC betonov in CEM malt	43
7.5.1 Razlez s posedom SCC pri povečevanju količine stabilizatorja	44
7.5.2 Razlez s posedom CEM pri povečevanju količine stabilizatorja	47

7.6 Primerjava obdelavnosti SCC – CEM	49
7.6.1 Primerjava rezultatov obdelavnosti	49
8 ZAKLJUČEK	52
8.1 Plastična viskoznost	52
8.2 Strižna napetost na meji tečenja	53
8.3 Razlez s posedom	53
VIRI	54

KAZALO SLIK:

Slika 1: Sestava aeriranega in neaeriranega betona (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese, 2002).....	2
Slika 2: Zrnavost agregata v betonu (Žarnić, 2005).....	7
Slika 3: Korelacija razleza CEM in poseda betona (Schwartzentruber et C. Catherine, 2000).....	9
Slika 4: Slika prikazuje model dimenzije x,y in z (Wallevik, 2009)	14
Slika 5: Slika prikazuje strižno obremenjen model (Wallevik, 2009)	14
Slika 6: Razvoj strižne napetosti in strižne hitrosti pri začetku premikanja sveže betonske mešanice (Wallevik, 2009).....	15
Slika 7: Zveza med navorom (G) in faktorjem viskoznosti (H) ter strižno napetostjo na meji tečenja in plastično viskoznostjo betona (Wallevik, 2009).....	16
Slika 8: Sejalna krivulja uporabljenega agregata za SCC betone	18
Slika 9: Sestavine za SCC beton v mešalcu, pripravljene za mešanje	20
Slika 10: Agregat, cement in apnenčeva moka.....	22
Slika 11: Podlaga in kalupa za izvajanje preizkusa razleza s posedom	24
Slika 12: Razlez SCC mešanice.....	26
Slika 13: ConTec Viscometer 5.....	27
Slika 14: Rezultat meritve z reometrom.....	28

KAZALO PREGLEDNIC:

Preglednica 1: Vrste cementa glede na sestavo (SIST EN 197-1:2011)	4
Preglednica 2: Mehanske zahteve, podane kot karakteristične vrednosti (SIST EN 197-1:2011)	4
Preglednica 3: Presevek vseh frakcij agregata	18
Preglednica 4: Sestavine SCC betonov	21
Preglednica 5: Sestavine CEM malt	22
Preglednica 6: Reološki parametri SCC mešanic	29
Preglednica 7: Reološki parametri CEM mešanic	29
Preglednica 8: Rezultati obdelavnosti SCC.....	43
Preglednica 9: Rezultati obdelavnosti CEM.....	43

KAZALO GRAFIKONOV:

Grafikon 1: Plastična viskoznost SCC na podlagi količine stabilizatorja 0-60 min	30
Grafikon 2: Plastična viskoznost SCC betonov	31
Grafikon 3: Strižna napetost na meji tečenja SCC na podlagi količine stabilizatorja: 0-60 min.....	32
Grafikon 4: Strižna napetost na meji tečenja SCC.....	33
Grafikon 5: Plastična viskoznost CEM na podlagi količine stabilizatorja: 0-60 min	34
Grafikon 6: Plastična viskoznost CEM malt	35
Grafikon 7: Strižna napetost na meji tečenja CEM na podlagi količine stabilizatorja: 0-60 min.....	36
Grafikon 8: Strižna napetost na meji tečenja CEM.....	36
Grafikon 9: Primerjava plastične viskoznosti CEM-SCC pri 0 min	37
Grafikon 10: Primerjava plastične viskoznosti betona SCCM4 in malte MM4 s 0,35% stabilizatorja ..	38
Grafikon 11: Primerjava plastične viskoznosti betona SCCR3 in malte MR3 z 0,1% stabilizatorja.....	39
Grafikon 12: Korelacija plastične viskoznosti CEM-SCC	39
Grafikon 13: Korelacija plastične viskoznosti CEM-SCC, brez meritev pri 0 min	40
Grafikon 14: Primerjava strižne napetosti na meji tečenja SCC-CEM pri 0 min	40
Grafikon 15: Primerjava strižne napetosti na meji tečenja SCCM4-MM4 z 0,35% stabilizatorja	41
Grafikon 16: Primerjava strižne napetosti na meji tečenja SCCR3 -MR3 z 0,1% stabilizatorja.....	42
Grafikon 17: Korelacija strižne napetosti na meji tečenja SCC-CEM.....	42
Grafikon 18: Primerjava razleza s posedom SCC 0-60 min.....	44
Grafikon 19: Razlez s posedom za SCC	45
Grafikon 20: Prikaz sovpadanja strižne napetosti in razleza SCC pri 0 min.....	46
Grafikon 21: Primerja razleza s posedom CEM: 0-60 min	47
Grafikon 22: Razlez s posedom CEM.....	48
Grafikon 23: Prikaz sovpadanja strižne napetosti in razleza CEM pri 0 min	49
Grafikon 24: Primerjava razleza s posedom SCC-CEM pri 0 min	49
Grafikon 25: Primerjava razleza SCC-CEM pri 60 min	50
Grafikon 26: Primerjava razleza SCCM4-MM4 z 0,35% stabilizatorja	50
Grafikon 27: Primerjava razleza SCCR3-MR3 z 0,1% stabilizatorja	51

1 UVOD

Portland cementni beton (beton) je najbolj uporaben gradbeni material, zaradi svojih lastnosti v svežem in strjenem stanju. V svežem stanju je beton dobro obdelaven in s tem enostavno vgradljiv, medtem ko ima v strjenem stanju dobro nosilnost, ki je izražena v tlačni in upogibni trdnosti.

Ob vsakodnevni uporabi betona si pri reševanju težav povezanih s svežim betonom pomagamo z uporabo različnih preskusov, ki so dobro poznani.

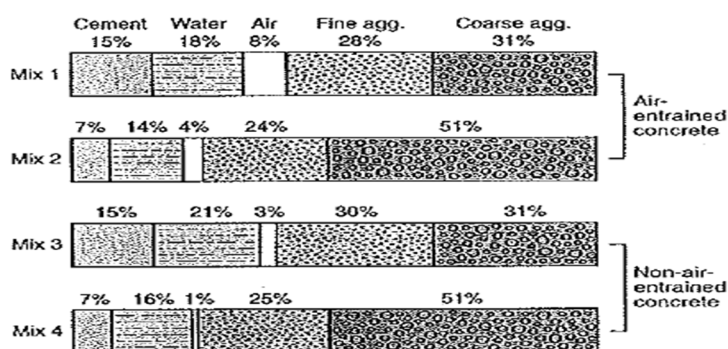
V okviru moje diplomske naloge smo se ukvarjali z reologijo svežega betona pri različnih razmerjih apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja. Reologija je veda, ki proučuje deformiranje in tečenje snovi. Svež beton je kompleksna suspenzija delcev, delci grobega agregata so razpršeni v malti, malta ima delce drobnega agregata razpršene v pasti, pasta pa cementne in ostale praškaste delce razpršene v vodi.

Sprojektirano je bilo večje število mešanic SCC betona in betonu ekvivalentnih CEM malt. Vsaka mešanica je bila posebej sprojektirana, ob upoštevanju predpisanih količin posameznih komponent. Mešanice so se razlikovale po vsebovanih količinah apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja. Nato je potekalo mešanje, in reološke meritve ter meritve obdelavnosti. Meritve reoloških lastnosti in obdelavnosti so potekala v 20 minutnih intervalih pri 0 min, 20 min, 40 min in 60 min. 0 min pomeni čas takoj po zamešanju malte ali betona. Vsi rezultati meritev so bili zabeleženi in so predstavljeni v nadaljevanju. Za meritve reoloških parametrov smo uporabili reometer ConTec Viscometer 5, za meritve obdelavnosti pa smo uporabili metodo razleza s posedom.

2 SESTAVA BETONA

2.1 Splošno

Beton je keramičen kompozitni material sestavljen iz dveh komponent, agregata in cementne paste. Pasta je sestavljena iz cementa in vode. Zaradi kemijske reakcije med cementom in vodo poveže pasta zrna agregata (običajno gramoz in pesek ali lomljen kamen) med seboj in dobimo beton. Ta kemična reakcija se imenuje hidratacija. V pasto se lahko doda tudi kemične dodatke za izboljšavo lastnosti betona. Cementna pasta je sestavljena iz cementa, vode in ujetega zraka ali namenoma vnesenega zraka. Pasta predstavlja približno 25-40% celotnega volumna betona. Agregat predstavlja približno 60-75% volumna betona in zato je njegova izbira zelo pomembna. Slika 1 prikazuje sestavi aeriranega in neaeriranega betona (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese, 2002).



Slika 1: Sestava aeriranega in neaeriranega betona (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese, 2002).

2.2 Cement

Cement je hidravlično vezivo, ki zaradi hidratacije (reakciji z vodo) veže in pridobiva na trdnosti. Ob tem iz cementne paste nastane strjen cementni kamen, ki prenaša visoke tlačne obremenitve. Najpomembnejši področji uporabe cementa sta proizvodnja malte in betona, kjer je uporabljen kot »lepilo« naravnih ali umetnih agregatov, ki skupaj ustvarijo močan gradbeni material. Obstajata dve osnovni vrsti cementov, in sicer silikatna in aluminatna skupina. Cement, ki se najpogosteje pojavlja na tržišču in je namenjen široki potrošnji je t.i. portlandski cement, ki je svoje ime dobil po barvi kamna z otoka Portland. Portlandski cement

je značilni predstavnik silikatnih cementov. (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese, 2002).

2.2.1 Hidratacija cementa

Hidratacija cementa je proces vezanja vode in cementa. To je kompleksna serija reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo.

Hitrost hidratacije je odvisna od:

- sestave klinkerja in količine primesi v mineralih klinkerja,
- mikrostrukture klinkerja,
- količine in oblike kalcijevega sulfata,
- finosti in zrnastostne sestave cementa,
- vodocementnega razmerja mešanice,
- razmer pri zorenju mešanice,
- prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici (Žarnić, 2005).

2.2.2 Vrste cementov glede na sestavo

Standard SIST EN 197-1 razvršča običajne cemente glede na sestavine v pet vrst. Običajni cementi so označeni z oznako CEM in rimsko številko, ki pove vrsto cementa, sestavljeni pa so iz glavnih sestavin in manj pomembnih sestavin, kamor sodijo na primer mlevni dodatek in kalcijev sulfat. Glavne sestavine so tiste, katerih masni delež v cementu je večji od 5%. Masni delež vseh manj pomembnih sestavin skupaj pa ne sme presegati 5% mase glavnih komponent. Oznake A, B in C označujejo delež mineralnih dodatkov, črke v oklepaju pa vrsto mineralnih dodatkov.

Preglednica 1: Vrste cementa glede na sestavo (SIST EN 197-1:2011)

Vrsta cementa	Opis
CEM I	čisti portlandski cement
CEM II	portlandski cement z mineralnimi dodatki
CEM III	žlindrin cement
CEM IV	pucolanski cement
CEM V	mešani cement

2.2.3 Mehanske zahteve cementa

Poleg razmerja različnih sestavin v cementu postavlja standard SIST EN 197-1 določene zahteve glede kemijske sestave cementa ter fizikalno-mehanskih lastnosti. Cement mora biti označen z oznako trdnostnega razreda (marka cementa). Standard določa glede na tlačno trdnost po 28 dneh tri trdnostne razrede, in sicer 32,5, 42,5 in 52,5, poleg tega so cementi z visokimi začetnimi trdnostmi označeni z veliko črko R (rapid), cementi z normalno začetno trdnostjo pa s črko N (normal).

Preglednica 2: Mehanske zahteve, podane kot karakteristične vrednosti (SIST EN 197-1:2011)

Tlačna trdnost			
	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost
Oznaka trdnosti	2 dni	7 dni	28 dni
32,5 N	-	> 16	≤ 32,5 ≤ 52,5
32,5 R	≥ 10		
42,5 N	≥ 10		≤ 42,5 ≤ 62,5
42,5 R	≥ 20		
52,5 N	≥ 20		≤ 52,5
52,5 R	≥ 30		

2.3 Voda

Voda je nujna sestavina vsake betonske mešanice, ker je mogoče le z njeno navzočnostjo sprožiti proces hidratacije cementa. Poleg tega je voda v betonu pomembna tudi kot sestavni del, ki se manifestira pri viskoznosti betonskih mešanic, ali kot del, ki omogoča učinkovito vgradljivost betona. Voda za pripravo betona ne sme vsebovati sestavin, ki bi lahko negativno vplivale na proces hidratacije cementa, kot tudi tistih sestavin, ki lahko povzročijo korozijo armature (jeklo), v armiranem betonu. Pitna voda skoraj vedno izpolnjuje te zahteve, tako da jo je mogoče uporabiti za izdelavo betona brez kakršnega koli dokaza o izpolnjevanju pogojev. Vendar pa je v vseh drugih primerih treba pridobiti dokazila o kakovosti vode za beton (Žarnić, 2005).

Kemijski dodatki, ki jih večinoma dodajamo vodi za pripravo betona, vplivajo na:

- zmanjšanje potrebe po vodi,
- poboljšanje obdelavnosti betona,
- vgradnjo zračnih mehurčkov in ustvarjanje zaprte poroznosti betona,
- reguliranje ostalih lastnosti betona.

2.3.1 Vodocementno razmerje

Parameter, ki najbolj vpliva na lastnost betona je vodocementno razmerje. To je razmerje med maso vode in cementa za pripravo cementne paste. V idealno projektiranem in izdelanem betonu je vsako zrno agregata oblepljeno s cementno pasto, vsi prostori med zrnji so zapolnjeni, cementna pasta pa vsebuje le drobno zaprto poroznost.

Možni so trije primeri vodocementnega razmerja:

$v/c < 0,38$ premalo vode za popolno hidratacijo cementa, zato del cementa ostane nevezan in predstavlja polnilo.

$v/c = 0,38$ idealno razmerje kjer hidratizira ves cement.

$v/c > 0,38$ vsa odvečna voda se namesti v kapilarnih porah (Žarnić, 2005).

2.4 Agregat

Agregat predstavlja 70-80% celotne mase betona. Za izdelavo betona se uporablja naravno zbrušen (pesek in gramoz) in drobljen agregat. Drobljen agregat je praviloma cenejši. Vloga agregata v betonu je sledeča:

- znižuje ceno betona; je razmeroma poceni, ker postopek pridobivanja ni drag,
- ustrezno sestavljen po frakcijah ustvarja koheziven beton, ki ga je lahko obdelovati v svežem stanju,
- znižuje hidratacijsko temperaturo betona,
- zmanjšuje krčenje betona,
- uravnava površinsko trdoto betona; odpornost na obrus,
- ustvari barvitost betonske površine,
- kontrola gostote,
- zvišanje požarne odpornosti betona.

Pri običajnih betonih zaobljena zrna omogočajo boljšo vgradljivost, vendar se z lomljenim agregatom lahko dosegajo višje trdnosti. Ustrezna zrnastostna sestava agregata omogoča izdelavo svežega betona ustreznih plastičnih lastnosti (vgradljivost, kohezija, odpornost na izločanje vode) in strjenega betona ustreznih lastnosti (trdnost, trajnost in izgled površine). Ustrezno granuliran agregat dobro zapolnjuje celoten prostor in onemogoča segregacijo sveže betonske mešanice. V fazi projektiranja sveže betonske mešanice sestavimo tako zrnastostno sestavo agregata v betonu, ki ustreza postavljenim zahtevam (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese, 2002).

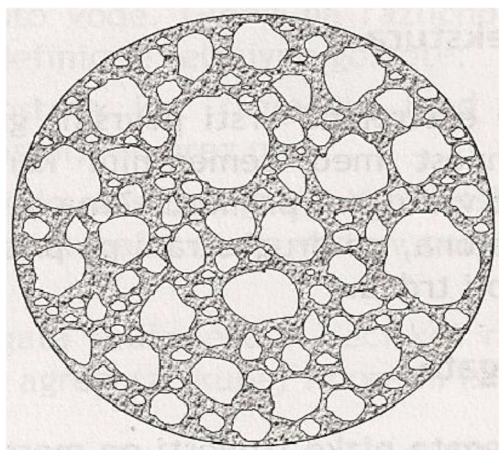
2.4.1 Maksimalno zrno

Običajno obravnavamo grobi (zrna premera nad 4 mm) in drobni agregat. Z izrazom pesek ponavadi imenujemo droben zaobljen agregat, nastal z naravnim razpadanjem skal in brušenjem zrn. Velikost maksimalnega zrna v betonu je odvisna od vrste in izmer konstrukcije, v kateri uporabljamo beton. V splošnem velikost maksimalnega zrna ne sme presegati 25% minimalne izmere konstrukcije, s posebno pozornostjo pri močno armiranih prerezi. Pri večini konstrukcij je maksimalno zrno agregata velikosti 16 mm ali največ 32

mm. Drobne frakcije agregata so potrebne za enakomerno zapolnitev prostora med večjimi zrni in morajo biti dodane v ustreznem razmerju do maksimalnega zrna (Žarnić, 2005).

2.4.2 Zrnavost agregata

S tem izrazom opisujemo relativno razmerje različnih velikosti zrn med nominalno maksimalnim zrnom in najdrobnejšim prisotnim delcem materiala, ki pade skozi sito z odprtino 0,25 mm. Ustrezna zrnavostna sestava agregata omogoča izdelavo svežega betona ustreznih plastičnih lastnosti (vgradljivost) in strjenega betona ustreznih lastnosti (trdnost, trajnost in izgled). Ustrezno granuliran agregat dobro zapolnjuje celoten prostor in onemogoča segregacijo sveže betonske mešanice. Praznine med posameznimi večjimi zrni se pri ustrezni sestavi pravilno zapolnijo z manjšimi zrni vse do najmanjših delcev (cementna zrna).



Slika 2: Zrnavost agregata v betonu (Žarnić, 2005)

3 SCC BETON IN CEM MALTA

3.1 SCC Beton

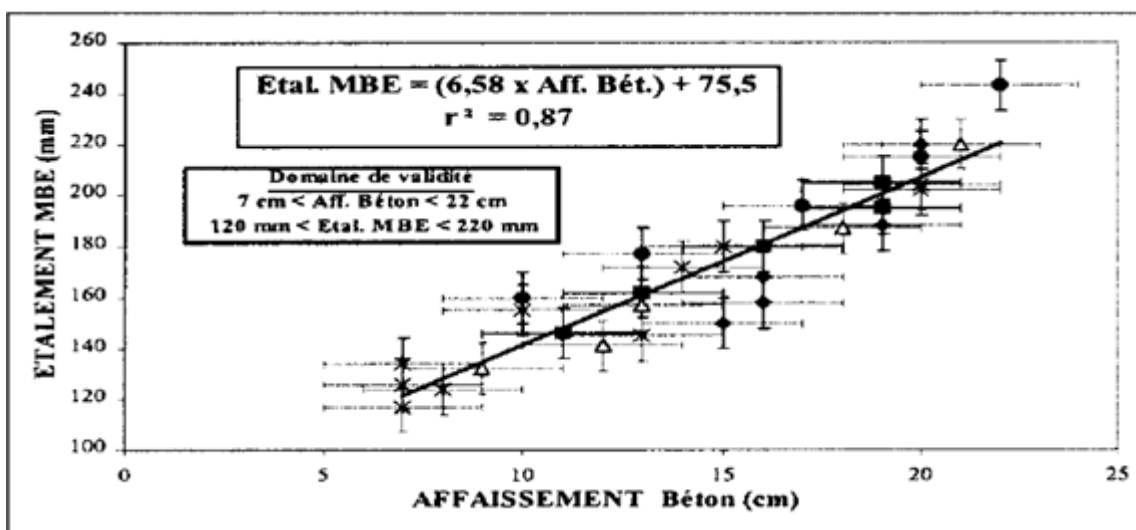
Lahko vgradljivi in SCC betoni so primerni za visoko kakovostne, gosto armirane elemente, kakor tudi za manj zahtevne nearmirane elemente, kot so razna podlivanja pod elementi, kjer je dostop otežen. Težnja je, da tovrstni betoni pri vgrajevanju potrebujejo malo ali nič vibracij za zapolnitev opaža in zgoščevanje strukture oziroma jih SCC betoni ne potrebujejo, saj so sposobni teči pod svojo lastno težo in zapolniti opaž ter doseči popolno zgoščenost tudi ob zelo zgoščeni armaturi v prerezu. Zaradi neuporabe vibracij postane delovno okolje mnogo bolj prijazno. Uporabni so tudi za sanacijska dela, kjer konstrukcijo tankoslojno obbetoniramo.

Glavna značilnost lahko vgradljivih in SCC betonov je, da imajo boljšo sposobnost tečenja kot običajni betoni. V začetku so za ta namen uporabljali v svežih mešanica betona velike količine cementa, z razvojem nove generacije superplastifikatorjev, ki močno zmanjšajo potrebo po vodi, in z razvojem novih vrst dodatkov, pa je mogoče lahko vgradljive in SCC betone izdelati tudi z običajnimi količinami cementa. Novi superplastifikatorji omogočajo dovolj dolgo znižanje viskoznosti cementne paste in disperzijo cementnih delcev. Vendar pa je za izdelavo SCC betonov potrebna drugačna zrnavostna sestava kamenega agregata, z veliko količino finih delcev. Pomanjkanje finih delcev v agregatu pa lahko kompenziramo z dodajanjem kamene moke, elektrofiltrskega pepela, mikrosilike ali granulirane plavžne žlindre. SCC betoni so na spremembe lastnosti vhodnih surovin zelo občutljivi. Te lastnosti so vlažnost in sestava posameznih frakcij kamenega agregata, nihanja v cementu in kemijskih dodatkih, kar zahteva večjo pozornost pri proizvodnji betona. Priporočljiva je uporaba betonarn, kjer je možno skladiščiti večje količine agregata v pokritih silosih in tako kontrolirati vsebnost vlage (Hočevar, Kavčič,2010).

3.2 CEM malta

Kratica CEM v prevodu pomeni betonu ekvivalentna malta (concrete equivalent mortar). Glavni cilj je na podlagi sestave betona sprojektirati betonu ekvivalentno malto (CEM), katere reološke lastnosti so povezane s tistimi pri betonu. S tem bi zmanjšali potrebo po materialih pri preiskavah in olajšali delo v laboratoriju. Za preizkušanje betona je treba uporabiti veliko več materiala in energije kot je to potrebno pri maltah.

Pri običajnih betonih so raziskovalci pokazali, da je metoda CEM zelo uporabna pri načrtovanju vrste in količine dodatka betonu. Rološke lastnosti CEM malt omogočajo oceno učinkovitosti različnih kombinacij cementov in dodatkov. Če je znana korelacija CEM malte in betona, je možno sklepati, kakšen bo posed betona. Vendar moramo biti pazljivi, saj korelacija ni univerzalna, ampak mora biti določena eksperimentalno za vsako skupino mešanic posebej. Velja na primer za skupino betonov, pri katerih spreminjamo le superplastifikator (Schwartzentruber et C. Catherine, 2000)



Slika 3: Korelacija razleza CEM in poseda betona (Schwartzentruber et C. Catherine, 2000)

Bistvo metode CEM je ohranjanje specifične površine agregata. Skupna specifična površina agregatnih zrn vseh frakcij v betonu je enaka specifični površini agregatnih zrn v malti. Količine cementa in vseh dodatkov ostanejo enake, kot so bile v betonu. Vodocementno razmerje ohranimo tako, da spremenimo količino vode. S tem postopkom se torej zmanjšata masa in prostornina agregata v mešanici (Hočevar, 2013).

4 SVEŽ BETON

Svež beton je začetna faza betonske mešanice, kjer se lahko beton oblikuje in je v plastičnem stanju. Lastnost, s katero opišemo stanje svežega betona je konsistenca. Konsistenca betona nam pove, kako enostavno beton teče. Sveže betonske mešanice, ki so ena od skupin materialov s cementnim vezivom, so kompleksna suspenzija delcev: delci grobega agregata so razpršeni v malti, malta ima delce drobnega agregata razpršene v pasti, pasta pa cementne in ostale praškaste delce razpršene v vodi (Žarnić, 2005).

4.1 Mešanje

Osnovne sestavine betonske mešanice morajo biti pazljivo zmešane v homogeno celoto. Zaporedje dodajanja sestavin v mešalec igra pomembno vlogo pri lastnostih končnega produkta. Glede na želene lastnosti betonske mešanice se lahko zaporedje dodajanja komponent spremeni. Pomembno je, kdaj se doda voda v suho mešanico agregata in cementa ter kakšna je hitrost obračanja bobna mešalca. Drugi pomemben faktor pri mešanju je količina mešanice glede na kapaciteto mešalca, čas polnjenja glede na čas mešanja, oblika in stanje bobna in njegovih lopatic. Bobni dobrih mešalcev omogočajo izmenjavo materiala iz enega na drugi konec bobna s kotaljenjem, pregibanjem in gnetenjem (Žarnić, 2005).

4.2 Obdelavnost

Enostavna vgradnja, konsolidacija in končno oblikovanje betonske mešanice in tudi stopnja odpornosti proti segregaciji se imenuje obdelavnost. Beton mora biti obdelaven, ampak ne sme priti do segregacije komponent med transportom, vgrajevanjem in zgoščanjem. Stopnja obdelavnosti potrebna za pravilno vgradnjo betona je odvisna od metode vgrajevanja, načina zgoščevanja in vrste betona. Različne metode vgrajevanja zahtevajo drugačne stopnje obdelavnosti betonske mešanice (Žarnić, 2005).

Faktorji, ki vplivajo na izbiro obdelavnosti betona so:

- način in čas transporta,
- količina cementa in njegove lastnosti,
- konsistenca betona,
- zrnastostna sestava agregata,

- vsebnost vode v mešanici,
- temperatura betonske mešanice in zraka,
- vsebnost zraka,
- dodatki.

Enakomerna porazdelitev agregata in prisotnost vnesenega zraka bistveno pomagata pri preprečevanju segregacije in poboljšata obdelavnost betonske mešanice. Lastnosti vezane na obdelavnost so konsistenca, segregacija, pretočnost, črpnost, izcejanje vode in vgradljivost.

Kako poboljšati obdelavnost:

- povečanje v/c količnika,
- uporaba zaobljenega agregata,
- podaljšanje mešalnega časa,
- povišanje temperature mešanja,
- neporozen oagregat.

4.3 Pomembnost obdelavnosti betona

Čeprav bi bilo treba lastnosti svežega betona obravnavati na podlagi tega, da so pomembne le, v kolikor imajo učinek na lastnosti strjenega betona, je treba priznati, da je pristop, ki daje velik pomen lastnostim svežega betona kot takim bolj vizionaren. Strjen beton mora zadovoljiti bolj ali manj opredeljene zahteve standardov v zvezi s trdnostjo, trajnostjo, krčenjem in lezenjem ter drugimi lastnostmi, in to po tako nizki ceni kot je le mogoče. Zaradi teh zahtev mora biti svež beton ustrezne sestave glede kakovosti in količine cementa, agregata in ostalih dodatkov in mora izpolnjevati zahteve glede homogenosti, odpornosti na segregacijo, sposobnosti tečenja in zgoščenosti ter kvalitete končne obdelave površine (G.H. Tattersall, P.F.G. Banfill, 1983).

4.4 Konsistenca

Konsistenca betona je tisti parameter, ki določa plastičnost betona. Standardi predpisujejo metode določanja konsistence sveže betonske mešanice (Ve-Be metoda, metoda s posedom, metoda z razlezom, metoda z vibriranjem) in kriterije za posamezne stopnje konsistence (trdoplastična, srednjeplastična, mehkoplastična in tekoča). Tekoč beton uporabljamo pri betoniranju tankih profilov ali izjemno gosto armiranih elementov. Tak beton mora imeti vse lastnosti homogene betonske mešanice. Zato se plastičnemu betonu dodajajo superplastifikatorji, ki povečujejo vgradljivost. Plastična mešanica omogoča izdelavo trdnega in homogenega betona, vendar je pri vgradnji treba vložiti nekaj več energije (Žarnić, 2005).

4.5 Konsolidacija

Pri vgradnji z dovajanjem energije se delci svežega betona spravijo v gibanje, zmanjša se njihovo medsebojno trenje, mešanica pa pri tem prehaja v stanje gostega fluida. Vibriranje omogoča uporabo bolj toge mešanice z večjimi zrn, pri kateri je potrebna manjša količina cementne paste za oblikovanje zrn agregata in s tem manjša potreba po vodi. Beton z optimalno zrnastostno sestavo se bo lažje zgostil in zapolnil opaž. Vibriramo beton, ki ga ne moremo ročno vgraditi. Pri ročno vgradljivem betonu lahko vibriranje povzroči njegovo segregacijo (Žarnić, 2005).

Ker pri diplomskem delu uporabljamo samozgoščevalni beton, ki je samo zaradi delovanja lastne teže in sposobnosti tečenja sposoben zapolniti opaž, nismo potrebovali vibratorjev.

5 REOLOGIJA

5.1 Splošno

Reologija je veda, ki proučuje deformiranje in tečenje snovi. Obravnava povezavo med silo, deformacijo in časom. Snov je v tem primeru lahko karkoli od trdega materiala do tekočine. Podskupina reologije je viskometrija, ki proučuje povezavo med silo in deformacijo. Viskoznost definiramo kot upor proti tečenju oz. upor tekočine proti deformiranju. Večji kot je upor, večja bo viskoznost materiala (Hočevar, Bosiljkov, Kavčič, 2010).

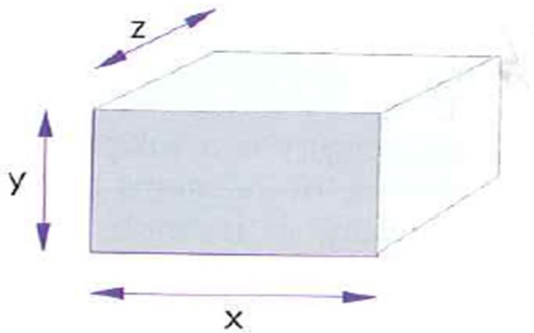
5.2 Zakaj reologija

Prednosti in lastnosti reologije:

- Reologija nam pomaga razumeti interakcije med posameznimi sestavinami in nam omogoča vpogled v strukturo materiala. Obstaja namreč povezava med velikostjo in obliko delcev ter viskoznostjo materiala,
- reološki preskusi omogočajo kontrolo kakovosti surovin, procesov in končnih produktov,
- reološki preskusi pomagajo pri dimenzioniranju procesne opreme uporabljene v procesu vgradnje betona: črpalke, ...
- reološki preskusi omogočajo tudi preskušanje ustreznosti novih produktov na trgu (Wallevik, 2009).

5.3 Viskometrija

Slika (Slika 4) prikazuje tridimenzionalen model materiala dimenzij x , y in z . Vrh modela ima površino $A = x \cdot z$.

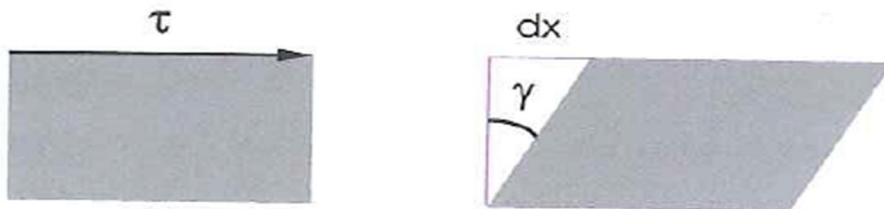


Slika 4: Slika prikazuje model dimenzije x, y in z (Wallevik, 2009)

Če dodamo silo F na zgornjo ploskev modela (površina A), bo povzročala strižno napetost na model.

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

Dodana sila bo na ploskev A v času delovanja dt povzročila deformacijo dx . Deformacija se lahko tudi opiše s kotom γ . Dobljena deformacija se imenuje strižna deformacija in če je odvajana po času dt dobimo količino, ki se imenuje strižna hitrost.



Slika 5: Slika prikazuje strižno obremenjen model (Wallevik, 2009)

Če strižno napetost τ delimo s strižno hitrostjo $\dot{\gamma}$ dobimo viskoznost materiala μ .

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

5.4 Modeli za strižne deformacije

Merilna oprema sloni na več modelih obnašanja materiala:

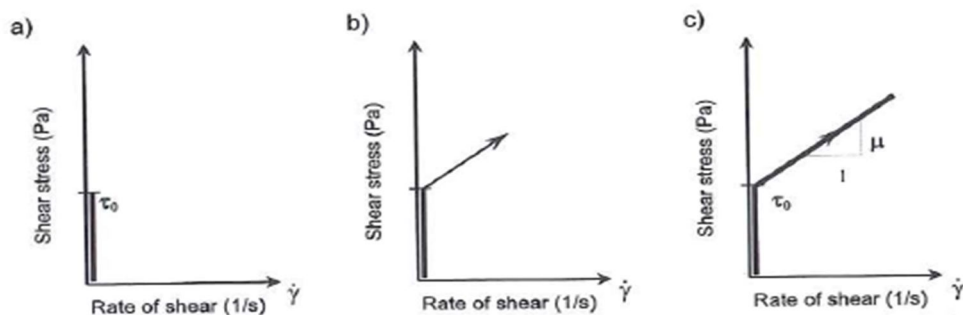
- tok med dvema vzporednima ploščama,
- krožni tok med dvema koaksialnima valjema,
- tok skozi kapilare in cevi,
- krožni tok med dvema vzporednima ploščama.

V primeru moje diplomske naloge je bil uporabljen model krožnega toka med dvema koaksialnima valjema. Koaksialni valjasti reometri delujejo po principu enega mirujočega in enega rotirajočega valja. Najpogosteje je notranji valj stacionaren, zunanji pa rotira. Ti reometri upoštevajo Binghamovo obnašanje tekočine.

Primer koaksialnega valjastega reometra je ConTec Viskometer 5, kateri je bil uporabljen za meritve reoloških parametrov v moji diplomski nalogi. ConTec Viskometer 5 je v nadaljevanju podrobneje opisan.

5.5 Reologija svežega betona

Sveža betonska mešanica potrebuje vnos sile za sprožitev tečenja oziroma premikanja mešanice. Z drugimi besedami, ima določeno odpornost proti tečenju. Napetost, ki je potrebna za začetek tečenja se imenuje napetost na meji tečenja (τ_0). Z višanjem strižne hitrosti se povzroči povečanje strižne napetosti. Nagib linije (μ) predstavlja plastično viskoznost betona (Wallevik, 2009). Opisano obnašanje velja za Binghamov model tečenja, ki velja za večino svežih betonov.

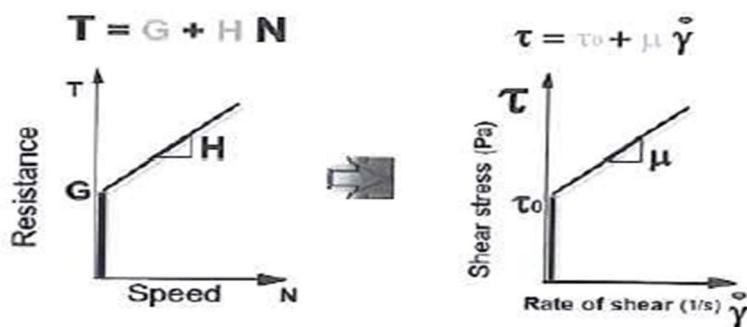


Slika 6: Razvoj strižne napetosti in strižne hitrosti pri začetku premikanja sveže betonske mešanice (Wallevik, 2009)

Napetost na meji tečenja in plastična viskoznost betona se lahko določita s pomočjo viskometra. Takšen test nam poda strižne odpornosti betona pri eni ali več strižnih hitrosti.

5.6 Navor in strižna napetost

Več komercialnih aparatov je na voljo za meritve reoloških lastnosti svežega betona, pri čemer upoštevajo Binghamov model tekočine. BML viskometer in ConTec Viscometer 5 merita navor T , pri različnih krožnih hitrostih N . Z uporabo linearne regresije lahko določimo odsek ob osi navora (y -os) in naklon premice. Odsek G se imenuje odpornost proti tečenju in naklon H se imenuje faktor viskoznosti (Wallevik, 2009).



Slika 7: Zveza med navorom (G) in faktorjem viskoznosti (H) ter strižno napetostjo na meji tečenja in plastično viskoznostjo betona (Wallevik, 2009)

Z uporabo matematične enačbe (Reiner-Rivlin), se lahko odpornost proti tečenju in faktor viskoznosti pretvorita v napetost na meji tečenja (τ_0) in plastično viskoznost (μ).

6 EKSPERIMENTALNO DELO

6.1 Uvod

Tema moje diplomske naloge je preizkušanje reoloških lastnosti svežega betona pri različnih razmerjih apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja. Preizkušanje oz. meritve smo opravljali v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Preizkuse reoloških lastnosti svežih mešanic smo opravljali na betonskih mešanicah in maltah. Sprojektirano je bilo večje število mešanic, pri katerih se je količina apnenčeve moke povečevala in zmanjševala količina kemijskega stabilizatorja. Ker pri diplomskem delu uporabljamo samozgoščevalni beton, ki je samo zaradi delovanja lastne teže in sposobnosti tečenja sposoben zapolniti opaž, nismo potrebovali vibratorjev. Če imamo v mešanici večjo količino apnenčeve moke, se zmanjša potrebna količina kemijskega stabilizatorja in obratno. Pri tem pa smo poskušali obdržati določeno obdelavnost mešanic. Pred vsako meritvijo smo določili potrebne količine sestavin (cement, voda, agregat, apnenčeva moka in kemijski dodatek) za vsako mešanico. Vsako sestavino smo natančno tehtali. Pred vsakim mešanjem smo mešalno posodo rahlo navlažili in vanjo stresli agregat in cement ter apnenčevo moko, če smo jo uporabili. Sestavine smo najprej mešali eno minuto na suho nato pa dodali potrebno količino vode in stabilizatorja. Med mešanjem smo ustavili mešalec in očistili stene posode, če se je kaj prijelo nanje. Kasneje smo mešali še tri minute, kar je skupaj nanese pet minut mešanja. V naslednjih odstavkih bodo opisane sestavine mešanic in uporabljene metode za določitev reoloških lastnosti svežih mešanic betonov in malt. V preglednicah bodo podane tudi količine sestavin posameznih mešanic SCC betonov in CEM malt.

6.2 Uporabljeni materiali

6.2.1 Voda

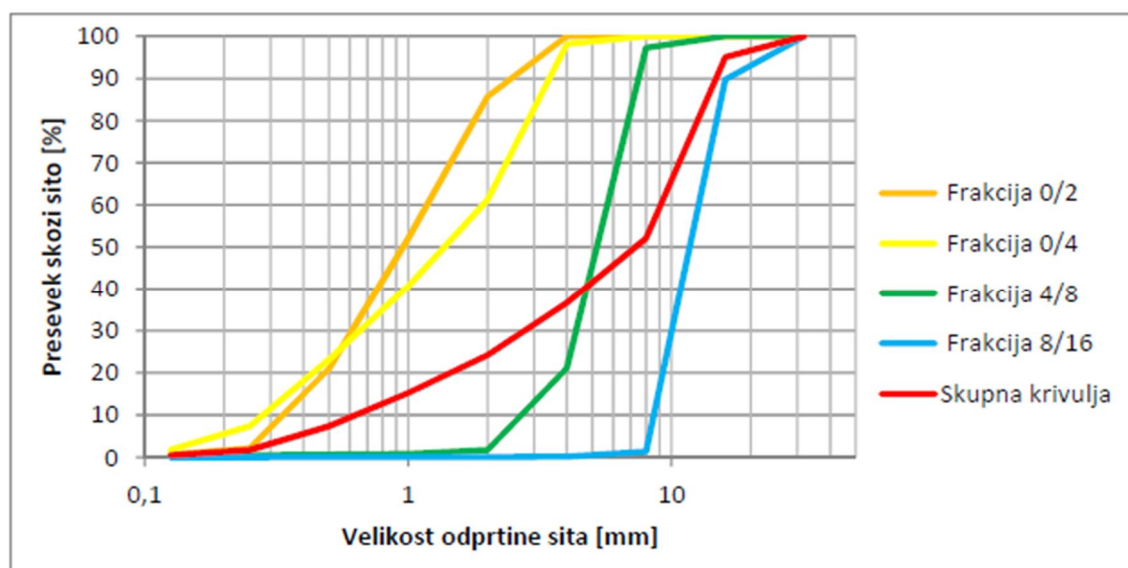
Uporabljena je navadna pitna voda. Kot je bilo že prej omenjeno, pitna voda izpolnjuje pogoje za uporabo v betonski mešanici in malti. Ni potrebnih predhodnih dokazovanj o ustreznosti vode. Vodocementno razmerje se je spreminjalo glede na količino vode in cementa v posamezni mešanici.

6.2.2 Agregat

Pri betonskih mešanica smo uporabili agregat vseh frakcij : 0/2, 0/4, 4/8, 8/16 mm. Pri maltah pa smo uporabili samo agregat frakcije 0/2. Uporabljen je bil drobljen apnenčast agregat. Agregat je bil zračno suh. Na sliki 11 je prikazana sejalna krivulja uporabljenega agregata za SCC betone.

Preglednica 3: Presevek vseh frakcij agregata

	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



Slika 8: Sejalna krivulja uporabljenega agregata za SCC betone

6.2.3 Cement

Uporabljen je bil portland cement CEM I 42,5 R. Število 42,5 predstavlja standardiziran trdnostni razred, črka R pa je indikator hitrosti vezanja (R- hitro vezanje, N- počasno vezanje).

6.2.4 Apnenčeva moka

Kot je bilo že prej omenjeno, se za SCC betone uporablja večja količina manjših frakcij agregata in prav tako večja količina finih praškastih delcev, s katerimi poskušamo doseči stabilnost betonske mešanice. Pri mojih preizkušancih je bila dodana apnenčeva moka. To so drobni mineralni delci, ki padejo skozi sito z odprtino 0,125 mm. Zaradi finosti imajo veliko specifično površino. Zato moramo pri pripravi betonske mešanice dodati večjo količino vode zaradi zagotavljanja ustrezne vgradljivosti betona ali uporabiti superplastifikator.

6.2.5 Kemijski stabilizator

Stabilizatorjev je več vrst in imajo zelo različne lastnosti. V splošnem se uporabljajo za zmanjšanje segregacije grobih zrn agregata in notranjega ter površinskega izcejanja vode pri betonih SCC ter za preprečitev izgube materiala zaradi izpiranja med podvodnim betoniranjem (Hočevar, 2013). Uporabljen stabilizator je bil v tekočem agregatnem stanju. Je disperzija kopolimera na osnovi akrilata in karboksilnih kislin in gostote $1,05 \text{ kg/dm}^3$.



Slika 9: Sestavine za SCC beton v mešalcu, pripravljene za mešanje

6.2.6 Kemijski plastifikator

S plastifikatorji in superplastifikatorji, ali drugače z dodatki za zmanjševanje potrebe po vodi, pri enaki obdelavnosti svežega betona zmanjšamo vodocementno razmerje, ali pri enakem vodocementnem razmerju povečamo obdelavnost svežega betona (Hočevnar, 2014). Uporabljen superplastifikator je bil v tekočem agregatnem stanju, iz družine porikarboksilatov in gostote $1,06 \text{ kg/dm}^3$.

6.3 Sestavine SCC in CEM mešanic

6.3.1 Sestavine SCC

Preglednica 4: Sestavine SCC betonov

SESTAVINE	MEŠANICE SCC				
	SCCR3	SCCM1	SCCM2	SCCM3	SCCM4
CEM I 42,5 R (kg)	400	400	400	400	400
V/C	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
V/C ef	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Voda (kg)	232	232	232	232	232
Agregat (kg)	1422	1472	1522	1572	1639
Kamena moka(kg)	216,5	166,5	116,5	66,5	/
SP1 (%)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
ST2 (%)	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35

Obrazložitev kratic v tabeli:

- CEM I 42,5 R – uporabljen cement v kg,
- V/C – vodocementni količnik v mešanici,
- V/C ef – efektivni vodocementni količnik,
- SP1 – superplastifikator (v tekoči obliki, družina polikarboksilatov, gostota 1,06 kg/dm³),
- ST2 – stabilizator v praškasti obliki.

6.3.2 Sestavine CEM

Preglednica 5: Sestavine CEM malt

SESTAVINE	MEŠANICE MALT CEM				
	MR3	MM1	MM2	MM3	MM4
CEM I 42,5 R (kg)	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
Voda (kg)	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
Agregat (kg)	12,89	13,33	13,78	14,23	14,84
Kamena moka(kg)	3,03	3,33	1,63	0,93	/
SP2 (%)	60,42	55,52	50,62	45,72	39,20
ST2 (%)	5,60	11,20	14,00	16,80	19,60

Obrazložitev kratic v tabeli:

- CEM I 42,5 R – uporabljen cement v kg,
- SP2 – superplastifikator (V tekoči obliki, družina polikarboksilatov, gostota 1,08 kg/dm³),
- ST2 – stabilizator v praškasti obliki.



Slika 10: Agregat, cement in apnenčeva moka

6.4 Metode preiskav

Primarni atributi uspešnosti samozgoščevalnega betona SCC so sposobnost tečenja ali zapolnjevanja, sposobnost prehajanja med ovirami in stabilnost. To se lahko meri s kombinacijo testov, ki omogočajo oceno kakovosti SCC betona.

Sem spada kombinacija danes najbolj uporabljenih testov:

- Slump flow test (metoda razleza s posedom),
- prezkus z V- lijakom,
- prezkus z L- zabojem,
- prezkus z J- obročem,
- preizkus odpornosti proti segregaciji s sitom.

Te metode bodo najverjetneje uporabljene med samo proizvodnjo betonske mešanice. Rezultati več preiskav skupaj zagotovijo informacijo o sposobnosti tečenja in zapolnjevanja, prehajanja med ovirami in stabilnosti SCC mešanice https://grace.com/construction/en-ca/Documents/TB-1506_SCC.pdf#search=scc (pridobljeno 25.7.2014.)

Za rezultate moje diplomske naloge je bila uporabljena metoda slump flow testa oziroma metoda razleza s posedom.

6.4.1 Metoda razleza s posedom

Preskus razleza s posedom v skladu s SIST EN 12350-8:2010 je nadgradnja preskusa s posedom stožca, ki je opisan v SIST EN 12350-2:2009. To je najpreprostejši način ocene konsistence svežega SCC betona na gradbišču. Pri tem uporabljamo enako opremo, kot pri preskusu s posedom. Stožec napolnimo v eni plasti brez zgoščevanja. Stožec dvignemo in opazujemo, kako daleč se bo razlezel beton. Rezultat je povprečje med največjim premerom betona in premerom pravokotno na največjega.

Potrebujemo

- Kalup v obliki prisekanega stožca za betone (večji),
- kalup v obliki prisekanega stožca za malte (manjši),
- ravno podlago,
- lopatko,
- vodno tehtnico,
- meter,
- mokro krpo.



Slika 11: Podlaga in kalupa za izvajanje preizkusa razleza s posedom

Na sliki 11 sta prikazana kalupa za izvajanje meritve razleza s posedom in podlaga. Dimenzije kalupa za malte so, višina 150 mm, spodnji notranji premer 100 mm in zgornji notranji premer 50 mm. Dimenzije kalupa za betone pa so, višina 300 mm, spodnji notranji premer 200 mm in zgornji notranji premer 100 mm. Podlago za opravljanje meritve razleza s posedom je predstavljal stresalna miza minimalne velikosti 900 mm x 900 mm.

6.4.1.1 Princip meritve

Razlez s posedom je meritev za oceno sposobnosti tečenja samozgoščevalnega betona brez prisotnosti ovir. Meritev temelji na postopku opisanem v dokumentu SIST EN 12350-8:2010.

Rezultat je pokazatelj sposobnosti tečenja in zapolnjevanja prostora (opaža) samozgoščevalnega betona.

6.4.1.2 Potek meritve

Najprej pripravimo ravno podlago, na kateri bomo opravljali meritve. Postavimo jo na ravna tla in odmaknjeno od aparaturo, ki bi povzročale morebitne nezaželene vibracije. S pomočjo vodne tehtnice preverimo, če je podlaga vodoravna. Če ni, si pomagamo z zagozdami (klini). Pred meritvijo podlago še očistimo in rahlo navlažimo. Na sredino podlage postavimo kalup stožčaste oblike in vanj do vrha nalijemo pripravljeno betonsko mešanico. Ko je kalup poln ga počasi dvignemo, tako da se beton počasi razleze pod lastno težo. Počakamo, da se razleze do konca in nato izmerimo največji premer razleza ter premer, ki je pravokoten na največjega. Rezultat je povprečje obeh premerov. Preverimo tudi morebitne znake segregacije mešanice. Rezultate zapišemo.

6.4.1.3 Rezultat meritve

$$SF = \frac{dm+dr}{2}$$

SF..... razlez v mm,

Dm..... največji premer v mm

Dr..... premer, pravokoten na največjega v mm



Slika 12: Razlez SCC mešanice

6.4.2 Reometer

Šele, ko so nove metode preiskav pokazale, da je beton pravzaprav Binghamova tekočina, se je uveljavil princip merjenja strižne napetosti in strižne hitrosti. S tem se je začela uporabljati reologija tudi na svežih betonih. Z reološkimi meritvami dobimo dva parametra, ki ju iz meritev izvednotimo, in sicer napetost na meji tečenja ter plastično viskoznost svežega betona.

6.4.2.1 ConTec Viscometer 5

ConTec Viscometer 5 je koaksialni valjasti reometer za pretok suspenzije delcev, ki je primeren za merjenje reoloških lastnosti paste, malte in betonskih mešanic.

Reološke lastnosti so opisane s temeljnimi parametri v Binghamovem modelu, napetost na meji tečenja in plastična viskoznost. Lahko pa se izberejo vrednosti G in H , namesto Binghamovih parametrov, in običajno je tako, ker je tak pristop lažje kontrolirati.

Razpon območja delovanja ConTec Viskometra 5 je: navor 0,27 Nm-27Nm in hitrost vrtenja 0,1-0,6 rps (vrtljajev na sekundo), pri normalnih pogojih delovanja. Se pa lahko hitrosti vrtenja nastavijo v območju od 0,05 rps do 0,65 rps. Zelo nizka hitrost vrtenja viskometra omogoča merjenje krivulje napetost-deformacija mešanice, ki predstavlja pomemben

parameter v povezavi s konsolidacijo betona. Visok razpon navora viskometra je nujen pri testiranjih visoko zmogljivih betonih. Maksimalna velikost zrna agregata je 22 mm za standardno verzijo. Ko se testirajo betoni z večjim maksimalnim zrnom agregata, se sistem koaksialnih cilindrov zamenja z sistemom z vzporednimi ploščami, ki omogoča testiranje betona z maksimalnim zrnom agregata do vključno 40 mm. Oba cilindra sistema koaksialnih valjev vsebujeta rebra za zmanjšanje drsenja materiala. Morda najbolj pomemben vidik pri ConTec Viskometru je ta, da lahko uporabnik dejansko ustvari svojo geometrijo <http://www.contec.is/page11.htm> (pridobljeno 25.7.2014).



Slika 13: ConTec Viscometer 5

6.4.2.2 Rezultat meritve

Rezultate izmerjene s ConTec Viskometrom smo obdelali v programu excel. Parametra G in H smo s pomočjo enačb (1) in (2) pretvorili v napetost na meji tečenja in plastično viskoznost.

Enačba za pretvorbo iz G v τ_o :

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

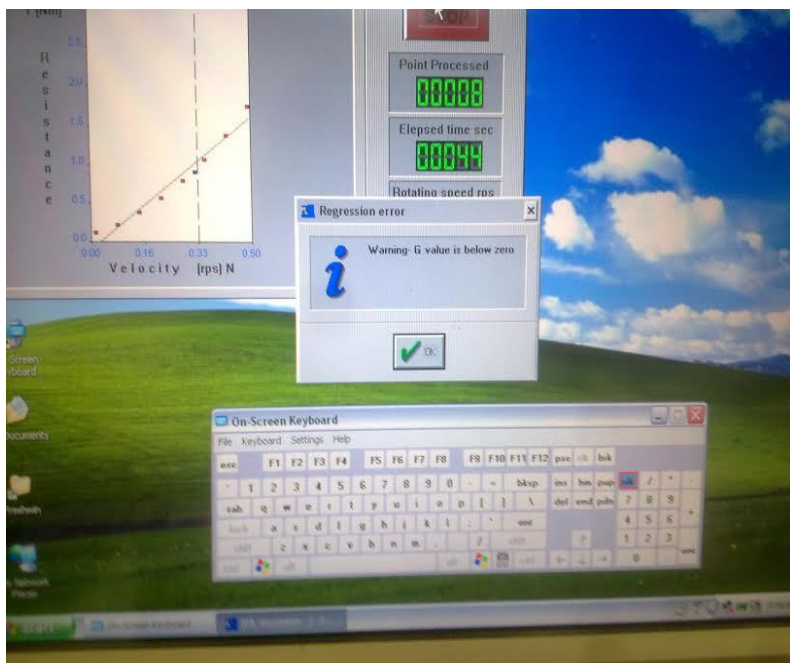
Enačba za pretvorbo H v μ :

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

R_i - polmer notranjega valja reometra,

R_o - polmer zunanega valja reometra,

h – višina malte/betona na rebrih valja reometra.



Slika 14: Rezultat meritve z reometrom

7 ANALIZA REZULTATOV

7.1 Rezultati reoloških meritev SCC betonov in CEM malt

Reološke parametre najprej podam v obliki preglednic, kasneje pa jih še prikažem v obliki grafikonov. Rezultate za vsako mešanico posebej smo merili v intervalih (0 minut, 20 minut, 40 minut, 60 minut) po zamešanju mešanic. V vsakem intervalu smo naredili tri meritve. Prikazani rezultati v preglednicah so povprečje treh meritev.

Preglednica 6: Reološki parametri SCC mešanic

Mešanice SCC z rezultati reoloških parametrov						
		SCCR3	SCCM1	SCCM2	SCCM3	SCCM4
0 min	τ_o (Pa)	20,7	41,1	24,8	35,9	39,2
	μ (Pa s)	20,9	24	21,9	32,9	26,9
20 min	τ_o (Pa)	26,3	36,4	28,6	28,1	35,4
	μ (Pa s)	19,65	21	24,87	30,4	31,75
40 min	τ_o (Pa)	30,8	36,3	28,5	23,5	44,9
	μ (Pa s)	13,9	21,2	25,75	34,65	31,1
60 min	τ_o (Pa)	42,2	43	32,6	33,8	46,7
	μ (Pa s)	19,5	26,65	28,7	35,9	34,4

Preglednica 7: Reološki parametri CEM mešanic

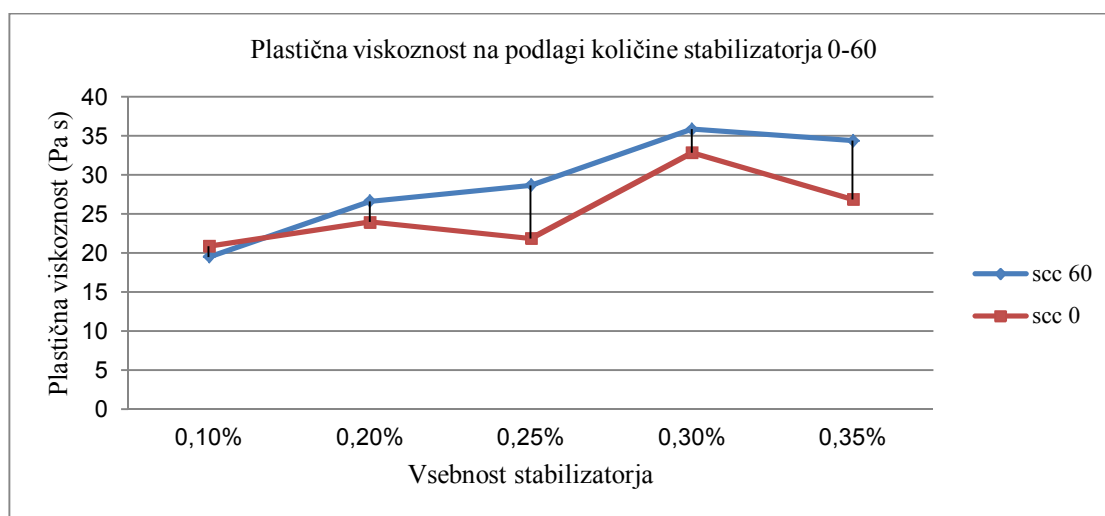
Mešanice CEM z rezultati reoloških parametrov						
		MR3	MM1	MM2	MM3	MM4
0 min	τ_o (Pa)	16,5	25,3	26,3	18,9	34,4
	μ (Pa s)	2,7	13,7	12,5	10,8	16,3
20 min	τ_o (Pa)	17,3	23,6	22,7	20,1	23
	μ (Pa s)	3,8	10,17	9,4	9,42	10
40 min	τ_o (Pa)	19,4	20,6	27,2	19	24,4
	μ (Pa s)	3,6	8,75	6,43	9,5	10,15
60 min	τ_o (Pa)	15	22,5	23,6	19,6	25,3
	μ (Pa s)	4,1	8,17	7,2	9,56	7,9

7.2 Reološka parametra SCC

Najprej bom pogledal, kako se spreminjajo reološki parametri SCC betona v prvi uri po zamešanju mešanice in jih nato primerjal z rezultati CEM malt. Pogledal bom tudi, ali so razlike v obnašanju betona in malte odvisne od količine stabilizatorja in kamene moke v mešanici. Kasneje bom tudi analiziral in primerjal obdelavnost SCC in CEM.

7.2.1 Plastična viskoznost SCC pri povečevanju količine stabilizatorja

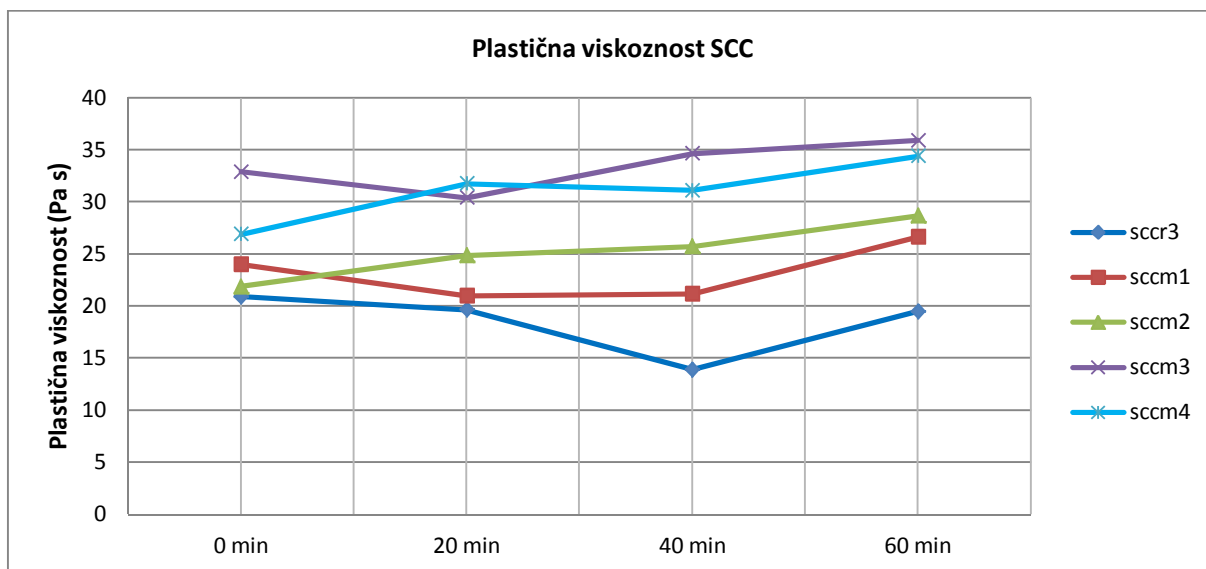
Na grafikonu 1 so prikazane vrednosti plastične viskoznosti SCC betonov pri 0 minut in 60 minut, od mešanice z najmanj, 0,1 % stabilizatorja, do mešanice z največ, 0,35 % stabilizatorja.



Grafikon 1: Plastična viskoznost SCC na podlagi količine stabilizatorja 0-60 min

Na grafikonu 1 opazimo, da z višanjem količine stabilizatorja in manjšanjem količine kamene moke dosežemo višje viskoznosti. Višja viskoznost pomeni višjo stabilnosti betona. Višjo stabilnost malte ali betona pa lahko dosežemo tudi z višjo napetostjo na meji tečenja. Na začetku, pri času 0 minut, je na vrednost plastične viskoznosti za posamezno mešanico močno vplival stabilizator, ki je viskoznost povečal. Ko je učinek stabilizatorja popustil, pa je bila hidratacija cementa in z njo večja viskoznost razlog za vzdrževanje ali rahlo večanje viskoznosti betona s časom. Najvišjo plastično viskoznost pri 0 minut (rdeča krivulja) doseže mešanica SCCM3, katera ima 30% stabilizatorja in 66,5 kg moke. Če primerjamo plastične

viskoznosti po 0 minut in 60 minut vidimo, da ostane razmerje med posameznimi sestavami približno enako s tem, da se vsem mešanicom poveča plastična viskoznost, najbolj pa mešanicama SCCM2 (0,25%) in SCCM4 (0,35%).



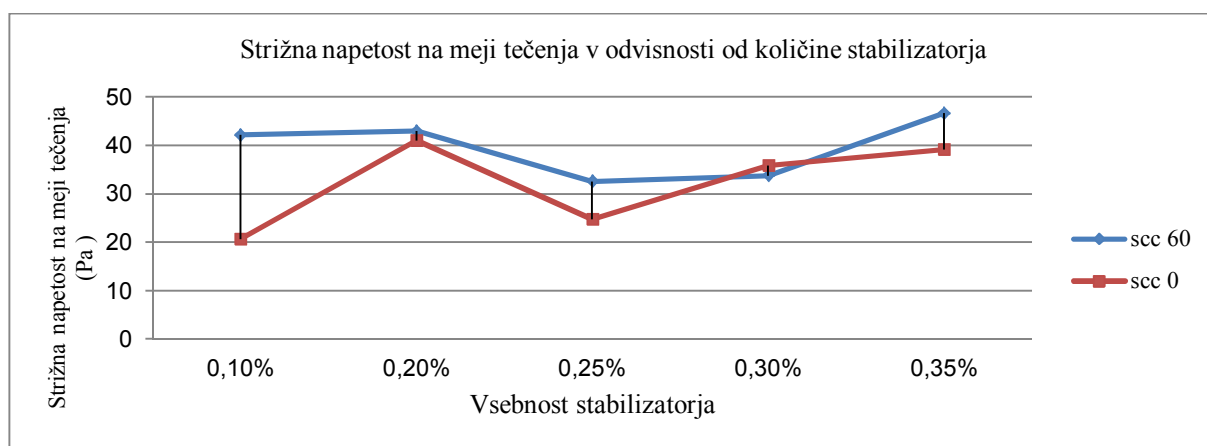
Grafikon 2: Plastična viskoznost SCC betonov

Na grafikonu 2 vidimo, da ima najmanjšo plastično viskoznost mešanica SCCR3 (temno modra krivulja), celo prvo uro po zamešanju. Omenjena mešanica ima na koncu mešanja vrednost plastične viskoznosti 19,5 Pa s, na začetku pa je imela 20,9 Pa s, kar je zanemarljiva razlika. Ostalim mešanicom pa se viskoznost čez čas nekoliko poveča. Pričakoval bi, da se bodo vrednosti bolj povečale, a ker je imel stabilizator največji učinek takoj na začetku, med mešanjem, je njegov prispevek k viskoznosti pozneje manjši. Eno uro po zamešanju imata največjo viskoznost mešanici SCCM3 in SCCM4, kateri imata najvišjo količino stabilizatorja. Mešanica SCCM4 je bila tudi pri meritvi razleza s posedom najbolj viskozna in je dosegla najmanjši razlez s posedom. Največjo razliko med začetno plastično viskoznostjo in končno ima mešanica SCCM4 (razlika je 7,5 Pa s).

Iz rezultatov na grafikonu 2 vidimo, da so vrednosti plastične viskoznosti mešanice z manjšo količino stabilizatorja manjše, kljub večji količini apnenčaste moke. Če primerjam mešanici z največjo količino vsebovanega stabilizatorja (SCCM4-svetlo modra krivulja) in z najmanj stabilizatorja (SCCR3-temno modra krivulja) vidimo, da ima svetlo modra krivulja višje vrednosti plastične viskoznosti, z drugimi besedami, mešanica SCCM4 je bolj »gosta« od

mešanice SCCR3. Opazi se tudi podoben trend odvisnosti plastične viskoznosti v odvisnosti od časa na obeh grafih. Grafa sta tudi dokaj položna – plastična viskoznost se s časom ne spreminja bistveno. Kot sem navedel že zgoraj, je to zaradi večjega vpliva stabilizatorja takoj po zamešanju, pozneje pa je ta vpliv popustil, viskoznost pa se je povečala zaradi pričakovane izgube obdelavnosti betona s časom. Je pa vidno iz grafikona 2, kjer so prikazane plastične viskoznosti vseh mešanic, da ni imela najvišje vrednosti plastične viskoznosti mešanica z največjo količino stabilizatorja (v našem primeru SCCM4 0,35%), ampak mešanica z nekoliko manj stabilizatorja (mešanica SCCM3 0,3%). Mešanice SCC vsebujejo tudi agregat 0/2 in 0/4, kjer je veliko finih delcev, kateri vplivajo na lastnosti svežega betona, še veliko večji vpliv pa imajo na malte, katere so sestavljene samo iz frakcije 0/2.

7.2.2 Strižna napetost na meji tečenja pri povečevanju količine stabilizatorja

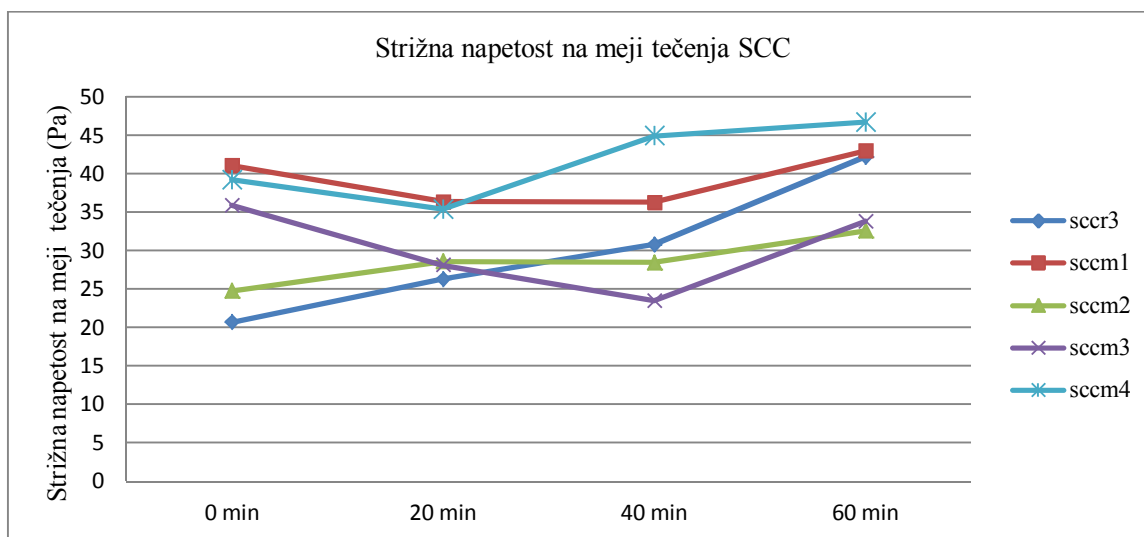


Grafikon 3: Strižna napetost na meji tečenja SCC na podlagi količine stabilizatorja: 0-60 min

Vrednost strizne napetosti na meji tečenja se z večanjem količine stabilizatorja v splošnem večja.

Če pogledamo na grafikonu 3 rdečo krivuljo, katera prikazuje strizne napetosti na meji tečenja pri 0 minut opazimo, da mešanica SCCM1 z 0,2% stabilizatorja doseže najvišjo vrednost, kar je nekoliko nepričakovano in je lahko posledica napake meritve. Če pogledamo še modro krivuljo, ki prikazuje strizne napetosti pri 60 minut, pa je najvišjo vrednost dosegla mešanica SCCM4 z največ stabilizatorja, 0,35 %. Krivulja, ki prikazuje strizne napetosti izmerjene po 60 minutah se giblje okrog vrednosti 40 Pa, lahko tudi zato, ker je učinek stabilizatorja v celoti izničen po 60 minutah po zamešanju. Ostaja le še učinek časa, kar pomeni, da ima

stabilizator na začetku vpliv in na koncu izzveni in ostane le še vpliv časa. Pri mešanici z 0,1% stabilizatorja (SCCR3) je vrednost strižne napetosti na meji tečenja po 60 minutah najbolj narasla. Pri ostalih mešanicah, kjer je bila količina stabilizatorja večja, pa je razlika med začetno in končno vrednostjo minimalna, ker je imel stabilizator na začetku močan vpliv in je nato s časom izzvenel. Z višanjem strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti večamo stabilnost betona, istočasno pa z večanjem strižne napetosti na meji tečenja nižamo sposobnost tečenja in zapolnjevanja. Zato je potrebno oba reološka parametra uravnotežiti, da dosežemo zahtevane lastnosti sveže mešanice.



Grafikon 4: Strižna napetost na meji tečenja SCC

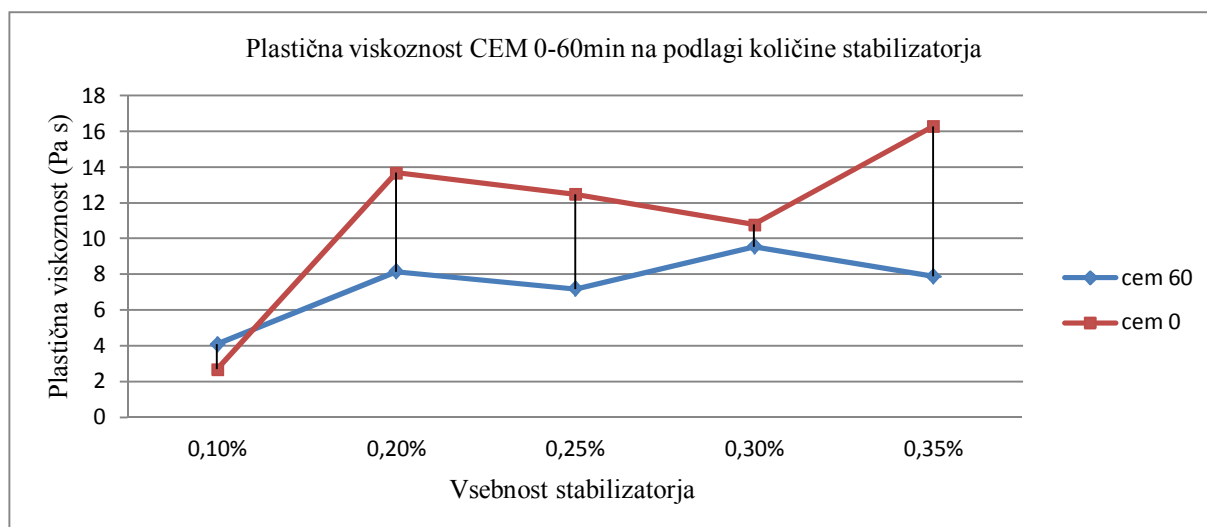
Podobno kot pri grafih viskoznosti (grafikon 2) opazimo tendenco naraščanja tudi strižnih napetosti na meji tečenja pri vseh mešanicah, razen pri mešanici SCCM3 prikazano z vijolično krivuljo, katera ima po eni uri mešanja približno enako strižno napetost kot na začetku mešanja. Največji preskok v vrednosti pa dobimo pri mešanici SCCR3 (temno modra krivulja), ker ni bilo začetnega vpliva stabilizatorja. Pri SCC betonih ima stabilizator učinek na začetku, kasneje ostane le še učinek časa zato se vrednosti strižne napetosti rahlo povečajo. Če primerjam mešanici z največ vsebovanega stabilizatorja (SCCM4 svetlo modra krivulja) in najmanj stabilizatorja (SCCR3 temno modra krivulja) vidim, da je mešanica SCCR3 v celotnem obravnavanem obdobju po zamešanju (60 minut) imela nižje vrednosti strižne napetosti na meji tečenja, od mešanice SCCM4. Opazi se hitrejše naraščanje vrednosti strižne napetosti na meji tečenja s časom pri mešanici SCCR3. Lahko zaključim, da če mešanice

betona ne vsebujejo stabilizatorja ali ga imajo premalo, da bi učinkoval, se jim vrednosti strižnih napetosti opazno povečujejo čez celo uro po zamešanju. Mešanice, pri katerih je količina stabilizatorja večja, dosežejo višjo vrednost strižne napetosti na meji tečenja že med mešanjem in se ta vrednost čez celo uro ne spremeni bistveno oz. se rahlo poveča. Vrednost strižne napetosti na meji tečenja mešanice brez stabilizatorja po 60 minutah doseže podobne vrednosti kot pri mešanici s stabilizatorjem.

7.3 Reološka parametra CEM

7.3.1 Plastična viskoznost CEM pri povečevanju količine stabilizatorja

Na grafikonu 5 so prikazane vrednosti plastične viskoznosti CEM malt pri 0 minut, od mešanice z 0,1% stabilizatorja do mešanice z 0,35% stabilizatorja. Mase ustrezajo enakim odstotkom, kot pri SCC betonih, to je 0,1 % (5,6 g) do 0,35 % (19,6 g).

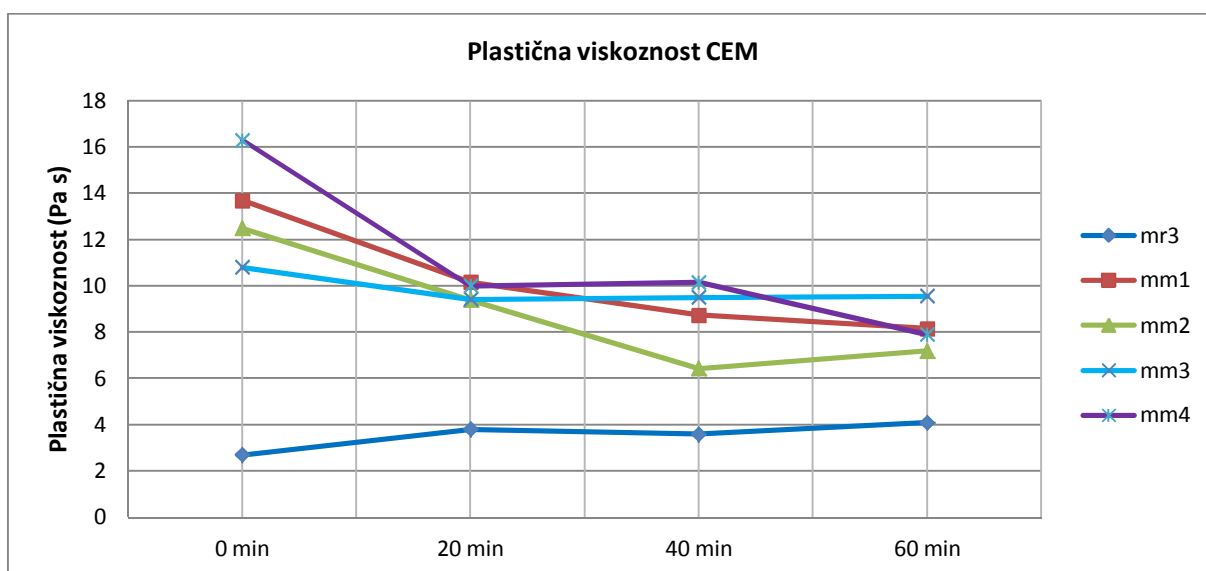


Grafikon 5: Plastična viskoznost CEM na podlagi količine stabilizatorja: 0-60 min

Tudi pri maltah vidimo, da se z večanjem količine stabilizatorja večja plastična viskoznost. Zopet opazimo, da se viskoznost, podobno kot pri betonih, ne povečuje linearno z večanjem količine stabilizatorja. Kot je že prej omenjeno, so te razlike posledica količine finih delcev v manjših frakcijah kamenega agregata, ki jo težko kontroliramo. So pa razlike med plastičnimi

viskoznostmi malt, zaradi spreminjanja deleža stabilizatorja, bistveno večje, kot pri betonih. Stabilizator je imel večji vpliv na malte.

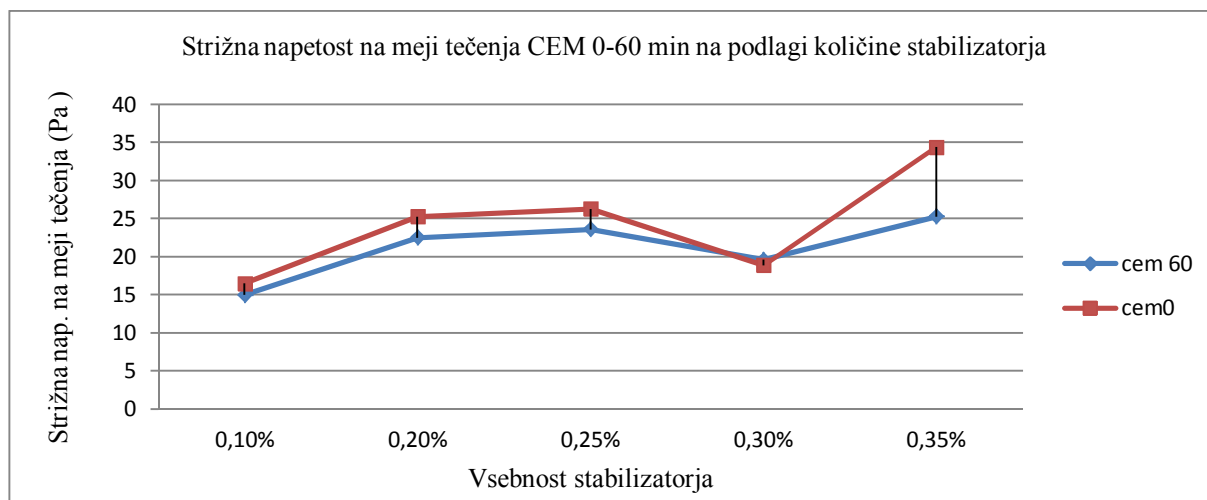
Vrednosti plastične viskoznosti po 60 minut, ki so prikazane na grafikonu 5 z modro krivuljo, so manjše, kot tiste takoj po zamešanju, razen pri mešanici z 0,1 % dodanega stabilizatorja. Gre za bistveno razliko v primerjavi z rezultati SCC betonov, kjer so bile plastične viskoznosti po eni uri večje od začetnih. Vidimo, da je vpliv stabilizatorja pri maltah drugačen, kot pri betonih. To pripisujemo prisotnosti večje količine finih apnenčastih delcev, ki so prisotni v malti, saj le ta vsebuje izključno drobljeno frakcijo 0/2, ki ima velik delež praškastih delcev.



Grafikon 6: Plastična viskoznost CEM malt

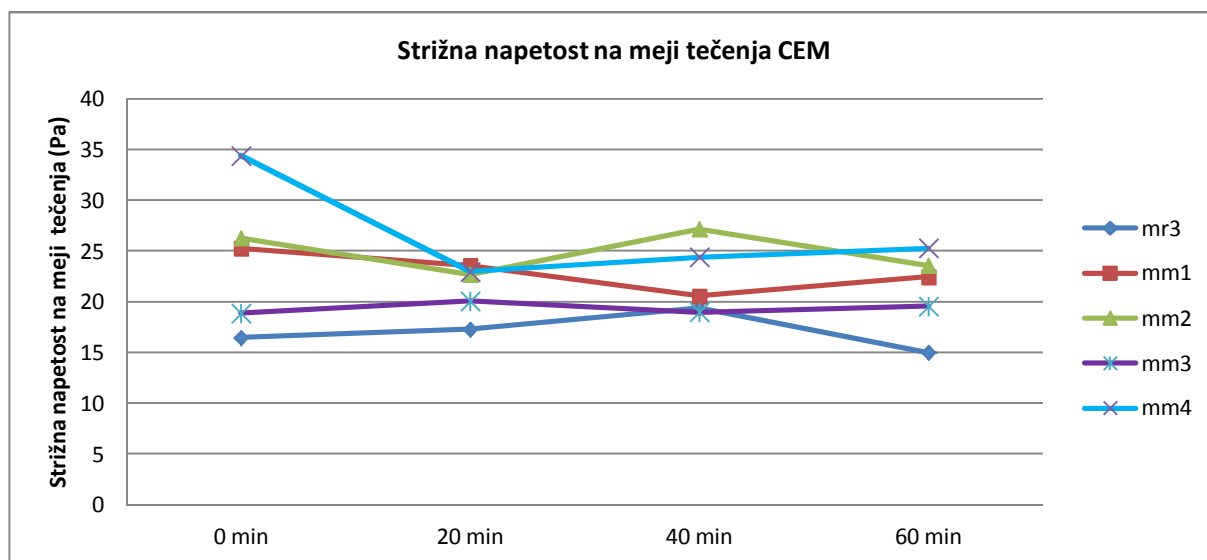
Če pogledamo grafikon 6, kateri prikazuje plastične viskoznosti CEM malt pa vidimo, da se pri vseh mešanicah razen MR3 viskoznost s časom po zamešanju zmanjša. Pri mešanici MR3 z najmanjšo količino stabilizatorja (0,1%) je bil vpliv stabilizatorja zanemarljiv. Pri mešanicah s večjo količino stabilizatorja pa je opaziti takojšen močan vpliv stabilizatorja, kateri s časom očitno izgublja svoj vpliv in se vrednosti plastične viskoznosti zmanjšajo. Mešanicam malt brez stabilizatorja se vrednost plastične viskoznosti s časom ne spreminjajo.

7.3.2 Strižna napetost na meji tečenja CEM pri povečevanju količine stabilizatorja



Grafikon 7: Strižna napetost na meji tečenja CEM na podlagi količine stabilizatorja: 0-60 min

Kot je razvidno iz grafikona 7, je odziv CEM malt na večanje deleža stabilizatorja približno enak po 0 minut in 60 minut. Manjša razlika je le pri mešanici z deležem stabilizatorja 0,35%, kjer je vrednost po 60 minutah malo večja, kot takoj po zamešanju.



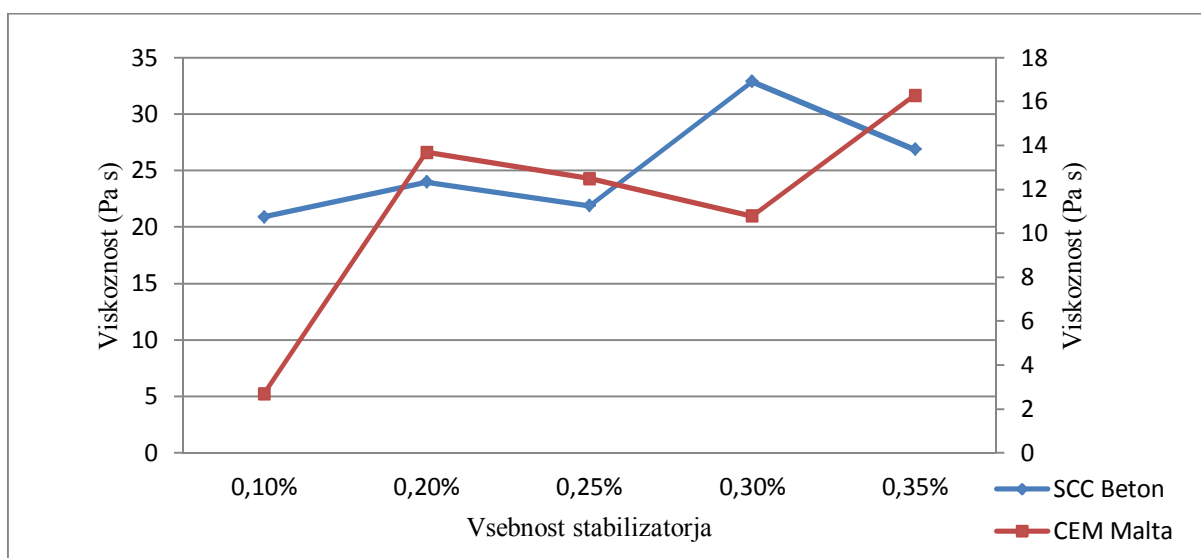
Grafikon 8: Strižna napetost na meji tečenja CEM

Enako kot pri grafikonu 6, kateri prikazuje vrednosti plastične viskoznosti malt, opazimo tudi pri strižni napetosti na meji tečenja, da pri maltah vrednosti upadajo. Drugačen vpliv

stabilizatorja na malte pripisujemo večjemu številu finih delcev in pomanjkanju grobe frakcije agregata. Začetni vpliv stabilizatorja je močnejši kot na betone. S časom izgublja svoj vpliv, ker vrednosti upadajo ali pa ostajajo konstantne.

7.4 Primerjava reoloških parametrov SCC in CEM

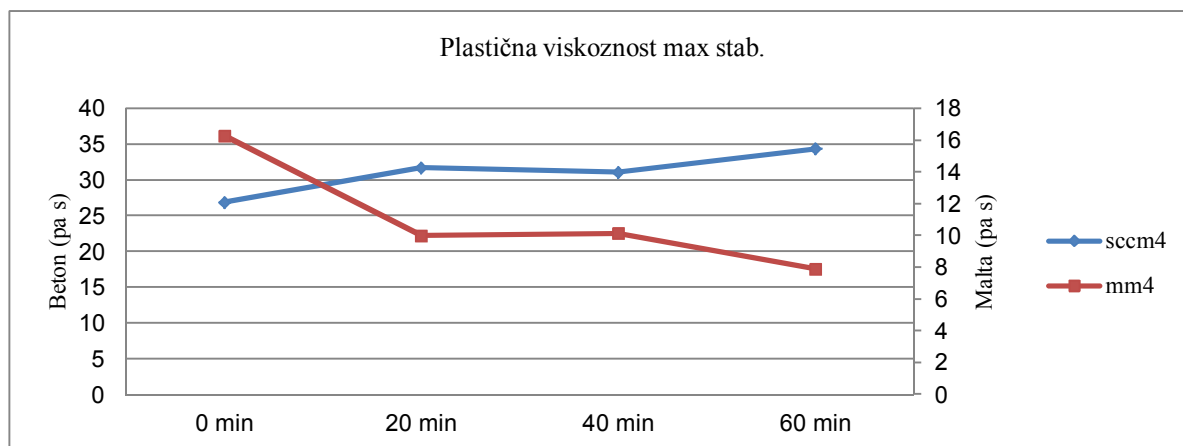
7.4.1 Primerjava plastične viskoznosti



Grafikon 9: Primerjava plastične viskoznosti CEM-SCC pri 0 min

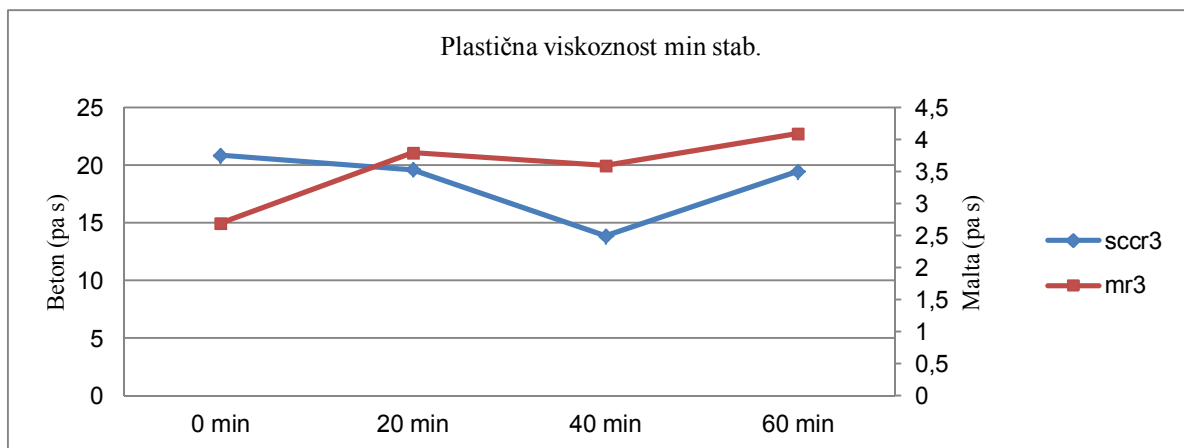
Primerjava plastične viskoznosti SCC betonov in CEM malt pri 0 minut po zamešanju je prikazana na grafikonu 9. Mešanice so razvrščene po vrsti, od mešanice z najmanjšo količino stabilizatorja do mešanice z največ stabilizatorja. Vidimo, da krivulje skačejo. Pri SCC betonu oz. modri krivulji vidimo, da ima mešanica z 0,3% stabilizatorja večjo viskoznost kot mešanica z več stabilizatorja 0,35%, ostale mešanice pa dosegajo približno enak rezultat. Pri CEM malti pa je razgibanost krivulje večja, mešanici z 0,2% in 0,25% stabilizatorja imata recimo večjo plastično viskoznost od mešanice z 0,3% stabilizatorja. Zanimivo je, da ne velja za vse mešanice, da imajo z večjo količino stabilizatorja večjo viskoznost, čeprav je splošen trend naraščanje plastične viskoznosti z naraščanjem deleža stabilizatorja. Pozabiti ne smemo, da smo z večanjem deleža stabilizatorja manjšali delež apnenčeve moke v mešanici, ki prav tako poveča stabilnost sveže malte ali betona. To je verjetno bistven razlog za dobljene

rezultate plastične viskoznosti. Če bi zadržali količino apnenčeve moke konstantno in večali delež stabilizatorja, bi plastična viskoznost mešanic verjetno ves čas naraščala.



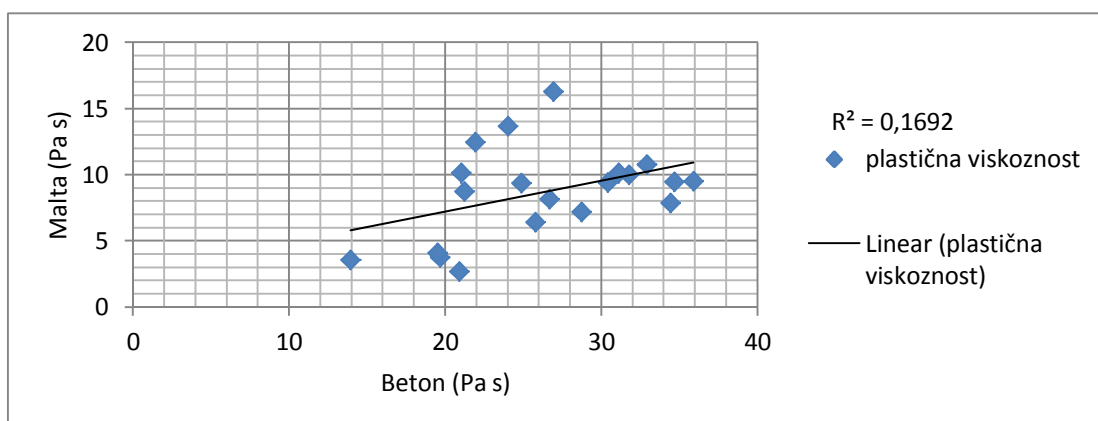
Grafikon 10: Primerjava plastične viskoznosti betona SCCM4 in malte MM4 s 0,35% stabilizatorja

Primerjava plastične viskoznosti mešanic SCCM4 in CEM MM4 z največjo količino stabilizatorja pokaže, da se pri SCC betonu plastična viskoznost v prvi uri po zamešanju ohranja, kar pomeni, da je delež stabilizatorja in apnenčeve moke ustrezno uravnan. Pri malti, ki vsebuje verjetno bistveno večji delež apnenčeve moke in ne vsebuje grobih delcev, pa je učinek stabilizatorja izrazit na začetku, takoj po zamešanju, s časom pa izgublja na učinkovitosti, kar potrjuje bistveno nižanje plastične viskoznosti s časom.



Grafikon 11: Primerjava plastične viskoznosti betona SCCR3 in malte MR3 z 0,1% stabilizatorja

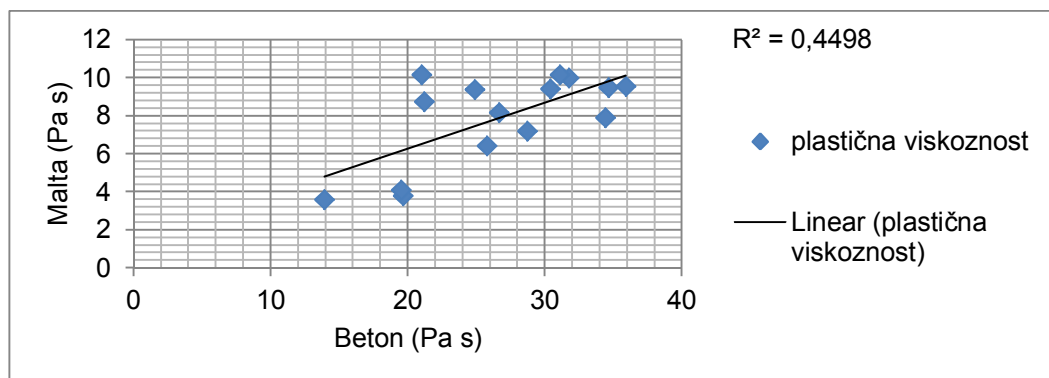
Tudi pri najmanjšem deležu stabilizatorja (grafikon 11) se opazi drugačen vpliv stabilizatorja na beton in na CEM malto. Vendar pa so razlike med rezultati in mešanici majhne, gibljejo se v območju 15 do 23 Pa·s, to je okrog 20 Pa·s. Količina stabilizatorja je bila majhna, količina apnenčeve moke pa velika, zato so v tem primeru rezultati za beton in CEM malto skoraj primerljivi, ko jih gledamo skozi čas. Absolutni rezultati se razlikujejo za faktor, ki se giblje okrog vrednosti 5 do 6.



Grafikon 12: Korelacija plastične viskoznosti CEM-SCC

Pri korelaciji rezultatov plastične viskoznosti (pri 0 min, 20 min, 40 min in 60 min) vidimo, da točke bistveno odstopajo od trendne linije. Tudi rezultat R^2 ima vrednost samo 0,1692, kar

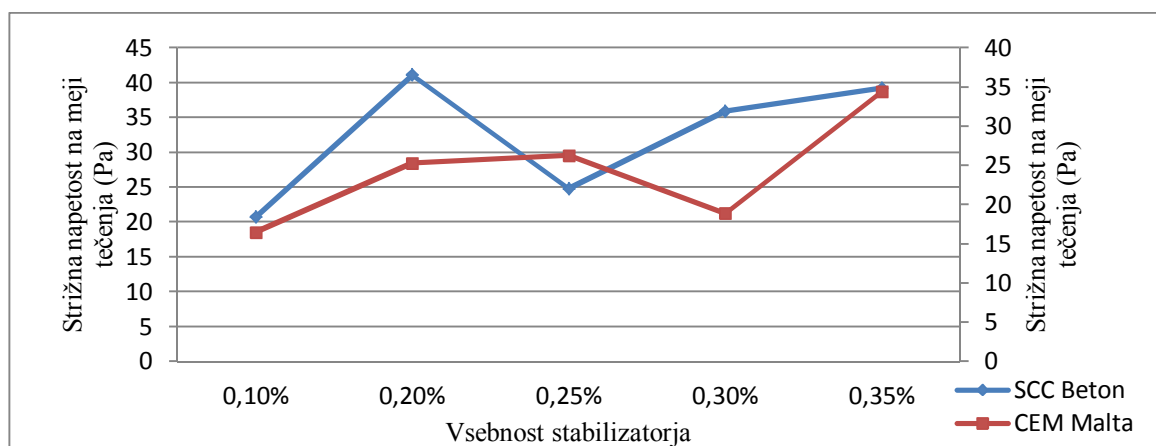
je zelo nizek rezultat. To nam pokaže slabo korelacijo med rezultati SCC betona in CEM malte. To je bilo tudi pričakovano, saj je stabilizator imel drugačen vpliv na beton kot na malto. Različen vpliv ima zaradi različne količine finih delcev, katerih je v malti bistveno več kot pri betonu. Na malte pa ima bistveno večji vpliv, saj CEM malte vsebujejo samo frakcijo kamenega agregata 0/2.



Grafikon 13: Korelacija plastične viskoznosti CEM-SCC, brez meritev pri 0 min

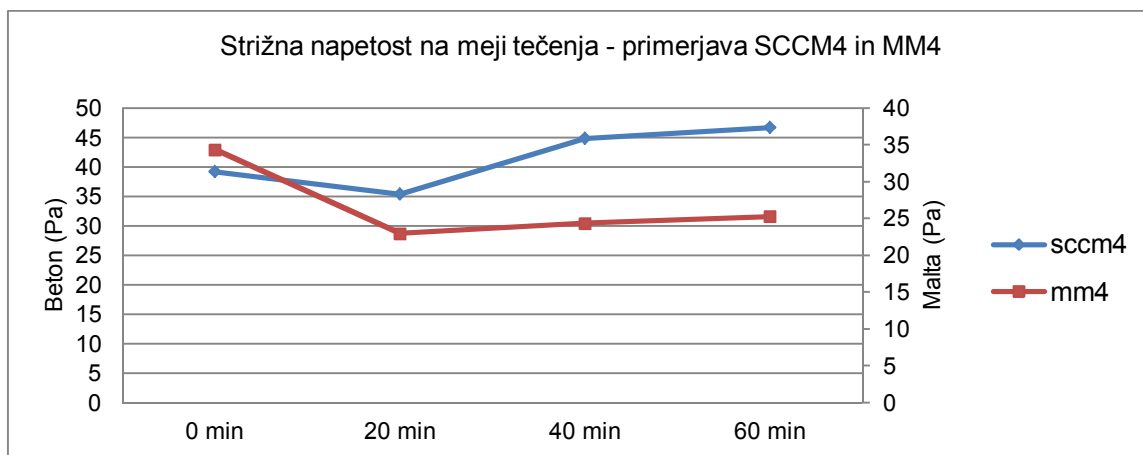
To je korelacija (Grafikon 13), kjer smo upoštevali samo vrednosti plastične viskoznosti pri 20,40 in 60 min. Vrednost R^2 se je zelo povečala, dosegla je vrednost 0,4498. V začetnem merjenju reoloških lastnosti, to je v času 0 min, je imel stabilizator največji vpliv, zato taka razlika v korelaciji med rezultati.

7.4.2 Primerjava strižne napetosti na meji tečenja



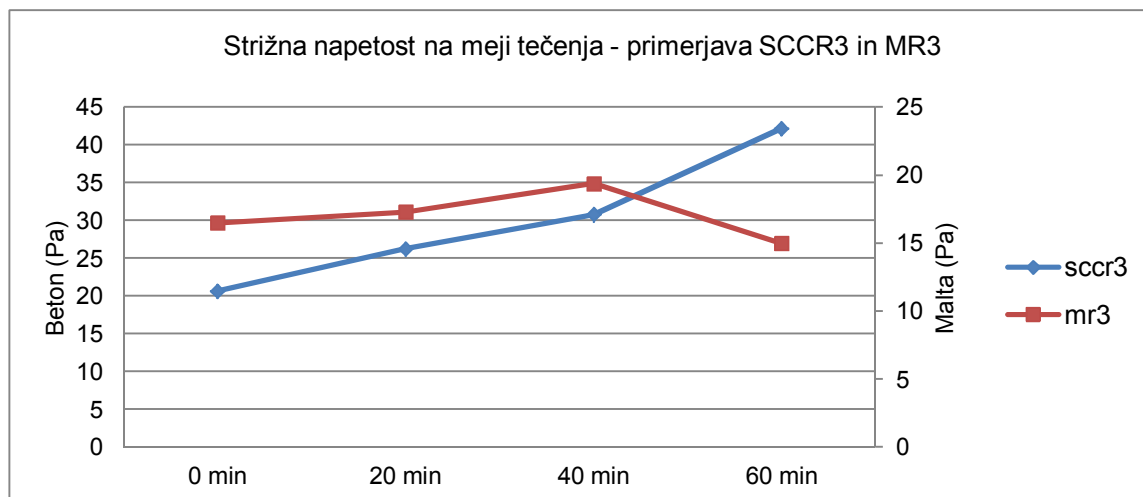
Grafikon 14: Primerjava strižne napetosti na meji tečenja SCC-CEM pri 0 min

Grafikon 14 pokaže, da je tudi pri napetosti na meji tečenja vpliv stabilizatorja na betone drugačen, kot na CEM malte, saj spreminjanje strižne napetosti na meji tečenja z večanjem deleža stabilizatorja ni podobno pri CEM maltah in betonih. To je verjetno zaradi relativno zelo velike količine finih delcev v maltah glede na betone in ker v maltah ni grobih delcev. Vidimo, da so vrednosti strižnih napetosti na meji tečenja za CEM malte nižje kot za betone.



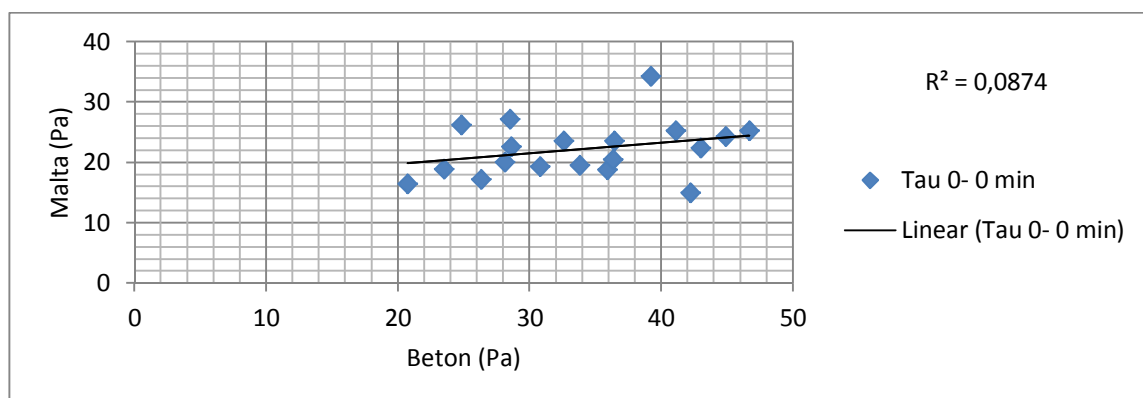
Grafikon 15: Primerjava strižne napetosti na meji tečenja SCCM4-MM4 z 0,35% stabilizatorja

Grafikon 15 prikazuje primerjavo grafov mešanic SCCM4 in CEM MM4 z največjo količino stabilizatorja. Vrednosti strižne napetosti na meji tečenja so pri CEM malti manjše kot pri SCC betonu. Ocenim lahko, da stabilizator v času 0 bolj poveča strižno napetost na meji tečenja CEM malte, v primerjavi s SCC betonom. Potem njegov učinek popusti in strižna napetost na meji tečenja CEM malte se bistveno zmanjša. Pri betonu, ki vsebuje drugačno zrnovostno sestavo agregata (tudi večja agregatna zrna) pa je očitno oblikovanje strukture betona s časom drugačno, kot pri malti (ki ima primerjalno več paste zaradi večje količine finih delcev), zato pri betonu napetost na meji tečenja s časom narašča.



Grafikon 16: Primerjava strižne napetosti na meji tečenja SCCR3 -MR3 z 0,1% stabilizatorja

Na grafikonu 16 je prikazano časovno odvisno spreminjanje napetosti na meji tečenja za SCC beton in CEM malto z najmanjšim deležem stabilizatorja in največjo količino dodane apnenčeve moke. Za ta primer bi lahko rekli, da se nekje do časa 40 minut mešanici obnašata podobno. Če pa pogledamo absolutne vrednosti parametra, pa lahko zaključimo, da se napetost na meji tečenja za CEM malto giblje okrog 17 Pa (od 15 do 20 Pa) in je dokaj konstantna, pri betonu pa se s časom veča, od 20 do 42 Pa. Primerjava z največjim deležem stabilizatorja (grafikon 15) pokaže podoben odziv mešanic SCCM4 in CEM MM4, če zanemarimo rezultat pri času 0 min, to je, če upoštevamo le čas, ko učinek stabilizatorja popusti.



Grafikon 17: Korelacija strižne napetosti na meji tečenja SCC-CEM

Korelacija vrednosti strižnih napetosti na meji tečenja malt in betonov je slaba. Točke rezultatov odstopajo od trendne linije, tudi rezultat R^2 je zelo nizek, doseže vrednost 0,0874.

7.5 Rezultati meritve obdelavnosti SCC betonov in CEM malt

Rezultate meritev obdelavnosti enako kot pri rezultatih reoloških meritev podam najprej v preglednicah in nato še v grafikonih. Meritve so potekale vzporedno z reološkimi meritvami v 20 minutnih intervalih. Meritev obdelavnosti je bila za razliko od meritev reoloških parametrov (tri meritve) samo ena.

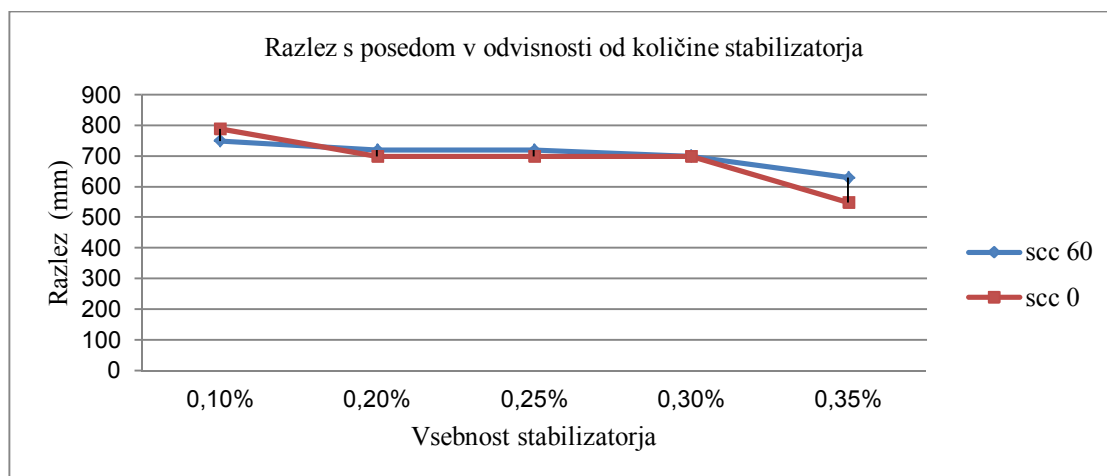
Preglednica 8: Rezultati obdelavnosti SCC

Mešanice SCC z rezultati razlezov v mm					
	R3	M1	M2	M3	M4
0 min	790	700	700	700	550
20 min	760	740	720	710	660
40 min	760	730	720	700	620
60 min	750	720	720	700	630

Preglednica 9: Rezultati obdelavnosti CEM

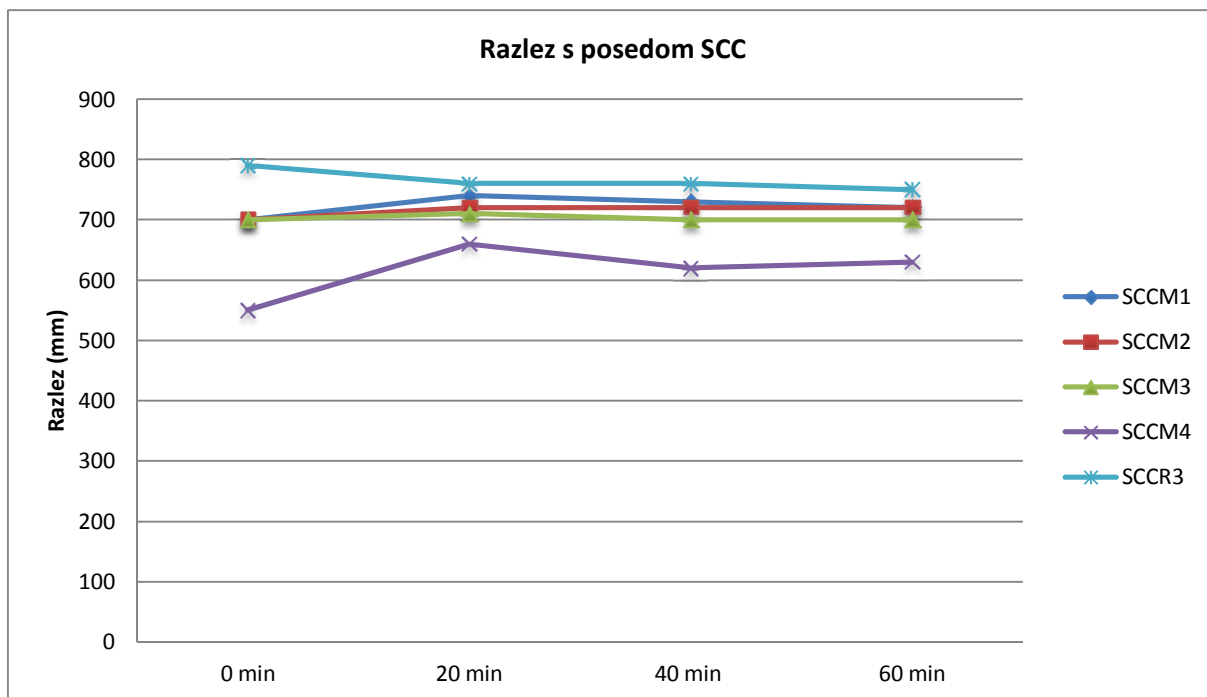
Mešanice CEM z rezultati razlezov v mm					
	R3	M1	M2	M3	M4
0 min	460	310	320	360	270
20 min	480	380	390	370	350
40 min	450	380	380	390	380
60 min	460	390	380	400	370

7.5.1 Razlez s posedom SCC pri povečevanju količine stabilizatorja



Grafikon 18: Primerjava razleza s posedom SCC 0-60 min

Iz grafikona 18 razberemo, da se je premer razleza z večanjem količine stabilizatorja sicer zmanjševal, vendar so bili rezultati za deleže stabilizatorja od 0,2 % do 0,3 % enaki. Večja kot je bila količina stabilizatorja v mešanici, manjši je bil izmerjen premer razleza. Razlika med mešanico z najmanj in največ stabilizatorja je dobrih 200 mm. Razlika v obdelavnosti je opazna. Stabilizator ni spremenil obdelavnosti v času do 60 min po zamešanju betonov. Krivulji na grafikonu 18 ne odstopata veliko v vrednostih. Pri primerjavah med začetno (0 min) in končno (60 min) vrednostjo reoloških parametrov in parametrov obdelavnosti so bile najmanjše razlike pri vrednostih razleza s posedom. To pomeni, da stabilizator drugače vpliva na obdelavnost in drugače na reološke lastnosti betonske mešanice.



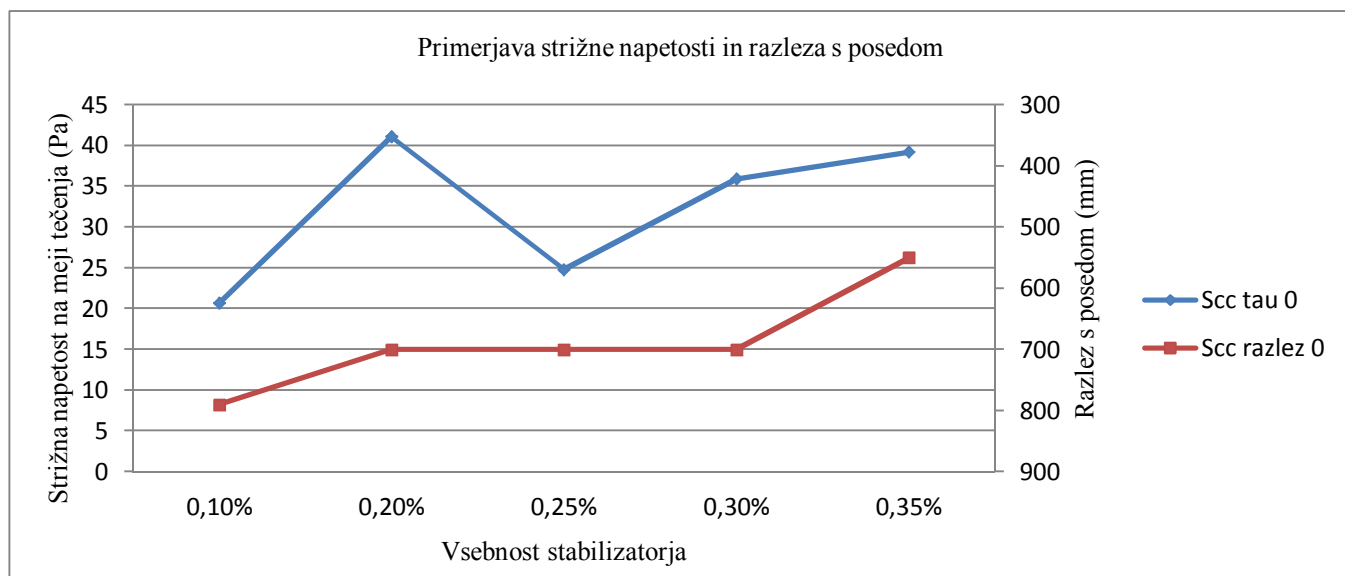
Grafikon 19: Razlez s posedom za SCC

Najmanjši razlez pri 0 min po mešanju pa ima mešanica SCCM4, in sicer 550 mm, ki ravno še spada na spodnjo mejo obdelavnosti SCC betonov. Največji razlez pa mešanica SCCR3, 790 mm. Mešanica SCCM4 ima največjo količino agregata od vseh mešanic in najmanjšo količino dodane moke (0 kg). Ima tudi največjo količino stabilizatorja, 0,35% na maso cementa. Pri tej mešanici opazimo, da stabilizator na začetku hitro začne delovati kasneje pa rahlo popusti in dobimo malo večje razleze.

Mešanice SCCM1, SCCM2 in SCCM3 imajo primerljive rezultate obdelavnosti ves čas, od 0 do 60 min po zamešanju betona. Vse tri so približno enako obdelavne, kar smo tudi želeli doseči. Pri mešanici SCCM2 smo pri merjenju razleza opazili, da se na sredini »kupčka« nabirajo večja zrna, kar kaže na rahlo segregacijo. Segregacijo je bilo opaziti tudi pri mešanicah SCCM3 in SCCM4, kjer se je ta pojav stopnjeval. To pomeni, da večanje količine stabilizatorja, ob istočasnem zmanjšanju količine apnenčeve moke, ni ekvivalenten ukrep z vidika zagotavljanja stabilnosti (odpornosti na segregacijo) mešanic.

Če primerjamo krivulji na grafikonu 19 z največ stabilizatorja (SCCM4) in najmanj stabilizatorja (SCCR3) vidimo, da se razlez s posedom pri mešanici SCCR3 bistveno ne spremeni. Učinek stabilizatorja je skozi vseh 60 minut po zamešanju približno enak. Pri mešanici z največ stabilizatorja je začetni učinek stabilizatorja na razlez s posedom večji, potem pa popusti. Začetna razlika v razlezih med mešanicama z največ in najmanj

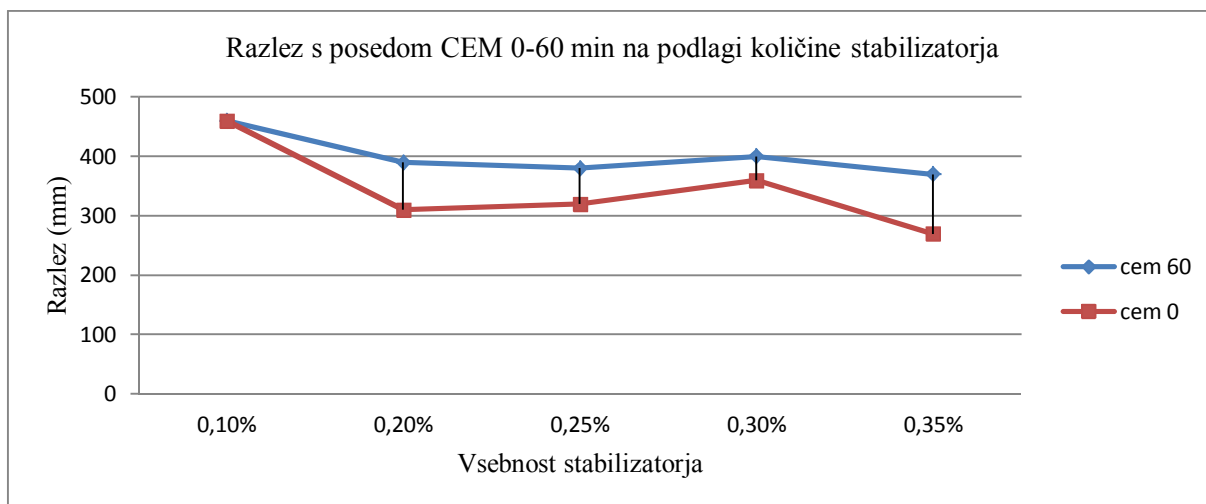
stabilizatorja je pri 0 minut po zamešanju približno 250 mm, po 20 minutah pa se zmanjša na približno 150 mm.



Grafikon 20: Prikaz sovpadanja strižne napetosti in razleza SCC pri 0 min

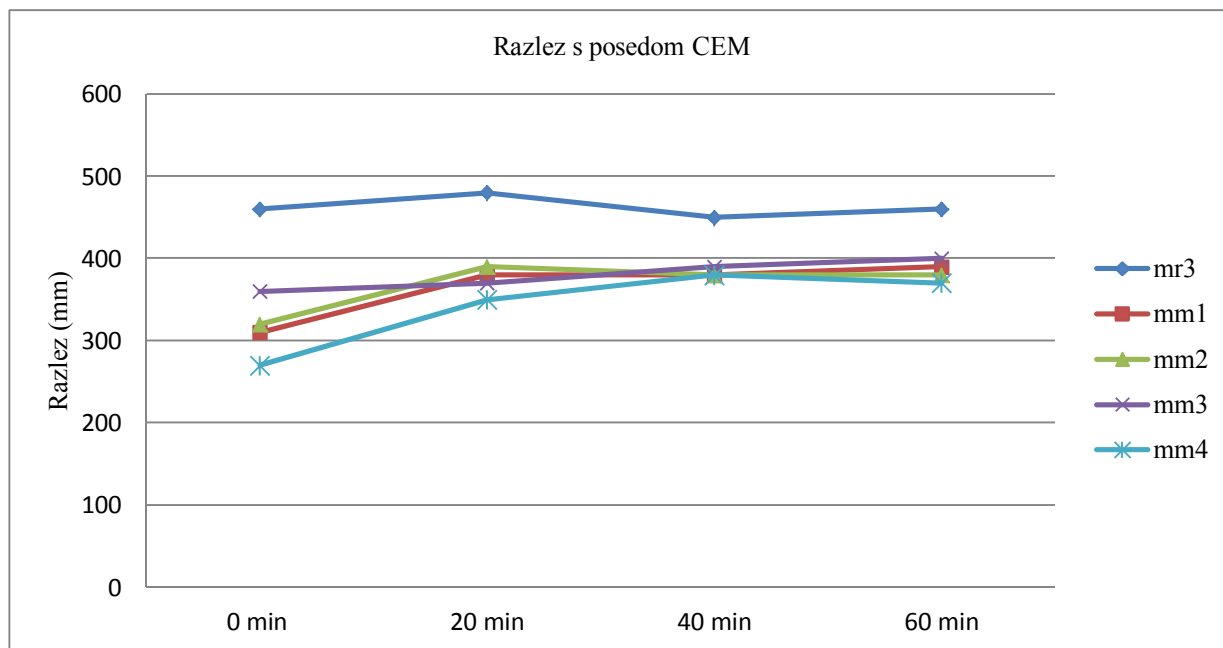
Na grafikonu 20 sem hotel prikazati vpliv strižne napetosti na meji tečenja na lastnosti obdelavnosti betona. Višja kot je strižna napetost na meji tečenja manjši je razlez in obratno. Najnižjo strižno napetost na meji tečenja ima mešanica SCCR3 (20,7 Pa) in največji razlez (790 mm). Mešanica katera izstopa v vrednosti strižne napetosti je SCCM1, kar je bila verjetno posledica napake med meritvijo. Mešanica z največjo količino stabilizatorja SCCM4 ima najvišjo vrednost strižne napetosti na meji tečenja (39,2 Pa) in najmanjši razlez (550 mm). Grafa strižne napetosti in razlez si lepo sledita z izjemo omenjene mešanice M1.

7.5.2 Razlez s posedom CEM pri povečevanju količine stabilizatorja



Grafikon 21: Primerja razleza s posedom CEM: 0-60 min

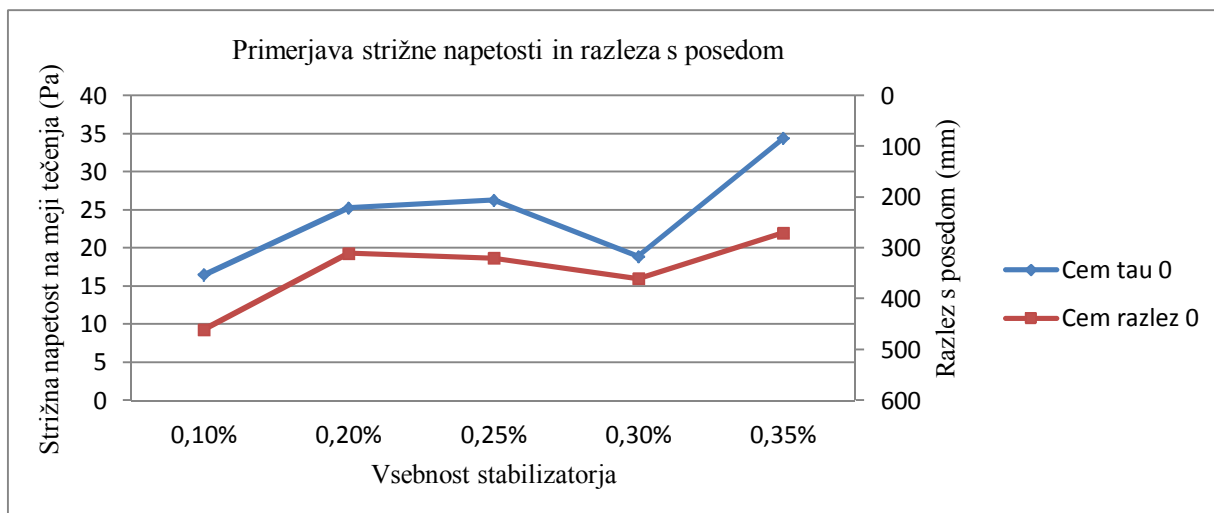
Na grafikonu 21 opazim, da se z večanjem količine stabilizatorja premer razleza s posedom najprej izrazito zmanjša med količino stabilizatorja 0,1 % in 0,2 %, potem je približno konstanten do 0,3 % in potem se, s povečanjem deleža stabilizatorja na 0,35 %, ponovno zmanjša. Stabilizator je pri deležih 0,2 % ali več skozi čas izgubljal svoj vpliv ali pa je razlika v rezultatih le posledica časa in stabilizator od 20 min naprej nima več vpliva. Pri maltah je krivulja malo bolj razgibana kot pri SCC betonih (grafikon 18), kar je pričakovano, zaradi količine finih delcev v maltah, ki jo težko kontroliramo. Če gledamo rdečo krivuljo (grafikon 21) katera prikazuje začetne razleze, je razlika v premeru med mešanico s 5,6 g (0,1 %) in 19,6 g (0,35 %) stabilizatorja približno 200 mm. Pri končnih razlezih (modra krivulja) pa je ta razlika nekoliko manjša, približno 100 mm. Stabilizator ima približno podoben vpliv na obdelavnost malt kot na betone. Iz grafikona 21 vidimo, da so razlezi po 60 min večji od začetnih razlezov. Pri betonu je bila razlika med začetnimi in končnimi razlezi bistveno manjša kot pri maltah. Opazen je drugačen vpliv stabilizatorja na betona in malte, res pa je, da gre za manjšo razliko kot v primeru viskoznosti in strižne napetosti. Večjo razliko med začetnimi in končnimi razlezi pripišemo močnemu začetnemu vplivu stabilizatorja na malte.



Grafikon 22: Razlez s posedom CEM

Iz rezultatov prikazanih na grafikonu 22 lahko vidimo, da je spreminjanje razleza s posedom s časom za CEM malte podobno, kot pri SCC betonih na grafikonu 19. Najbolj odstopa mešanica MR3, označena z temno modro barvo na grafikonu 22, z največjim razlezom 460 mm, če gledamo razleze pri 0 min. Najmanjši razlez pa ima mešanica MM4, to je 270 mm. Ostale tri mešanice pa se obnašajo približno enako. Pri mešanici MM4 pa smo imeli največjo količino stabilizatorja, to je 0,35 %.

Če primerjamo mešanico z največ stabilizatorja (MM4 svetlo modra krivulja) in mešanico z najmanj stabilizatorja (MR3 temno modra krivulja) opazimo podobno obnašanje mešanic. Stabilizator je imel večji vpliv na začetku pri mešanici MM4, ker se ji čez celo uro razlez povečuje. Pri mešanici MR3 pa stabilizator ni imel bistvenega vpliva, saj se vrednosti na temno modri krivulji čez celo uro bistveno ne spremenijo. Takoj po zamešanju mešanic je imela mešanica MM4 200 mm manjši premer razleza kot mešanica MR3. Po 60 minutah pa se ta razlika razpolovi približno na 100 mm.

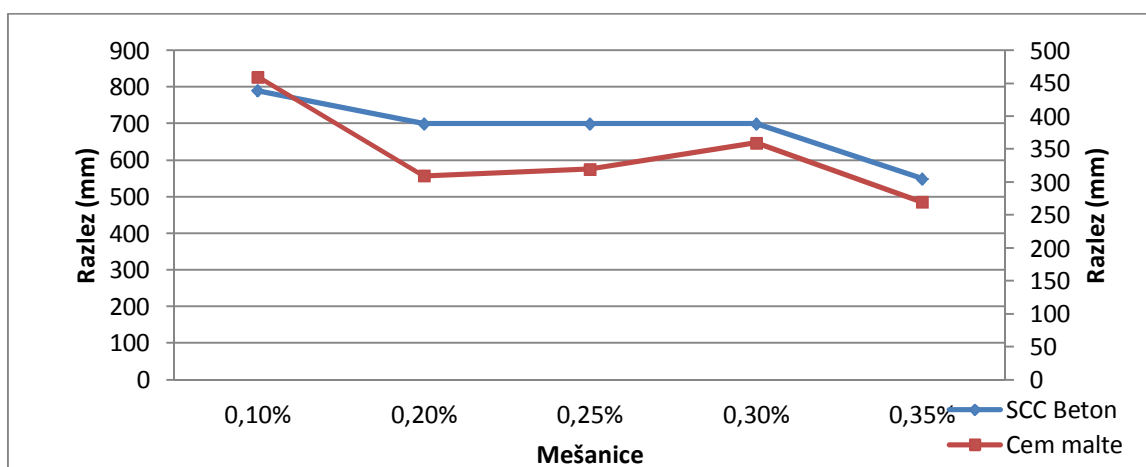


Grafikon 23: Prikaz sovpadanja strižne napetosti in razleza CEM pri 0 min

Na grafikonu 23 lahko pridemo do istega zaključka kot pri grafikonu 20, da višja kot je strižna napetost na meji tečenja manjši je premer razleza in obratno. Mešanica MM4 ima najvišjo vrednost strižne napetosti na meji tečenja (34,4 Pa) in najmanjši razlez (270 mm). Mešanica MR3 pa je imela najnižjo vrednost na meji tečenja (16,3 Pa) in največji izmerjen razlez (460 mm).

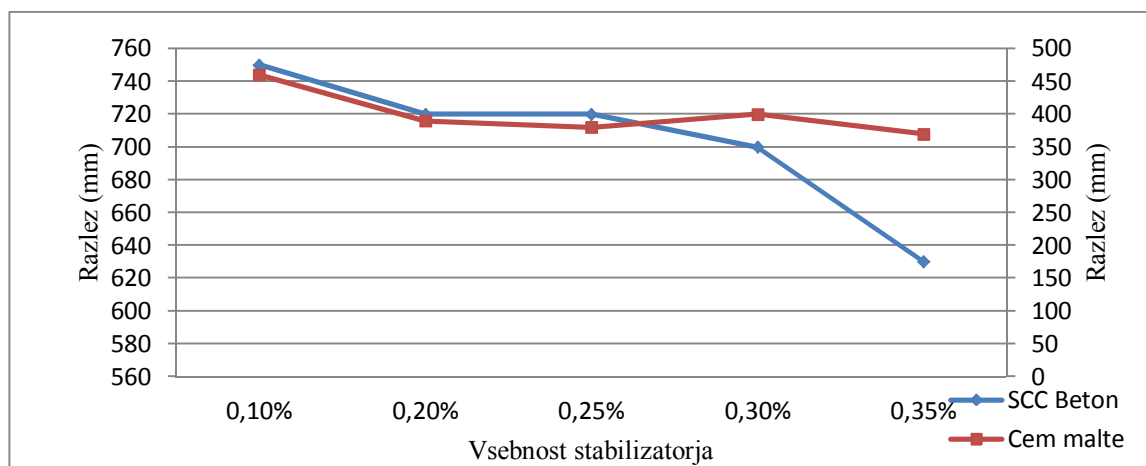
7.6 Primerjava obdelavnosti SCC – CEM

7.6.1 Primerjava rezultatov obdelavnosti

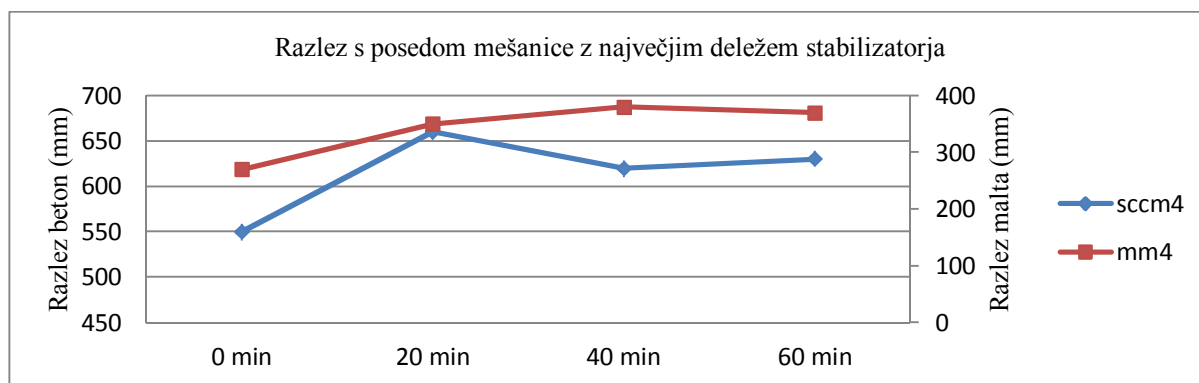


Grafikon 24: Primerjava razleza s posedom SCC-CEM pri 0 min

Grafikon 24 prikazuje vrednosti razleza s posedom v odvisnosti od deleža stabilizatorja za SCC betone in CEM malte pri času 0, grafikon 30 pa pri času 60 min. Vidimo, da se grafa betona in malte relativno dobro ujemata pri obeh časih. Pri betonih in pri maltah se z višanjem količine stabilizatorja zmanjša razlez, kar je pričakovano. Pri času 60 min (grafikon 25) in največjem deležu stabilizatorja pa je razhajanje med rezultati relativno veliko zaradi bistveno večjega znižanja razleza s posedom pri betonu, v primerjavi z malto.

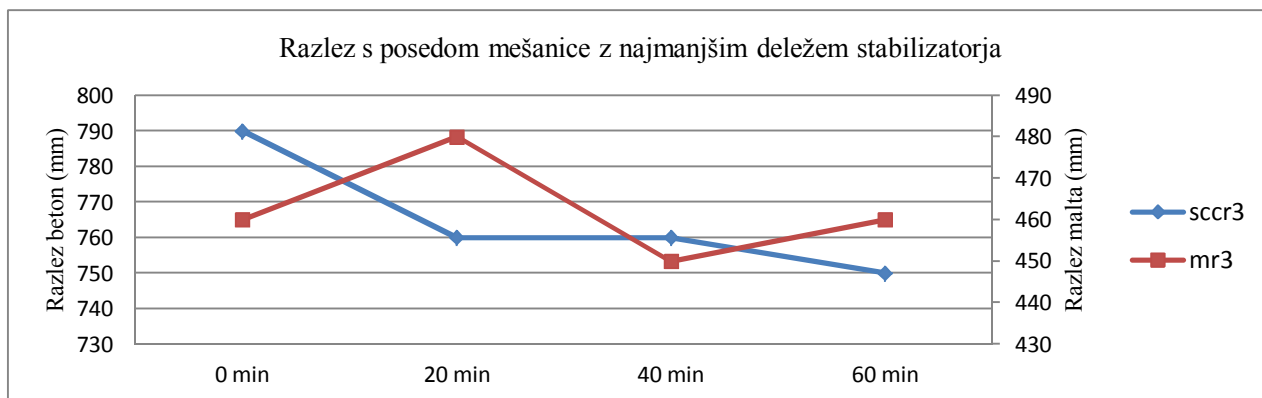


Grafikon 25: Primerjava razleza SCC-CEM pri 60 min



Grafikon 26: Primerjava razleza SCCM4-MM4 z 0,35% stabilizatorja

Če primerjamo mešanici SCC in CEM z največjo količino stabilizatorja (grafikon 26) opazimo v grobem podoben vpliv, oba imata tendenco naraščanja razleza s časom. Pri obeh mešanicah je vpliv stabilizatorja s časom slabel oz. je imel močan začetni vpliv, nato je ostal le učinek časa ali delovanja drugega dodatka (superplastifikatorja).



Grafikon 27: Primerjava razleza SCCR3-MR3 z 0,1% stabilizatorja

Če pogledamo obe mešanici z najmanjšo količino vsebovanega stabilizatorja (grafikon 27) vidimo, da stabilizator s časom ni izgubljal vpliva, saj se razlez po eni uri ni povečal. Tako pri mešanicah z najmanjšo količino stabilizatorja, kot pri tistih z največjo količino vidimo, da sta grafa CEM malt bolj razgibana kot SCC betonov. Vpliv stabilizatorja pri SCC je majhen ali ga sploh ni. Večji vpliv je imel pri CEM malti, kar zaključimo po bolj razgibanem grafu.

8 ZAKLJUČEK

Opravljali smo poskuse na svežih betonskih mešanicah. Bilo je sprojektirano večje število mešanic. Merili smo reološke lastnosti in lastnosti obdelavnosti mešanic SCC betonov in njim ekvivalentnih CEM malt. Reološka parametra, plastično viskoznost in strižno napetost na meji tečenja, smo merili z reometrom ConTec Viskometer 5. Podatke o obdelavnosti pa smo določali z metodo razleza s posedom. Dobljene rezultate smo primerjali med seboj in poskusili dobiti korelacijo med mešanicami SCC betonov in njim ekvivalentnimi CEM maltami. Če bi se dalo napovedati obnašanje betona na podlagi rezultatov obnašanja malt, bi zmanjšali čas in stroške potrebne za izdelavo raznih analiz in raziskav, saj je veliko lažje in hitreje opraviti poizkuse na maltah. Porabi se tudi manj materiala in energije.

Primarno sem se osredotočil na vpliv količine apnenčaste moke in količine stabilizatorja na lastnosti mešanic SCC betona in njim ekvivalentnih CEM malt.

8.1 Plastična viskoznost

Pri SCC betonih smo pričakovali porast plastične viskoznosti s časom, od 0 min do 60 min po zamešanju betona. Pri skoraj vseh mešanicah se je viskoznost s časom do konca opazovanja (60 min) nekoliko povečala, razen pri mešanici SCCR3. Vendar spremembe niso bile zelo velike. To, da ni bilo velikega porasta viskoznosti s časom pri SCC betonih pripisujemo takojšnjem vplivu stabilizatorja (že med mešanjem) in poznejši hitri izgubi njegovega učinka. Pri mešanicah CEM malt pa je bil opažen trend padanja plastične viskoznosti pri skoraj vseh mešanicah razen pri mešanici MR3. Na MR3 stabilizator ni imel enakega vpliva, kot na ostale CEM malte. Tako pri betonih kot pri maltah je najnižje vrednosti dosegla mešanica R3, z najmanjšo količino stabilizatorja in največjo količino moke. Na ti dve mešanici stabilizator ni imel bistvenega vpliva.

Stabilizator drugače vpliva na SCC betone kot na CEM malte. To je zaradi različne sestave mešanic in bistveno večjega števila drobnih delcev (finih – prahu) v CEM maltah, ki vsebujejo le frakcijo agregata 0/2.

Je pa opažen trend povečevanja plastične viskoznosti s povečevanjem količine stabilizatorja v mešanicah, tako pri SCC betonih, kot pri CEM maltah. Ta odstopanja smo pripisali količini finih delcev, ki se nahajajo v frakcijah 0/2 in 0/4 in jih težko kontroliramo.

8.2 Strižna napetost na meji tečenja

Podobna opažanja kot pri plastični viskoznosti, so tudi pri strižni napetosti na meji tečenja. Vrednosti strižne napetosti na meji tečenja se med časom 0 min in 60 min po zamešanju praviloma povečajo, vendar zelo različno in odvisno od deleža stabilizatorja. Povečanje je največje pri mešanici SCCR3. Na začetku ima SCCR3 sicer najmanjšo vrednost strižne napetosti na meji tečenja, kar je pričakovano, zaradi najnižje količine stabilizatorja. Ker ni začetnega učinka stabilizatorja se vrednost strižne napetosti dviguje vseh 60 minut.

Pri CEM maltah pa je, podobno kot pri plastični viskoznosti, opažen trend padanja vrednosti strižne napetosti na meji tečenja s časom vse od 0,2 % deleža stabilizatorja naprej. Pri mešanici z najnižjo količino stabilizatorja MR3 pa so vrednosti skozi celo uro približno konstantne. Do različnih trendov obnašanja mešanic SCC betonov in njim ekvivalentnih CEM malt prihaja zaradi različne zrnastostne sestave agregata v mešanicah in nekontrolirane količine prašnih delcev v frakcijah 0/2 in 0/4, katerih je pri maltah bistveno več.

8.3 Razlez s posedom

Pri razlezu opazimo podobno obnašanje tako SCC betonov kot njim ekvivalentnih CEM malt. Pri SCC in CEM imata največji razlez mešanici R3 z najmanj stabilizatorja, najmanjšega pa mešanici M4, kateri vsebujeta največ stabilizatorja. Pri mešanicah SCC je bila razlika med začetnim in končnim razlezom majhna, pri CEM pa malo večja. Vpliv stabilizatorja zopet ni enak na SCC kot na CEM mešanice. Stabilizator je imel večji vpliv na začetku, kasneje pa je njegov učinek popustil. Je pa opazna večja podobnost obnašanja obeh mešanic, kot pri primerjavi reoloških parametrov. Pri SCC mešanicah z manjšo količino moke je prišlo do pojava segregacije in to kljub povečani količini stabilizatorja.

VIRI

Roko Žarnić. 2005, Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij. 351 str.

Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C Panarese. 2002, Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2002, 358 str.

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

G.H Tattersall, P.F.G. Banfill. 1983, Rheology of fresh concrete, Pitman Publishing Pty Ltd, Melbourne, Pitman Publishing New Zeland Ltd, Wellington. 368 str.

Hočevar, A., Bokan Bosiljkov, V., Kavčič, F. 2010. Preskušanje svežih betonov - uvod v reologijo. V:

Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). 32. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije,

Bled, Slovenija, 7.-8. oktober 2010. Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: p. 207-216.

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

Schwartzentruber, A., Catherine, C. 2000. Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - A new tool to design concrete containing admixture. Materials and Structures 33: 475-482.

DRUGI VIRI:

Metode preiskav. <https://grace.com/construction/en-ca/Documents/TB-1506SCC.pdf#search>
(pridobljeno 25.7.2014.)

Reometer. <http://www.contec.is/page11.htm> (Pridobljeno 25.7.2014.)

STANDARDI:

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

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

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