

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:

Erdani, U. 2012. Primerjava reoloških lastnosti svežih malt in betonov z enako razvito površino agregatnih zrn. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Hočevar, A.): 63 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:

Erdani, U. 2012. Primerjava reoloških lastnosti svežih malt in betonov 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.): 63 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
PRVE STOPNJE
OPERATIVNEGA
GRADBENIŠTVA**

Kandidat:

UROŠ ERDANI

**PRIMERJAVA REOLOŠKIH LASTNOSTI SVEŽIH
MALT IN BETONOV Z ENAKO RAZVITO POVRŠINO
AGREGATNIH ZRN**

Diplomska naloga št.: 21/OG-MK

**COMPARISON OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF
FRESH MORTAR AND CONCRETE WITH THE SAME
SURFACE AREA OF AGGREGATE GRAINS**

Graduation thesis No.: 21/OG-MK

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Somentor:

Andraž Hočevar, univ.dipl.inž.grad.

Član komisije:

doc. dr. Sebastjan Bratina

Ljubljana, 24. 09. 2012

IZJAVE

Podpisani **Uroš Erdani** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »**Primerjava reoloških lastnosti svežih malt in betonov z enako razvito površino agregatnih zrn**«.

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

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

Ljubljana, 10.9.2012

Uroš Erdani

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.32:(043.2)
Avtor:	Uroš Erdani
Mentor:	prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, univ. dipl. ing. grad.
Somentor:	Andraž Hočevar, univ. dipl. ing. grad.
Naslov:	Primerjava reoloških lastnosti svežih malt in betonov z enako razvito površino agregatnih zrn
Obseg in oprema:	63 str., 7 pregl., 71 sl.
Ključne besede:	reologija, reološke lastnosti, dodatki, metoda CEM

IZVLEČEK

Zaradi vedno kompleksnejših gradenj so reološke lastnosti svežega betona, kot sta napetost na meji tečenja in plastična viskoznost, ključnega pomena za učinkovito vgradnjo in stabilnost betonske mešanice. Lastnosti svežega betona lahko modificiramo z uporabo kemijskih in mineralnih dodatkov. Namen diplomske naloge je primerjava reoloških lastnosti svežega betona in njemu enakovredne malte, ki smo jo določili po metodi CEM (»concrete equivalent mortar«). Metoda CEM je relativno nova metoda, s pomočjo katere lahko iz recepture za beton izračunamo recepturo za malto, katere reološke lastnosti naj bi kazale korelacijo z reološkimi lastnostmi betona. Meritve smo izvedli na 26 različnih sestavah malt, ki so vsebovale različne kemijske in/ali mineralne dodatke. Meritve so bile opravljene na aparatu za merjenje reoloških lastnosti ConTec Viscometer 5. Opravili smo tudi standardne meritve razleza malte na stresalni mizici. Rezultate preiskav na maltah smo primerjali z rezultati preiskav na betonih, ki so bile opravljene v okviru drugih diplomskih nalog.

BIBLIOGRAPHIC - DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 691.32:(043.2)
Author: Uroš Erdani
Supervisor: prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, univ. dipl. ing. grad.
Co-advisor: Andraž Hočevar, univ. dipl. ing. grad
Title: Comparison of rheological properties of fresh mortar and concrete with the same surface area of aggregate grains.
Notes: 63 p., 7 tab., 71 fig.
Keywords: rheology, rheological properties, admixtures, method CEM

ABSTRACT

Due to the complexity of modern constructions rheological properties of fresh concrete, such as yield stress and plastic viscosity, are crucial for efficient casting and stability of the concrete. The rheological properties can be modified by the use of chemical admixtures and mineral additives. The aim of this diploma work was to compare the rheological properties of fresh concrete and concrete equivalent mortar, which were determined by using CEM (»concrete equivalent mortar«) method. Its principle is to design mortar, deducted from concrete composition, for which the rheological properties display correlation with those of concrete. Measurements were made on 26 samples, which contained various chemical admixtures and mineral additives. Rheological measurements were carried out on ConTec Viscometer 5. Standard measurements were also performed, such as determination of consistence of fresh mortar by using flow table. The obtained results on mortars were compared with those obtained on concrete mixtures tested in the framework of other diploma works.

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil mentorici prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov ter somentorju univ. dipl. inž. grad. Andražu Hočevarju za strokovno pomoč in svetovanje ob nastajanju moje diplome. Zahvaljujem se tudi vsem sošolcem in prijateljem za pomoč ob študiju ter svoji družini in puncu Saši za vse vzpodbudne besede in potrpežljivost med študijem in ob nastajanju diplome.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	I
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC - DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VII
KAZALO PREGLEDNIC	X
1 UVOD	1
2 PREGLED TEORETIČNE VSEBINE	2
2.1 BETON	2
2.2 OSNOVNI MATERIALI BETONA	2
2.2.1 Agregat	2
2.2.2 Voda	6
2.2.3 Cement	7
2.2.3.1 Delitev	9
2.2.3.2 Standardno označevanje	10
2.3 KEMIJSKI DODATKI	11
2.3.1 Vrste kemijskih dodatkov	11
2.4 MINERALNI DODATKI	13
3 REOLOGIJA	14
3.1 UVOD V REOLOGIJO	14
3.2 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA	16
3.3 BINGHAMOV MODEL TEKOČINE	17
3.4 MALTE	17
3.5 REOMETRI	18
3.6 VPLIV POSAMEZNIH SESTAVIN NA REOLOŠKE LASTNOSTI	22
4 LASTNE PREISKAVE	24
4.1 UVOD	24
4.2 UPORABLJENI MATERIALI	24

4.2.1 Agregat	24
4.2.2 Voda	24
4.2.3 Cement.....	24
4.2.4 Kemijski dodatki	25
4.2.5 Mineralni dodatki	25
4.3 IZRAČUN BETONSKE MEŠANICE.....	25
4.4 METODA CEM.....	27
4.5 PREISKAVE NA SVEŽIH MALTAH.....	29
4.5.1 Mešanje malt.....	29
4.5.2 Razlez na stresalni mizici	29
4.5.4 Meritve z reometrom ConTec Viscometer 5	30
4.6 PREISKAVE NA SVEŽIH BETONIH	31
4.6.1 Preskus s posedom stožca.....	31
4.6.2 Metoda z razlezom.....	32
4.6.3 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu.....	34
4.7 UPORABLJENE MEŠANICE SVEŽIH MALT	35
5 ANALIZA REZULTATOV	38
5.1 PRIMERJAVA V ČASU 0 MINUT	38
5.2 ČASOVNA PRIMERJAVA.....	51
6 ZAKLJUČEK	63
VIRI	64

KAZALO SLIK

Slika 1: Zrnavost agregata v betonu (Žarnić, 2005)	4
Slika 2: Shematski prikaz sejanja agregata (Žarnić, 2005).....	5
Slika 3: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 (SIST 1026: 2008)	5
Slika 4: Zahteve za prehodni pregled vode za pripravo betona (SIST EN 1008 : 2003)	7
Slika 5: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja (Žarnić, 2005)	9
Slika 6: Sistem označevanja cementov po standardu (SIST EN 197-1: 2001).....	10
Slika 7: Mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti	11
Slika 8: Model za opis Newtonske tekočine (Wallevik,2009).....	15
Slika 9: Pseudoplastična tekočina (Wallevik,2009)	15
Slika 10: Dilatirana tekočina (Wallevik,2009)	16
Slika 11: Binghamov model (http://www.theconcreteportal.com/rheology.html).....	17
Slika 12: ConTec Viscometer 5 na UL FGG.....	19
Slika 13: Posoda, valj in zgornji obroč ConTec Viscometra (http://www.contec.is/ConTec %20Measuring %20Systems.pdf).....	19
Slika 14: CEMAGREM-IMG (NIST-2000).....	20
Slika 15: Sestavni deli BTRHEOM-a.....	20
Slika 16: IBB Rheometer (NIST, 2000)	21
Slika 17: Two-point Rheometer (NIST, 2000)	21
Slika 18: ICAR Rheometer (http://concretepixels.com/blog/wp-content/uploads/2008/11/rh-instrument.jpg)	22
Slika 19: Na grafih prikazan vpliv posameznih sestavin. (Wallevik, 2009).....	22
Slika 20: Korelacijska krivulja med razlezom CEM in posedom betona	28
Slika 21: Mešalec	29
Slika 22: Stresalna mizica	30
Slika 23: Posed stožca (Gradiva-vaje 2008/09).....	32
Slika 24: Razlezna miza (SIST EN 12350-5:2009).....	33
Slika 25: Naprava za merjenje vsebnosti zraka v betonu (Gradiva-vaje 2008/09).....	34
Slika 26: Primerjava napetosti na meji tečenja beton-malta.	38
Slika 27: Primerjava viskoznosti beton-malta.	39
Slika 28: Primerjava razleza beton-malta	40
Slika 29: Trendna črta - napetost na meji tečenja.....	41
Slika 30: Trendna črta - plastična viskoznost	41
Slika 31: Trendna črta – razlez	42
Slika 32: Trendna črta - napetost na meji tečenja, z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 40 mm.....	44
Slika 33: Trendna črta - plastična viskoznost, z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 40 mm.	44
Slika 34: Trendna črta – razlez, z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 40 mm.....	44
Slika 35: Trendna črta - napetost na meji tečenja z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 35 mm.....	45

Slika 36: Trendna črta - plastična viskoznost z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 35 mm. .46	46
Slika 37: Trendna črta - razlez z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 35 mm.46	46
Slika 38: Trendna črta - napetost na meji tečenja z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 30 mm.47	47
Slika 39: Trendna črta - plastična viskoznost z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 30 mm. .47	47
Slika 40: Trendna črta - razlez z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 30 mm.47	47
Slika 41: Trendna črta - napetost na meji tečenja z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 25 mm.48	48
Slika 42: Trendna črta - plastična viskoznost z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 25 mm. .48	48
Slika 43: Slika 39: Trendna črta - razlez z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 25 mm.49	49
Slika 44: Trendna črta - napetost na meji tečenja z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 20 mm.49	49
Slika 45: Trendna črta - plastična viskoznost z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 20 mm. .50	50
Slika 46: Trendna črta - razlez z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 20 mm.50	50
Slika 47: Časovna primerjava MR1a in CR1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).51	51
Slika 48: Časovna primerjava MR1b in CR1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).52	52
Slika 49: Časovna primerjava MR1c in CR1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).52	52
Slika 50: Časovna primerjava ML1 in CL1: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).53	53
Slika 51: Časovna primerjava ML1a in CL1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).53	53
Slika 52: Časovna primerjava ML1b in CL1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).53	53
Slika 53: Časovna primerjava ML1c in CL1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).54	54
Slika 54: Časovna primerjava MV1a in CV1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).54	54
Slika 55: Časovna primerjava MV1b in CV1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).55	55
Slika 56: Časovna primerjava MV1c in CV1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).55	55
Slika 57: Časovna primerjava MRA1a in CRA1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).56	56
Slika 58: Časovna primerjava MRA1b in CRA1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).56	56
Slika 59: Časovna primerjava MRA1c in CRA1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).56	56

Slika 60: Časovna primerjava MZ1a in CZ1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	57
Slika 61: Časovna primerjava MZ1b in CZ1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	57
Slika 62: Časovna primerjava MZ1c in CZ1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	58
Slika 63: Časovna primerjava MM1a in CM1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	58
Slika 64: Časovna primerjava MM1b in CM1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	59
Slika 65: Časovna primerjava MM1c in CM1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	59
Slika 66: Časovna primerjava MG1a in CG1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	60
Slika 67: Časovna primerjava MG1b in CG1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	60
Slika 68: Časovna primerjava MG1c in CG1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	61
Slika 69: Časovna primerjava MT1a in CT1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	61
Slika 70: Časovna primerjava MT1b in CT1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	62
Slika 71: Časovna primerjava MT1c in CT1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).	62

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Nekateri kemijski dodatki in njihove oznake (http://www.mapei.com/SI-SL/ ; navedene so okrajšave ameriških izrazov za nekatere dodatke).....	12
Preglednica 2: Reologija cementne paste, malte in betona [9].....	18
Preglednica 3: Tabela za preračun mešanice za osnovni beton (mešanica je bila zasnovana v okviru diplomskih nalog študentov Nejca Andrejke in Bojana Kresala).....	26
Preglednica 4: Razredi poseda.....	32
Preglednica 5: Razredi razleza	33
Preglednica 6: Razlezi	43
Preglednica 7: Vrednosti R^2	51

1 UVOD

Beton ima že zelo dolgo zgodovino uporabe v gradbeništvu. Z zelo hitrim napredkom moderne družbe se razvija tudi beton. V novejšem času je potreba po betonu vedno bolj naraščala, roki za izgradnjo pa so se krajšali, zato s klasičnim betonom ni bilo moč slediti temu trendu. Posledica tega je razvoj najrazličnejših kemijskih in mineralnih dodatkov betonu, ki omogočajo modificiranje lastnosti svežih in strjenih betonov. Prav reološke lastnosti svežih betonov, kot sta napetost na meji plastičnosti in viskoznost, so zelo pomembne pri vgrajevanju betonov v opaže najrazličnejših oblik.

V okviru moje diplomske naloge smo se osredotočili na primerjavo reoloških lastnosti svežih malt in betonov z enako razvito površino agregatnih zrn. V eksperimentalnem delu smo pripravili 26 različnih betonskih mešanic, pri katerih smo spreminjali vrsto cementa, vodocementno razmerje, dozacijo kemijskih dodatkov tipa superplastifikator, gostilec in aerant ter dozacijo mineralnih dodatkov, žindre, mikrosilike in tufa. Po opravljenih preskusih na svežih betonskih mešanicah smo se lotili preračuna betonskih mešanic v mešanice betonu enakovredne malte. Za preračun smo uporabili relativno novo orodje za projektiranje mešanic, metodo CEM. CEM ali »concrete equivalent mortar« je metoda, ki išče betonu kar najbolj podobno oz. reprezentativno malto.

Za sestavo malte, enakovredne betonu, moramo upoštevati več pogojev: uporabiti moramo isto vrsto in količino cementa, isto vrsto in odmere mineralnih dodatkov, ohraniti moramo enako efektivno vodocementno razmerje, uporabiti enako vrsto kemijskih dodatkov, enako vrsto agregata in dodati enako količino drobnega peska, da dobimo enako površino zrn kot v betonu. Pri tem pa moramo vedeti, da samo ena formula CEM velja za eno mešanico, torej če spremenimo betonsko mešanico, moramo spremeniti tudi formulo za malto.

Namen teh preiskav je zmanjšati količino porabljenega materiala in pospešitev testiranj vpliva posameznih kemijskih ali mineralnih dodatkov na reološke lastnosti suspenzij z grobimi delci. Malto lahko zamešamo v veliko manjših količinah kot beton in tudi testiranja so časovna krajša. Naprave za merjenje parametrov reoloških lastnosti so še relativno nove in tudi metodo CEM je potrebno dobra preštudirati in prilagoditi posameznim dodatkom, zato rezultati še ne izpolnijo vseh pričakovanj.

Celotno diplomsko delo je razdeljeno na več poglavij, v katerih so opisani posamezni materiali, uporabljeni v preiskavah, kemijski in mineralni dodatki, osnove reologije ter preiskave, ki smo jih opravili. V poglavju analiza rezultatov so zbrani vsi rezultati, ki smo jih pridobili med preiskavami in jih kasneje analizirali.

2 PREGLED TEORETIČNE VSEBINE

2.1 Beton

Zaradi svoje vsestranske uporabnosti je beton v zadnjem stoletju postal najpogosteje uporabljen gradbeni material. Uporablja se tako pri izvedbi najenostavnejših objektov pa vse do vedno bolj kompleksnih konstrukcij in arhitekturnih objektov. Je mešanica mineralnega agregata, cementa, vode in dodatkov, s katerimi se regulirajo lastnosti betona. Osnovne sestavine betona zamešamo v homogeno celoto, pri tem pa moramo biti pazljivi na vrstni red dodajanja posameznih sestavin. V tako dobljeni sveži betonski mešanici se začno odvijati fizikalni in kemijski procesi. Najpomembnejši proces je hidratacija cementa. Cement skupaj z vodo tvori cementno pasto, ki je osnovna komponenta (matrica), v kateri mineralni agregat predstavlja polnilo. Posledica hidratacije je prehod cementne paste v cementni kamen in s tem spreminjanje sveže betonske mešanice v strjen beton.

2.2 Osnovni materiali betona

2.2.1 Agregat

Agregat tvori večino betonske mase in je zato njegov izbor ključnega pomena za kakovost in lastnosti betona. Je najtrša komponenta betona, ki mu daje skelet, sestavlja pa se s kombinacijo zrn različnih velikosti, tako da vsebuje delež peska (drobnega agregata), zrna grobega agregata in praškaste delce. Mineralni agregat razlikujemo predvsem po načinu pridobivanja:

- ~ drobljen agregat - nastane z miniranjem kamnin in poznejšim drobljenjem, ima ostre robove;
- ~ prod - je aluvialnega izvora, ima oble robove in je raznolike mineralne sestave v odvisnosti od izvora rečnih nanosov.

Razlikujemo pa ga tudi po mineralni sestavi, glede na vrsto kamenine, iz katere je pridobljen in ki določa njegove lastnosti:

- ~ metamorfni mineralni agregat (marmor),
- ~ magmatski mineralni agregat (granit, čizlakit, granodiorit, ...),
- ~ sedimentni mineralni agregat (apnenec, dolomit,...). [1]

Naravni mineralni agregat, ki ga uporabimo za pripravo betonske mešanice, mora biti čist, trd in inerten. Poleg tega pa mora izpolnjevati še naslednje zahteve:

- ~ prisotnost snovi, ki bi lahko kakorkoli vplivale na hidratacijo in strjevanje betona ter na mehanske lastnosti in obstojnost strjenega betona, morajo biti v določenih mejah. V primeru armiranega betona pa je pomembno tudi, da ne povzročajo korozije armature;

- ~ organske snovi (humozni delci, masti) zavirajo hidratacijo cementa, zato je njihov delež v agregatu omejen;
- ~ omogočena je dobra povezava med cementno pasto in zrnih agregata, le-ta ne smejo biti obvita z glino;
- ~ prisotnost grudic gline v agregatu je omejena;
- ~ zrna agregata odporna proti drobljenju;
- ~ vpojnost zrn ne sme biti prevelika;
- ~ pomembna je oblika zrn, ploščata in podolgovata zrna so nezaželena;
- ~ zadostna zmrzljinska odpornost;
- ~ paziti je treba, da vsebnost amorfnega silicijevega dioksida ni prevelika, saj povzroča alkalno-silikatno reakcijo v betonu, pri tem prihaja do notranjih napetosti, posledice pa so razpoke in postopno razpadanje betona. [2]

Ker je vsebnost agregat v betonu zelo velika, tudi do 85% pri podložnem betonu, ima pomembno vlogo pri:

- ~ ceni betona - agregat znižuje ceno betona, saj se nahaja v velikih količinah in izkopavanje le-tega ni drago;
- ~ kohezivnosti - če je sestavljen ustrezno po frakcijah, ustvarja koheziven beton, ki ga je lažje vgrajevati;
- ~ hidratacijski temperaturi - jo znižuje, ker so običajno kemično inertni in delujejo kot odvjalci toplote;
- ~ krčenju betona - ga zmanjšujejo, ker na agregat voda običajno ne deluje in zato lahko agregatna zrna omejujejo krčenje cementne paste;

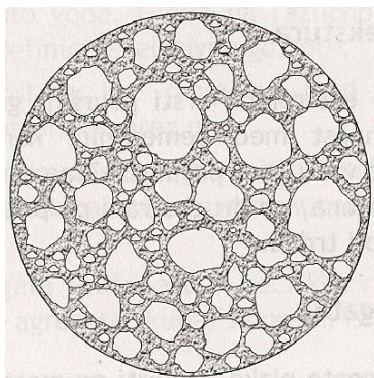
Agregati pa lahko služijo tudi za:

- ~ uravnavanje površinske trdote betona,
- ~ ustvarjenje barvitosti betonske površine,
- ~ kontrolo gostote,
- ~ zvišanje požarne odpornosti betona.

Na vgradljivost betonske mešanice vplivamo z izbiro oblike zrn, ki je odvisna od izvora agregata. Pri agregatu, pridobljenem iz rečnih nanosov, so zrna zaobljena, pri zrnih, dobljenih z drobljenjem, pa so ostroroba. Zaobljena zrna nam pri običajnih betonih omogočajo lažje vgrajevanje, posledično pa tudi manjšo porabo vode, kar pomeni manjše vodocementno razmerje. Prodnat agregat je zelo nehomogen in težko je kontrolirati njegovo mineraloško sestavo, kar lahko predstavlja nevarnost za pojav alkalno-silikatne reakcije. Produkt te reakcije je higroskopičen alkalno-silikatni gel, ki povzroči razpoke v

betonu in njegovo hitrejše propadanje. V današnjem času se za pripravo betonov večinoma uporablja drobljen agregat. Ta je zaradi homogenosti in ostrih robov. Ki omogočajo zaklinjanje, primernejši kot naravni agregat.

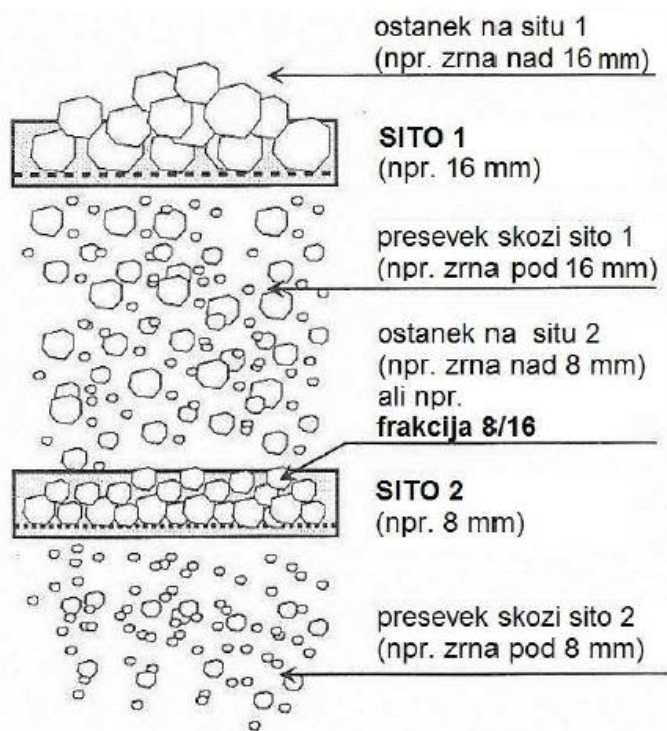
V betonski mešanici je pomembno razmerje grobih in finih frakcij. Velika vsebnost grobe frakcije izboljšuje mehanske lastnosti in zmanjšuje potrebo po cementni pasti, vendar poslabša vgradljivost in poveča možnost segregacije.



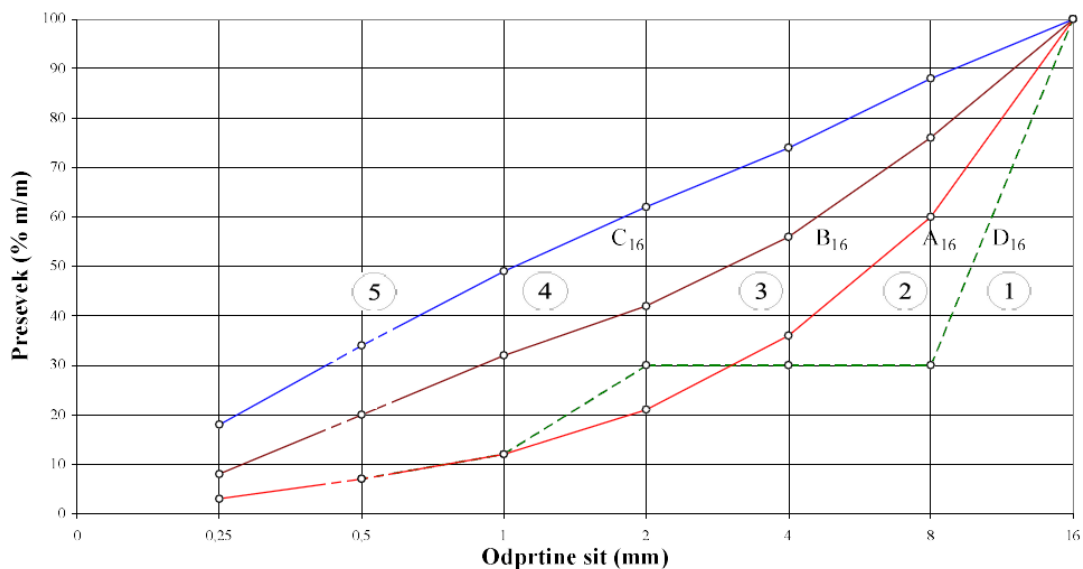
Slika 1: Zrnavost agregata v betonu (Žarnić, 2005)

Vsak beton mora imeti ustrezno zrnavostno sestavo, s katero opišemo relativno razmerje različnih velikosti zrn med nominalno maksimalnim zrnem in najdrobnejšim delcem. Pravilno načrtovana zrnavostna sestava omogoča izdelavo svežega betona z ustreznimi plastičnimi lastnostmi. Predvsem pazimo, da je betonska mešanica primerno vgradljiva, kohezivna in odporna na izločanje vode. Paziti moramo na pojav segregacije, ki ga uspešno preprečimo z dobro granuliranim materialom. Pri ustrezni zrnavostni sestavi agregata se votline med večjimi zrni zapolnijo z manjšimi zrni.

Pri izbiri primerne zrnavostne sestave agregata nam pomagajo standardi (SIST 1026:2008) s pomočjo mejnih zrnavostnih krivulj. Krivulje predstavljajo sovisnost med odprtino sita in količino presevka. Presevek je količina agregata, ki pade skozi sito z določenim premerom, izražen pa je v procentih od celotne količine agregata. Pri načrtovanju betonske mešanice govorimo o količini posamezne frakcije, ki jo potrebujemo. Frakcija je količina agregata, ki ostane med dvema sitoma. Npr. s frakcijo 16/32 označujemo agregat, ki je padel skozi sito s premerom 32 mm, obstal pa je na situ s premerom 16 mm.



Slika 2: Shematski prikaz sejanja agregata (Žarnić, 2005)



Mejne krivulje	Presevki (%) skozi sita (mm)								
	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5	63,0
D ₁₆	3	(7)	12	30	30	30	100		
A ₁₆	3	(7)	12	21	36	60	100		
B ₁₆	8	(20)	32	42	56	76	100		

Slika 3: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 (SIST 1026: 2008)

2.2.2 Voda

Voda je pomemben element betonske mešanice, saj brez nje ne bi potekal proces hidratacije. Pri običajnih konstrukcijah velja, da je pitna voda primerna za pripravo betonske mešanice. Pri kompleksnejših objektih, kot so prednapete betonske konstrukcije, je zaradi občutljivosti visoko trdnih jekel potrebno kontrolirati sestavo vode. Zaradi vsebnosti velike količine mineralov je morska voda le pogojno uporabna, vendar le za nearmirane betone. [1]

Kakovost vode, uporabljene za pripravo betonske mešanice, lahko vpliva na čas vezenja, razvoj trdnosti ter na zaščito pred korozijo. Zato je neznano vodo potrebno testirati. Odločitev, ali je določen vir vode primeren za izdelavo betona, je odvisna od sestave vode in namena uporabe betona. Ker je primernost vode odvisna od njenega izvora, imamo naslednje vrste vod [3]:

- ~ pitna voda – ni potrebno preskušati;
- ~ voda, pridobljena iz procesov v industriji – običajno je primerna, mora ustrezati zahtevam dodatka A v SIST EN 1008: 2003;
- ~ podtalnica – mora biti preskušena;
- ~ naravna površinska in industrijska odpadna voda – mora biti preskušena;
- ~ morska voda – za nearmirane betone;
- ~ komunalna voda – ni primerna;

Neprimernost vode, uporabljene v betonski mešanici, se lahko pokaže kot [1]:

- ~ eflorescenca – površinsko izločanje soli,
- ~ prostorninska nestabilnost cementnega kamna,
- ~ sprememba časovnega poteka hidratacije cementne paste,
- ~ sprememba barve paste,
- ~ različne vrste korozije.

S primerjalnimi preskusi prizem, izdelanih z vodo znane in neznane kakovosti, lahko preskušamo vpliv neznane vode na trdnost cementne paste.

Metode preskušanja [3]:

- ~ predhodna ocenitev,
- ~ humusne snovi,
- ~ kemični preskusi,
- ~ čas vezenja in trdnost.

Predhodna ocenitev vode:

		Zahteva
1	Olja in masti	Ne več kot vidni sledovi.
2	Detergenti	Morebitna pena mora izginiti v 2 minutah.
3	Barva	Voda, ki ni iz virov, navedenih v točki 3.2: barva se oceni kvalitativno kot blede rumena ali motna.
4	Izločene snovi	Voda iz virov, navedenih v točki 3.2.
		Voda iz drugih virov: največ 4 ml sedimenta
5	Vonj	Voda iz virov, navedenih v točki 3.2. 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	$\text{pH} \geq 4$
7	Humusne snovi	Barva se po dodatku NaOH oceni kvalitativno kot rumenkasto rjava ali motna.

Slika 4: Zahteve za prehodni pregled vode za pripravo betona (SIST EN 1008 : 2003)

Če voda ne ustreza eni ali več zahtevam, je v betonu ne smemo uporabiti, razen če je možno dokazati njeno primernost.

2.2.3 Cement

Cement je silikatno hidravlično vezivo ali fino zmlet neogranski material, ki ob mešanju z vodo tvori pasto, ki ob reakciji, imenovani hidratacija, veže in strjuje ter spremeni cementno pasto v cementni kamen. Ta je večinsko sestavljen iz kalcijevih silikat hidratov, ki ohranjajo stabilnost in trdnost tudi v vodi. Po standardu SIST EN 197-1 mora dati cement po mešanju z agregatom in vodo beton ali malto, ki ostaneta dovolj dolgo primerno obdelavna. Predpisana trdnost mora biti dosežena po določenem času, strjen material pa mora biti dolgo prostorninsko obstojen. [1,4]

Proizvodnja poteka v štirih fazah:

- ~ proizvodnja surovin,
- ~ mletje surovinske moke,
- ~ žganje klinkerja,
- ~ mletje cementa.

Osnovna surovina so minerali, ki jih najdemo v naravnem laporju, apnencu in glini. Po izkopu se material zdrobi in zmelje ter shrani v silose, kjer opravijo tudi kemijsko analizo. Po potrebi se dodajo manjkajoči minerali. Surovine se melje po suhem ali mokrem postopku, produkt pa je surovinska moka.

Proizvodnja klinkerja je najpomembnejši proces v proizvodnji cementa. Proces poteka v treh delih: izmenjevalcu toplote, rotacijski peči ter hladilcu klinkerja. V izmenjevalcu toplote se surovinska moka segreje na okrog 800°C, preden vstopi v rotacijsko peč, pri čemer apnenec preide v apno. Pri tem se izloči CO₂. Peč ima obliko cevi in se med obratovanjem vrtil približno 2 obrata/min ter je nagnjena za 3,5 %. Nagnjenost in vrtenje omogočata potovanje materiala po peči proti vse večjim temperaturam na primarni strani, kjer je nameščen gorilec. V peči se do temperature 1300°C tvorijo minerali klinkerja – belit, aluminat in ferit. Pri tej temperaturi se že pojavi tudi talina. Najvišjo temperaturo 1400 - 1450 °C doseže material v coni sintranja, kjer potekajo najpomembnejše kemijske in fizikalne reakcije. V tem območju belit reagira s prostim apnom in nastane glavni mineral klinkerja - alit. Minerala alit in belit dajeta klinkerju večino njegovih hidravličnih lastnosti, ki se prenesejo v končni produkt – cement. Zadnja, prav tako pomembna faza v procesu žganja klinkerja je hlajenje, ki odločilno vpliva na kvaliteto klinkerja [20].

Končni produkt žganja je cementni klinker v obliki temno sivih granul premera približno 3 cm. Različne snovi so dodane med mletjem cementnega klinkerja, ki dajejo končne lastnosti posameznim vrstam cementov. [1]

Najpogosteje so dodane [4]:

- ~ sadra - je obvezen dodatek za regulacijo vezanja, saj cementi z nezadostno količino sulfatov prehitro vežejo;
- ~ žlindra (S);
- ~ pucolanski materiali (P,Q);
- ~ apnenec (L, LL);
- ~ elektrofiltrski pepel (silicijski (V), kalcijski(W)).

Ostali dodatki:

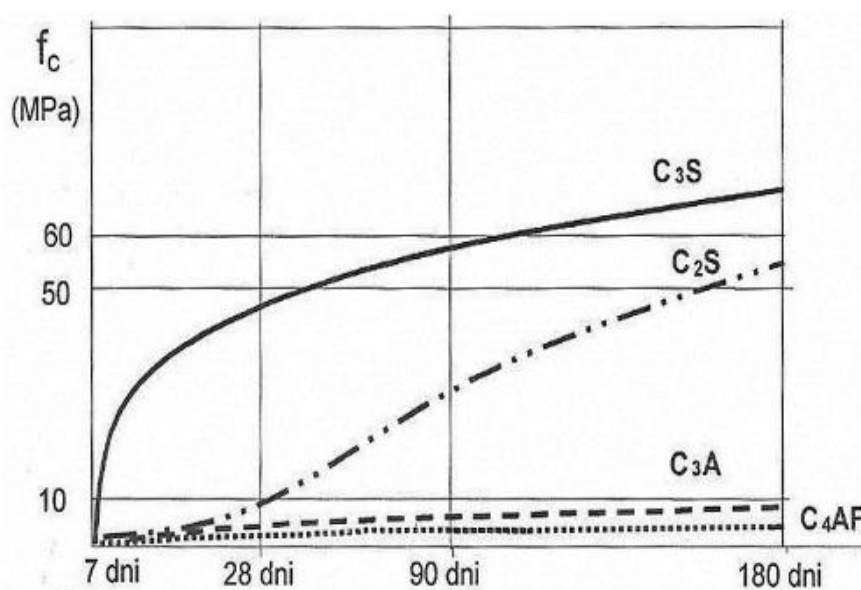
- ~ žgani skrilavec (T),
- ~ mikrosilika (D).

Minerali cementnega klinkerja:

- ~ trikalcijev silikat (alit) – C₃S – 40-70%,

- ~ dikalcijev silikat (belit) – C_2S – 5-30%,
- ~ trikalcijev aluminat (alit) – C_3A – 7-15%,
- ~ tetrakalcijev aluminoforit – C_4AF .

Najpomembnejši mineral običajnih portland cementnih klinkerjev je C_3S , ki močno reagira in prispeva k visokim trdnostim. Razvije visoke hidratacijske temperature in že po dveh do treh dneh doseže več kot polovico trdnosti, ki jo ima po 28 dneh. C_2S na začetku veže počasneje, dalj časa pa pridobiva na trdnosti in razvije nizko hidratacijsko toploto. Najmanj k trdnosti prispevata C_3A in C_4AF . Trikalcijev aluminat v začetku sprošča veliko toplote. Tetrakalcijev aluminoforit je odporen proti sulfatni koroziji in povzroča počasno strjevanje [1].



Slika 5: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja (Žarnić, 2005)

2.2.3.1 Delitev

Po standardu SIST EN 197-1[4] se običajne cemente deli na pet glavnih vrst:

- ~ CEM I - portlandski cement,
- ~ CEM II - mešani portlandski cement,
- ~ CEM III - žlindrin cement,
- ~ CEM IV - pucolanski cement,
- ~ CEM V - mešani cement.

Standard [4] pa poleg glavnih vrst uvaja tudi podvrste, skupaj poznamo 27 vrst običajnih cementov. Predvsem pod CEM II najdemo veliko vrst z različnimi dodatki:

- ~ portlandski cement z dodatkom žlindre,

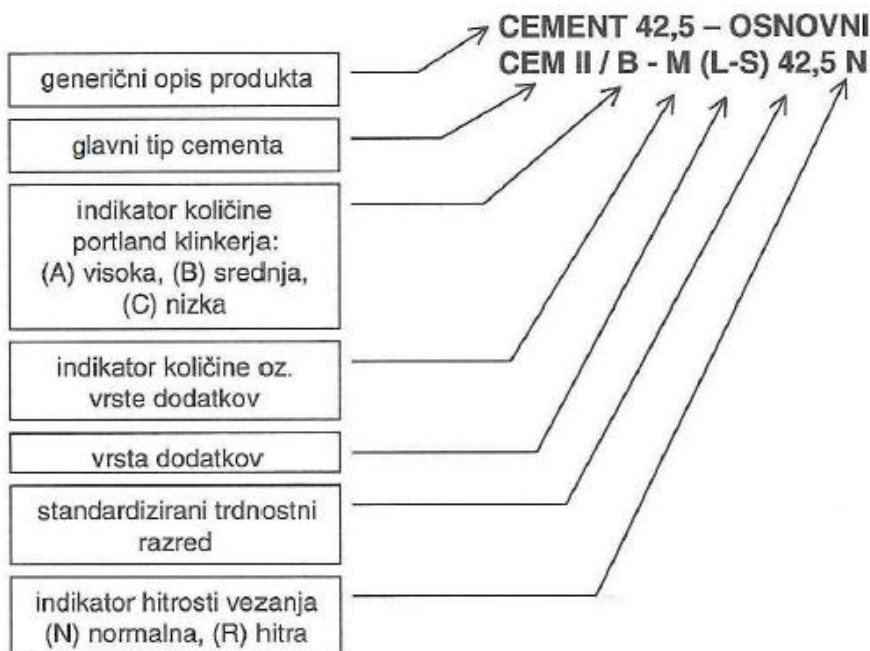
- ~ portlandski cement z dodatkom mikrosilike,
- ~ portlandski cement z dodatkom pucolana,
- ~ portlandski cement z dodatkom elektrofilterskega pepela,
- ~ portlandski cement z dodatkom žganega skrilavca,
- ~ portlandski cement z dodatkom apnenca,
- ~ portlandski mešani cement.

2.2.3.2 Standardno označevanje

Cementi morajo biti označeni vsaj z vrsto in številko, ki označuje trdnostni razred (32,5; 42,5; 52,5) [4].

Razred zgodnje trdnosti:

- ~ običajna zgodnja trdnost – N (normal)
- ~ visoka zgodnja trdnost – R (rapid)



Slika 6: Sistem označevanja cementov po standardu (SIST EN 197-1: 2001)

Primer: Imamo mešani portlandski cement z vsebnostjo granulirane plavžne žilindre (S), silicijskega elektrofilterskega pepela (V) in apnenca (L) v skupni količini med 6 in 20 % mase. Cement je trdnostnega razreda 32,5 in z visoko zgodnjo trdnostjo. Oznaka:

Portlandski mešani cement EN 197-1- CEM II/A-M (S-V-L) 32,5 R.

Trdnostni razred	Tlačna trdnost MPa				Čas začetka vezanja min	Prostorninska obstojnost (ekspanzija) mm
	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost			
	2 dneva	7 dni	28 dni			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 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	-				

Slika 7: Mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti

2.3 Kemijski dodatki

Uporaba kemijskih dodatkov betonom in maltam je v današnjem času zelo razširjena. Zaradi izvajanja gradbenih del v ekstremnih razmerah in zaradi hitre gradnje je uporaba dodatkov nujna. Glavni namen kemijskih dodatkov je v doseganju zahtevanih reoloških lastnosti svežih mešanic, ki pa imajo vpliv tudi na končne lastnosti betonov. Dodaja se jih v majhnih količinah, katerih masa praviloma ne presega 5% mase cementa. Uporabljamo jih pri pripravi betona na gradbišču, za transportni beton in za beton, namenjen za betonske izdelke. Dodaja se jih lahko pri pripravi mešanic za nearmirane, armirane in prednapete betone.

Z uporabo kemijskih dodatkov se lahko regulira naslednje lastnosti svežih betonov in malt:

- ~ povečanje obdelovalnosti z nespremenjeno količino zamesne vode;
- ~ upočasnitev ali pospešitev časa začetka vezanja;
- ~ zmanjša ali prepreči plastično krčenje;
- ~ zmanjša se segregacija betona;
- ~ izboljšanje črpnosti;
- ~ izboljša se površinska obdelovalnost;
- ~ podaljša se čas obdelovalnosti. [5]

2.3.1 Vrste kemijskih dodatkov

- ~ Aeranti – v svežo betonsko mešanico uvajajo drobne zračne mehurčke, ki v strjenem betonu predstavljajo okrogle zaprte pore, velikosti med 10 in 800 μm . Povečajo zmrzlinsko odpornost

in obdelovalnost betona, znižujejo možnost segregacije ter nekoliko zmanjšajo končno trdnost betona.

- ~ Pospeševalci – skrajšajo prehod betonske mešanice iz plastičnega v trdno agregatno stanje, s povečanjem hitrosti hidratacije cementa.
- ~ Zavlačevalci – v sveži betonski mešanici močno upočasnijo proces hidratacije. Uporabljajo se za daljše Transporte betonov, katerih konsistence mora ostati nespremenjena.
- ~ Plastifikatorji in superplastifikatorji - uporabljajo se za zmanjšanje količine potrebne vode pri enakem vodocementnem razmerju (plastifikatorji za okoli 12 %; superplastifikatorji tudi do 30%). Izboljšajo obdelovalnost in delujejo tudi kot zavlačevalci vezanja, zato je pomembna prava dozacija. Zaradi znižanja vodocementnega razmerja pri strjenih betonih povečujejo trdnost.
- ~ Gostilci – z njimi se dosega večje vodoneprepustnosti betona. Tak beton je nepropusten za vodo, ki ni pod tlakom.
- ~ Pigmenti – služijo za obarvanje betona.
- ~ Inhibitorji – zavirajo razvoj korozije armature vgrajene v betonu, lahko tudi povišajo trdnost betona.
- ~ Antifrizi - znižujejo temperaturo ledišča vode in s tem omogočajo betoniranje v hladnem vremenu.
- ~ Ekspanditorji - omogočajo izdelavo betona brez krčenja. Omogočajo izdelavo tlakov brez fug. [5]

Preglednica 1: Nekateri kemijski dodatki in njihove oznake (<http://www.mapei.com/SI-SL/>; navedene so okrajšave ameriških izrazov za nekatere dodatke)

Vrsta dodatka	Oznaka
Plastifikator	WR
Superplastifikator	HRWR
Aerant	AEA
Pospeševalec vezanja	SAA
Zavlačevalec vezanja	SRA
Gostilec	WrA

2.4 Mineralni dodatki

Mineralne dodatke so naravni ali industrijski odpadni materiali, ki jih glede na reakcijsko sposobnost delimo na:

- ~ tip I – nepucolanski dodatki,
- ~ tip II – pucolanski in latentno hidravlični dodatki.

Z uporabo mineralnih dodatkov v svežih betonih in maltah lahko spreminjamo naslednje lastnosti:

- ~ povečamo obdelovalnost,
- ~ zmanjšamo nagnjenost k izcejanju vode,
- ~ izboljšamo črpnost betona,
- ~ podaljšamo čas vezanja,
- ~ izboljšamo površinsko obdelavo.

Nepucolanski dodatki:

- ~ apnenčeva in dolomitna moka.

Pucolanski dodatki:

- ~ mikrosilika,
- ~ elektrofiltrski pepel,
- ~ žindra,
- ~ tufi.

3 REOLOGIJA

3.1 Uvod v reologijo

Beseda reologija izhaja iz grških besed $\rho\epsilon\omega$ (tečenje) in $\lambda\omicron\gamma\omicron\sigma$ (znanost), pomeni pa vedo o tečenju in deformiranju snovi. V osnovi preiskuje odnose med silo, deformacijo in časom tako elastičnih kot tudi tekočih snovi. Njena podskupina je viskometrija, ki preiskuje povezave med napetostjo in hitrostjo deformiranja. Viskoznost je definirana kot upor proti tečenju oziroma upor tekočine proti deformaciji. Viskoznost materiala bo velika, če bo upor velik in obratno. [6]

Namen izvajana reoloških preiskav:

- ~ razumeti odnose med posameznimi sestavinami in dobiti vpogled v strukturo materiala, saj obstaja povezava med velikostjo in obliko delcev ter viskoznostjo betona;
- ~ koristijo nam za kontrolo kakovosti surovin, procesov in končnih produktov. S tehnikami merjenja reoloških lastnosti lahko merimo material kot celoto ali pa interakcije med posameznimi sestavinami;
- ~ s pomočjo rezultatov dobljenih v preiskavah lahko načrtujemo procesno opremo, uporabljeno pri vgradnji betona;
- ~ rezultati preiskav lahko služijo kot metoda za preskušanje ustreznosti novih izdelkov. [6]

Obstaja več načinov ustvarjanja strižnega toka, s pomočjo katerega naprave merijo različne parametre:

- ~ tok med dvema vzporednima ploščama,
- ~ krožni tok med dvema koaksialnima valjema,
- ~ tok skozi kapilare in cevi,
- ~ krožni tok med dvema vzporednima ploščama ali med stožcem in ploščo. [6]

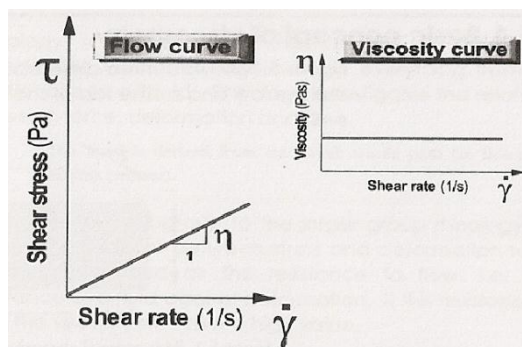
Klasifikacija tekočin:

- ~ newtonska tekočina,
- ~ nenewtonska tekočina, časovno neodvisna,
- ~ nenewtonska tekočina, časovno odvisna,
- ~ viskoelastična tekočina.

Za newtonsko tekočino je značilno, da ostane viskoznost konstantna pri različnih strižnih hitrostih. Enačba viskoznosti newtonske tekočine [6]

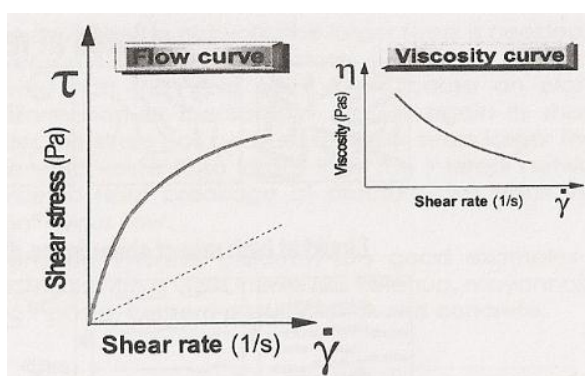
$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

kjer je τ strižna napetost, $\dot{\gamma}$ strižna hitrost, μ pa viskoznost.

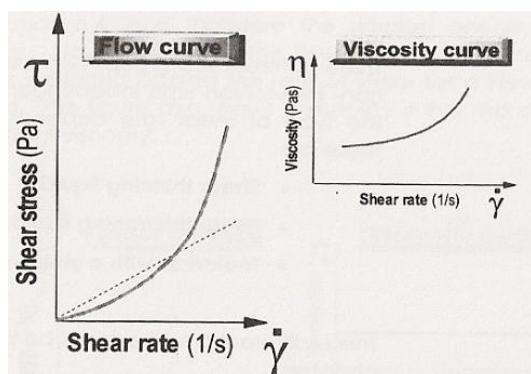


Slika 8: Model za opis newtonske tekočine (Wallevik,2009)

Med glavne lastnosti newtonske tekočine štejemo, da se tok tekočine pojavi tudi, ko je velikost napetosti blizu nič. Newtonske tekočine so preproste tekočine, kot so voda, glicerol in olje. Pri newtonskih tekočinah, ki so časovno neodvisne, je viskoznost odvisna od strižne hitrosti. Obstajajo tri različne podskupine nenevtonskih tekočin: 1. tekočine, ki ob povečanju strižne hitrosti izgubijo na viskoznosti (shear thinning liquids), imenovane tudi pseudoplastične tekočine; 2. tekočine, ki ob povečanju strižne hitrosti pridobijo na viskoznosti (shear thickening liquids) ali dilatirane tekočine; in 3. material, ki ima neko napetost na meji tečenja, a se med tečenjem lahko obnaša kot newtonska, pseudoplastična ali dilatirana tekočina. Med slednje spada tudi beton, pri katerem v začetku opazimo neko strižno napetost na meji tečenja, ko pa steče, se obnaša kot newtonska tekočina. Takšen model tekočine imenujemo Binghamov model. Binghamov model velja za običajne betone, SCC betoni pa se običajno ne obnašajo kot Binghamova tekočina.



Slika 9: Pseudoplastična tekočina (Wallevik,2009)



Slika 10: Dilatirana tekočina (Wallevik,2009)

Pri newtonski tekočini, ki je časovno odvisna, je viskoznost odvisna od strižne hitrosti in od časa, kar lahko opišemo z enačbo $\eta = \eta(\dot{\gamma}, t)$. Časovno odvisni materiali spremenijo strukturo med striženjem s konstantno hitrostjo striženja, kar posledično pomeni, da se tudi viskoznost spreminja s časom. Materiale razvrstimo, glede na viskozno obnašanje s časom, v tri skupine [6]:

- ~ tiksotropičen - je tekočina, ki ima notranjo zgradbo, vendar se ta med striženjem poruši in tekočina lahko steče, ko pa se umiri se notranja zgradba znova vzpostavi;
- ~ reopektičen – podoben tiksotropičnemu materialu, le da se struktura podre pri višjih strižnih hitrostih, pri nižjih hitrosti pa se le-ta hitreje ponovno vzpostavi, kot pri tiksotropičnem materialu;
- ~ antitiksotropičen – ima strukturo, ki se vzpostavi med striženjem in podre ob mirovanju.

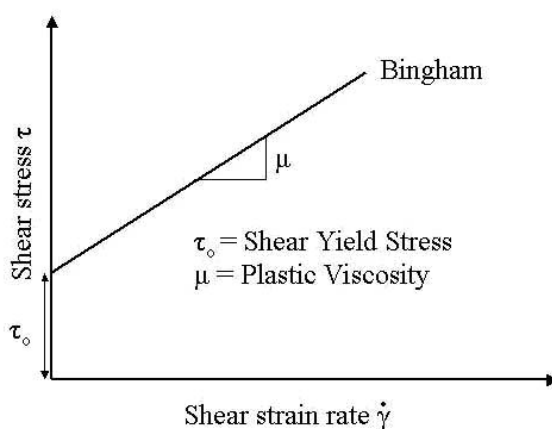
3.2 Reologija svežega betona

V zadnjih letih se vse večji poudarek daje na preiskovanje reoloških lastnosti svežih betonskih mešanic, saj le-te vplivajo na njegovo obdelovalnost, vgradljivost, sposobnost zgoščevanja ... Z dosedanjimi metodami preskušanja svežih betonskih mešanic težko opišemo npr. kakšne zgoščevalne lastnosti ima beton. V praksi so še vedno v veljavi enostavni načini preskušanja, kot je posed stožca, vendar imata dva betona z istim posedom lahko popolnoma različne obdelovalnosti. Še najboljše te lastnosti opiše delavec, ki ima veliko izkušenj z betonom. Vendar so to le subjektivne ocene, na podlagi katerih ne moremo iz vrednotiti lastnosti betona. Obstaja več izrazov, s katerimi opišemo sveži beton na podlagi občutka: moker, gost, viskozen, »župa«, lepljiv, koheziven, dober, slab, zelo dober. Ker pa so ti izrazi lahko napačno interpretirani (za nekoga lahko koheziven pomeni viskozen ipd.), so znanstveniki iskali način, s pomočjo katerega bi kar najbolj objektivno merili lastnosti svežega betona. Preiskave so pokazale, da je beton še najboljši približek Binghamovi tekočini. S to ugotovitvijo se je začela uporaba reologije na svežih betonih, katerih lastnosti merimo z merjenjem strižnih napetosti in strižnih hitrosti.

3.3 Binghamov model tekočine

Kdor je že imel priložnost delati s svežim betonom ve, da ga ne moremo mešati brez napora kot vodo, ampak potrebujemo določeno napetost, da steče. Tej napetosti pravimo napetost na meji tečenja, τ_0 . To pa uvršča beton med časovno neodvisne nenevtonske tekočine, za katere velja Binghamov model tekočine. Le-ta dovolj dobro opiše tečenje svežega beton in upošteva začetno napetost na meji tečenja, naprej pa upošteva linearno zvezo med strižno napetostjo in strižno hitrostjo in s tem konstantno viskoznost, kot pri newtonski tekočini. Binghamov model opišemo z enačbo [7,8]:

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



Slika 11: Binghamov model (<http://www.theconcreteportal.com/rheology.html>)

Kot je razvidno iz zgornje enačbe, obnašanje materiala določata dve konstanti, napetost na meji tečenja (τ_0) in plastična viskoznost (μ). Ti konstanti nista neposredno uporabni, lahko pa z njuno pomočjo dobimo enačbe, katerih parametre lahko neposredno merimo in so uporabni za določevanje uporabnosti materiala. Možna je izpeljava enačb, ki opisujejo Binghamovo obnašanje materiala med dvema rotirajočima cilindroma ali pri gibanju po cevi. Prva je pomembna za delo z koaksialnimi valjastimi reometri, druga pa za določanje transportnih možnosti oz. črpnosti betona [8].

3.4 Malte

Za malte lahko rečemo, da so kar sveža betonska mešanica, ki ji je bil odvzet grobi agregat. Malte se uporablja za preiskave reoloških lastnosti predvsem zaradi ekonomičnih razlogov. Z današnjo tehnologijo lahko, preko meritev na maltah, z visoko natančnostjo napovemo lastnosti betonov.

Malte kažejo reološko obnašanje nekje vmes med betonom in cementno pasto. Absolutni rezultati niso primerljivi, vendar se, z določenimi korelacijami, ti rezultati zelo dobro ujemajo. V spodnji tabeli so

prikazani povprečni rezultati napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti na cementni pasti, malti in betonu.

Preglednica 2: Reologija cementne paste, malte in betona [9]

	Cementna pasta	Malta	Beton
Napetost na meji tečenja(τ_0) [Pa]	10 - 100	80 – 400	500 – 2000
Plastična viskoznost(μ) [Pa.s]	0,01 – 1	1 – 3	50 - 100
Porušitev strukture	da	da	ne

Napetost na meji tečenja in plastična viskoznost se z večanjem agregatnih delcev zvišujeta, ker večji delci prenesejo večje napetosti brez deformacije. Zato pri betonih dobimo mnogo večje vrednosti rezultatov kot pri maltah in cementni pasti.

Pri cementni pasti se napetost na meji tečenja in plastična viskoznost povečujeta z večanjem finosti cementa.

3.5 Reometri

Reometri so naprave, ki poskušajo uporabiti teorijo reologije tekočin za merjene toka betona oziroma merijo strižno napetost pri različnih strižnih hitrostih. Reometri, namenjeni za testiranje polimerov in finih tekočin (drobni delci), niso uporabni za izvajanje meritev na betonih, saj ti vsebujejo prevelika agregatna zrna. To je vodilo v razvijanje novih reometrov, primernih za meritve na svežih betonih.

Vrste reometrov za merjenje reoloških lastnosti svežih betonov:

1. Koaksialni valjasti reometer

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, ker pa ne merijo direktno parametrov, ki jih potrebujemo v izračunu, so rezultati podani z relativnimi parametri. Dobimo obliko enačbe [6]:

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

V enačbi T pomeni navor na stacionaren valj, G je sila, potrebna za začetek gibanja betona (navor na meji tečenja), H pomeni odpornost betona proti povečanju hitrosti gibanja (koeficient viskoznosti) in S je hitrost vrtenja valja [6].

Primeri koaksialnih valjastih reometrov:

- ~ ConTec Viscometer 5 – je avtomatski reometer, kontroliran s pomočjo programa FreshWin. Optimiziran je lahko za različne velikosti agregatnih zrn (3 -5 mm za malte, 16mm za betone). [10]



Slika 12: ConTec Viscometer 5 na UL FGG



Slika 13: Posoda, valj in zgornji obroč ConTec Viscometra ([http://www.contec.is/ConTec %20Measuring %20Systems.pdf](http://www.contec.is/ConTec%20Measuring%20Systems.pdf))

- ~ CEMAGREF-IMG – je zelo velik reometer s prostornino okoli 500l, na zunanjem valju ima nameščene lopatice, na notranjem valju pa je nameščena rešetka . Je mobilen, saj je postavljen na prikolici.



Slika 14: CEMAGREM-IMG (NIST-2000)

2. Reometer z vzporednimi ploščami

Takšni reometri so uporabni za betone s posedom, večjim od 100 mm, pa vse do SCC betonov z največjim agregatnim zrnom velikosti 25 mm. Vzorec betona zavzame obliko votlega valja, potem pa beton strižemo med dvema ploščama, spodnjo fiksno in zgornjo rotirajočo okoli vertikalne osi. Postopek je nadzorovan s pomočjo programa (ADRHEO) [11].

Primer reometra:

- ~ BTRHEOM reometer



Slika 15: Sestavni deli BTRHEOM-a

3. Mešalni reometer z rotorjem

Princip mešalnega reometra je, da ima na rotorju nameščene lopatice, ki jih vstavimo v posodo s svežim betonom, poženemo in izmerimo navor, ki ga ustvari sveži beton. Lopatice so lahko različnih izvedb, npr. pravokotne, v obliki črke H, v obliki kril. Ti reometri obstajajo tudi v manjših izvedbah, zato je njihova uporaba možna tudi na terenu [12].

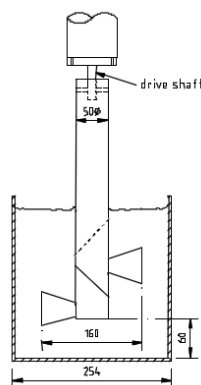
Primeri mešalnih reometrov [10, 12]:

- ~ IBB Rheometer – je popolnoma avtomatski, meri hitrost rotorja in navor. Uporablja lopatice v obliki črke H.



Slika 16: IBB Rheometer (NIST, 2000)

- ~ Two-point rheometer – uporablja štiri nagnjena rezila, nameščena okoli gredi, ki mešajo sveži beton.



Slika 17: Two-point Rheometer (NIST, 2000)

- ~ ICAR Rheometer – uporablja štiri pravokotne lopatice, uporaben za testiranja na terenu in omogoča preračun v osnovne Binghamove parametre.

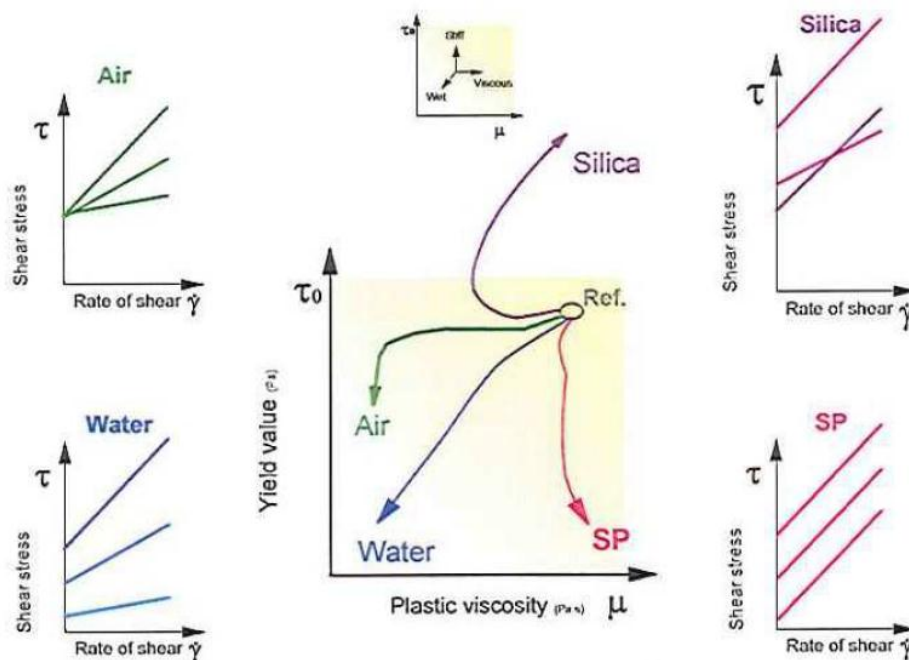


Slika 18: ICAR Rheometer (<http://concretepixels.com/blog/wp-content/uploads/2008/11/rh-instrumentjpg.png>)

- ~ ConTec Rheometer-4SCC – za kontrolo SCC betonov na gradbišču, lopatice v obliki kril.

3.6 Vpliv posameznih sestavin na reološke lastnosti

Leta 1983 je Wallevik [6] prikazal neke splošne smernice, kako dodajanje vode, aeranta, superplastifikatorja ali mikrosilike vpliva na strižno napetost na meji tečenja in viskoznost. Sestavine imajo različne vplive na tečenje sveže betonske mešanice. Najlažje je to prikazati s pomočjo diagrama imenovanega reograf (ang. yield value-viscosity diagram).



Slika 19: Na grafih prikazan vpliv posameznih sestavin. (Wallevik, 2009)

Voda – z dodajanjem vode se pomikamo proti začetku grafa, kar pomeni, da se znižujeta tako strižna napetost na meji tečenja kot tudi viskoznost. S količino vode vplivamo tudi na v/c razmerje in na konsistenco.

Cement – povečanje cementa malenkostno vpliva na povečanje plastične viskoznosti, glede na količino ima zmanjšanje vode veliko večji vpliv.

Agregat – oblika agregata ima bistven vpliva na lastnosti svežih mešanic. Pri betonu ima mešanica z uporabljenim zaobljenim agregatom manjšo plastično viskoznost in tudi nižjo napetost na meji tečenja od tiste z drobljenim agregatom. Pomemben je tudi delež grobih in finih zrn: z zmanjšanjem deleža grobih zrn se poveča napetost na meji tečenja. S povečevanjem deleža finih zrn se poveča napetost na meji tečenja, pomembno pa se zmanjša plastična viskoznost.

Superplastifikator – z dodajanjem superplastifikatorjev svežim mešanicam se znižuje potrebo po vodi oz. ob nespremenjeni količini vode se poveča tečenje in posledično se zmanjša napetost na meji tečenja. Superplastifikatorji lahko zagotovijo zahtevano obdelovalnost ob zmanjšanju količine zamesne vode ali pa izboljšajo obdelovalnost svežih betonskih mešanic ali malt ob nespremenjeni količini zamesne vode. Superplastifikatorji podaljšujejo čas zahtevane obdelovalnosti [5].

Aerant – z uvajanjem drobnih zračnih mehurčkov v svežo mešanico povečujemo poroznost, ki vpliva na zmanjšanje plastične viskoznosti, na napetost na meji tečenja pa nima bistvenega vpliva. Povečanje poroznosti izboljšuje obdelovalnost in zmanjšuje nagnjenost k izcejanju vode in segregaciji [5].

Mikrosilika – mikrosilika je zelo fin prah z delci tudi do 50-krat manjšimi od delcev cementa. Se dobro razporedi po sveži mešanici in deluje na dva načina: s fizikalnim zgoščevanjem strukture mešanice in pucolansko reakcijo. Pri prvem načinu se delci mikrosilike pri zamešanju sveže betonske mešanice razporedijo med prazne prostore med delce cementa in tako izpodrivajo vodo, kar pomeni zgostitev strukture betonske mešanice. Pri drugem načinu pa mikrosilika reagira s Ca(OH)_2 v CSH fazo, kjer hidratacijski produkti zapolnijo prazna mesta v hidratizirani cementni pasti. Z dodajanjem mikrosilike se zvišuje potreba po vodi, zato jo vedno uporabljamo skupaj s superplastifikatorji. Izboljšuje obdelovalnost in kohezivnost ter zmanjša možnost segregiranja in izcejanja vode. Mikrosilika se v svežih mešanicah obnaša podobno kot stabilizator. Z zamenjavo cementa z mikrosiliko, vendar le do določene meje, lahko plastično viskoznost zmanjšamo tudi do 50 %. Ko je ta meja presežena, se napetost na meji tečenja močno poveča [5].

Žlindra – vsebnost žlindre v betonskih mešanicah vpliva na manjšo potrebo po vodi ob zahtevani konsistenci. Žlindra poveča obdelovalnost in črpnost sveže mešanice, ter pospeši čas začetka vezanja.

[13]

4 LASTNE PREISKAVE

4.1 Uvod

Vse opravljene preiskave so bile opravljene v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju FGG, v okviru Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij. Preiskave reoloških lastnosti so potekale tako na svežih betonih kot tudi maltah. Cilj moje diplomske naloge je narediti primerjavo med reološkimi lastnostmi svežih malt in betonov. Delež posameznih sestavin je bil določen za betone, potem pa z metodo, imenovano CEM ali »concrete equivalent mortar«, še za malte. Preiskave smo opravili na 26 različnih mešanicah, v katerih smo uporabili dva različna cementa, tri kemijske in tri mineralne dodatke.

4.2 Uporabljeni materiali

4.2.1 Agregat

Za pripravo betonskih mešanic je bil uporabljen drobljen apnenčev agregat. Za sestavo agregata so bile uporabljene frakcije 0/2, 0/4, 4/8 in 8/16. Prav tako smo za pripravo malt uporabili drobljen apnenčev agregat, le da je bila uporabljena samo frakcija 0/2.

4.2.2 Voda

Uporabljena je bila pitna voda iz vodovoda. Gostota vode je 1 kg/dm^3 .

4.2.3 Cement

Uporabljeni sta bili dve vrsti cementa:

- ~ CEM I 42,5R,
- ~ CEM II/A-M (LL-S) 42,5R.

CEM I 42,5R je portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 in visoko zgodnjo trdnostjo (R).

Sestava:

- ~ minimalno 95% klinkerja,
- ~ regulator vezanja –sadra.

CEM II/A-M (LL-S) 42,5R je portlandski mešani cement z dodatkom apnenca (LL) in žindre (S). Trdnostni razred je 42,5 in ima visoko zgodnjo trdnost.

Sestava:

- ~ minimalno 80% portlandskega klinkerja,
- ~ 6 – 20 % mešanega dodatka – apnenec in žindra,

- ~ maksimalno 5% dodatkov – polnil,
- ~ regulator vezanja- sadra (max 5 %).

4.2.4 Kemijski dodatki

- ~ superplastifikator;
- ~ aerant;
- ~ gostilec.

4.2.5 Mineralni dodatki

- ~ žindra;
- ~ mikrosilika;
- ~ tuf.

4.3 Izračun betonske mešanice

Pri izračunu recepture za betonsko mešanico za osnovo vzamemo 1 m^3 . Nato določimo količino cementa, vode, zraka, kemijskih ter mineralnih dodatkov. Predpostavimo 2 % delež por. S pomočjo gostot izračunamo volumne posameznih sestavin v litrih. Ker količino cementa in vode poznamo, delež zraka pa predpostavimo, lahko količino agregata izračunamo tako, da skupaj z zrakom, vodo in cementom tvori 1000 l. Potem pa preračunamo koliko kilogramov agregata potrebujemo.

Ker predpostavimo, da imamo popolnoma suh agregat, potrebujemo še podatke o vodovpojnosti posamezne frakcije. Izračunamo količino vode, ki jo agregat posamezne frakcije vpije, in jo odštejemo od mase agregata. Če želimo obdržati enako učinkovito vodocementno razmerje, kot je predvideno, moramo količino vpite vode prišteti h količini vode za zahtevano vodocementno razmerje.

Preglednica 3: Tabela za preračun mešanice za osnovni beton (mešanica je bila zasnovana v okviru diplomskih nalog študentov Nejca Andrejke in Bojana Kresala)

Vhodne surovine	Proc. %	Masa v kg	Vodo - vpojnost %	Spec. masa kg/dm ³	Volumen l	Sestava za 1 m ³		Vlaga materiala %	Teža vlažnega materiala	Potrebno vode
Vrsta cementa CEM I 42,5 R		400		3,01	132,89	400	kg			
Kol. vode - absolutno		200		1	200,00	200	l			211,97
Kol. vode - efektivno		188,03								
Procent por	2				20					
Agregat		1747,2		2,7	647,11	1747,2	kg	0		
		površ. Suh							izsušen agregat	
0/2	22	384,38	0,99	2,7	142,4	384,38	kg	0	384,38	380,58
0/4	33	576,57	0,72	2,7	213,5	576,57	kg	0	576,57	572,42
4/8	18	314,50	0,75	2,7	116,5	314,50	kg	0	314,50	312,14
8/16	27	471,74	0,35	2,7	174,7	471,74	kg	0	471,74	470,09
Količina vpite vode(l):										11,97

Primer za osnovno betonsko mešanico:

Najprej izberemo 400 kg cementa ter 200 l vode (vodocementno razmerje 0,50), nato preračunamo kakšno prostornino zavzame v litrih; pri cementu delimo 400 z 3,01 in dobimo 132,89 l cementa, pri vodi ostane enako. Nato od 1000 litrov odštejemo količino cementa, vode in zraka ter dobimo količino agregata. Volumen agregata pomnožimo s specifično maso ter dobimo maso v kilogramih. Nato agregat razdelimo po posameznih frakcijah. Da dobimo popolnoma suh agregat, odštejemo količino vode, ki jo lahko vpije (11,97 l). Ker želimo ohraniti enako efektivno vodocementno razmerje, količino vode prištejemo k absolutni količini vode, dobimo 211,97 l vode.

Tako za osnovno mešanico potrebujemo:

- ~ 400 kg cementa,
- ~ 211,97 l vode,
- ~ agregat:
 - 0/2 380,58 kg
 - 0/4 572,42 kg
 - 4/8 312,14 kg
 - 8/16 470,09 kg.

Za preračun malt iz receptur za betone smo uporabili metodo CEM (»concrete equivalent mortar«).

4.4 Metoda CEM

Metoda CEM je novo orodje za projektiranje betonskih mešanic, ki vsebujejo dodatke. CEM ali »concrete equivalent mortar« je metoda, ki išče betonu kar najbolj podobno (reprezentativno) malto. Njen glavni namen je zmanjšanje zamesnih količin mešanic za preskušanje in s tem tudi pospešitev testiranj.

V zadnjih desetletjih se gradi v vedno bolj ekstremnih razmerah in roki za dokončanje so vedno krajši, zato se je uporaba različnih dodatkov zelo povečala. Ker pa imajo dodatki različne vplive na različne mešanice in ne reagirajo enako z vsemi cementi, je potrebno mešanice pred uporabo preiskati v laboratoriju.

Pri razvoju metode so strokovnjaki poskušali uvesti metodo, ki je uporabna in se jo lahko prenese v prakso, zato so upoštevali naslednja merila:

- ~ Hitrost - omogoča hitro izvedbo velikega števila poskusov;
- ~ Preprostost - uporabna za strokovnjake, ki imajo na voljo standardno opremo;
- ~ Vsestranska - uporabnost: uporabna za številne konsistence;
- ~ Zanesljivost - dobra povezava z reološkimi lastnostmi betona.

Upošteva se, da obstaja preprosta povezava med reološkimi lastnostmi betonov in ekvivalentnih malt, ki jih dobimo s sejanjem betonske mešanice skozi sito 5 mm. Presevek se imenuje malta enakovredna betonu. Vendar pa je takšen postopek še vseeno zamuden, zato je bilo potrebno definirati metodo, ki bo omogočala projektiranje betonu ekvivalentne malte brez procesa sejanja. Izbrana je bila metoda z razlezom, s stožcem, dvakrat manjšim od Abramsovega stožca. Naslednji korak je bil oblikovati metodo CEM neposredno iz sestave betona. Vse sestavine so ostale enake, spremenila se je le sestava agregata, tako da so odstranili delce, večje od 2 mm. V ta namen so naredili pet osnovnih (primerjalnih) malt, ki so ustrezale različnim kriterijem. Prva je bila klasična cementna malta, druge pa so temeljile na:

1. masa agregata v malti je ekvivalentna masi v betonu;
2. specifična površina delcev v malti je ekvivalentna tisti v betonu.

Upoštevati je treba, da mora biti vodocementno razmerje v malti enako vodocementnemu razmerju v betonu.

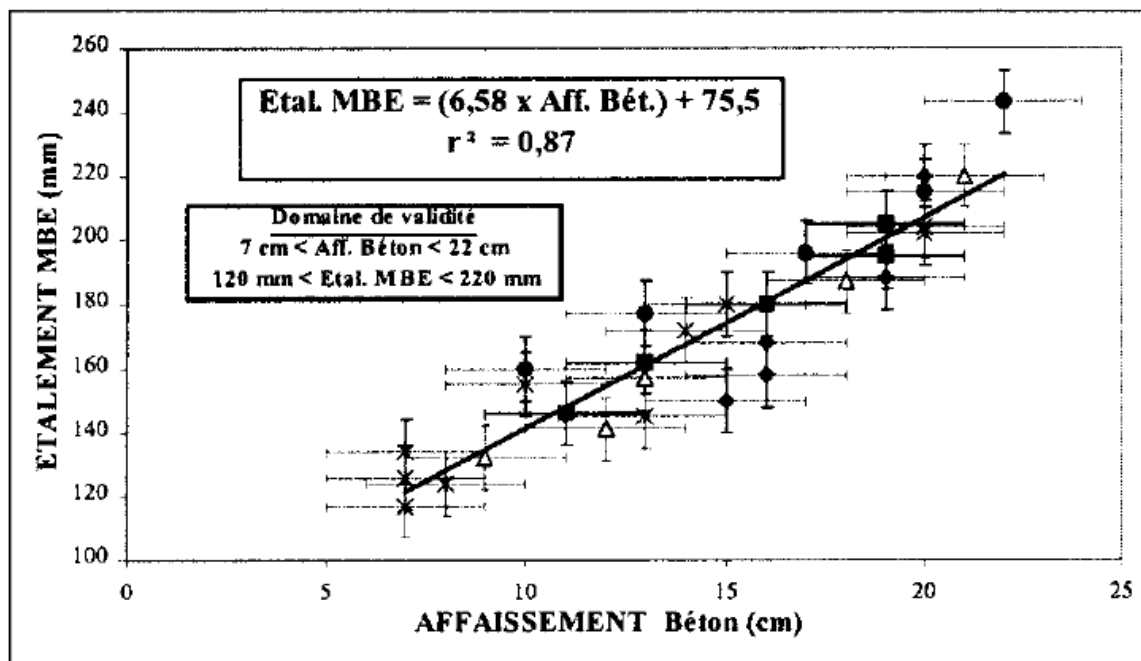
Preiskave so pokazale, da lahko sestavo betonu enakovredne malte iz betona dobimo, če upoštevamo naslednje pogoje:

- ~ ista vrsta in količina cementa,
- ~ ista vrsta in odmerek mineralnih dodatkov,

- ~ enako vodocementno razmerje,
- ~ enaka vrsta in odmereki kemijskih dodatkov in enak način vnosa,
- ~ uporaba istega agregata,
- ~ doda se količina drobnega peska, da dobimo enako površino zrn kot v betonu.

Upoštevati je potrebno tudi:

- ~ iz načela računanja CEM, sledi da je samo ena formula CEM za eno betonsko mešanico;
- ~ če se deleži v betonski mešanici spremenijo (npr. V/C, grobi/fini agregat), se spremenijo deleži v mešanici CEM in jo je zato potrebno na novo izračunati;
- ~ korelacijske krivulje veljajo samo za betonske mešanice, za katere so bile mešanice CEM narejene (primer korelacijske krivulje Slika 20);
- ~ delež posameznih elementov se določa po masi in ne volumnu. [14]



Slika 20: Korelacijska krivulja med razlezom CEM in posedom betona

4.5 Preiskave na svežih maltah

4.5.1 Mešanje malt

Mešanje svežih malt je potekalo v mešalcu HOBART A200. Mešalec se obrača okoli svoje osi in istočasno planetarno okoli pogonske gredi. Maksimalna velikost mešanice je 20 litrov. Omogoča mešanje s tremi različnimi hitrostmi.

Postopek mešanja:

Najprej navlažimo posodo in mešalo, nato dodamo cement in prižgemo mešalec na najnižjo hitrost. Zatem počasi dolivamo vodo in dodatke, počakamo, da se dobro premeša (prib. 30s) in začnemo z dodajanjem agregata. Ko na površini ni več vidnega suhega agregata, mešalec ustavimo in ročno sčistimo stene posode. Nato mešalec nastavimo na največjo hitrost in mešamo še približno 3 minute.



Slika 21: Mešalec

4.5.2 Razlez na stresalni mizici

Razlez na stresalni mizici uporabljamo za ugotavljanje konsistence svežih malt. Za postopek potrebujemo [15]:

- ~ kovinski konusni lijak; notranjost mora biti gladka in odporna proti agresivnemu delovanju cementne paste; dimenzije konusa: širina spodaj $100 \pm 0,5$ mm, širina zgoraj: $70 \pm 0,5$ mm, višina: $60 \pm 0,5$ mm;
- ~ nastavek za polnjenje;
- ~ stresalna mizica s premerom plošče 300 mm;
- ~ leseno nabijalo;
- ~ kljunasto merilo ali ravnilo;
- ~ zidarsko žlico.

Postopek merjenja razleza [15]:

- ~ notranjost kovinskega konusnega lijaka in nastavek za polnjenje navlažimo;
- ~ dobro premešano svežo malto vlijemo do polovice lijaka, nato 10-krat potolčemo z lesenim nabijalom;
- ~ malto nalijemo do vrha, zopet 10x potolčemo z lesenim nabijalom;
- ~ odstranimo nastavek za vlivanje;
- ~ odstranimo odvečno malto;
- ~ počasi in enakomerno dvignemo lijak;
- ~ pomerimo začetni razlez;
- ~ nato začnemo s stresanjem mizice (15 padcev po 10 mm);
- ~ pomerimo razlez v dveh pravokotnih smereh, rezultat je povprečje obeh.



Slika 22: Stresalna mizica

4.5.4 Meritve z reometrom ConTec Viscometer 5

Z reometrom ConTec Viscometer 5 smo preučevali obnašanje svežih malt oz. njihove reološke lastnosti. Reometer temelji na predpostavki, da imamo Binghamov model tekočine, vendar ne meri direktno parametrov, uporabljenih v enačbi, ki opisujejo Binghamov model tekočine. Ker smo opremo za malte v naših preiskavah prvič uporabili in le-ta še ni bila kalibrirana, nismo uporabili možnosti direktnega preračuna reoloških lastnosti s programom FreshWin. Reometer meri hitrost vrtenja in navor, ki ga povzroča malta. Iz postopka meritev pa izračuna faktorja G (sila, potrebna, da beton/malta steče) in H (odpor malte/betona proti spremembi strižne hitrosti).

Postopek meritev:

- ~ pripravimo vse potrebne sestavine za zamešanje malte;
- ~ pomembno je, da čas dodajanja vode označimo na reometru;
- ~ sveže zamešano malto vlijemo v posodo in jo vstavimo v reometer;
- ~ malto dobro premešamo, zapremo reometer in ga poženemo;

- ~ po prvem ciklu preizkušanja reometer odpremo in malto zopet dobro premešamo (pazimo, da se malta ne prične nabirati na narebrenem obodu posode) ter požemo reometer;
- ~ takšen postopek ponovimo trikrat, nato pa malto vrnemo v mešalec;
- ~ enak postopek ponovimo po 20, 40 in 60 minutah.

Dobljene rezultate izpišemo v program Excel, kjer jih tudi obdelamo. S pomočjo posebnih formul preračunamo parametra G in H v τ_0 in μ .

Enačba za preračun iz G v τ_0 :

$$\tau_0 = G \cdot (1/R_i^2 - 1/R_o^2) / (4 \cdot \pi \cdot h \cdot \ln(R_o/R_i)).$$

Enačba za preračun iz H v μ :

$$\mu = H \cdot (1/R_i^2 - 1/R_o^2) / (8 \cdot \pi^2 \cdot h).$$

R_i – polmer notranjega valja reometra

R_o – polmer zunanjega valja reometra

h – višina malte/betona na rebrih valja reometra

4.6 Preiskave na svežih betonih

4.6.1 Preskus s posedom stožca

Preskus s posedom stožca je najenostavnejša metoda za določanje konsistence svežih betonov. Uporablja se za tekoče ter srednje in mehko plastične betonske mešanice. Preskus ni uporaben za betone z agregatnimi zrn, večjimi od 40 mm.

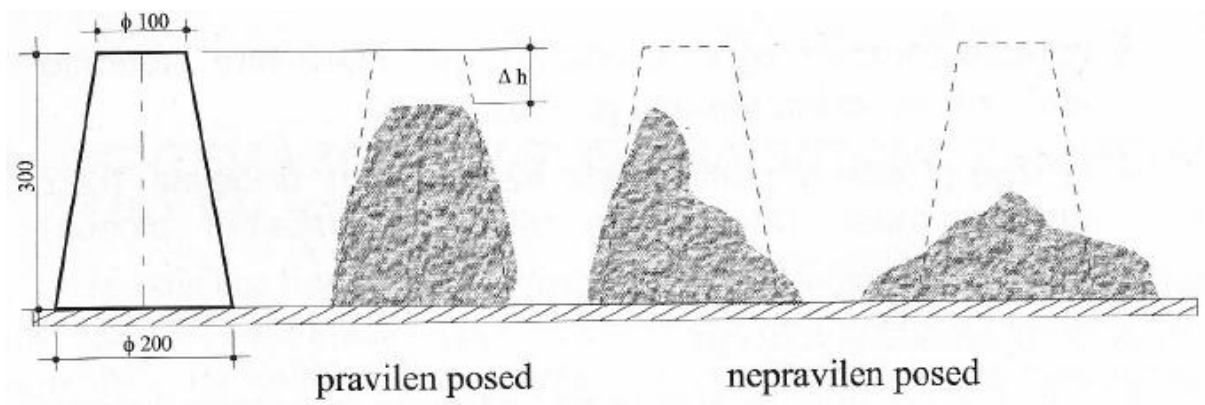
Za preskus potrebujemo:

- ~ konus (premer zgornje odprtine je 100 ± 2 mm, spodnje 200 ± 2 mm, višina konusa 300 ± 2 mm),
- ~ standardno kovinsko palico za nabijanje (premer palice 16 mm in dolžine 60 cm z zaobljenim vrhom),
- ~ zidarsko žlico,
- ~ merilo.

Postopek:

Stožec postavimo na podlago in ga dobro tiščimo k tlom. Polnjenje stožca poteka v treh plasteh, najprej napolnimo do 1/3 in s 25 prebodi z jekleno palico zgostimo prvo plast, napolnimo do 2/3 in zopet zgostimo s 25 prebodi, vendar prebadamo le do prve plasti in ne do tal. Nato ga napolnimo do vrha in ponovno zgostimo s 25 prebodi. Z zidarsko žlico odstranimo odvečen beton, po 30 sekundah

stožec počasi dvignemo in ga postavimo ob betonski stožec. Na rob stožca postavimo ravnilo ali jekleno palico, ter pomerimo razliko višin (zaokrožimo na 10 mm). Če zgornja plast ni ravna je merodajna najmanjša razlika višin. Če je posed nepravilen ali pa postopek traja dlje kot 150 sekund se preskus ponovi [16, 17].



Slika 23: Posed stožca (Gradiva-vaje 2008/09)

Razredi poseda:

Razred	Posed
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220

Preglednica 4: Razredi poseda

4.6.2 Metoda z razlezom

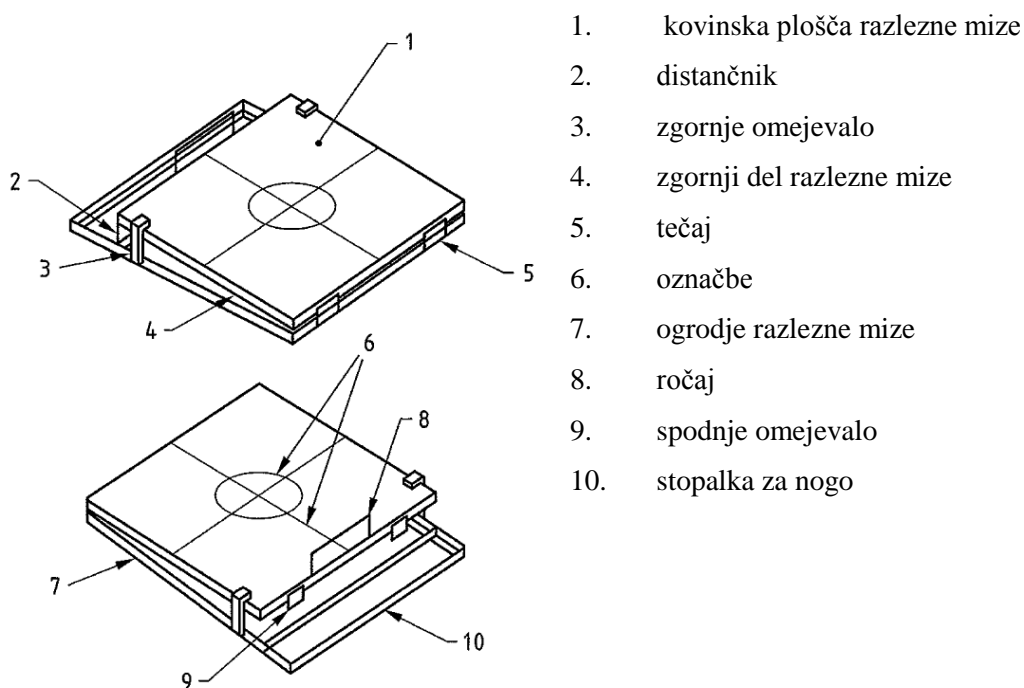
Ta metoda se uporablja za plastične in tekoče mešanice. Primerna je za določitev konsistence betonov, katerih razlez se giblje med 340 mm in 620 mm. Ta metoda ni primerna za penobeton in za betone z največjim agregatnim zrnem, večjim od 63 mm [18].

Potrebujemo:

- ~ skrajšan kovinski konus (premer osnove 200 ± 2 mm, premer vrha 130 ± 2 mm, višina 200 ± 2 mm);
- ~ lesen nabijač, dimenzij 4x4 cm;
- ~ gibljivo razlezno mizo dimenzij 700 ± 2 mm x 700 ± 2 mm, postavljeno na tog okvir;
- ~ zidarsko žlico.

Postopek:

Skrajšan kovinski konus postavimo na razlezno mizo in ga v dveh enakih slojih napolnimo. Z lesenim nabijačem vsak sloj nabijemo z desetimi udarci. Z zidarsko žlico odstranimo odvečen beton in po 30 sekundah konus počasi dvignemo. Stopimo na stopalko za nogo, da okvir mize držimo trdno k tlom, z roko pa dvignemo mizico za 4 centimetre in jo spustimo. Nato postopek dvigovanja in spuščanja ponovimo 15-krat. Pomerimo d_1 in d_2 , ki sta pravokotna drug na drugega ter vzporedna robovom mize. Rezultat je povprečje obeh dimenzij. [17,18]



Slika 24: Razlezna miza (SIST EN 12350-5:2009)

Razredi razleza [17]:

Razred	Razlez (v mm)
F1	≤ 340
F2	350 do 410
F3	420 do 480
F4	490 do 550
F5	560 do 620
F6	≥630

Preglednica 5: Razredi razleza

4.6.3 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu

Obstajata dve metodi določanja vsebnosti zraka v svežem betonu:

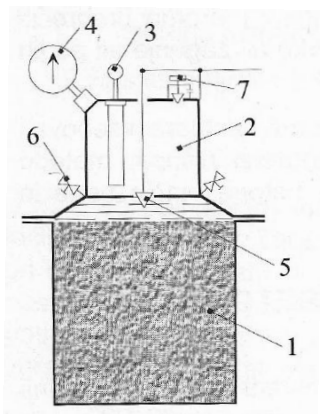
- ~ metoda vodnega stolpca,
- ~ manometerska metoda.

Za manometersko metodo potrebujemo:

- ~ posodo valjaste oblike s prirobnico iz jekla,
- ~ tog pokrov s prirobnico iz jekla, z zaklepom za tesno pritrđitev na posodo,
- ~ manometer, pritrjen na pokrov in kalibriran ,
- ~ zračno črpalko (tlačilko), vgrajeno na pokrov,
- ~ zgoščevalno palico (okrogla ali kvadratna),
- ~ leseno kladivo,
- ~ zidarsko žlico.

Postopek:

Svežo betonsko mešanico vgradimo v posodo v treh približno enakih slojih in vsak sloj posebej zgotimo z enim od načinov zgoščanja. Če zgoščamo s kovinsko palico, je število udarcev treba prilagoditi konsistenci betona. Odvečen beton odstranimo z zidarsko žlico in očistimo nalegajoče robove posode in pokrova. Pokrov namestimo na osnovno posodo in ga čvrsto pritrđimo z zaklepom. V prostor med osnovno posodo in pokrovom skozi odprtine z ventilom nalijemo vodo. Rahlo potolčemo z lesenim kladivom, da se zajeti zrak izloči. Nato zapremo ventila in z zračno črpalko vnašamo zrak toliko časa, da kazalec na manometru kaže nulo. Ko se zrak po nekaj sekundah ohladi na temperaturo okolice, je treba pritisk ponovno uravnati. Po izravnanju tlaka odpremo ventil in na manometru odčitamo »porozimetrijski indeks«. Ob pravilni kalibraciji manometra predstavlja porozimetrijski indeks delež zraka v procentih glede na celotno prostornino svežega betona v posodi. [17,19]



Slika 25: Naprava za merjenje vsebnosti zraka v betonu (Gradiva-vaje 2008/09)

- 1 osnovna posoda
- 2 pokrov
- 3 zračna črpalka
4. manometer
5. ventil
6. odprtini z ventilom
7. izpustni ventil

4.7 Uporabljene mešanice svežih malt

Mešanica:	MR1		MR1a	
Agregat:	0/2	13,032 kg	0/2	13,024 kg
Cement:	CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R	5,600 kg	CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R	5,600 kg
Voda:		2,932 kg		2,928kg
Dodatek I:	/	/	superplastifikator	5,6 g
Dodatek II:	/	/	/	/
Mešanica:	MR1b		MR1c	
Agregat:	0/2	13,017 kg	0/2	13,024 kg
Cement:	CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R	5,600 kg	CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R	5,600 kg
Voda:		2,924 kg		2,928kg
Dodatek I:	superplastifikator	11,2 g	superplastifikator	16,8 g
Dodatek II:	/	/	/	/
Mešanica:	ML1		ML1a	
Agregat:	0/2	13,022 kg	0/2	13,024 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	5,600 kg	CEM I 42,5 R	5,600 kg
Voda:		2,932 kg		2,928kg
Dodatek I:	/	/	superplastifikator	5,6 g
Dodatek II:	/	/	/	/
Mešanica:	ML1b		ML1c	
Agregat:	0/2	13,017 kg	0/2	13,009 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	5,600 kg	CEM I 42,5 R	5,600 kg
Voda:		2,924 kg		2,920 kg
Dodatek I:	superplastifikator	11,2 g	superplastifikator	16,8 g
Dodatek II:	/	/	/	/
Mešanica:	MV1a		MV1b	
Agregat:	0/2	13,032 kg	0/2	13,032 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	5,600 kg	CEM I 42,5 R	5,600 kg
Voda:		3,098 kg		3,262 kg
Dodatek I:	/	/	/	/
Dodatek II:	/	/	/	/
Mešanica:	MV1c		MRA1a	
Agregat:	0/2	13,032 kg	0/2	13,021 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	5,600 kg	CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R	5,600 kg
Voda:		3,428 kg		2,928 kg
Dodatek I:	/	/	superplastifikator	5,6 g
Dodatek II:	/	/	aerant	2,24 g
Mešanica:	MRA1b		MRA1c	
Agregat:	0/2	13,020 kg	0/2	13,020 kg
Cement:	CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R	5,600 kg	CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R	5,600 kg
Voda:		2,928 kg		2,928kg
Dodatek I:	superplastifikator	5,6 g	superplastifikator	5,6 g
Dodatek II:	aerant	3,36 g	aerant	2,8 g

Mešanica:	MZ1a		MZ1b	
Agregat:	0/2	13,057 kg	0/2	13,098 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	4,480 kg	CEM I 42,5 R	3,360 kg
Žlindra:		1,064 kg		2,128 kg
Voda:		2,896 kg		2,868 kg
Dodatek I:	superplastifikator	11,09 g	superplastifikator	10,98 g
Mešanica:	MZ1c			
Agregat:	0/2	13,138 kg		
Cement:	CEM I 42,5 R	2,24 kg		
Žlindra:		3,192 kg		
Voda:		2,842 kg		
Dodatek I:	superplastifikator	10,86 g		
Mešanica:	MM1a		MM1b	
Agregat:	0/2	13,066 kg	0/2	13,123 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	5,320 kg	CEM I 42,5 R	5,04 kg
Mikrosilika:		203 g		406 g
Voda:		2,882 kg		2,844 kg
Dodatek I:	superplastifikator	16,57 g	superplastifikator	16,34 g
Mešanica:	MM1c			
Agregat:	0/2	13,037 kg		
Cement:	CEM I 42,5 R	5,460 kg		
Mikrosilika:		102 g		
Voda:		2,902 kg		
Dodatek I:	superplastifikator	16,68 g		
Mešanica:	MG1a		MG1b	
Agregat:	0/2	12,058 kg	0/2	12,054 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	5,600 kg	CEM I 42,5 R	5,600 kg
Voda:		3,590 kg		3,588 kg
Dodatek I:	gostilec	5,6 g	gostilec	8,4 g
Dodatek II:	/	/	/	/
Mešanica:	MG1c			
Agregat:	0/2	12,050 kg		
Cement:	CEM I 42,5 R	5,600 kg		
Voda:		3,586 kg		
Dodatek I:	gostilec	11,20 g		
Dodatek II:	/	/		
Mešanica:	MT1a		MT1b	
Agregat:	0/2	13,036 kg	0/2	13,118 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	5,04	CEM I 42,5 R	4,480 kg
Tuf:		448 g		896 g
Voda:		2,884 kg		2,829 kg
Dodatek I:	superplastifikator	27,44 g	superplastifikator	26,88 g

Mešanica:	MT1c	
Agregat:	0/2	12,994 kg
Cement:	CEM I 42,5 R	5,32 kg
Tuf:		224 g
Voda:		2,912 kg
Dodatek I:	superplastifikator	27,72 g

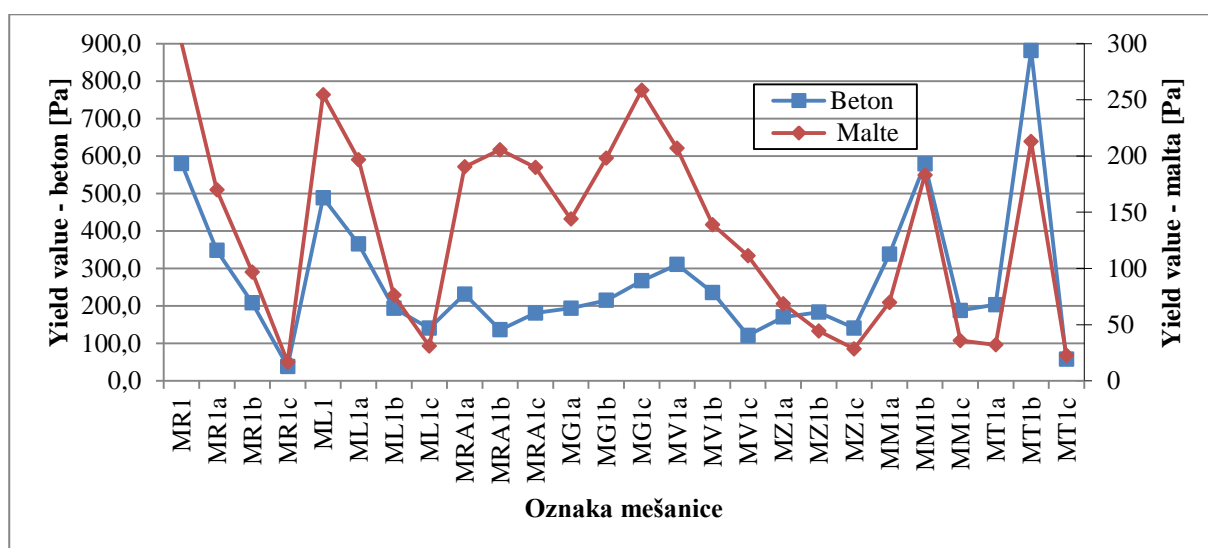
5 ANALIZA REZULTATOV

Analizirali smo 26 različnih svežih betonskih mešanic (preiskave, opravljene v okviru diplomskih nalog Nejca Andrejke in Bojana Kresala) in svežih malt. Vsa testiranja smo izvedli z reometrom ConTec Viscometer 5, in sicer v času 0 min, 20 min, 40 min in 60 min. Za vsak čas (npr. 0 min) smo izvedli tri ponovitve meritev, katerih rezultate smo nato povprečili. Reometer omogoča izvoz rezultatov meritev v Excel, kjer smo podatke uredili in naredili primerjave s pomočjo grafov.

5.1 Primerjava v času 0 minut

Ker smo na istem grafu združili podatke od malt (desna y-os) in betonov (leva y-os), oznake MR1, MR1a itd., pomenijo tudi CR1, Cr1a itd.

Napetost na meji tečenja



Slika 26: Primerjava napetosti na meji tečenja beton-malta

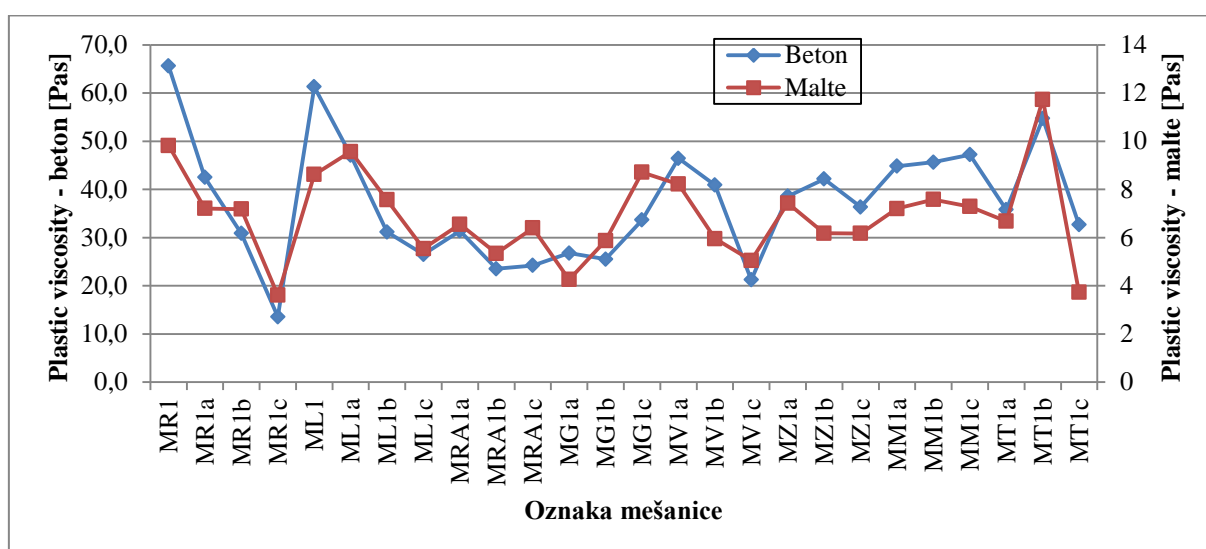
V začetku in na koncu grafa opazimo, da je korelacija pri napetosti na meji tečenja med maltami in betoni dokaj zadovoljiva. Pri mešanicah MRA(CRA), MG(CG) ter MV(CV) pa je opazen razkorak med rezultati. Pri maltah se napetost na meji tečenja mnogo bolj poveča kot pri betonih.

MRA so mešanice z dodatkom superplastifikatorja in aeranta. V osnovi naj bi dodajanje aeranta vplivalo samo na plastično viskoznost, vendar je možno, da v večjih količinah deluje tudi na zmanjšanje napetosti na meji tečenja. Tako je možno, da je aerant pri betonu zmanjšal napetost na meji tečenja.

Mešanice MG vsebujejo gostilec, ki izboljšuje stabilnost svežih mešanic. Pri betonu opazimo konstantno naraščanje napetosti, pri maltah pa je naraščanje zelo strmo. Tu bi bilo verjetno potrebno spremeniti dozacijo gostilca pri maltah ali betonih, da bi bile mogoče podrobnejše primerjave.

Mešanice MV so mešanice, pri katerih smo spreminjali vodocementno razmerje. Opazimo, da ima dodajanje vode oz. povečanje vodocementnega razmerja manjši vpliv na zmanjšanje napetosti na meji tečenja pri maltah kot pa pri betonih.

Viskoznost

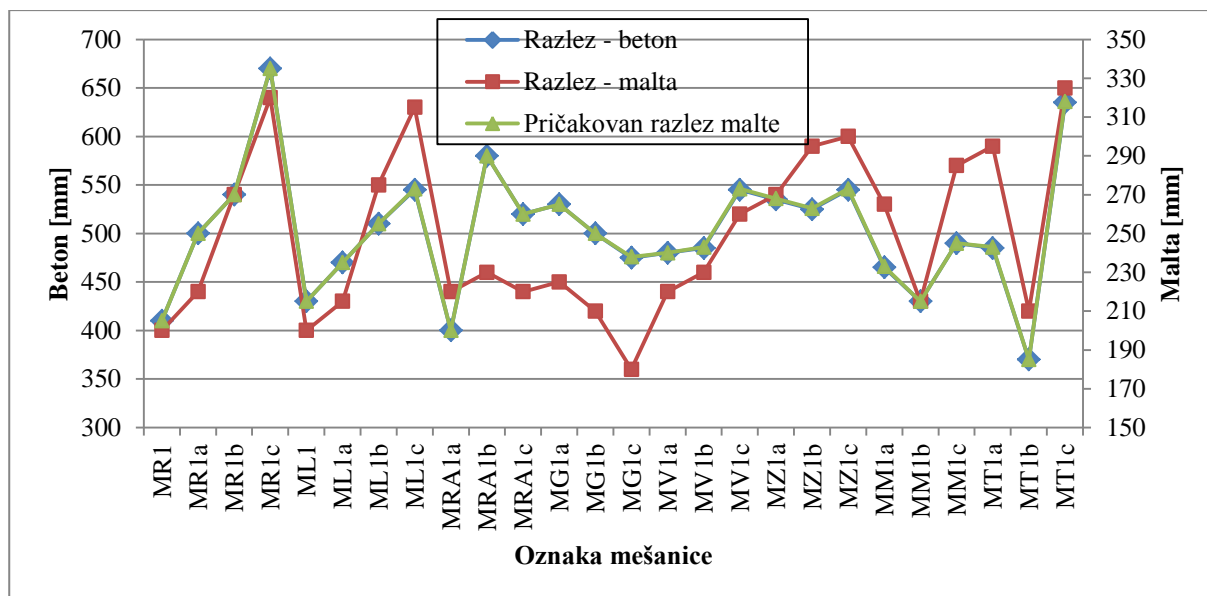


Slika 27: Primerjava viskoznosti beton-malta

Spreminjanje plastične viskoznosti pri maltah in betonih je zelo podobno. Zanimivo je, da so mešanice, katerih napetosti na meji tečenja so bile povsem različne, pri plastični viskoznosti primerljive.

Največja odstopanja opazimo pri mešanicah, pri katerih smo nekaj cementa zamenjali z mikrosiliko (MM), ter mešanicah brez dodatkov (MR1 in ML1 – različna sta samo cementa). Znano je, da mikrosilika zmanjša poroznost cementne paste, zato je verjetno, da ima zmanjšanje poroznosti večji vpliv na betone, ki vsebujejo večja zrna agregata, kot na malte z manjšimi agregatnimi zrn.

Razlez



Slika 28: Primerjava razleza beton-malta

Razlez je bil najprej izmerjen na betonskih mešanica (v okviru diplomskih nalog Nejca Andrejke in Bojana Kresala), nato pa smo ga preračunali, da smo dobili pričakovan razlez malte. Preračun je potekal po naslednji enačbi:

$$(d_m - 100)/100 = (d_c - 200)/200 \text{ izrazimo } d_m = d_c/2.$$

d_m – razlez malte

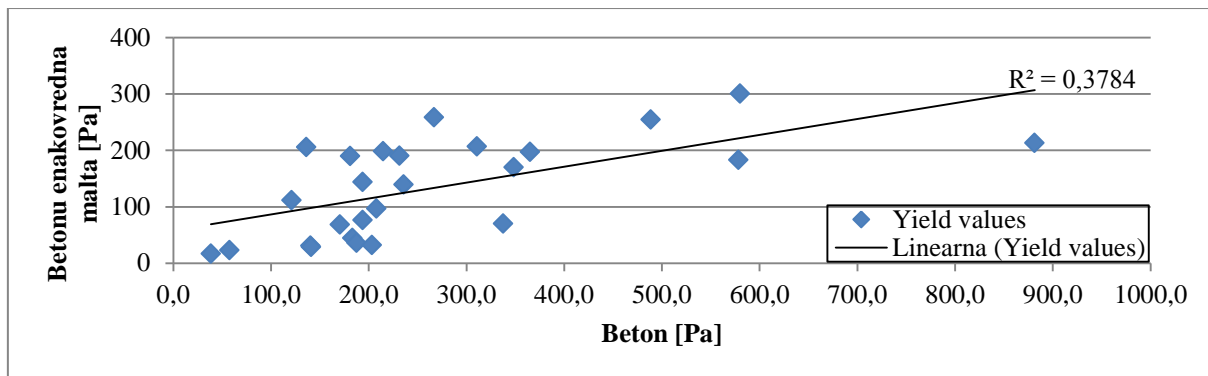
d_c – razlez betona

Na sliki 27 imamo primerjavo razlezov malt in betonov ter pričakovan razlez malte. Opazimo, da se dejanski razlez malte ne ujema najboljše s pričakovanim. Ponovno so največje razlike pojavljajo pri mešanica MRA in MG. Če pogledamo sliko 25, kjer je primerjava napetosti na meji tečenja, ugotovimo, da je manjši razlez malte od pričakovanega razleza logičen. Zaradi takšnih odstopanj krivulj napetosti na meji tečenja med betonom in maltami je bilo pričakovati, da bo razlez malte manjši od pričakovanega.

Najboljše ujemanje je pri mešanici MM1b. Že iz slike 25 je razvidno, da se napetosti na meji tečenja dobro ujemata, zato je bilo pričakovati dobro ujemanje tudi pri razlezu. Pri betonu je bil razlez 430 mm, pri malti pa 215 mm, tako se dejanski razlez malte popolnoma ujema s pričakovanim.

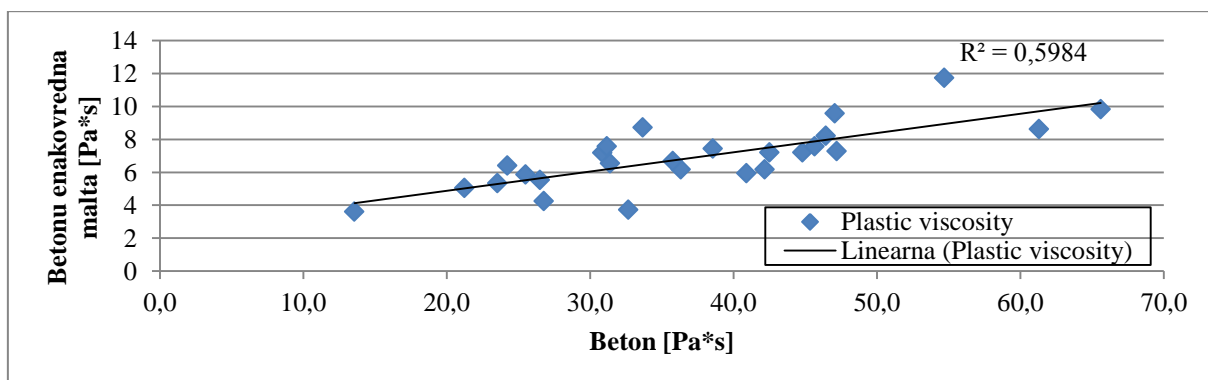
Na slikah 28 do 30 smo za boljšo primerjavo ujemanja rezultatov naredili primerjavo s pomočjo trendne črte. Vpeljali smo tudi vrednost R^2 , ki ponazarja ujemanje točk s trendno črto. Vrednost R^2 se giblje med 0 in 1. Bližje kot je 1, boljše je ujemanje in posledično manj točk odstopa od trendne črte.

Napetost na meji tečenja



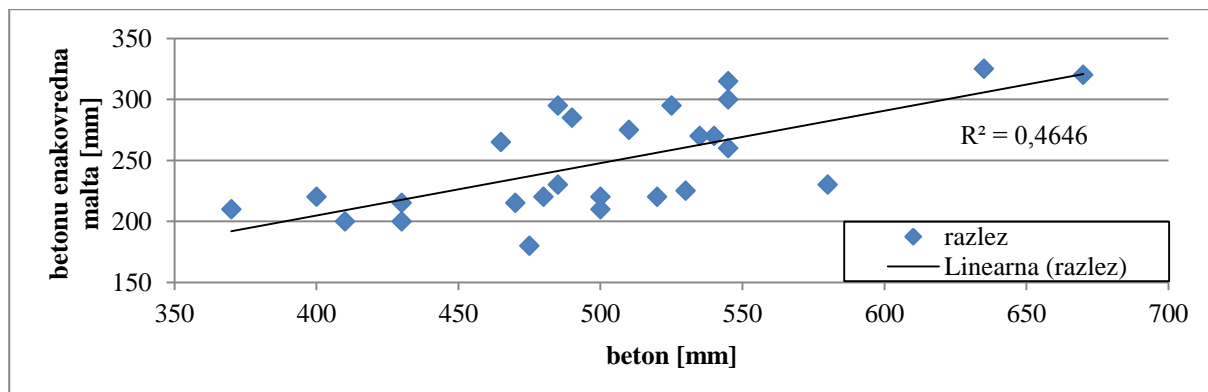
Slika 29: Trendna črta - napetost na meji tečenja

Plastična viskoznost



Slika 30: Trendna črta - plastična viskoznost

Razlez



Slika 31: Trendna črta – razlez

Iz slik 28 do 30 je razvidno, da se točke ne prilegajo najboljše trendni črti, kar dokazujejo tudi rezultati vrednosti R^2 . Najslabše se točke prilegajo pri napetosti na meji tečenja. Takšen rezultat je pričakovan, saj so največja odstopanja vidna prav pri primerjavi napetosti.

Ker želimo R^2 čim bolj približati vrednosti 1, smo postopoma eliminirali posamezne mešanice, ki so najbolj odstopale. Osredotočili smo se na odstopanja pri razlezu. Postopoma smo eliminirali vse več mešanic, s tem pa se je izboljševala tudi vrednost R^2 . Ugotoviti želimo, do katere meje je smiselno odstranjevati mešanice oz. kakšno je največje dopustno odstopanje dejanskega razleza od pričakovanega. Meje smo postavili pri 40, 35, 30, 25 ter 20 mm. Iz tabele 6 so razvidni razlezi posameznih betonov in malt, pričakovani razlezi malt in razlika dejanskega razleza od pričakovanega. Največja razlika je pri mešanici MRA1b in znaša 60 mm.

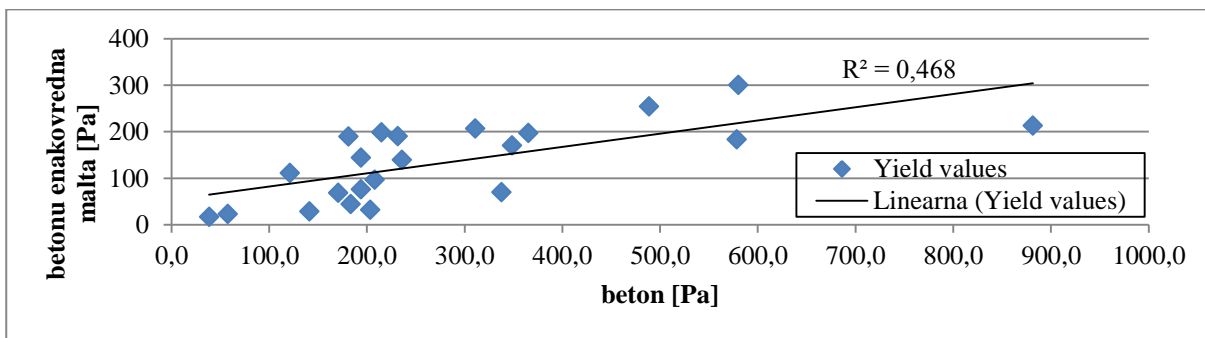
Preglednica 6: Razlezi

Oznaka	Razlez		Pričakovan razlez malte	Razlika od pričak. razleza
	beton	malta		
MR1	410	200	205	5
MR1a	500	220	250	30
MR1b	540	270	270	0
MR1c	670	320	335	15
ML1	430	200	215	15
ML1a	470	215	235	20
ML1b	510	275	255	20
ML1c	545	315	273	42
MRA1a	400	220	200	20
MRA1b	580	230	290	60
MRA1c	520	220	260	40
MG1a	530	225	265	40
MG1b	500	210	250	40
MG1c	475	180	238	58
MV1a	480	220	240	20
MV1b	485	230	243	13
MV1c	545	260	273	13
MZ1a	535	270	268	2
MZ1b	525	295	263	32
MZ1c	545	300	273	27
MM1a	465	265	233	32
MM1b	430	215	215	0
MM1c	490	285	245	40
MT1a	485	295	243	52
MT1b	370	210	185	25
MT1c	635	325	318	7

1. Odstranjene mešanice, katerih dejanski razlez se od pričakovanega razlikuje za več kot 40mm.

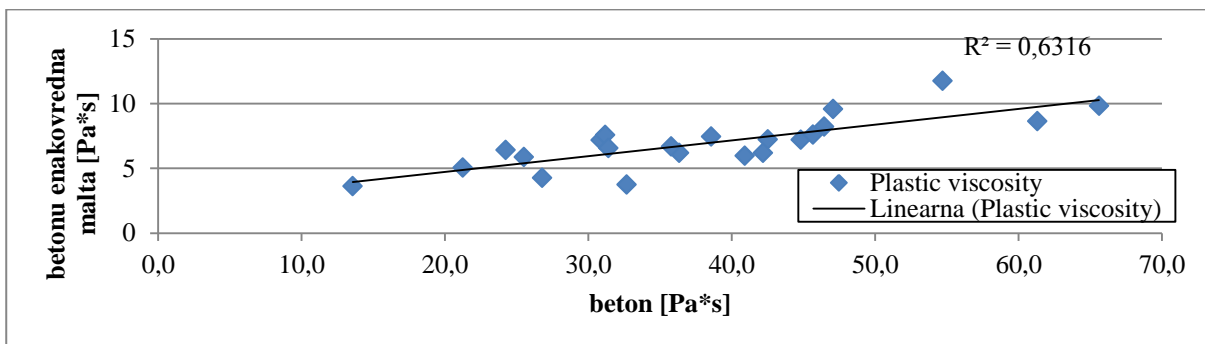
Pri prvi eliminaciji smo odstranili mešanice ML1c, MRA1b, MG1c in MT1a.

Napetost na meji tečenja



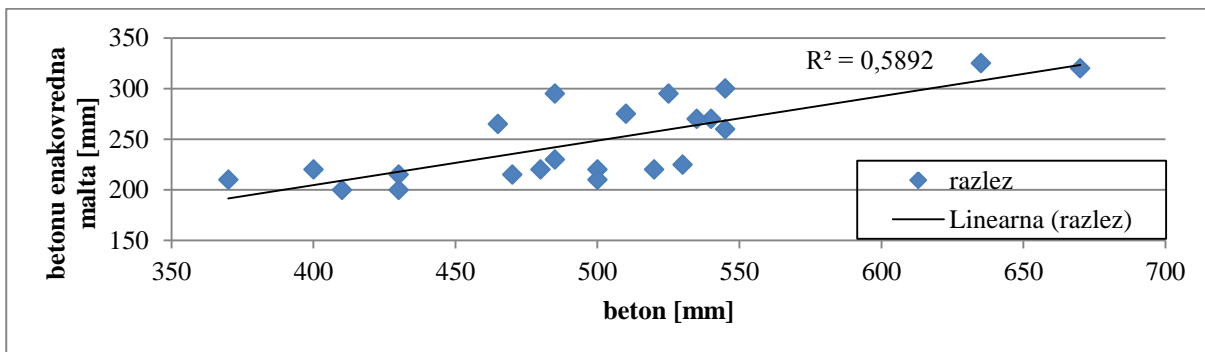
Slika 32: Trendna črta - napetost na meji tečenja, z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 40 mm.

Plastična viskoznost



Slika 33: Trendna črta - plastična viskoznost, z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 40 mm.

Razlez



Slika 34: Trendna črta – razlez, z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 40 mm.

Ob primerjavi teh rezultatov z osnovnimi (brez odstranjenih mešanic) ugotovimo, da se j vrednost R^2 izboljšala. Največje izboljšanje je vidno pri napetosti na meji tečenja (9%) ter razlezu (12%).

Mešanice, ki smo jih izločili, bi bilo potrebno modificirati. V mešanici ML1c je očitno prevelika količina superplastifikatorja, kar je privedlo do prevelikega razleza (42 mm). Če to mešanico primerjamo z MR1c, ki je enaka, le da je zamenjan cement, ugotovimo, da je razlika v razlezu verjetno tudi posledica drugačnega reagiranja superplastifikatorja z različnimi cementi.

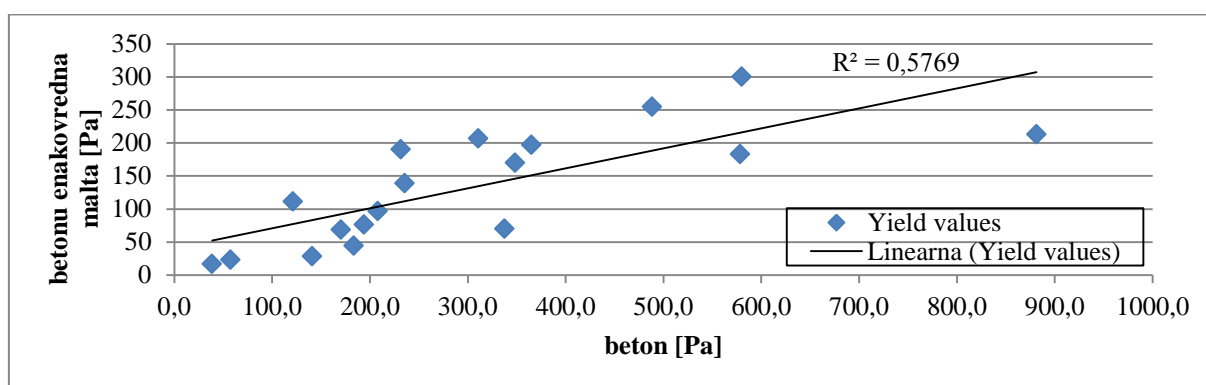
Največjo razliko smo dobili pri mešanici MRA1b, ki vsebuje tako aerant kot tudi superplastifikator. Kot smo že ugotovili, ima aerant v večjih količinah mnogo močnejši vpliv na mešanico kot v manjših količinah. Zato bi bil potreben drugačen preračun količine aeranta, ki ga dodamo malti enakovredni betonu.

Tudi pri mešanici z gostilcem MG1c je očitno količina le-tega prevelika, saj je mešanica takoj po zamešanju preveč gosta in premalo steče.

Pri mešanici MT1a smo 10% cementa zamenjali s tufom in dodali tudi superplastifikator. Razlika je lahko nastala zaradi napake pri meritvah ali pa je količina superplastifikatorja prevelika.

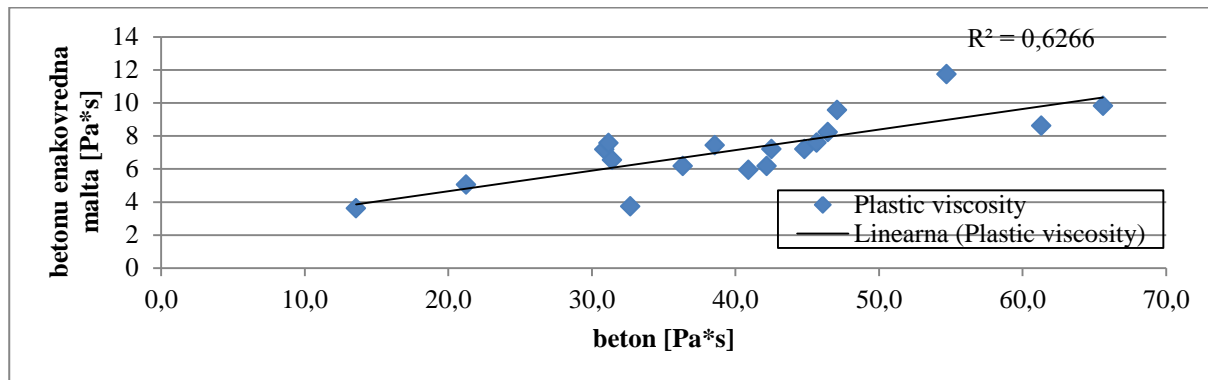
2. Odstranjene mešanice, katerih dejanski razlez se od pričakovanega razlikuje za več kot 35 mm.

Napetost na meji tečenja



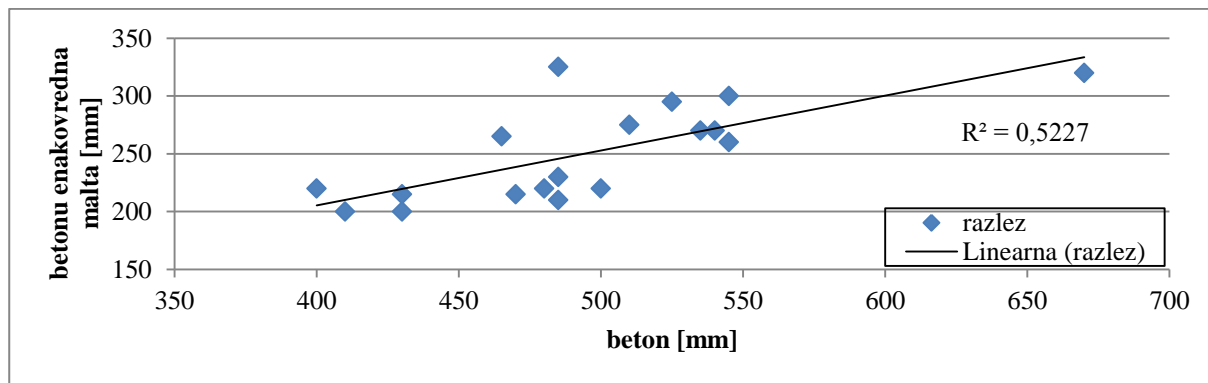
Slika 35: Trendna črta - napetost na meji tečenja z odstranjenimi mešanicami z razliko v razlezu večjo od 35 mm.

Plastična viskoznost



Slika 36: Trendna črta - plastična viskoznost z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 35 mm.

Razlez



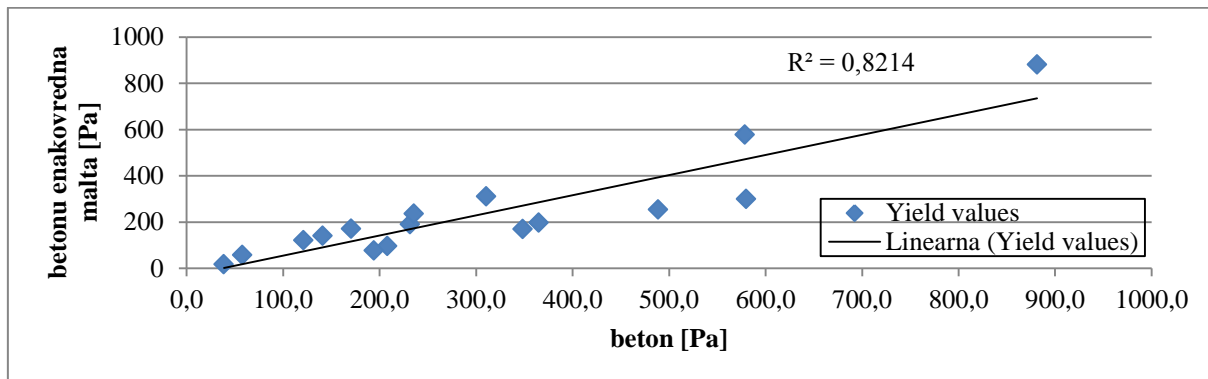
Slika 37: Trendna črta - razlez z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 35 mm.

Tu smo dodatno eliminirali še mešanice MRA1c, MG1a, MG1b in MM1c. Tako smo odstranili že vse mešanice z gostilcem ter dve od treh z aerantom. Te mešanice niso bile v redu in bo potreben drugačen preračun dodatkov za malto, enakovredno betonu.

Na teh grafih opazimo, da se je povečala vrednost R^2 le za napetost na meji tečenja (11%), vrednost pri plastični viskoznosti ter razlezu pa se je celo nekoliko znižala (pl. viskoznost $\approx 1\%$, razlez $\approx 6\%$).

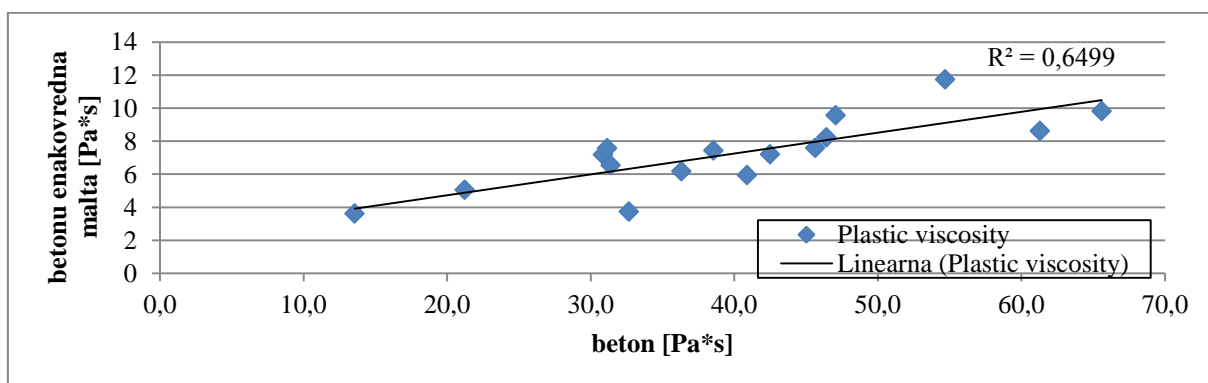
3. Odstranjene mešanice, katerih dejanski razlez se od pričakovanega razlikuje za več kot 30 mm.

Napetost na meji tečenja



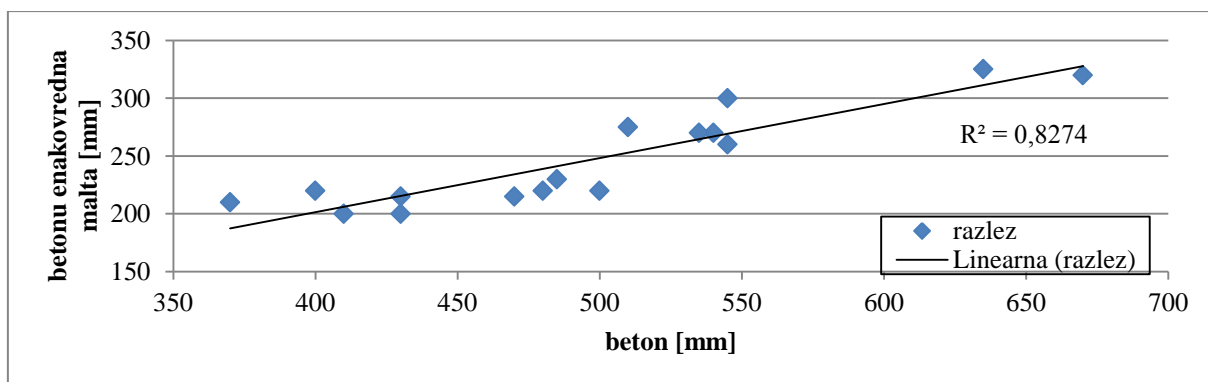
Slika 38: Trendna črta - napetost na meji tečenja z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 30 mm.

Plastična viskoznost



Slika 39: Trendna črta - plastična viskoznost z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 30 mm.

Razlez



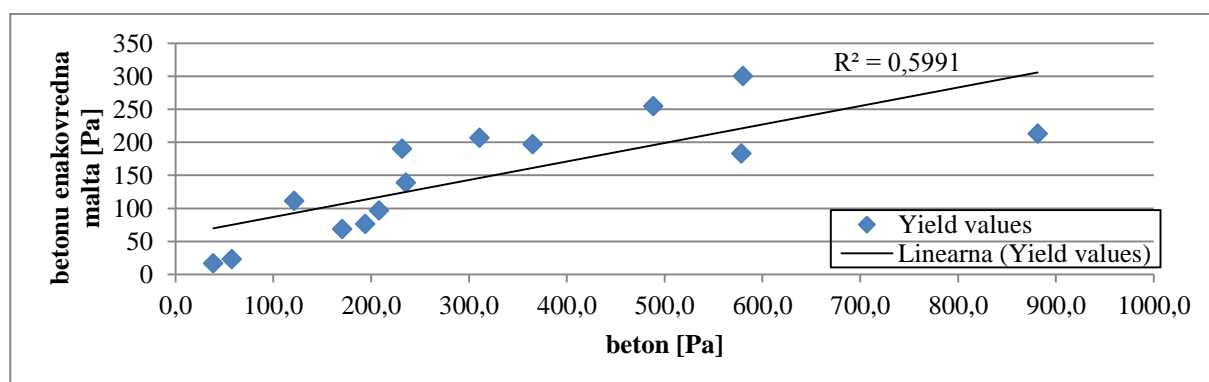
Slika 40: Trendna črta - razlez z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 30 mm.

Tukaj smo eliminirali še mešanici MZ1b in MM1a. Opazimo konkretno izboljšanje vrednosti R^2 , predvsem pri napetosti na meji tečenja in razlezu. Pri napetosti na meji tečenja ima R^2 vrednost 0,82, kar predstavlja 24 % več kot pri prejšnji eliminaciji. Vrednost R^2 pri viskoznosti je 0,65 (2% izboljšanje), vrednost R^2 pri razlezu pa 0,83, kar pomeni 30 % izboljšanje.

Mešanice MM so mešanice z dodatkom mikrosilike in superplastifikatorja. Tudi tu bo potrebno spremeniti dozacijo superplastifikatorja. Pri mešanici MM1a smo 5% cementa zamenjali z mikrosiliko, pri MM1b 10% ter pri MM1c 2,5 %. Dozacija superplastifikatorja je povsod 0,3 % glede na količino cementa. Razlez pri MM1b je bil povsem enak pričakovanemu. Pri MM1a in MM1c pa je bil dosti večji. Tako lahko sklepamo, da lahko pri manjšem vnosu mikrosilike dodatno zmanjšamo dozacijo superplastifikatorja (z 0,3% glede na količino cementa na manj).

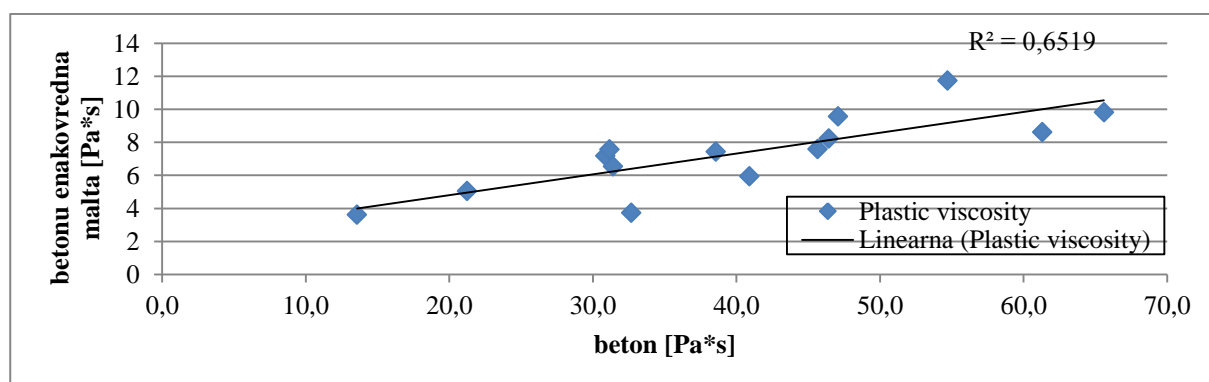
4. Odstranjene mešanice, katerih dejanski razlez se od pričakovanega razlikuje za več kot 25 mm.

Napetost na meji tečenja



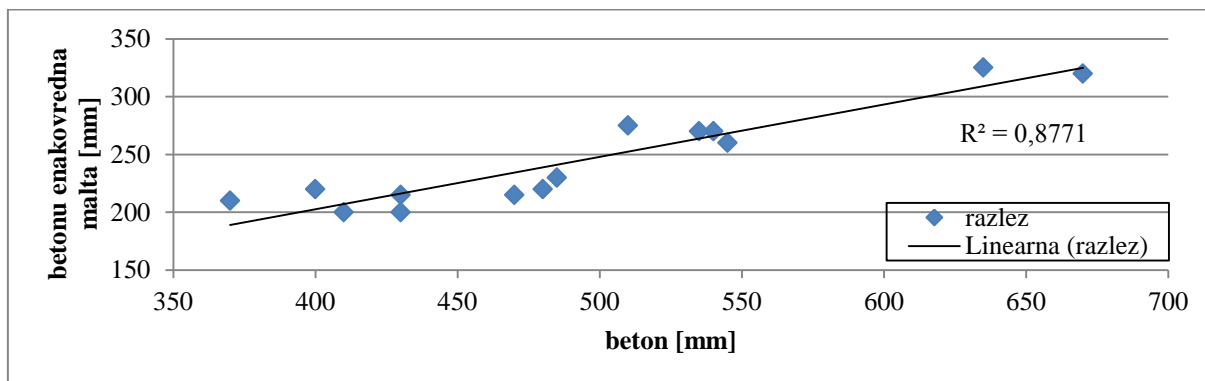
Slika 41: Trendna črta - napetost na meji tečenja z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 25 mm.

Plastična viskoznost



Slika 42: Trendna črta - plastična viskoznost z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 25 mm.

Razlez



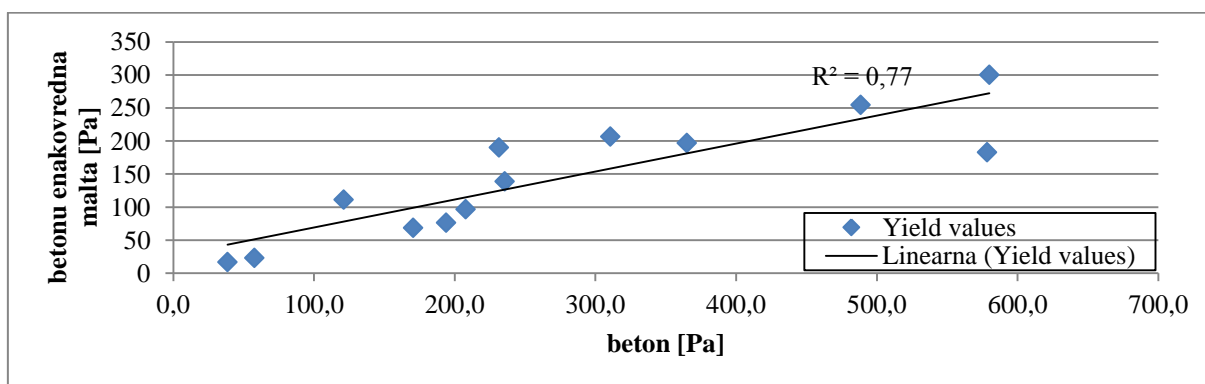
Slika 43: Slika 39:Trendna črta - razlez z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 25 mm.

Sedaj opazimo zelo počasno naraščanje vrednosti R^2 in pri napetosti na meji tečenja celo velik padec (22%). Dodatno smo odstranili mešanici MZ1c in MR1a. Za mešanico MR1a je mogoče sklepati, da je prišlo do napak med samim preskusom, saj je razlez drugih mešanic iz skupine MR dokaj enak pričakovanim razlezom. Potrebno bi bilo ponoviti preskus, saj je možno tudi, da je količina superplastifikatorja premajhna.

Pri mešanicah z žlindro se pokaže, da pri večjih količinah žindre lahko dozacijo superplastifikatorja nekoliko zmanjšamo, saj sta bila razleza pri MZ1b (40% žindre) in MZ1c (60 % žindre) prevelika, pri MZ1a (10% žindre) pa je bil razlez v redu.

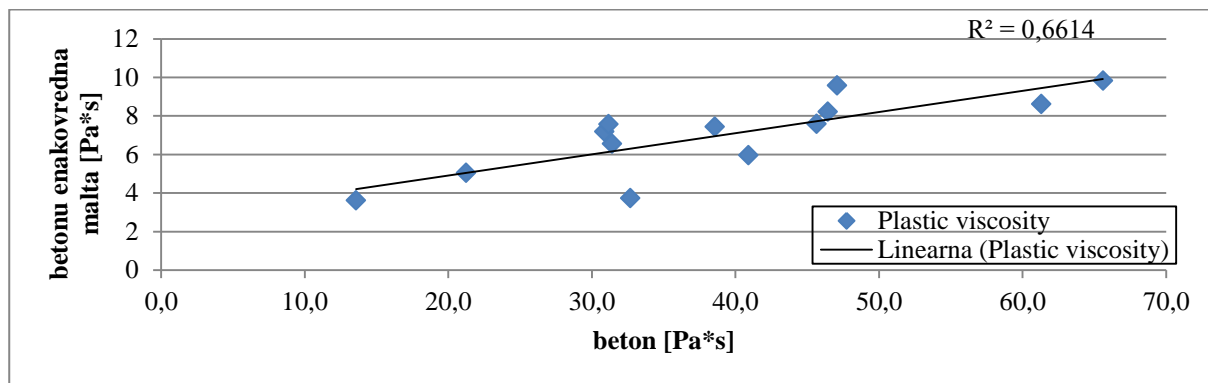
5. Odstranjene mešanice, katerih dejanski razlez se od pričakovanega razlikuje za več kot 20 mm.

Napetost na meji tečenja



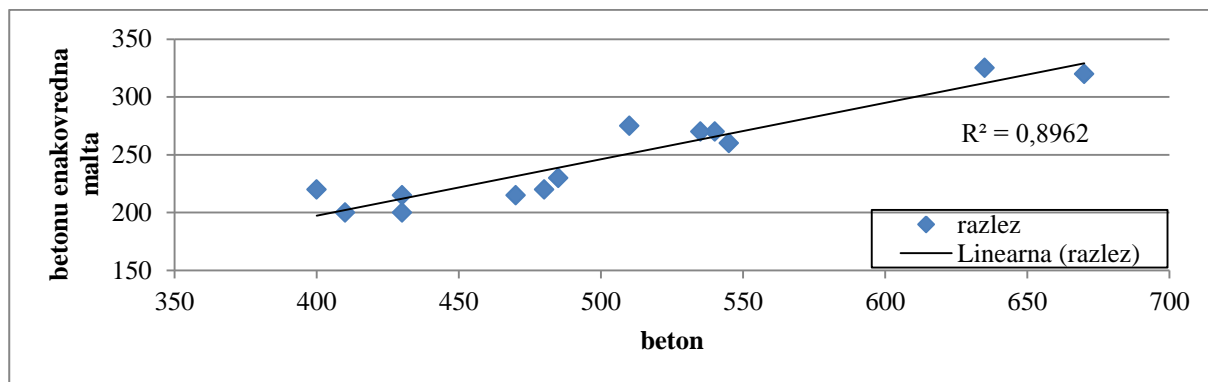
Slika 44: Trendna črta - napetost na meji tečenja z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 20 mm.

Plastična viskoznost



Slika 45: Trendna črta - plastična viskoznost z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 20 mm.

Razlez



Slika 46: Trendna črta - razlez z odstranjenimi mešanici z razliko v razlezu večjo od 20 mm.

Dodatno smo odstranili še mešanico MT1b. Opaznejši prirast vrednosti R^2 opazimo le pri napetosti na meji tečenja, medtem ko se R^2 pri plastični viskoznosti poveča le za 1% in razlezu za skoraj 2%.

Smiselna meja izločevanja mešanic bi bila pri razliki dejanskega razleza od pričakovanega za 30 mm. Od tu naprej se R^2 ne povečuje bistveno in bi bilo nesmiselno zavreči rezultate dodatnih mešanic.

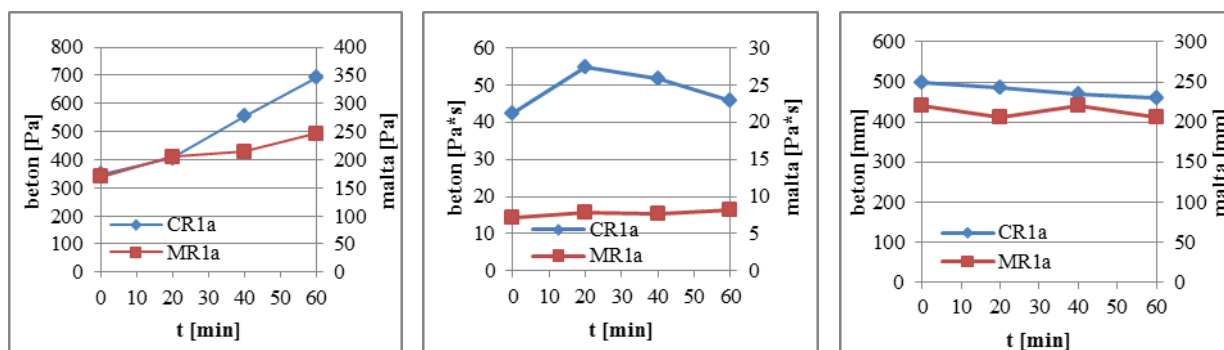
Preglednica 7: Vrednosti R^2 .

Meja	R^2		
	napetost na meji tečenja	pl. viskoznost	razlez
40	0,47	0,63	0,59
35	0,58	0,63	0,53
30	0,82	0,65	0,83
25	0,6	0,65	0,88
20	0,77	0,66	0,9
vse mešanice	0,38	0,60	0,46

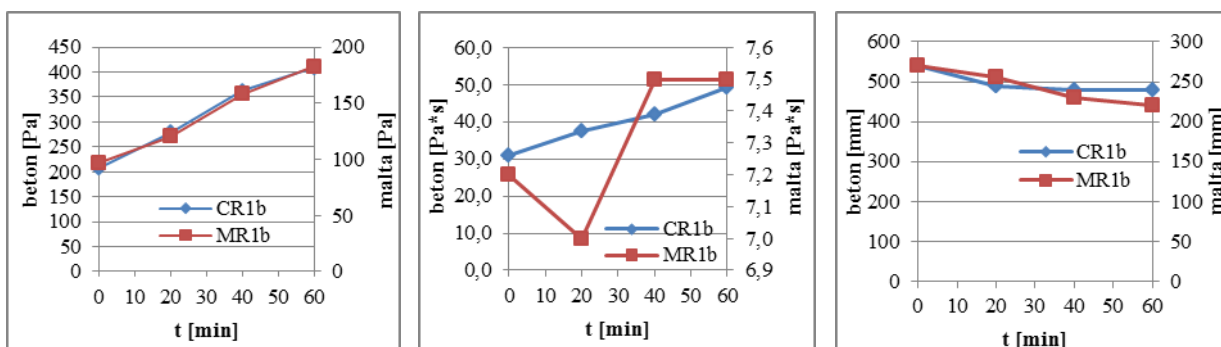
5.2 Časovna primerjava

Časovna primerjava je narejena za betone in njim enakovredne malte. Primerja se rezultate v časovnem okviru ene ure. Na vsakem grafu imamo štiri točke iz štirih meritev pri časih 0, 20, 40 in 60 min. Rezultati na grafih so podani v merilu 2:1 (beton: malta). Ker rezultati še niso normirani, nam je pomembna le primerjava trenda naraščanja oziroma padanja med betonom in malto. Pri napetosti na meji tečenja smo privzeli, da je nastopila upoštevanja vredna sprememba lastnosti takrat, ko so rezultati zunaj meje ± 5 Pa od povprečne vrednosti. Za plastično viskoznost je ta meja $\pm 2,5$ Pas. Pričakovan razlez malt je enak polovici razleza betona. To se v grafu pokaže kot dobro ujemanje krivulje razleza malte s krivuljo razleza betona (imamo merilo 2:1).

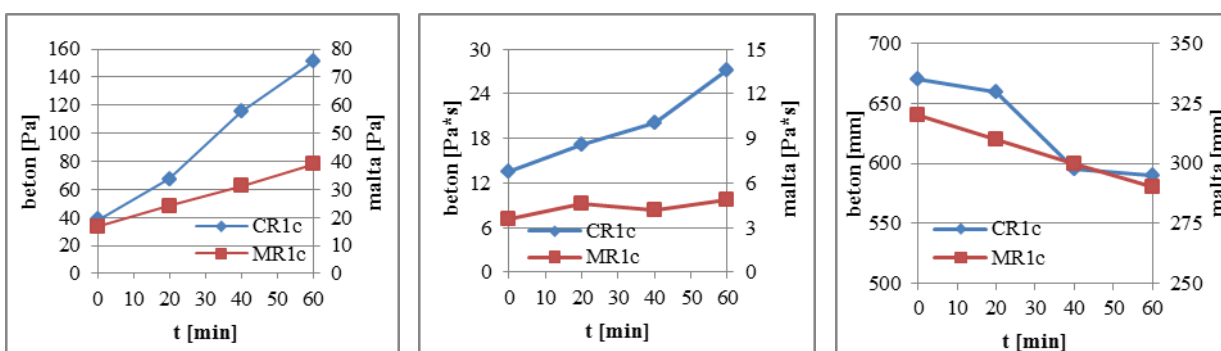
MR1a in CR1a (0,1% SP)



Slika 47: Časovna primerjava MR1a in CR1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MR1b in CR1b (0,2% SP)

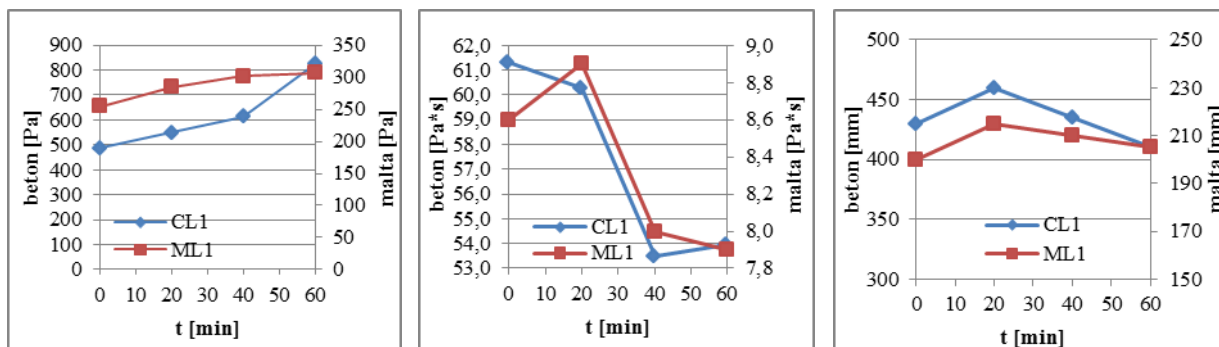
Slika 48: Časovna primerjava MR1b in CR1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MR1c in CR1c (0,3% SP)

Slika 49: Časovna primerjava MR1c in CR1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

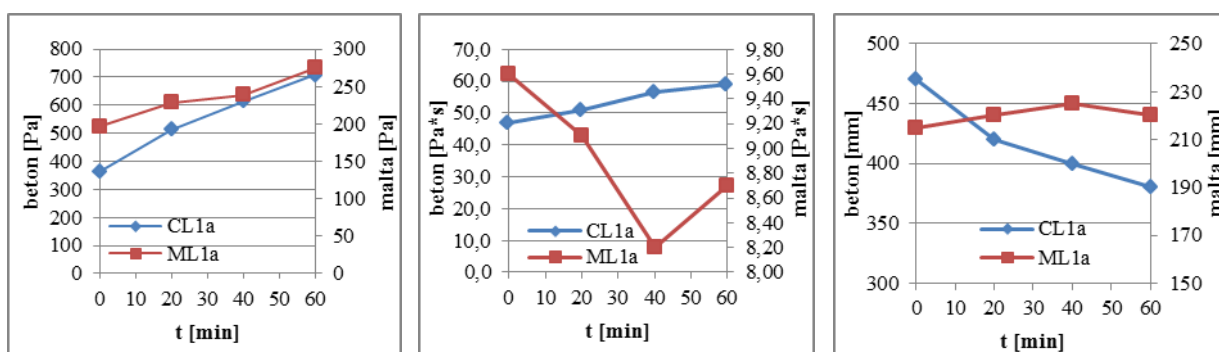
Mešanice MR so mešanice z dodatkom superplastifikatorja. Rezultati časovne primerjave med maltami in betoni v časovnem intervalu 60 minut nam dajo dobre rezultate. Za mešanice s superplastifikatorjem je značilno, da se napetost na meji tečenja na začetku zniža (glede na mešanico brez dodatka), nato pa s časom narašča. Ta trend je značilen tako za ekvivalentne malte kot za betone. Pri plastični viskoznosti pa se zdi, da se le ta pri ekvivalentnih maltah s časom ne spreminja, pri betonih pa s časom rahlo narašča. Izjema je betonska mešanica z 0,1% superplastifikatorja, kjer ostaja plastična viskoznost približno enaka do ene ure po zamešanju betona. Najboljša je korelacija rezultatov pri razlezu, pri katerem se dejanski razlez malte le malo razlikuje od pričakovanega.

ML1 in CL1 (brez SP)



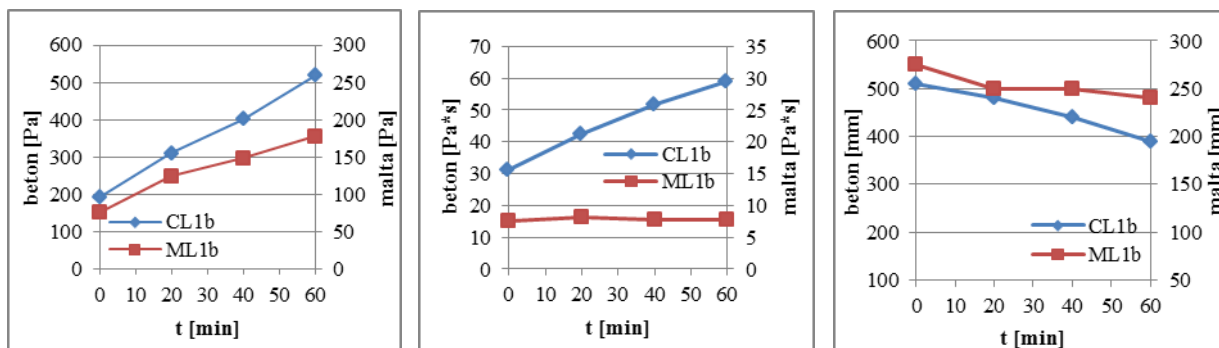
Slika 50: Časovna primerjava ML1 in CL1: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

ML1a in CL1a (0,1% SP)

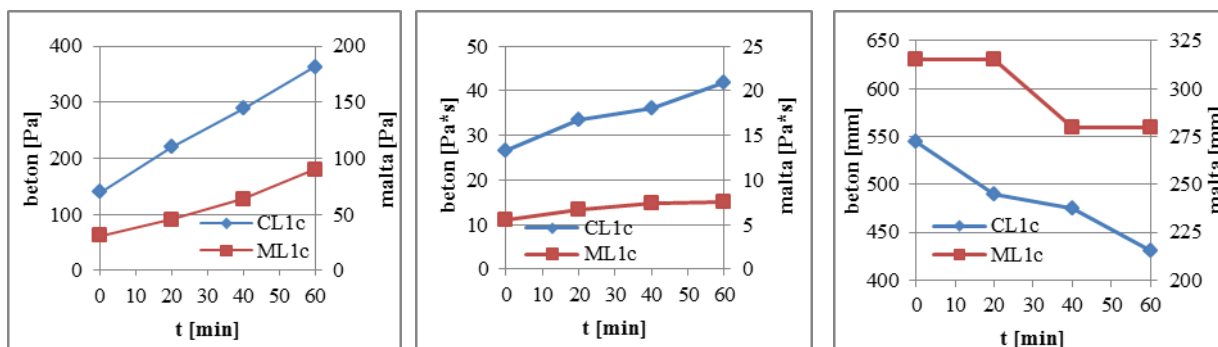


Slika 51: Časovna primerjava ML1a in CL1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

ML1b in CL1b (0,2% SP)

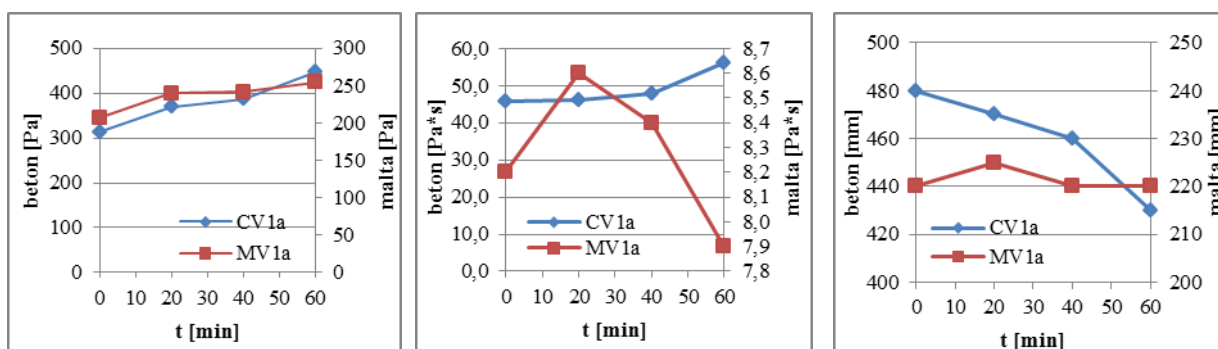


Slika 52: Časovna primerjava ML1b in CL1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

ML1c in CL1c (0,3% SP)

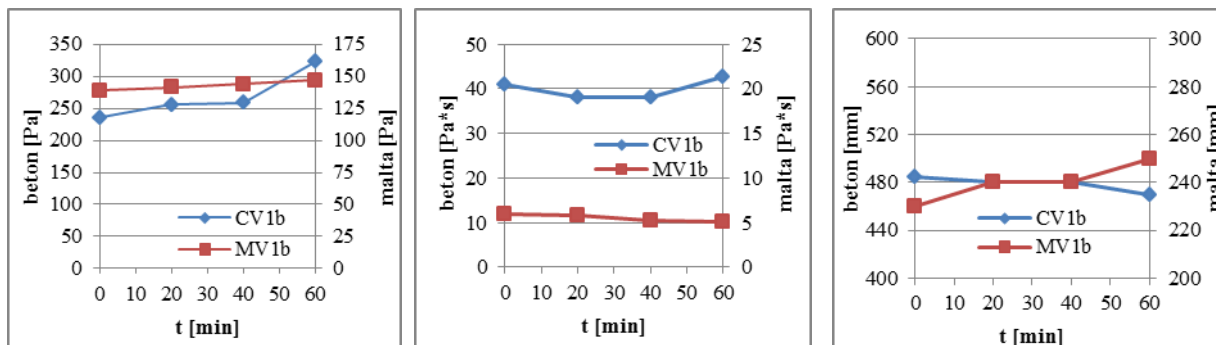
Slika 53: Časovna primerjava ML1c in CL1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

Za mešanice ML (CL) smo spremenili vrsto uporabljenega cementa, uporabili smo CEM I 42 R, količine dodatkov pa so ostale enake kot pri mešanicah MR. Zopet se kaže dobro ujemanje rezultatov pri napetosti na meji tečenja in plastični viskoznosti med referenčnimi maltami in betoni. Pri mešanici CL1b opazimo naraščanje plastične viskoznosti s časom, pri ostalih betonih pa se plastična viskoznost s časom le rahlo spreminja, praviloma večja. Sprememba ni večja od 10 Pa·s.. Razlezi se dobro ujemajo s pričakovanimi, le pri mešanici ML1c (CL1c) se pojavijo odstopanja, ki so zunaj meje ± 30 mm. Na to spet lahko vplivajo agregatna zrna, in sicer lahko večja zrna v betonu bistveno spremenijo reološke lastnosti betonske mešanice.

MV1a in CV1a (V/C = 0,53)

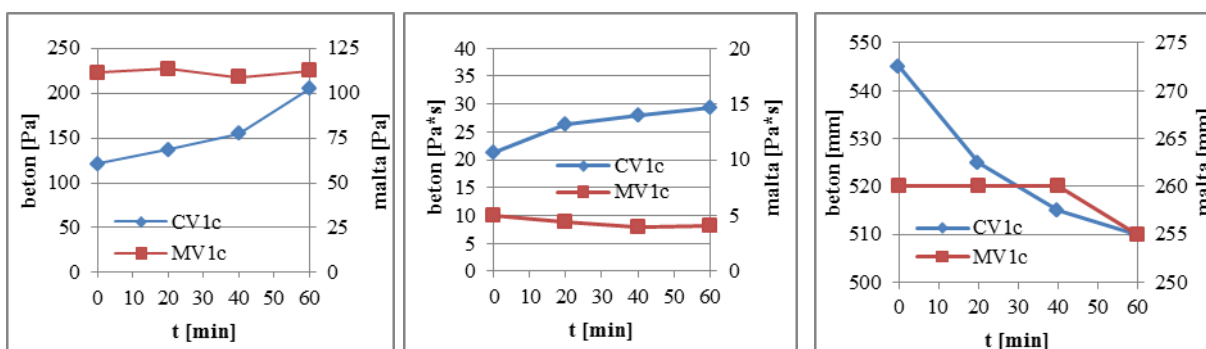
Slika 54: Časovna primerjava MV1a in CV1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MV1b in CV1b (V/C = 0,56)



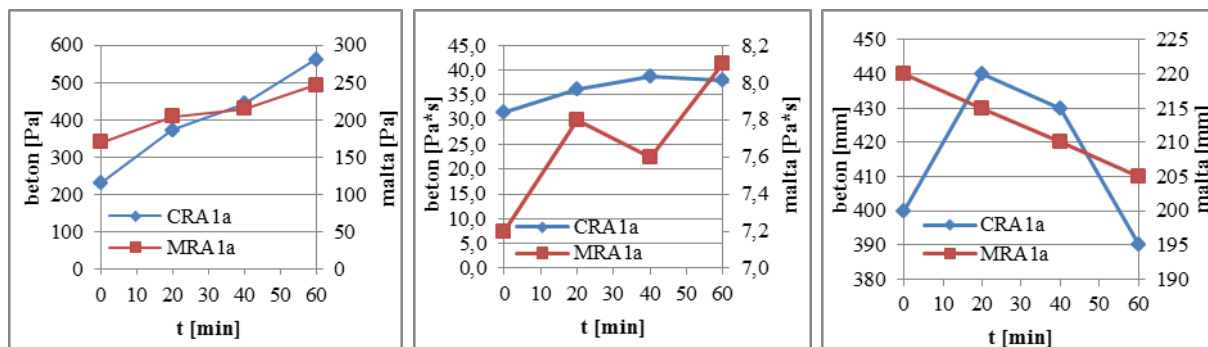
Slika 55: Časovna primerjava MV1b in CV1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MV1c in CV1c (V/C = 0,59)

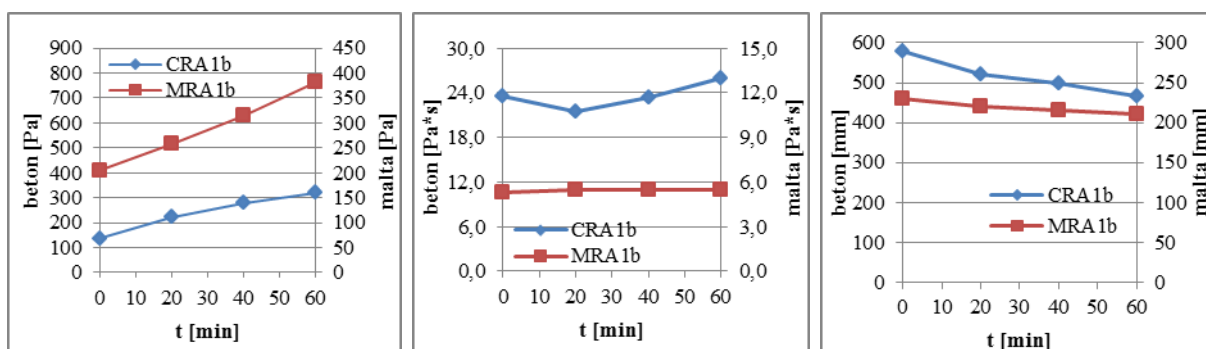


Slika 56: Časovna primerjava MV1c in CV1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

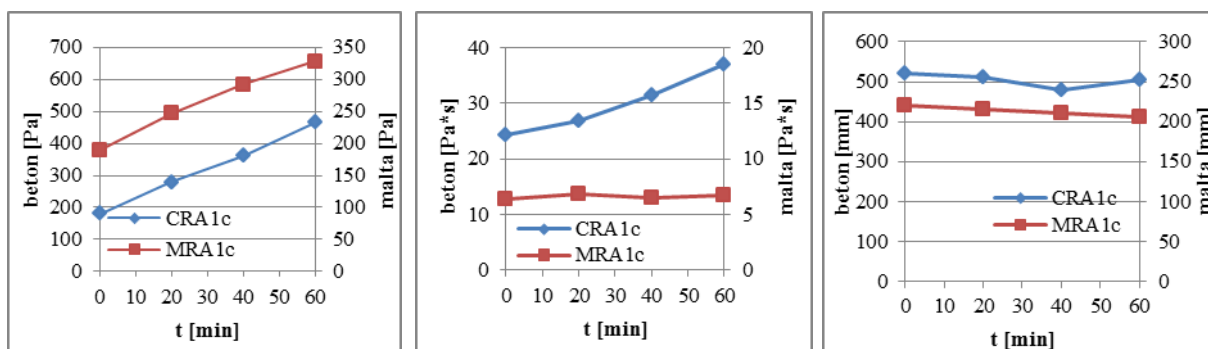
Mešanice MV (CV) so brez dodatkov, spreminjali smo vodocementno razmerje. Pri mešanicah MV1a (CV1a) in MV1b (CV1b) vidimo, da se plastična viskoznost s časom skoraj ne spreminja oz. ostaja praviloma znotraj privzetih mej. Pri napetosti na meji tečenja pa pri betonih ta karakteristika s časom rahlo narašča, pri maltah pa so spremembe manjše ali jih ni. To velja tudi za mešanico MV1c (CV1c), pri kateri se plastična viskoznost betona s časom spreminja najbolj (narašča s časom), medtem ko ostaja pri ekvivalentni malti konstantna. V grafih pa je tudi lepo viden vpliv vodocementnega razmerja, saj z naraščanjem le-tega vrednost napetosti na meji tečenja pada. Tudi viskoznost nekoliko pada pri betonih, na malte pa vodocementno razmerje očitno ne vpliva v veliki meri, saj so vrednosti pri vseh mešanicah zelo podobne.

MRA1a in CRA1a (0,1% SP; 0,04% aerant)

Slika 57: Časovna primerjava MRA1a in CRA1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MRA1b in CRA1b (0,1% SP; 0,06% aerant)

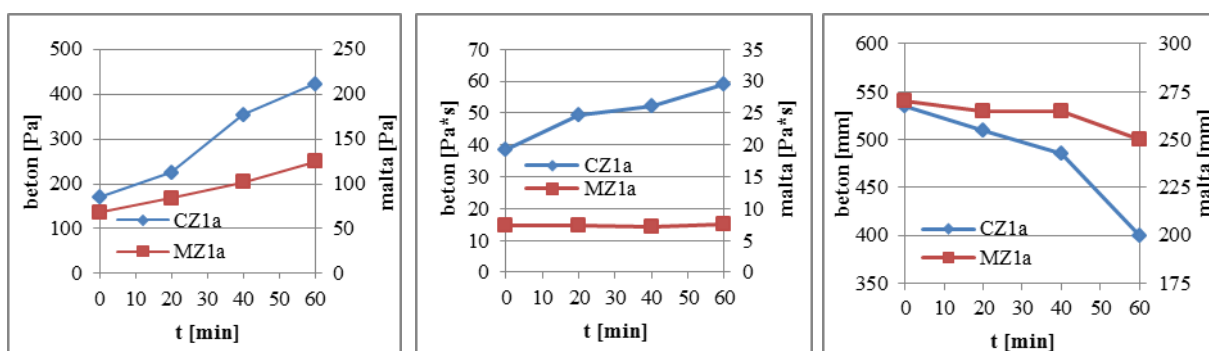
Slika 58: Časovna primerjava MRA1b in CRA1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MRA1c in CRA1c (0,1% SP; 0,05% aerant)

Slika 59: Časovna primerjava MRA1c in CRA1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

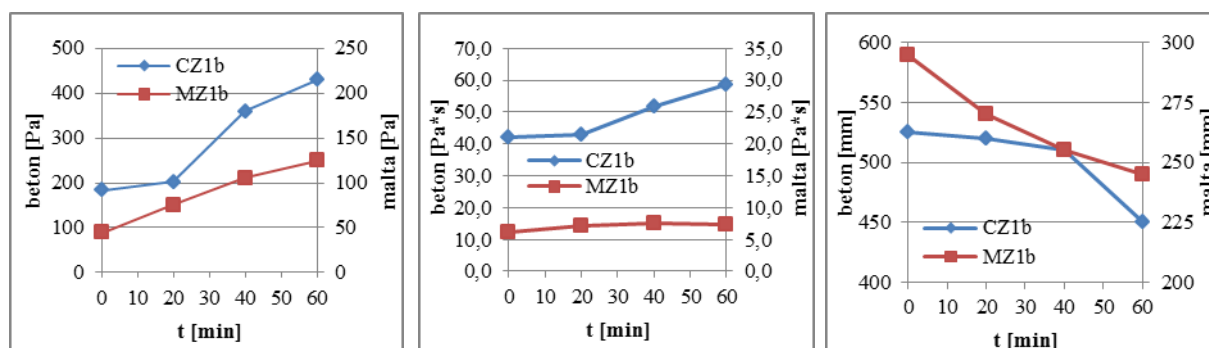
V mešanicah MRA (CRA) sta dodana superplastifikator in aerant. Trend naraščanja napetosti na meji tečenja med betonom in malto se lepo ujame. Pri prvi mešanici sta krivulji dokaj skupaj, pri drugih dveh, ki vsebujeta nekoliko več aeranta (dozacija superplastifikatorja je pri vseh treh enaka), je krivulja malte nekoliko višje od betonske. Vnos aeranta v mešanico primarno zniža plastično viskoznost, kar je lepo vidno v grafih, ko se vrednost niža od mešanice MRA1a (CRA1a) navzdol (opomba: mešanica MRA1b ima največjo vsebnost aeranta, zato je tam tudi najnižja vrednost plastične viskoznosti). Medtem ko se pri največjem deležu aeranta plastična viskoznost betona s časom ne spreminja, se pri obeh manjših deležih rahlo poveča (za okrog 10 Pa·s). Pri ekvivalentnih maltah ostaja plastična viskoznost približno konstantna za vse mešanice. Razlez pri prvi mešanici se lepo ujema s pričakovanim, pri drugih dveh pa opazimo manjša odstopanja, kar je lahko posledica povečanja napetosti na meji tečenja pri maltah.

MZ1a in CZ1a (20% žindre)

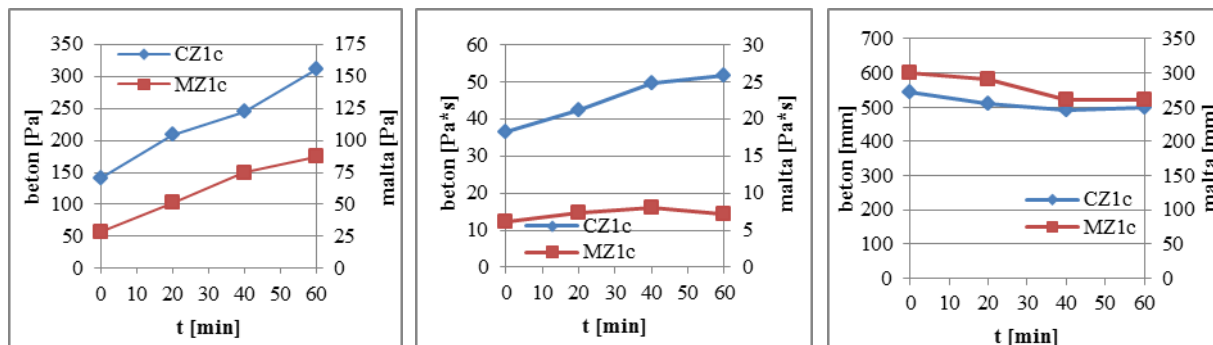


Slika 60: Časovna primerjava MZ1a in CZ1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MZ1b in CZ1b (40% žindre)

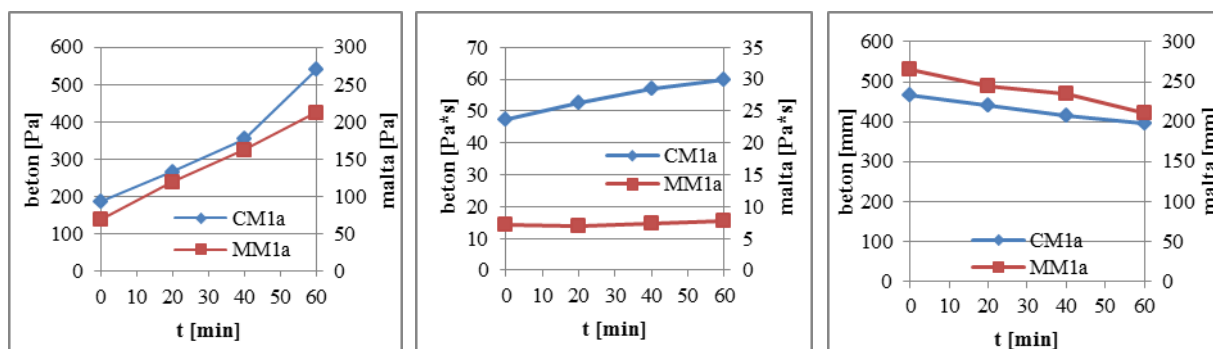


Slika 61: Časovna primerjava MZ1b in CZ1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MZ1c in CZ1c (60% žindre)

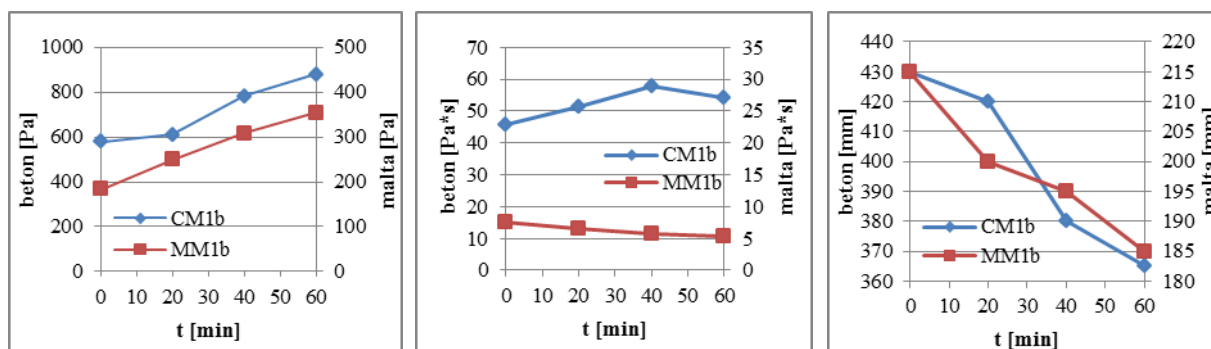
Slika 62: Časovna primerjava MZ1c in CZ1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

Pri mešanica MZ (CZ), v katerih del cementa zamenjujemo z žindro ter dodamo superplastifikator, so rezultati primerjav vseh mešanic relativno dobri. Opazimo le naraščanje viskoznosti pri betonih, medtem ko je le-ta pri maltah konstantna. Vse kaže, da večja agregatna zrna v betonih vplivajo na plastično viskoznost betona tako, da s časom viskoznost nekoliko raste. V vseh mešanicah je enaka količina superplastifikatorja, razlezi malt pa so nekoliko večji od pričakovanih, zato lahko sklepamo, da bi lahko količino superplastifikatorja nekoliko zmanjšali.

MM1a in CM1 (5% mikrosilike)

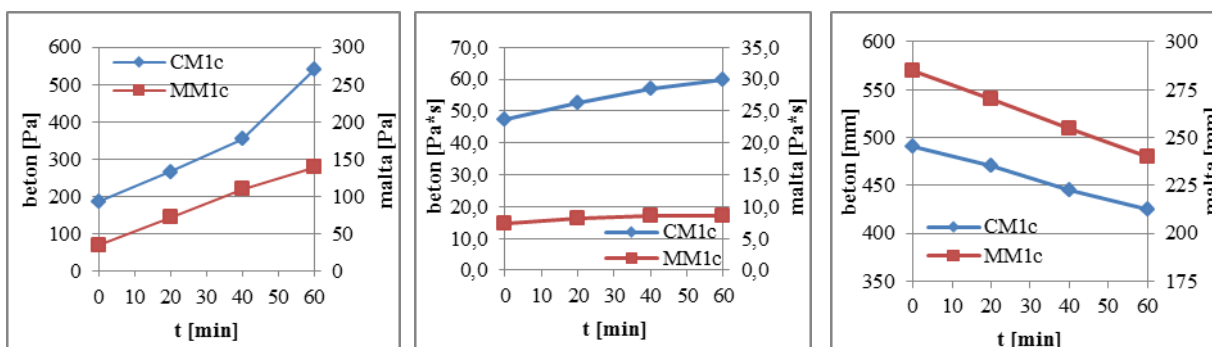
Slika 63: Časovna primerjava MM1a in CM1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MM1b in CM1b (10% mikrosilike)



Slika 64: Časovna primerjava MM1b in CM1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MM1c in CM1c (2,5% mikrosilike)

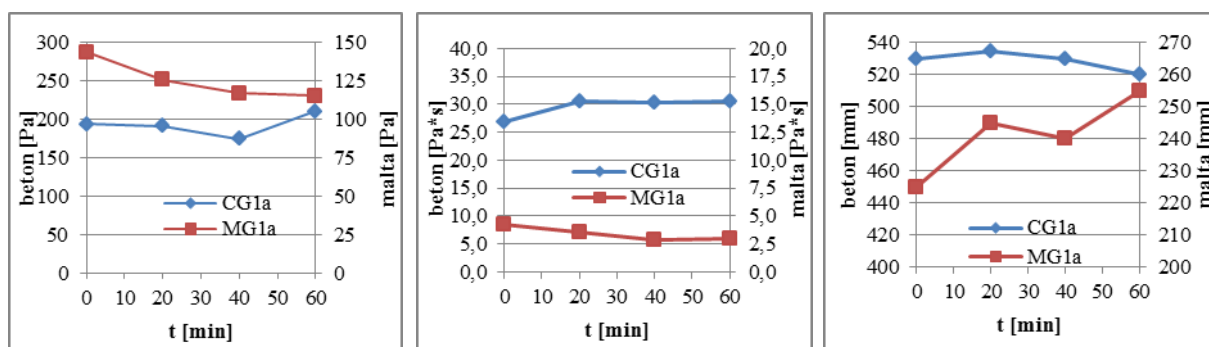


Slika 65: Časovna primerjava MM1c in CM1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

Pri mešanicih MM (CM) zamenjamo določen delež cementa z mikrosiliko. Napetost na meji tečenja se pri vseh treh mešanicih ekvivalentne malte in betona dobro ujema, le pri zadnji meritvi prve in zadnje mešanice, ki sta vsebovali 2,5 in 5,0% mikrosilike, se pojavi manjši skok pri betonu. Pri drugi mešanici (MM1b in CM1b), ki vsebuje največji delež mikrosilike glede na cement (10%), opazimo izrazito povečanje napetosti na meji tečenja. V osnovi naj bi mikrosilika vplivala samo na plastično viskoznost, in sicer naj bi jo nižala. Vendar, po Walleviku [6], ko dosežemo določeno mejo količine mikrosilike v mešanici, le-ta začne vplivati tudi na napetost na meji tečenja (jo povečuje), kar se vidi tudi pri grafu mešanice MM1b (CM1b), ki vsebuje največji delež mikrosilike. Pričakovano obnašanje pa vidimo tudi pri rezultatih plastične viskoznosti, saj naj bi pri mešanicih z do približno 5 % mikrosilike, plastična viskoznost padala, pri večjih količinah pa naj bi naraščala. To se je potrdilo v naših preiskavah pri ekvivalentnih maltah, pri mešanici MM1c z 2,5 % mikrosilike je vrednost 7,3,

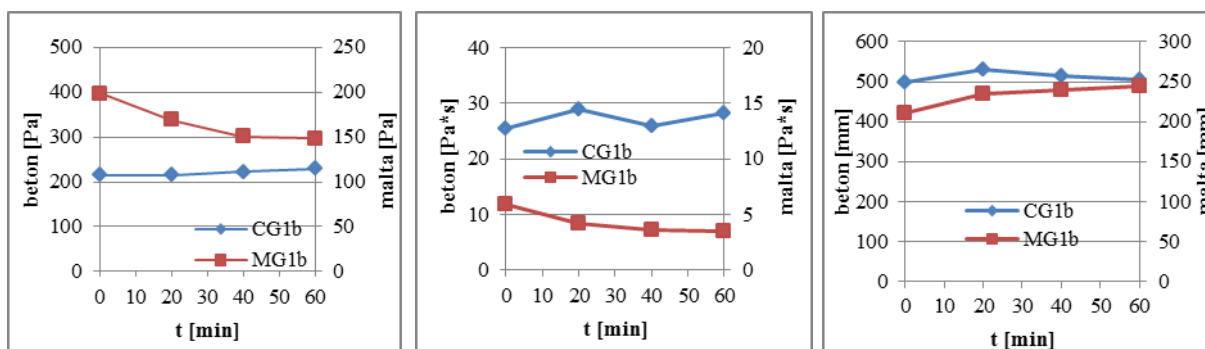
potem je vrednost pri mešanici MM1a (5 % mikrosilike) nekoliko padla na 7,2, nato pa se je znova povečala na 7,6 pri mešanici MM1b (10 % mikrosilike). Se pa postavlja vprašanje, ali je to res trend ali pa gre za raztost rezultatov meritev. Mi smo namreč za naše preiskave privzeli, da vrednosti meritev viskoznosti v območju $\pm 2,5$ Pa·s okrog povprečne vrednosti lahko pomenijo tudi enake rezultate – razlike so posledica merilne negotovosti. Šele, ko bo oprema tudi ustrezno kalibrirana, bomo lahko na podlagi dobljenih rezultatov podali bolj realne zaključke.

MG1a in CG1a (0,1% gostilca)



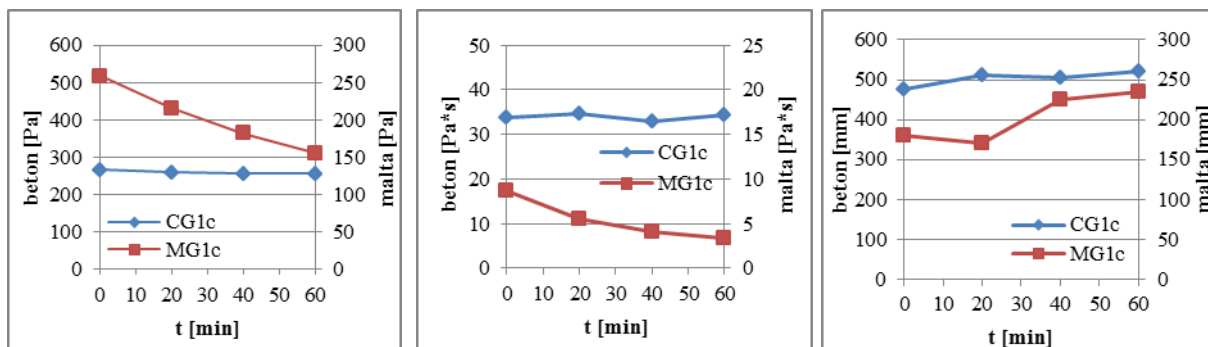
Slika 66: Časovna primerjava MG1a in CG1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MG1b in CG1b (0,15% gostilca)



Slika 67: Časovna primerjava MG1b in CG1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

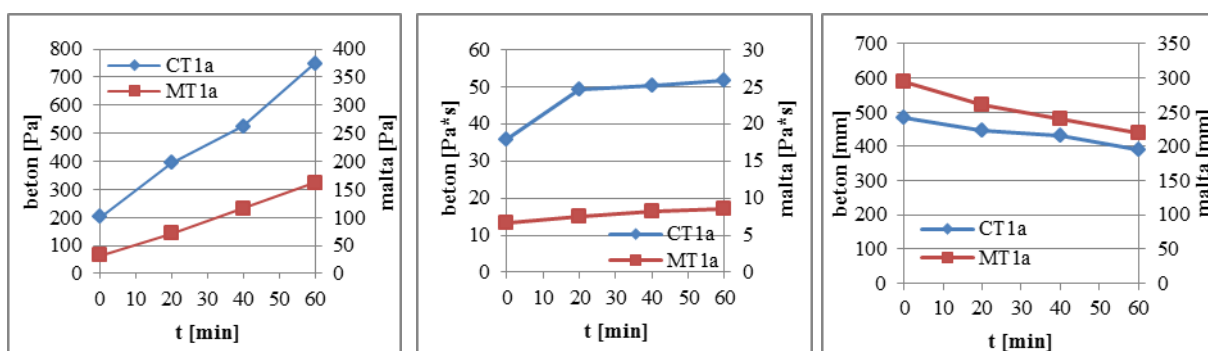
MG1c in CG1c (0,2% gostilca)



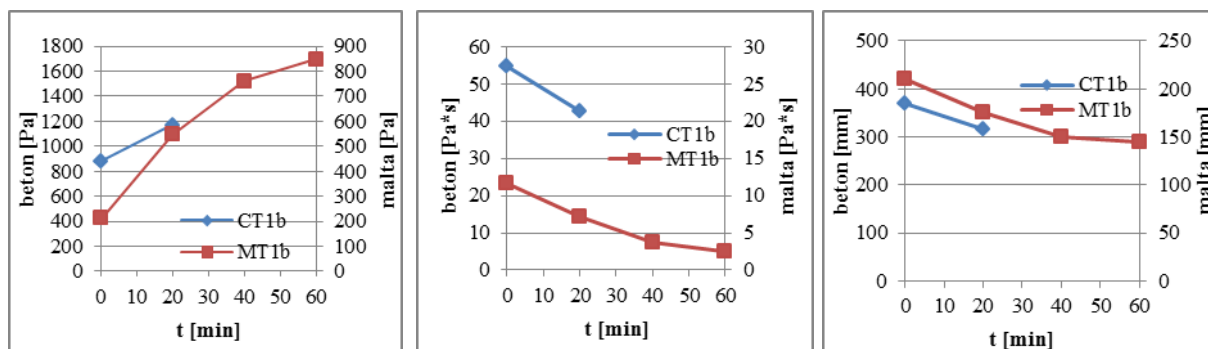
Slika 68: Časovna primerjava MG1c in CG1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

Mešanice MG (CG) so mešanice z dodatkom gostilca. Razlike v trendu krivulje opazimo predvsem pri napetosti na meji tečenja. Krivulja za betone je konstantna, medtem ko ima pri maltah trend padanja. Boljši so rezultati pri plastični viskoznosti, kjer so vsi skoki vidni na grafu znotraj privzete natančnosti metode ($\pm 2,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Pri razlezu pa opazimo razlike predvsem pri začetnih meritvah, potem pa se dejanski razlez malte vedno bolj ujema s pričakovanim. Mogoče gre tu za začetno močno delovanje gostilca, ki pa nato hitro začne popuščati.

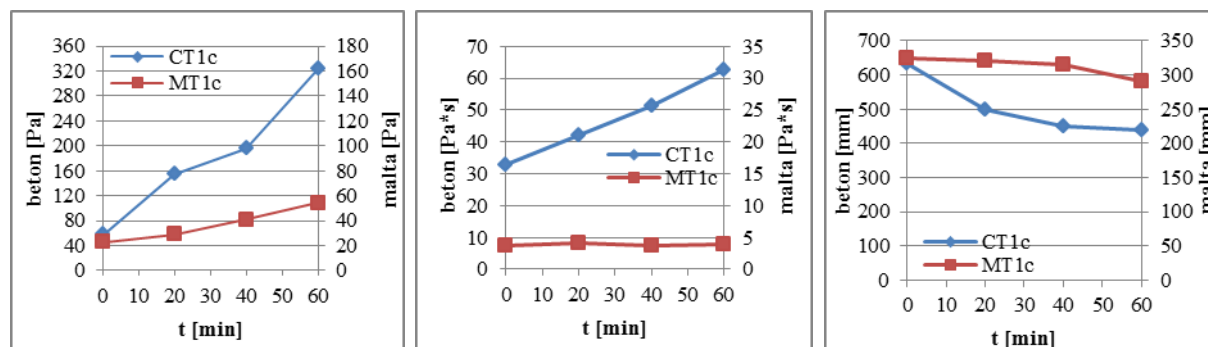
MT1a in CT1a (10% tufa)



Slika 69: Časovna primerjava MT1a in CT1a: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MT1b in CT1b (20% tufa)

Slika 70: Časovna primerjava MT1b in CT1b: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

MT1c in CT1c (5% tufa)

Slika 71: Časovna primerjava MT1c in CT1c: napetost na meji tečenja (levo), plastična viskoznost (srednji) in razlez (desni).

Pri mešanicih MT (CT) smo del cementa zamenjevali s tufom. Tu rezultati niso najboljši. Predvsem pri mešanici CT1b, kjer je bilo 20 % cementa zamenjanega s tufom, saj so bila testiranja na betonu po 20 minutah prekinjena, ker je beton postal pregost. Pri napetosti na meji tečenja lahko opazimo, da se ta veliko hitreje narašča pri betonu, na kar zopet najverjetneje vplivajo večja agregatna zrna. Tudi plastična viskoznost se pri betonu povečuje, medtem ko pri mlati ostane skoraj konstantna. V splošnem opazimo, da se vrednosti napetosti na meji tečenja ter plastične viskoznosti s povečevanje deleža tufa višajo, razlez pa se manjša.

6 ZAKLJUČEK

Beton je največkrat uporabljen konstrukcijski material. V sodobnem času ga vgrajujemo v najrazličnejše možne oblike, zaradi česar so ključnega pomena njegova sposobnost vgrajevanja in obdelovalnost. Ob napredku na področju razvoja kemijskih in mineralnih dodatkov betonu imamo možnost projektirati najrazličnejše recepture betonov. Seveda pa je potrebno te recepture tudi preskusiti, in sicer na mešanicah v svežem in strjenem stanju. Ker pa moramo preskuse na svežih betonih izvajati na razmeroma velikih količinah materiala, smo se v okviru moje diplomske naloge lotili primerjave reoloških lastnosti svežih malt in betonov.

Meritve na maltah smo izvajali na velikem številu različnih mešanic manjših količin, tako da so ti preskusi z ekonomske vidika veliko bolj smiselni. Za pripravo malte, enakovredne betonu, smo uporabili metodo CEM (»concrete equivalent mortar«). Meritve smo izvajali na 26 različnih vzorcih, na vsakem vzorcu pa smo izvedli štiri meritve v časih 0, 20, 40 in 60 minut. Recepture smo zasnovali tako, da smo uporabili različne kemijske in mineralne dodatke ter dva različna cementa.

Meritve smo izvajali na napravi, imenovani reometer, s katero smo izmerili parametre za izračun napetosti na meji tečenja ter plastične viskoznosti. Merili pa smo tudi betonu enakovredne malte. Rezultate preiskav na maltah smo primerjali z rezultati preiskav na betonih, ki so bile opravljene v okviru diplomskih nalog Nejca Andrejke in Bojana Kresala. Glavni del moje diplomske naloge so tako primerjave rezultatov na betonih in njim ekvivalentnih maltah.

Po analizi rezultatov lahko rečemo, da smo pri večini mešanic opazili pričakovano obnašanje. Pri nekaterih mešanicah so se pojavili posamezni skoki, ki so lahko posledica napake meritve. Najslabše rezultate smo dobili pri mešanicah s tufom, kjer na betonih niso bile izvedene preiskave v vseh časovnih intervalih (beton je postal pregost), zato tudi ni bila možna primerjava vseh mešanic. Pri ostalih mešanicah pa je vidna korelacija pri napetosti na meji tečenja, plastični viskoznosti in razlezu, med betonom in malto.

Zaradi dobrih korelacij med betoni in ekvivalentnimi maltami ima smisel nadaljevati s takšnimi preskusi, saj je na trgu vedno več novih dodatkov za betone, ki jih je potrebno preskusiti. S preskusi na maltah, namesto na betonih, se postopek občutno pospeši, upravičen pa je tudi z ekonomskega vidika, saj porabimo veliko manj materiala za pripravo malt, kot pa za betone.

VIRI

- [1] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij.
- [2] 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.
- [3] 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 (istoveten EN 1008:2002): 16 str.
- [4] SIST EN 197-1:2002. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente (istoveten z EN 197-1:2000): 24 str.
- [5] Zajc, A. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. 14. Slovenski kolokvij o betonih. Posebne lastnosti betonov z dodatki. Zbornik. Ljubljana.
- [6] Wallevik, O.H. 2009. Introduction to rheology of fresh concrete, ICI rheocenter course. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219 str.
- [7] Hočevar, A., Bokan-Bosiljkov, V., Kavčič, F. 2010. Preskušanje svežih betonov - uvod v reologijo. V: Lopatič, J., Markelj, V., Saje, F. (ur.). Zbornik 32. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled, Hotel Golf, 7. – 8. oktober 2010. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 207-216.
- [8] Tattersall, G. H., Banfill, P., 1983. The rheology of fresh concrete. Boston, London, Melbourne, Pitman Advanced Publishing Program: 368 str.
- [9] Banfill, P.F.G. 2003 The reology of fresh cement and concrete – a review. Paper accepted for publication in Proc 11th International Cement Chemistry Congress, 13 str.
- [10] Beaupre, D., Chapdelaine, F., Domone P., Koehler, E., Shen, D., Sonebi, M., Struble, L., Tepke., Wallevik, O., Wallevik, J.E., 2003. Comparison of concrete rheometers: International tests at MB, Cleveland OH, USA.
- [11] Banfill, P., Beaupre, 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, Nantes, France.

[12] Hočevar, A., Kavčič, F., Bokan Bosiljkov, V. 2010. Zanesljivost reoloških meritev svežih malt in betonov. Lipica. 8 str.

[13] Slag cement association. Slag cement and fly ash.

<http://www.slagcement.org/pdf/no11%20Slag%20Cement%20and%20Fly%20Ash.pdf> (5.8.2012).

[14] Schwartzenruber, A., Catherine, C. 2000. La methode du mortier de beton equivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide a la formulation des betons adjuvantes (Method of the concrete equivalent mortar (CEM) – A new tool to design concrete containing admixture). *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 33, October 2000, pp 475. 8 str.

[15] SIST EN 1015-3:1999. Methods of testformortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).10 str.

[16] SIST EN 12350 -2:2009. Preskušanje svežega betona -2. Del: Preskus s posedom stožca. 12 str.

[17] Žarnič R., Bosiljkov V., Bokan Bosiljkov V., Dujič, B. 2008/09. Gradiva vaje. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 142 str.

[18] SIST EN 12350 -5:2009. Preskušanje svežega betona – 5. Del: Preskus z razlezom. 14 str.

[19] SIST EN 12350 -7:2009. Preskušanje svežega betona -7 del: Vsebnost zraka- Metode s pritiskom. 26 str.

[20] Proizvodnja cementa. <http://www.lafarge.si/> (5.9.2012).