

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:

Andrejka, N. 2012. Vpliv mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Hočevar, A.): 77 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:

Andrejka, N. 2012. Vpliv mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Hočevar, A.): 77 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:

NEJC ANDREJKA

**VPLIV MINERALNIH DODATKOV NA REOLOŠKE
LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA**

Diplomska naloga št.: 20/OG-MK

**INFLUENCE OF MINERAL ADDITIVES ON
RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRESH CONCRETE**

Graduation thesis No.: 20/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

ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

IZJAVE

Podpisani Nejc Andrejka izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom: »Vpliv mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona«.

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

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

(podpis)

Ljubljana, 10.9.2011

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	666.97.031(043.2)
Avtor:	Nejc Andrejka
Mentor:	izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Somentor:	Andraž Hočevar, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Vpliv mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežega betona
Tip dokumenta:	diplomsko delo
Obseg in obseg:	77 str., 19. pregl., 34 sl., 46 graf.
Ključne besede:	reologija, viskoznost, strižna napetost na meji tečenja, plastična viskoznost, posed, razlez

Izveček

Namen opravljenih preiskav je bil raziskati vpliv mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežih betonskih mešanic. Lastnosti svežih betonskih mešanic smo pridobili na tri načine, s klasičnima metodama preizkusa z razlezom in preizkusa s posedom ter s še dokaj neuveljavljenim koaksialnim valjastim reometrom ConTec Viscometer 5. Reometer predstavlja boljši in modernejši način za ugotavljanje lastnosti svežih betonov. To je v zadnjem času ob vse večjih zahtevah po kakovostni vgradnji betona ter ustreznem projektiranju samozgoščevalnih in lahkovgradljivih betonov nujno potrebno, saj uveljavljeni metodi razleza in poseda ne podata dovolj informacij. Obravnavali smo vpliv treh mineralnih dodatkov: mikrosilike, tufa in granulirane plavžne žlindre, poleg tega pa tudi vpliv vodo-cementnega razmerja, ki je ključni faktor v betonu in vpliv super-plastifikatorja, ker smo ga zaradi boljše obdelavnosti betona, ki je potrebna za ustrezno meritev dodali vsem mešanicam z mineralnimi dodatki. Analizirali smo vpliv mineralnih dodatkov na mehanske lastnosti sveže betonske mešanice po času ter njihov vpliv na reološke lastnosti glede na njihov delež v betonu.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	666.97.031(043.2)
Author:	Nejc Andrejka
Supervisor:	assoc. Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.
Cosupervisor:	Andraž Hočevar, B. Sc.
Title:	Influence of mineral additives on rheological properties of fresh concrete
Document type:	Graduation Thesis – Higher professional studies
Scope and tools:	77 p., 19. tab., 34 fig., 46 graph.
Keywords:	rheology, plastic viscosity, yield value, slump, flow

Abstract

The purpose of the research was to examine the influence of mineral admixture on the rheological properties of fresh concrete mixtures. Rheological properties of fresh concrete mixtures were obtained in three ways, with well known methods slump test and flow table test and with yet fairly non-established coaxial cylindrical rheometer ConTec Viscometer 5. Rheometer is a better and modern way to detect such properties of fresh concrete. Recently the approach has become indispensable, due to growing demands for quality of cast concrete and for adequate design of self-compacting and highly-flowable concrete mixtures. Slump test and flow table test do not provide enough information about rheological properties for this kind of special concrete. We researched the impact of three mineral additives: micro silica, tuff and granulated blast furnace slag, as well as the impact of water-cement ratio, which is a key factor in concrete. We also researched the influence of super-plasticizer, because concrete needs to be in proper workability, which is necessary for proper measurements. We analyzed the influence of mineral admixtures on the rheological properties of concrete over time and their effect on mechanical properties according to their share in the concrete.

ZAHVALA

Zahvalil bi se mentorici izr. prof. Violeti Bokan-Bosiljkov in somentorju Andražu Hočevarju, za vso pomoč pri nastajanju diplomske naloge, še posebej v obdobju pisanja v Novi Zelandiji.

Zahvalil bi se tudi svojim staršem in bratu Benu, ki so me vsa leta študija spodbujali in mi stali ob strani.

Zahvala gre tudi sošolcem in prijateljem, za lepe čas, ki smo jih preživeli skupaj v času študija.

KAZALO VSEBINE

ERRATA.....	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD.....	1
2 OSNOVNE KOMPONENTE BETONA	2
2.1 Splošno o betonu	2
2.2 Cement	2
2.2.1 Proizvodnja cementa	3
2.2.2 Mineralna sestava in hidratacija cementa.....	4
2.2.3 Vrste cementov.....	5
2.3 Voda	6
2.4 Mineralni agregat	7
2.4.1 Zrnastostna sestava	7
2.4.2 Gostota	8
2.4.3 Oblika zrn agregata	8
2.4.4 Površinska tekstura.....	9
2.4.5 Največje zrno agregata	9
2.4.6 Trdnost agregata.....	9
2.4.7 Kakovost agregata	10
2.4.8 Vlažnost.....	10
2.5 Plastifikatorji	10
2.5.1 Delovanje plastifikatorjev	11
2.6 Mikrosilika	12
2.6.1 Uporaba	13
2.7 Tuf.....	13
2.7.1 Uporaba	14
2.8 Mleta granulirana plavžna žindra (Ground Granulated Blast-Furnace Slag).....	15
2.8.1 Proizvodnja žindre	16
2.8.2 Uporaba	17
3 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA.....	18
3.1 Uvod v reologijo	18

3.2 Osnove viskometrije.....	18
3.3 Modeli za strižno deformiranje	19
3.3.1 Tok med paralelnima ploščama.....	20
3.3.2 Krožni tok med vrtečima se cilindroma	20
3.3.3 Tok skozi cevi	20
3.3.4 Krožni tok med paralelnima ploščama.....	20
3.4 Klasifikacija tekočin.....	20
3.4.1 Newtonska tekočina	21
3.4.2 Ne-Newtonska tekočina, časovno neodvisna	21
3.4.3 Ne-Newtonska tekočina, časovno odvisna.....	21
3.5 Bingham-ov model tekočine	22
4 EKSPERIMENTALNO DELO	24
4.1 Uvod v eksperimentalno delo.....	24
4.2 Metode preiskav	25
4.2.1 Preizkus s posedom	25
4.2.2 Preizkus z razlezom.....	27
4.2.3 Reometer	29
4.2.3.1 Koaksialni valjasti reometri.....	30
4.2.3.2 Reometri z vzporednimi ploščami.....	31
4.2.3.3 Mešalni reometer z rotorjem	31
4.3 Opis materialov uporabljenih v eksperimentu in njihov vpliv	32
4.3.1 Cement in voda.....	32
4.3.1.1 Vpliv vodo-cementnega razmerja na lastnosti sveže betonske mešanice.....	33
4.3.2 Agregat	34
4.3.2.1 Vpliv agregata na lastnosti sveže betonske mešanice	35
4.3.3 Mikrosilika	35
4.3.3.1 Vpliv mikrosilike na lastnosti svežega betona	35
4.3.4 Tuf.....	35
4.3.4.1 Vpliv tufa na lastnosti svežega betona	36
4.3.5 Mleta granulirana plavžna žindra	36
4.3.5.1 Vpliv žindre na lastnosti svežega betona	37
4.3.6 Plastifikator	38
4.4 Sestava betonskih mešanic	38
4.4.1 Receptura betona	38
4.4.1.1 Deleži in količine mineralnih dodatkov pri posameznih mešanicah za 1 m ³ betona.....	40
4.4.1.2 Deleži in količine vode pri mešanicah CL1 in CV1.....	41

4.4.2 Mešanice s spreminjanjem V/C razmerja.....	41
4.4.3 Mešanice s spreminjanjem SP.....	42
5 REZULTATI.....	45
5.1 Mešanice z različnimi deleži SP.....	45
5.2 Mešanice s spreminjanjem V/C razmerja.....	49
5.3 Mešanice v kombinaciji z mikrosiliko	52
5.4 Mešanice v kombinaciji s tufom	56
5.5 Mešanice v kombinaciji z mleto granulirano plavžno žlindro	59
5 ZAKLJUČEK.....	62
VIRI.....	63

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Prispevek posameznih materialov k trdnosti	4
Slika 2.2: Mejne krivulje območja primernosti agregata z $d_{max} = 16$ mm po SIST EN 1026.....	8
Slika 2.3: Stopnje količine vlage v agregatu.....	10
Slika 2.4 levo: Delovanje SP: zgoraj - cementna pasta brez SP, spodaj - cementna pasta s SP	12
Slika 2.5 desno: Shematski prikaz povprečne molekule SP nove generacije – polikarboksilata.....	12
Slika 2.6: Mikrosilika	12
Slika 2.7: SEM mikroposnetek mikrosilike pod 20'000 X povečavo	13
Slika 2.8: Primer tufa	13
Slika 2.9: SEM mikroposnetek delcev tufa pod 100 kratno povečavo	14
Slika 2.10: Mleta granulirana plavžna žindra (GGBS).....	15
Slika 2.11: SEM mikroposnetek delcev žindre pod 2100 X povečavo.....	16
Slika 2.12: Gašenje žindre z vibrirno mizo je z vodo najvarčnejša metoda.....	17
Slika 3.1 : Telo dimenzij x,y in z.....	18
Slika 3.2: Strižno obremenjen model.....	19
Slika 3.3: Modeli za opis tekočin.....	22
Slika 3.4: Razmerje med navorom na meji tečenja (G) in koeficientom viskoznosti (H) in med strižno napetostjo na meji tečenja (τ_0) in plastično viskoznostjo (μ).....	23
Slika 4.1: Reograf - vpliv posameznih sestavin na lastnosti svežega betona (τ_0/μ).....	24
Slika 4.2: Oprema za preizkus s posedom	25
Slika 4.3: Meritev poseda	25
Slika 4.4: Obliki poseda.....	26
Slika 4.5: Oprema za preizkus z razlezom.....	27
Slika 4.6: Primer razleza - meritev razleza $d = (d_1+d_2) / 2$	28
Slika 4.7: Miza za razlez in kalup.....	28
Slika 4.8: ConTec Viscometer 5	29
Slika 4.9 levo: Program FRESHwin	30
Slika 4.10 desno: Cemagref IMG	30
Slika 4.11: BTRHEOM.....	31
Slika 4.12: ICAR Rheometer	32
Slika 4.13: Rheometer BT2.....	32
Slika 4.13: Vpliv vode na vrednosti τ_0/μ	33
Slika 4.14: Difraktogram vzorca tufa.....	36
Slika 4.15: Karta geološke sestave tal v okolici Zaloške gorice	36
Slika 4.16: Difraktogram vzorca žindre.....	37
Slika 4.17: Laboratorijski mešalec za beton	42

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Delež glavnih mineralov v PC klinkerju in njihove lastnosti	5
Preglednica 2.2: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1	5
Preglednica 2.3: Genetska klasifikacija osnovana na velikosti delcev	14
Preglednica 2.4: Kemijska sestava žindre	16
Preglednica 3.1: Opis Bingham-ovega modela tekočne	23
Preglednica 4.1: Stopnje poseda	27
Preglednica 4.2: Stopnje razleza	29
Preglednica 4.3: Zrnavost posameznih frakcij	34
Preglednica 4.4: Zrnavost mešanice agregata za beton	34
Preglednica 5.1: Rezultati meritev s SP pri času $t = 0$	46
Preglednica 5.2 : Vpliv SP na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času t. $(x(t_{60}) - x(t_0))$	48
Preglednica 5.3: Rezultati meritev z dodajanjem vode pri času $t = 0$	50
Preglednica 5.4: Vpliv vode na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času. $(x(t_{60}) - x(t_0))$	52
Preglednica 5.5: Rezultati meritev z mikrosiliko pri času $t = 0$	53
Preglednica 5.6 : Vpliv mikrosilike na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času $(x(t_{60}) - x(t_0))$	56
Preglednica 5.7: Rezultati meritev s tufom pri času $t = 0$	56
Preglednica 5.8 : Vpliv tufa na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času. $(x(t_{60}) - x(t_0))$	59
Preglednica 5.9: Rezultati meritev z žindro pri času $t = 0$	59
Preglednica 5.10 : Vpliv žindre na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času t	61
$(x(t_{60}) - x(t_0))$	61

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1 levo: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža superplastifikatorja ...	45
Grafikon 2 desno: Posed in razlez v odvisnosti od deleža superplastifikatorja.....	45
Grafikon 3 desno: Plastična viskoznost in SNMT v odvisnosti od časa za primer CL1	46
Grafikon 4 levo: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CL1	46
Grafikon 5 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CL1a	47
Grafikon 6 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CL1a	47
Grafikon 7 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CL1b	47
Grafikon 8 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CL1b	47
Grafikon 9 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CL1c	48
Grafikon 10 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CL1c	48
Grafikon 11: Plastične viskoznosti in strižne napetosti na meji tečenja v odvisnosti od časa za betone CL1.....	49
Grafikon 12 levo: Odvisnost plastične viskoznosti in SNMT od dodajanje vode	49
Grafikon 13 desno: Odvisnost poseda in razleza od dodajanje vode	49
Grafikon 14 levo: Plastična viskoznost in SNMT v odvisnosti od časa za primer CV1a	50
Grafikon 15 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CV1a.....	50
Grafikon 16 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CV1b.....	51
Grafikon 17 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CV1b.....	51
Grafikon 18 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CV1c.....	51
Grafikon 19 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CV1c.....	51
Grafikon 21 levo: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža mikrosilike.....	53
Grafikon 22 desno: Posed in razlez v odvisnosti od deleža mikrosilike	53
Grafikon 23 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CM1a	54
Grafikon 24 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CM1a	54
Grafikon 25 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CM1b	54
Grafikon 26 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CM1b	54
Grafikon 27 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CM1c	55
Grafikon 28 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CM1c	55
Grafikon 29: Primerjava plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za vse vzorce z mikrosiliko	55
Grafikon 30 levo: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža tufa.....	56
Grafikon 31 desno: Posed in razlez v odvisnosti od deleža tufa	56
Grafikon 32 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CT1a	57
Grafikon 33 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CT1a	57

Grafikon 34 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CT1b	57
Grafikon 35 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CT1b	57
Grafikon 36: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CT1a.....	58
Grafikon 37: Strižna napetost na meji tečenja (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od časa za primere s tufom	58
Grafikon 38 levo: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža žindre	59
Grafikon 39 desno: Posed in razlez v odvisnosti od deleža žindre	59
Grafikon 40 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CZ1a	60
Grafikon 41 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CZ1a	60
Grafikon 42 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CZ1b	60
Grafikon 43 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CZ1b	60
Grafikon 44 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CZ1c	61
Grafikon 45 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CZ1c	61
Grafikon 46: Strižna napetost na meji tečenja (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od časa za primere z žindro	61

1 UVOD

Živimo v časih, ko nam grozi globalno segrevanje in ko se svet zaradi vpliva človeka spreminja bolj kot kdajkoli prej. Začenjamo se zavedati, da nam planet na katerem živimo ne ponuja vsega na pretek in tudi gradbeništvo, kot ena največjih svetovnih industrij, se pomika v smer »zelene« gradnje.

Eno izmed področij, kjer gradbeništvo prispeva veliko k onesnaževanju, je proizvodnja portland cementnega klinkerja. Za eno proizvedeno tono PC klinkerja se v ozračje izpusti okrog eno tono ogljikovega dioksida. S tem si po ocenah raziskovalcev, proizvodnja cementa lasti 7% delež vseh izpustov CO₂ v svetu. (Turanli, L., Uzal, B. 2003)

Ker je gradbeništvo pomemben del svetovnega gospodarstva in z novogradnjami praviloma pozitivno vpliva na gospodarsko rast, je potrebno na trgu zagotoviti zadostne količine betona za nemoten potek gradenj. Ker PC klinker kot osnovna sestavina veziva za betone nima prave alternative, je v bližnji prihodnosti nerealno pričakovati, da se bo svetovna proizvodnja tega materiala bistveno zmanjšala. Kljub temu pa lahko že danes, v določenih primerih, velik del PC klinkerja v vezivu za izdelavo betonov zamenjamo z mineralnimi dodatki, kot so: tuf, žlindra, vulkanski pepel, mikrosilika, itd. in na ta način prispevamo k zmanjšanju emisij CO₂ znotraj industrije gradbenih materialov. Poleg tega, da z uporabo mineralnih dodatkov zmanjšamo proizvodnjo PC klinkerja, se zaradi prihrankov pri energiji, zmanjša tudi cena cementa (Turanli, Uzal, 2003). Uporaba mineralnih dodatkov pa ne zmanjša le cene in obsega proizvodnje PC klinkerja, temveč lahko izboljša tudi številne lastnosti betona. Za večji obseg uporabe mineralnih dodatkov v betonu, je potrebno njihove lastnosti predhodno raziskati. Pomembno je, da zelo dobro poznamo vpliv posameznega mineralnega dodatka ali njihove kombinacije na beton v svežem in strjenem stanju. V okviru diplomske naloge sem se osredotočil na vpliv mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežih betonov.

V preteklosti se vplivu mineralnih dodatkov na lastnosti svežega betona ni posvečalo toliko pozornosti, kot vplivu na lastnosti strjenega betona. Šele z razvojem naprednih betonov, kot so lahko gradljivi in samozgoščevalni betoni, so se raziskave močno osredotočile tudi na vpliv mineralnih dodatkov na reološke lastnosti in/ali obdelavnost svežega betona. Razvoj nove raziskovalne opreme na tem področju je tovrstne preiskave še dodatno vzpodbudil. Danes so raziskave o lastnostih svežega betona, zaradi številnih zahtev glede izgleda površine betonov in tudi neposrednega vpliva na lastnosti strjenega betona, pomemben del raziskav betona.

V diplomski nalogi sem se posvetil študiju vpliva treh mineralnih dodatkov: mikrosilike, žlindre in tufa na reološke lastnosti svežega betona. Med tem, ko lahko s tufom in žlindro nadomestimo večje količine PC klinkerja (tudi več kot 50%), se z mikrosiliko običajno nadomešča največ 10 % PC klinkerja (Turanli, Uzal, 2003).

2 OSNOVNE KOMPONENTE BETONA

2.1 Splošno o betonu

Beton je kompozit, ki se po zamešanju vseh sestavin s časom strdi. Poznamo različne betone, ki se v osnovi razlikujejo po vrsti veziva, ki je lahko cement, bitumen, apno itd.. Beton o katerem bo govora v tej diplomski nalogi, je zmes:

- agregata,
- cementa,
- vode,
- mineralnih in kemijskih dodatkov.

Beseda beton izvira iz latinske besede »concretus« kar pomeni kompaktno ali zgoščeno. Beton je razmeroma star kompozit, saj so ga poznali že stari Rimljani pred več kot 2000 leti. Nekatere zgradbe starega Rima zgrajene s pomočjo betona, so vidne še dandanes in že stoletja opravljajo svojo funkcijo (Hadrianov Panteon – Rim,). Vse kaže na to, kako dobro so Rimljani poznali ta kompoziti material. S propadom rimskega imperija je odšlo v pozabo tudi znanje o betonu, vse do leta 1756, ko je britanski inženir John Smeaton preizkusil mešanico apna in zdrobljene opeke. S tem se je začela nova doba gradbeništva, ki je v začetku 19. stoletja pripeljala do izuma portlandskega cementa.

2.2 Cement

Cement je fino mleto silikatno hidravlično vezivo, ki po dodatku vode z njo reagira, veže in se strdi. Je bistveni gradbeni material v betonu, ki še nima alternative, ali pa je ta zdelo draga. Postopek pridobivanja, ki se vse do danes ni bistveno spremenil, je leta 1824 patentiral Joseph Aspdin (www.lafarge.si).

2.2.1 Proizvodnja cementa

Osnovne sestavine za proizvodnjo cementnega klinkerja (cementa) so (www.lafarge.si):

- lapor,
- apnenec,
- glina.

Ti se drobijo in meljejo ter transportirajo v silose. Običajno osnovne sestavine ne vsebujejo pravega razmerja mineralov, zato je nujno predhodno preračunati njihova razmerja, saj so v nekaterih željeni minerali bolj prisotni, v nekaterih manj. Po potrebi se mešanici dodaja boksit, žgano apno (CaO), kremenčev pesek (SiO_2) ali piritne ogorke (Fe_2O_3). Ko je razmerje surovin pravo, se surovine zmelje v surovinsko moko. To se za tem transportira v silose, kjer se ji z vpihovanjem stisnjenega zraka z dna doseže ustrezno homogeniziranost (www.lafarge.si).

Sledi žganje surovin, ki je najpomembnejši proces pri proizvodnji cementa. S tem se tvori cementni klinker, ki je osnovna surovina za izdelavo cementa. Pridobivanje cementnega klinkerja poteka v treh fazah (www.lafarge.si):

- v prvi fazi se surovinska moka s pomikanjem skozi izmenjevalce toplote segreje, kar skrajša čas zadrževanja surovinske moke v rotacijski peči. Temperatura surovine ob izstopu iz izmenjevalca in ob vstopu v rotacijsko peč, doseže okoli $800\text{ }^\circ\text{C}$, temperatura plinske faze pa okoli $1000\text{ }^\circ\text{C}$,
- v drugi fazi se pregreto surovinsko moko segreva v rotacijski peči. V peči, ki ima obliko cevi, se surovine segrejejo do temperature $1300\text{ }^\circ\text{C}$, pri čemer karbonati ter glineni delci v celoti razpadejo, tvorijo pa se minerali klinkerja. Najvišjo temperaturo v tej fazi $1400 - 1450\text{ }^\circ\text{C}$ doseže material v coni sintranja, kjer potekajo najpomembnejše kemijske in fizikalne reakcije in kjer material dobi hidravlične lastnosti,
- tretja faza je ohlajanje materiala. Ta se deloma ohladi že v zadnjem delu peči, ohlajanje pa se nadaljuje v hladilcu klinkerja, kjer se temperatura materiala spusti pod $100\text{ }^\circ\text{C}$. Končni produkt žganja je portland cementni klinker v obliki temno sivih granul premera približno 3 cm.

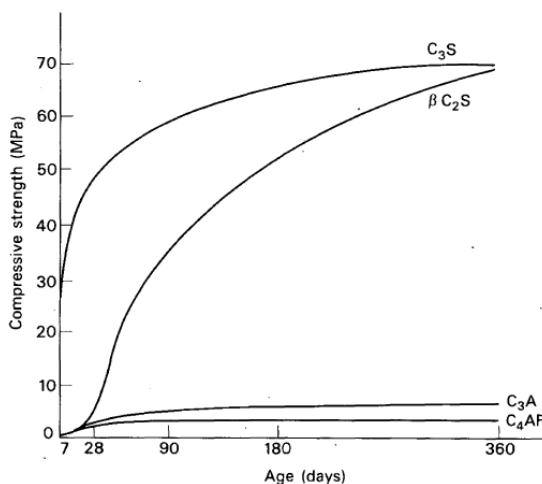
Ohlajen PC klinker se zmelje na zrnca velikosti 0,001 do 0,1 mm. Odvisno od finosti mletja se specifična površina cementa giblje med 2000 in $5000\text{ cm}^2/\text{g}$ po Blainu. Tako pridobljen portlandski cement ima sorazmerno konstantno kemijsko sestavo. Portland cement lahko poleg osnovnih sestavin C, S, A, F vsebuje tudi nekatere primesi kot so Na_2O , K_2O , SO_3 , MgO . Vse te primesi so škodljive, vendar se jih je težko znebiti (www.lafarge.si).

2.2.2 Mineralna sestava in hidratacija cementa

Večinski delež cementa sestavljajo štiri minerali:

- trikalcijev silikat,
- dikalcijev silikat,
- trikalcijev aluminat,
- tetrakalcijev aluminat.

Bistvena naloga cementa je, da v stiku z vodo reagira in pri tem ustvari cementni kamen. To se zgodi z reakcijo med molekulami vode in posameznimi minerali cementa. Temu procesu pravimo hidratacija cementa in je zaradi časovnih in drugih razlik v strjevanju posameznih mineralov zelo zapleten proces. Kot prvi mineral v stiku z vodo reagira C_3S , ki tudi največ prispeva k trdnosti cementnega kamna. C_3S proizvede tudi največ hidratacijske toplote in se zaradi tega v večjih deležih uporablja v cementih, ki so primerni za betoniranje v zimskih pogojih. Sledi mu mineral C_2S , ki počasi reagira in sprošča bistveno manj hidratacijske toplote kot C_3S , vendar tudi manj prispeva k trdnosti. C_3A hitro reagira in na začetku hidratacije sprošča veliko toplote. Za upočasnitev njegovega strjevanja, mu lahko dodamo sadro. Mineral z najmanjšim deležem C_4AF najpočasneje pridobiva na trdnosti in prispeva najmanjši delež k trdnosti cementnega kamna (Žarnić, 2005).



Slika 2.1: Prispevek posameznih materialov k trdnosti (Tattersall, G.H., Banfill, P.F.G., 198)

Preglednica 2.1: Delež glavnih mineralov v PC klinkerju in njihove lastnosti (Žarnić, 2005)

Oznaka	Ime	Delež	Lastnosti
C ₃ S	Trikalcijev silikat	45 – 60 %	najpomembnejši, pospeši proces hidratacije, povzroča visoke trdnosti
C ₂ S	Dikalcijski silikat	20 – 30 %	zavira in podaljšuje proces hidratacije in strjevanja
C ₃ A	Trikalcijev aluminat	4 – 12 %	pospešuje strjevanje in razvijanje hidratacijske toplote, občutljiv na sulfatno korozijo
C ₄ AF	Tetrakalcijev aluminat	10 – 20 %	zavira strjevanje, odporen na sulfatno korozijo

2.2.3 Vrste cementov

Za različne pogoje gradenj si želimo različne vrste cementov. Slovenski standard SIST EN 197-1, ki predpisuje sestavo, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente deli 27 osnovnih cementov v pet glavnih skupin:

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

Preglednica 2.2: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1

Vrsta cementa	Opis	Glavne sestavine	Delež mineralnih dodatkov
CEM I	portlandski cement	klinker	0 %
CEM II	mešani portlandski cement	klinker, granulirana plavžna žindra (S), mikrosilika* (D), pucolan (P,Q), elektrofiltrski pepel (V,W), žgani skrilavec (T), apnenec (L, LL), mešani mineralni dodatek (M)	II/A 6 – 20 % II/B 21 – 35 %
CEM III	žlindrin cement	klinker, granulirana plavžna žindra (S)	III/A 36 – 65 % III/B 66 – 80 % III/C 81 – 95 %
CEM IV	pucolanski cement	klinker, mikrosilika (D), pucolan (P,Q), elektrofiltrski pepel (V)	IV/A 11 – 35 % IV/B 36 – 55 %
CEM V	mešani cement	klinker, granulirana žindra (S), pucolan (P,Q), elektrofiltrski pepel (V)	V/A 18 – 30 % S

* Delež mikrosilike je omejen na 10 %.

2.3 Voda

Voda kot ena izmed osnovnih sestavin, ima v cementnem betonu zelo pomemben vpliv na njegove mehanske in tehnološke lastnosti. V splošnem velja, da je za pripravo mešanic cementnega betona povsem primerna pitna voda, pri betonih višjih zahtev, pa je potrebno njeno sestavo predhodno analizirati.

Slovenski standard SIST EN 1008 razvršča vode v naslednjih šest skupin:

- pitna voda velja za primerno za uporabo v betonu in je ni potrebno preizkusiti,
- voda, pridobljena iz procesov v industriji betona je običajno primerna, vendar mora ustrezati zahtevam iz standarda SIST EN 1008: Dodatek A,
- podtalnica je lahko primerna za uporabo v betonu, vendar mora biti preizkušena,
- naravna površinska voda in industrijska odpadna voda mora biti prav tako preizkušeni,
- morska voda ali manj slana voda pospeši vezanje, kar povzroči, da beton hitreje pridobi na trdnosti, ki pa je na koncu nekoliko manjša, kot z uporabo pitne vode. Morska voda v povprečju vsebuje 3,5% soli, največ natrijevega klorida, magnezijevega klorida in sulfata. Morska voda ni primerna za pripravo armiranih betonov, saj je jeklo zaradi prisotnosti kloridov (NaCl) izpostavljeno pospešeni koroziji,
- komunalna voda ni primerna za uporabo v betonu.

Standard SIST EN 1008 nam predpisuje, da je za uporabo vode v betonu nujen njen predhodni pregled. Pregled mora zadostovati naslednjim zahtevam:

- 1) olja in masti: Ne več kot vidni sledovi,
- 2) detergenti: Morebitna pena mora izginiti v 2 minutah,
- 3) barva: Barva se oceni kvalitativno kot blede rumena ali motna *,
- 4) izločene snovi: Največ 4 ml sedimenta*,
- 5) vonj: Brez vonja, razen vonja ki je dovoljen za pitno vodo, rahel vonj po cementu*,
- 6) kisline: $\text{pH} > 4$,
- 7) humusne snovi: Barva se po dodatku NaOH oceni kvalitativno kot rumenkasto rjava ali motna.

Vpliv organskih nečistoč in gline v vodi lahko povzroči odprto poroznost ter oblepljenje zrn, kar poslabša sprijemnost med agregatom in cementno pasto, s tem pa beton zgubi na trdnosti.

*Za vodo pridobljena iz procesov industrij betona so zahteve drugačne.

2.4 Mineralni agregat

Mineralni agregat je v splošnem sipek material, sestavljen iz kamnitih zrn različnih velikosti. Ima največji delež in je najcenejša komponenta v betonu. Običajno zapolnjuje okoli 75 % njegove prostornine.

Pridobivamo ga ali v kamnolomih, ali v gramoznih izkopih v aluvialnih dolinah. Mineralni agregat pridobljen z razstreljevanjem in drobljenjem vezanih kamnin v kamnolomih se imenuje drobljenec. Ta nastane z lomljenjem manjših skal in ima ostre robove ter manj trdna zrna zaradi notranjih razpok, ki nastanejo pri drobljenju. Zrna takšnega agregata so nepravilnih oblik in imajo ostre robove. Gramoz, ki je aluvialna nevezana kamnina, se pridobiva s kopanjem na območju rečnih dolin. Ima zglajene robove in je običajno bolj pravilnih oblik kot drobljenec. Beton, izdelan z gramozom je običajno bolj obdelaven, kot tisti z drobljencem (Žarnić, 2005).

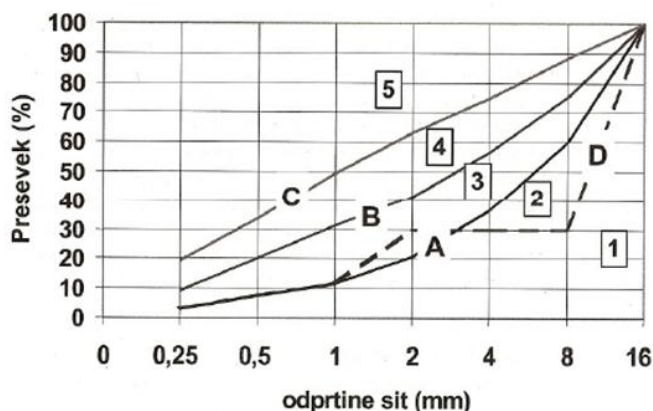
Agregat delimo na :

- droben agregat ali pesek, ki vsebuje zrna do 4 mm,
- grob agregat, ki vsebuje zrna večja od 4 mm.

2.4.1 Zrnastostna sestava

Za beton ustreznih mehanskih lastnosti ter konsistence in drugih lastnosti v svežem stanju je potrebna ustrezna zrnastostna sestava agregata. Ustrezno granuliran agregat dobro zapolnjuje celoten prostor in zmanjša možnost nastanka segregacije sveže betonske mešanice.

Zrnastostno sestavo agregata predpisujejo standardi v obliki mejnih krivulj. Krivulje predstavljajo presejek agregatnih zrn skozi določeno sito izražen v procentih. Priporoča se, da leži zrnastostna sestava izbranega agregata znotraj mejnih krivulj podanih po SIST EN 1026 (slika 2.2). Znano je, da z večanjem števila frakcij izboljšamo lastnosti betona, zagotovimo boljšo zbitost zrn in zmanjšamo trenje v masi, saj se votline med večjimi zrni zapolnijo z manjšimi. V primeru majhnih vsebnosti drobnih frakcij pa se pojavi večja nevarnost za nastanek pojava segregacije ali izločanja vode (Žarnić, 2005).



Slika 2.2: Mejne krivulje območja primernosti agregata z $d_{\max} = 16$ mm po SIST EN 1026 (Žarnić, 2005)

2.4.2 Gostota

Gostota običajnih agregatov je med 2200 in 2600 kg/m^3 , sicer pa ta lahko niha od 500 kg/m^3 pri zelo lahkih agregatih, ter vse do 7000 kg/m^3 pri zelo težkih magnetitih agregatih. Razlikujemo med tremi vrstami gostot:

- normalna relativna gostota, kot razmerje med maso normalno suhega agregata in njegovo prostornino brez por,
- relativna gostota z vodo zasičenega a površinsko suhega agregata, kot razmerje mase agregata skupaj z maso vode v porah in prostornine agregata vključno s porami,
- relativna gostota agregata osušenega v peči, kot razmerje mase osušenega agregata in prostornine agregata skupaj s porami.

2.4.3 Oblika zrn agregata

Oblika agregata je odvisna od njegovega izvora. Pri drobljenem agregatu je idealna kvadratasta oblika, pri gramozu pa kroglasta. Običajno so zrna vmesne oblike in so bolj ali manj nepravilna. V primerjavi z drobljenim agregatom je za gramoze značilna dobra vgradljivost, vendar pri enakem vodocementnem razmerju betoni z drobljenim agregatom dosegajo višje trdnosti in togosti. Zrna agregata, ki po svoji obliki odstopajo preveč (paličasta, ploščata), s svojo veliko specifično površino in anizotropnimi lastnostmi neugodno vplivajo na kvaliteto betona (Žarnić, 2005).

2.4.4 Površinska tekstura

Teksturo površine delimo na dve vrsti: grobo in fino. Beton z agregatom grobe površine zaradi dobre sprijemnosti s cementnim kamnom dosega višje trdnosti, vendar je slabše vgradljiv, kot beton z agregatom fine površine (Žarnić, 2005).

2.4.5 Največje zrno agregata

Velikost največjega zrna agregata je odvisna od izmer konstrukcijskih elementov in razdalje med vzporednimi armaturnimi palicami. V tč. 5.4.4. standarda SIST 1026 je sledeče določilo: » največje zrno v najbolj grobi frakciji agregata naj bo manjše od ene četrtine najmanjše mere prereza betonskega elementa (pri ploščah – od ene tretjine debeline plošče) in vsaj za 5 mm manjše od svetle razdalje med vzporednimi vodoravnimi ali navpičnimi palicami armature v elementu«. Pri večini konstrukcij je največje zrno 16 mm ali največ 32 mm. Izjema so masivne konstrukcije, kot npr. jezovi in mostovi, kjer je lahko največje zrno tudi 64 mm. S povečanjem velikosti največjega zrna agregata lahko zelo znižamo stroške konstrukcije, saj se zaradi zmanjšane skupne površine agregata, zmanjša potreba po vodi in cementu. Slaba stran uporabe veliki zrn je, da s tem zmanjšamo tudi trdnost betona (Žarnić, 2005).

2.4.6 Trdnost agregata

Trdnost agregata je pomemben faktor pri trdnosti betona, saj se z agregatom nizke trdnosti ne da pripraviti betona visoke trdnosti. Potrebo po uporabi zadosti trdnih agregatov ugotovimo s porušitvijo preizkušancev, kjer opazujemo ali je porušitev nastala po agregatu, ali po cementnem kamnu (Žarnić, 2005).

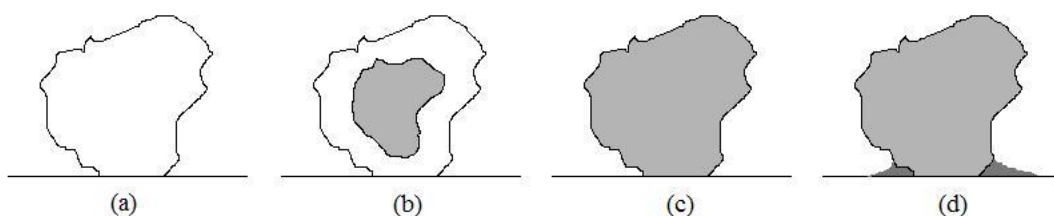
2.4.7 Kakovost agregata

Kakovost agregata je povezana s prisotnostjo različnih primesi, ki jih delimo v naslednje skupine (Žarnić, 2005):

- praškasti delci $< 0,075$ mm: zaradi velike specifične površine vpijejo veliko vode,
- organske primesi: zaradi svoje pogoste kislosti zmanjšajo alkalnost cementne paste, ki je nujna za proces hidratizacije,
- soli: pospešujejo zgodnje faze hidratizacije cementa; še posebej so nevarne pri AB konstrukcijah, zaradi nastanka korozije,
- snovi, ki reagirajo.

2.4.8 Vlažnost

Agregat običajno že vsebuje določeno količino vlage. Pri njegovi uporabi je potrebno ugotoviti, kolikšen je njen delež. To je predvsem pomembno zaradi vodo-cementnega razmerja. Glede na količino vlage v agregatu ločimo štiri stanja, ki so shematsko prikazana na sliki 2.3 (Žarnić, 2005).



Slika 2.3: Stopnje količine vlage v agregatu: (a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago in (d) moker (Žarnić, 2005)

2.5 Plastifikatorji

Plastifikatorji za beton so dodatki, ki omogočajo zmanjšanje vodo-cementnega razmerja, vendar pri tem ohranijo obdelavnost betona ali jo povečajo brez povečanja vodo-cementnega razmerja. Spadajo v družino kemijskih dodatkov in so po definiciji standarda SIST EN 934-2 snovi/produkti, ki jih dodamo betonu v času mešanja v količinah < 5 % na maso veziva.

Že stari Rimljani so maltam dodajali kri, mleko in svinjsko mast, ker so verjetno slučajno odkrili, da izboljšujejo obdelavnost sveže malte. Danes vemo, da so to odlični plastifikatorji in aeranti. Prve umetne plastifikatorje so razvili v ZDA okrog leta 1930, ko se je pričela masovna uporaba betona. Ker so potrebe po kakovosti betona z leti naraščale, se razvoj plastifikatorjev ni ustavil in tako lahko danes govorimo o plastifikatorjih tretje generacije, ki so bistveno bolj učinkoviti, od tistih prvih (Černilogar, 2010).

Glede na kemijsko sestavo plastifikatorje delimo v štiri skupine (Černilogar, 2010):

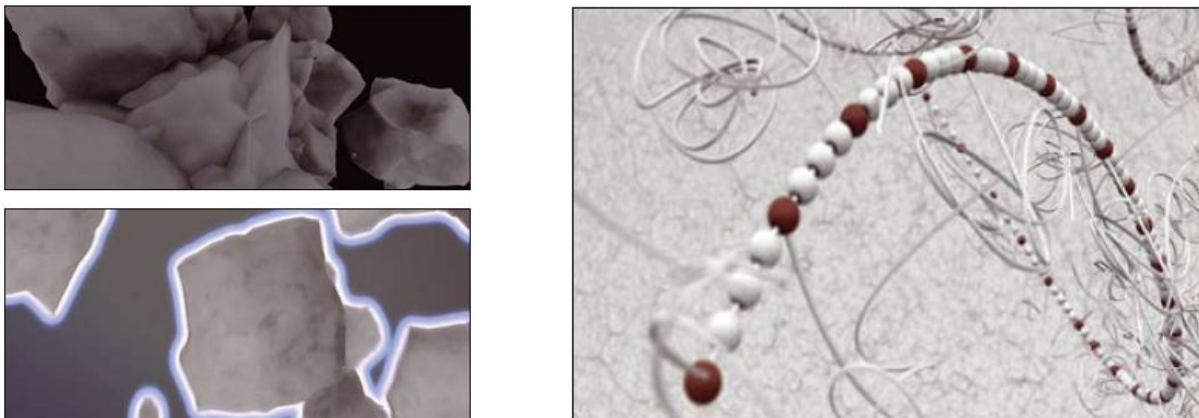
- sulfonirani melamin-formaldehidni kondenzati (SMF),
- sulfonirani naftalen-formaldehidni kondenzati (SNF),
- modificirani lignin-sulfonati (MLS),
- modificirani polikarboksilati (MPC).

Potrebna količina vode v mešanici je odvisna predvsem od:

- vrste plastifikatorja,
- začetne konsistence mešanice,
- lastnosti cementnega veziva.

2.5.1 Delovanje plastifikatorjev

Plastifikatorji (P) in superplastifikatorji (SP) prve generacije delujejo tako, da se adsorbirajo na cementne delce, jih omrežijo in zaradi elektrostatskega odboja enako nabitih delcev preprečujejo njihovo združitve. Podoben učinek imajo hiperplastifikatorji (SP nove generacije), ki se prav tako z negativno nabitimi skupinami adsorbirajo na cementne delce, vendar za razliko od P in SP združevanje cementnih delcev v tem primeru preprečujejo še dolge glavne in stranske verige. Tako se ustvari prostorski odboj, ki zaradi postopne in daljše adsorpcije traja dlje. Je pa delovanje P, SP posebno pa SP nove generacije odvisno tudi od vrste dejavnikov: kemijske in mineralne sestave cementa, količine cementa, sestave agregata, vrste in sestave mineralnih dodatkov, morebitnih drugih kemijskih dodatkov in pogojev dela (Černilogar, 2010).



Slika 2.4 levo: Delovanje SP: zgoraj - cementna pasta brez SP, spodaj - cementna pasta s SP (Černilogar, Gradbenik 2010)

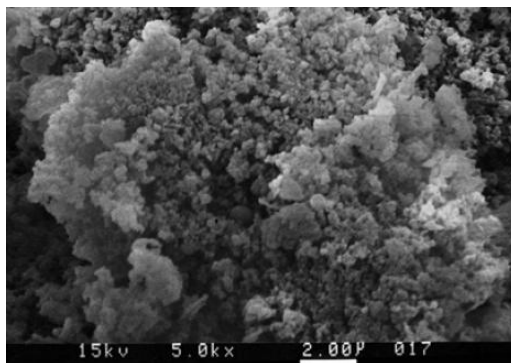
Slika 2.5 desno: Shematski prikaz povprečne molekule SP nove generacije – polikarboksilata (Černilogar, Gradbenik 2010)

2.6 Mikrosilika



Slika 2.6: Mikrosilika

Mikrosilika je praškast material, sestavljen iz okroglih zrn manjših od 1 μm , kar je v povprečju 100 krat manj od povprečnega zrna cementa. Njena specifična površina se giblje okoli 20000 cm^2/g po Blainu. Mikrosilika nastane kot stranski produkt proizvodnje silicijevih ali ferosilicijevih zlitin. Proizvodnja poteka v električnih pečeh pri temperaturah nad 2000 $^{\circ}\text{C}$, pri čemer med pretvorbo zelo čistega kremenca v silicij, nastanejo hlapi silicijevega dioksida, ki se v višjem delu peči, ki je hladnejši, mešajo s kisikom in kondenzirajo v zelo drobna zrna. Ko se zrna uskladišči se jim odstrani vse nečistoče ter preveri njihovo velikost. Večji del kondenzirane mikrosilike sestavlja amorfni silicijev dioksid (najmanj 85%) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002).



Slika 2.7: SEM mikrosnetek mikrosilike pod 20'000 X povečavo (Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., 2002)

2.6.1 Uporaba

Mikrosilika ima kot mineralni dodatek k betonu ugoden vpliv tako na svež kot na strjen beton. Ker so delci mikrosilike manjši od delcev cementa imajo večjo specifična površino in s tem vežejo nase več vode. S tem se zmanjša mobilnost vode v betonu, kar zmanjša možnost nastanka segregacije betona in izločanja vode. Zaradi tega je mikrosilika odličen stabilizator. Mikrosiliko se kot dodatek za cement uporablja za betone z visokimi zahtevami glede nepropustnosti. Z njo praviloma nadomestimo med 5 in 10 % cementnega klinkerja (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002).

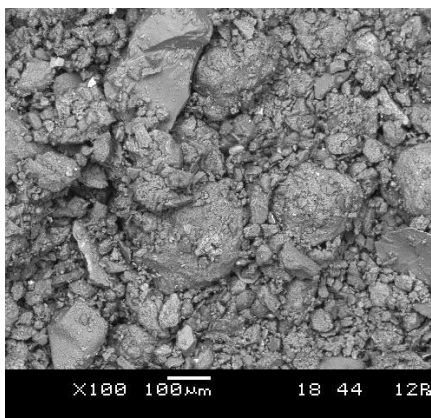
2.7 Tuf



Slika 2.8: Primer tufa

Tuf je piroklastična sedimentna kamnina, ki nastane s konsolidiranjem vulkanskega prahu. V preglednici 2.3 je predstavljena njegova genetska klasifikacija osnovana na velikosti delcev.

Spada v skupino naravnih pucolanov, materialov naravnega nastanka, ki imajo hidratacijske sposobnosti. Pucolani, zmešani z vodo, se sami ne strjujejo, toda zmleti v prisotnosti cementa in pri normalni zunanji temperaturi reagirajo z raztopljenim kalcijevim hidroksidom ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Pri tem nastanejo spojine kalcijevih silikatov in kalcijevih aluminatov, ki dajejo trdnost. Pucolani vsebujejo predvsem reaktivni silicijev dioksid (SiO_2) in aluminijev oksid (AlO_3) ter druge okside.



Slika 2.9: SEM mikrosnetek delcev tufa pod 100 kratno povečavo (Uranjek, M. 2011)

Preglednica 2.3: Genetska klasifikacija osnovana na velikosti delcev (Vrabec, 2005)

VELIKOST DELCEV	PIROKLASTIČNI SEDIMENTI IN KAMNINE			
	NEKONSOLIDIRAN PIROKLASTIČNI MATERIAL	TUF (konsolidiran piroklastični material)	TUFIT (presedimentirana sineruptivna kamnina)	TUFKA MANINA (posteruptivno presedimentirana ali predelana kamnina)
< 0,06 mm	drobnozrnati vulkanski pepel	pelitski tuf	muljasti tuf	tufski muljavec
0,06 – 2 mm	debelozrnati vulkanski pepel	debelozrnati tuf	peščeni tufit	tufski peščenjak
		lapilni tuf	lapilni tufit	tufski konglomerat
2 – 64 mm	lapilni piroklastični material		lapilni tufit s plovcem	tufska breča
			lapilni tufit s plovcem in litičnimi delci lapilnih kamnin	
	bombe, bloki	konglomerat	tufitska breča	
> 64 mm		piroklastična breča	tufitska breča s plovcem	
			tufitska breča s plovcem in litičnimi delci	

2.7.1 Uporaba

Tuf se lahko uporabi kot mineralni dodatek k betonu ali kot komponento v cementu. Na beton ima naslednje splošno znane vplive: zmanjša sproščanje hidratacijske toplote, zmanjša prepustnost površine, poviša sulfatno odpornost in močno pripomore k zmanjšanju alkalno-silikalne reakcije. Tuf vpliva tudi na čas vezanja, vendar je vpliv odvisen od vrste. Nekateri tufi čas vezanja podaljšajo,

nekateri ga skrajšajo. Za tuf je značilna velika potreba po vodi, kar pomeni višje V/C razmerje in posledica tega je manjša končna trdnost betona. Zaradi vpliva na trdnost je delež tufa, ki lahko zamenja cementni klinker v vezivu navzgor omejen na 35 %. Zaradi ekonomičnosti in čistejše proizvodnje betona, pa se danes v praksi vse bolj uporabljajo mešanice z višjo vrednostjo tufa, tudi do 50 % in več (Turanli, Uzal, Bektas, 2003). Tak primer so na primer pucolanski cementi. Tuf se v gradbeništvu uporablja tudi (www.montana-zalec.si):

- pri proizvodnji betonskih izdelkov,
- pri izdelavi že pripravljenih suhih malt,
- kot polnilo pri izdelavi fugirnih mas, vodoneprepustnih mas,
- kot sanacijskih material,
- pri izdelavi mineralnih vlaken za toplotne in zvočne izolacije,
- pri izdelavi hidravličnih malt (takšne malte za hidratacijo ne potrebujejo zraka).

2.8 Mleta granulirana plavžna žindra (Ground Granulated Blast-Furnace Slag)



Slika 2.10: Mleta granulirana plavžna žindra (GGBS)

V osnovi je žindra latentno hidravlično vezivo, kar pomeni, da ob primerni aktivaciji poseduje hidravlične lastnosti. Prva uporaba mlete granulirane plavžne žindre v betonu sega v leto 1774. V začetku se jo je uporabljalo v kombinaciji z gašenim apnom, kasneje pa je gašeno apno nadomestil cement. Njena prva uradna proizvodnja je zabeležena v Nemčiji leta 1892. Od takrat se GGBS uporablja kot agregat ali kot dodatek v cementih, lahko tudi oboje (Virgalitte, Luther, Jere, Mather, 2000).

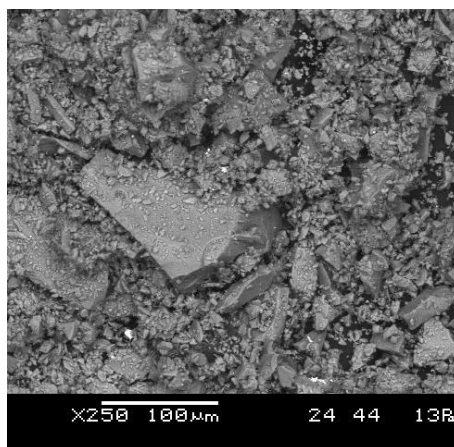
2.8.1 Proizvodnja žlindre

Plavžna žindra je nekovinski material, ki nastane v plavžu pri proizvodnji surovega železa. Da iz železove rude pridobimo železo, je potrebno rudo segreti nad temperaturo 1500 °C. Pri tem se kot stranski produkt tvori staljena žindra, ki se nalaga nad staljeno železo. 95 % njene sestave tvorijo, silicij, kalcij, aluminij, magnezij in kisik. Njena sestava je odvisna predvsem od kvalitete rude in nečistoč v koksu. V preglednici 2.4 je prikazana kemijska sestava žlindre in delež posameznih spojin (Virgalitte, Luther, Jere, Mather, 2000).

Preglednica 2.4: Kemijska sestava žlindre (Bokan Bosiljkov, 2006)

Kemična spojina	Masni delež spojine [%]
SiO ₂	29 - 38
Al ₂ O ₃	10 - 18
CaO	36 - 44
MgO	4 - 12
SO ₃	1 - 2,5
Fe ₂ O ₃	0,2 - 2
Na ₂ O in K ₂ O	1 - 2

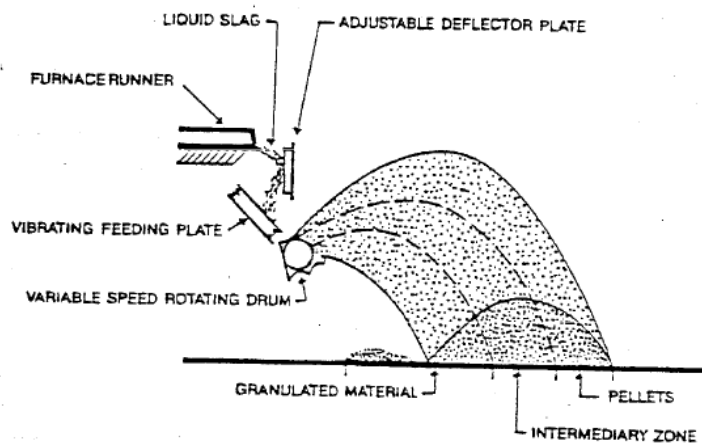
Da žindra doseže najboljšo možno sposobnost hidratizacije, jo je potrebno v najkrajšem možnem času, ko zapusti peč, ohladiti. Tako dosežemo, da se talina preoblikuje v zrna (granule) velikosti največ 4,75 mm in zmanjšamo njeno kristalizacijo na minimum. Počasti staljena žindra tvori kristalno obliko in nima hidravličnih lastnosti. Delci, ki se tvorijo pri razdrobitvi, so splošno manjši od 4,75 mm. Žindra se nato melje v prah, ki ima delce manjše od 45 μm. Njena razvita površina po Blainu se giblje med 4000 in 6000 cm²/g (Virgalitte, Luther, Jere, Mather, 2000).



Slika 2.11: SEM mikrosnetek delcev žlindre pod 2100 X povečavo (Uranjek, M. 2011)

Za ohlajanje žlindre obstajajo tri metode. Prva metoda je najbolj enostavna, vendar se dandanes ne uporablja več. Staljeno žlindro se enostavno potopi v vodo. Takšen način ohlaiditve ne zagotovi ustrezne granulacije, zato se danes uporabljata naslednji dve metodi (Virgalitte, Luther, Jere, Mather, 2000):

- gašenje žlindre s pomočjo visokotlačnih vodnih šob,
- gašenje žlindre z vibracijsko mizo ter vrtečim se bobnom (slika 2.12).



Slika 2.12: Gašenje žlindre z vibrirno mizo je z vodo najvarčnejša metoda

2.8.2 Uporaba

Žlindra se kot hidravlično vezivo aktivira z dodajanjem portland cementa, apna ali alkalije iz drugih virov. Hidratacija je v kombinaciji s portland cementom odvisna predvsem od razgradnje in raztapljanja steklaste strukture žlindre. Do tega pojava pride zaradi sproščanja hidroksidnih ionov med hidratacijo portland cementa. S samo vodo ne moremo doseči zadostne hidratacije. Z žlindro lahko nadomestimo do 70 % cementnega klinkerja (Virgalitte, Luther, Jere, Mather, 2000).

3 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA

3.1 Uvod v reologijo

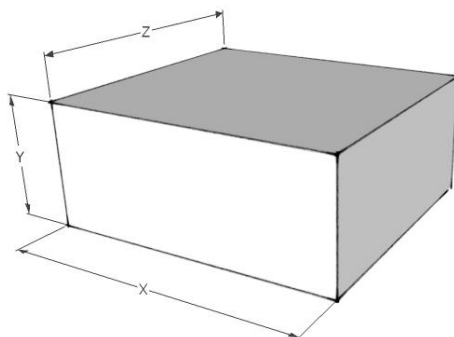
Metodi ocene konsistence svežega betona s posedom ali razlezom nista dovolj učinkoviti za oceno lastnosti naprednih betonov v svežem stanju, za katere so zahteve vse višje. Še posebej se neprimernost metode pokaže pri uporabi različnih kemijskih in mineralnih dodatkov, s katerimi medsebojen vpliv sestavin betona postane še bolj zapleten proces. Zaradi tega se zadnja leta vse bolj uveljavlja ugotavljanje lastnosti svežega betona z uporabo reologije.

Reologija je veda, ki preučuje deformiranje in tečenje snovi. Te snovi so lahko elastične ali tekoče. Obravnava povezavo med silo, deformacijo in časom. Podskupina reologije je viskometrija. Ta preiskuje povezave med napetostjo in hitrostjo deformiranja. Definirana je kot upor proti tečenju oz. upor tekočine proti deformaciji. Pri velikem uporu je viskoznost materiala velika.

Reološke lastnosti svežega betona merimo z napravami imenovanimi reometri ali viskometri. Rezultati tovrstnih preiskav nam omogočajo do zdaj najboljšo kontrolo kakovosti surovih materialov, procesov in končnih produktov. Z njimi si lahko pomagamo pri dimenzioniranju procesne opreme (npr. črpalke) v procesu vgradnje betona, pri določanju vpliva posameznih materialov na lastnosti svežega betona, ter pri preučevanju vpliva novih dodatkov.

3.2 Osnove viskometrije

Na sliki 3.1 je prikazano tridimenzionalno telo dimenzij x, y in z . Zgornja ploskev ima površino: $A = X \cdot Z$.



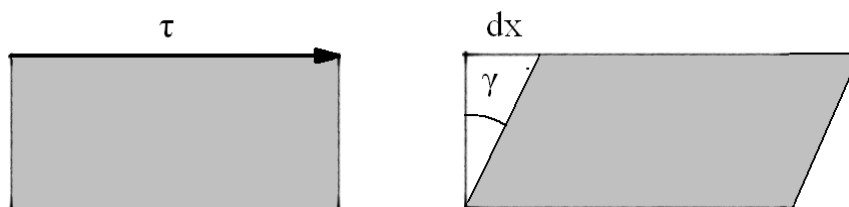
Slika 3.1 Telo: dimenzij x, y in z

Če na zgornjo ploskev deluje sila F v smeri ravnine v kateri ta ploskev leži, pravimo da je sila strižna. Ta sila povzroči strižno napetost (Wallevik, 2009):

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

S časom dt se telo se zaradi posledice strižne sile deformira za dx na vrhu ploskve (slika 3.2). Deformacijo lahko opišemo tudi s kotom γ . Razmerje med deformacijo in časom, ki je bil za to potreben imenujemo strižna hitrost (Wallevik, 2009):

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



Slika 3.2: Strižno obremenjen model

Če strižno napetost (τ) delimo s strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$), dobimo viskoznost (η) ali funkcijo viskoznosti ($\eta(\dot{\gamma})$):

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

Opomba: Zaradi lažjega označevanja sem strižno hitrost ($\dot{\gamma}$) v nadaljevanju označeval brez pike (γ).

3.3 Modeli za strižno deformiranje

Strižno deformiranje tekočin merimo na štiri načine (Wallevik, 2009):

- tok med paralelnima ploščama,
- krožni tok med vrtečima se cilindroma,
- tok skozi cevi,
- krožni tok med paralelnima ploščama.

3.3.1 Tok med paralelnima ploščama

Iz teoretičnega vidika je to idealen model za merjenje viskoznih lastnosti tekočin ali suspenzij. Njegova pomanjkljivost je v težki izvedljivosti v praksi.

3.3.2 Krožni tok med vrtečima se cilindroma

Krožni tok med vrtečima se cilindroma je zaradi praktične izvedljivosti in ustreznosti rezultatov najpogosteje uporabljen model v viskometriji. Tudi ta model ima v praksi nekaj pomanjkljivosti:

- »top in bottom« efekt,
- zdrs na površini zunanjega ali notranjega cilindra,
- konstantna strižna hitrost ob vsaki rotacijski hitrosti.

3.3.3 Tok skozi cevi

S takšnim modelom ni mogoče določiti strižne napetosti na meji tečenja, zato ni primeren za Ne-newtonske tekočine.

3.3.4 Krožni tok med paralelnima ploščama

Z njim lahko določimo elasto-plastično obnašanje. Je primeren za sveže betone.

3.4 Klasifikacija tekočin

Tekočine razvrščamo v štiri glavne skupine (Wallevik, 2009):

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

3.4.1 Newtonska tekočina

Za Newtonske tekočine velja, da je viskoznost konstantna za vse strižne hitrosti. Njihovo obnašanje je med vsemi najlažje opisati. Opišemo ga z linearno odvisnostjo med strižno napetostjo (τ) in strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$) (slika 3.3). Med Newtonske tekočine spadajo eno fazne tekočine ali raztopine z majhnimi molekularnimi masami, kot so voda, olje in gorivo (Wallevik, 2009, Hočevar, 2011).

3.4.2 Ne-Newtonska tekočina, časovno neodvisna

Časovno neodvisne Ne-Newtonske tekočine so tekočine, za katere velja, da je njihova viskoznost odvisna od strižne hitrosti. Tekočine te vrste, delimo v tri skupine (Wallevik, 2009, Hočevar, 2011):

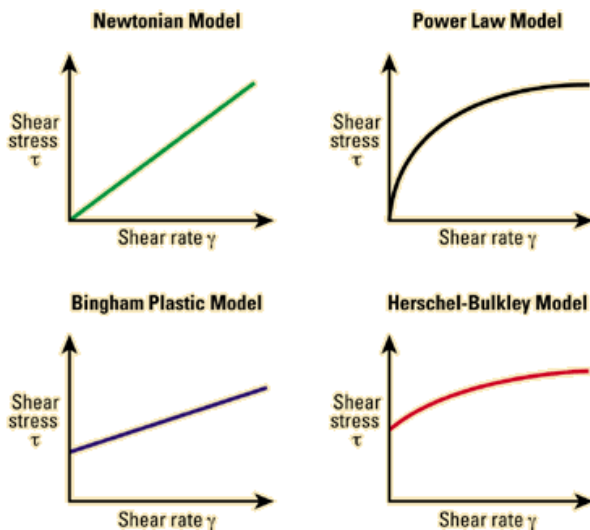
- tekočine s strižnim redčenjem (shear thinning) ali psevdoplastične tekočine imajo lastnost, da se jim viskoznost zmanjšuje z večanjem strižne hitrosti. Takšne tekočine so šamponi, barve, pomarančni sok, itd. Do tega pojava pride zaradi orientacije podolgovatih delcev v smeri toka, zaradi raztezanja polimernih verig v smeri toka in njihovega trganja, zaradi deformacije okroglih delcev v eliptične ter zaradi razbijanja delcev, ki so jih združile v večje skupine,
- tekočine s strižnim zgoščanjem ali dilatirane (dylatancy) tekočine imajo obratno lastnost, saj se jim viskoznost z višanjem strižne hitrosti večja. To so materiali iz gosto stisnjenih delcev, kot na primer 50 % pasta krompirjevega škroba v vodi,
- tekočine, ki imajo napetost na meji tečenja, ne tečejo same od sebe. Da stečejo, mora strižna napetost preseči napetost na meji tečenja. Takšnim tekočinam rečemo tudi viskoplastične. Primeri takšni materialov so: kečap, majoneza, zobna pasta, malta, beton. Takšne tekočine najlažje opišemo z Binghamovim modelom za tekočine.

3.4.3 Ne-Newtonska tekočina, časovno odvisna

Pri tem tipu tekočin, je njihova viskoznost odvisna tako od strižne hitrosti, kot tudi od časa. Snov med striženjem spremeni svojo strukturo, kar vpliva na viskoznost. Obnašanje teh tekočin delimo v naslednje tri skupine (Wallevik, 2009, Hočevar, 2011):

- tiksotropična tekočina je material z notranjo strukturo. Med striženjem se struktura poruši, med mirovanjem pa se ponovno sestavi (povrne). Porušitev strukture in ponovna vzpostavitev strukture sta funkciji časa in materialnih karakteristik,
- reopektrične tekočine se od tiksotropičnih razlikujejo po manjših hitrostih striženja. Reopektrična tekočina ponovno sestavi svojo strukturo hitreje med počasnim striženjem kot med mirovanjem. Tak primer je mavčna pasta,

- anti-tiksotropična tekočina pri strižni obremenitvi poveča viskoznost, saj zgradi strukturo, ki se poruši med mirovanjem. Primerov je malo, eden je gumi-lateks.



Slika 3.3: Modeli za opis tekočin

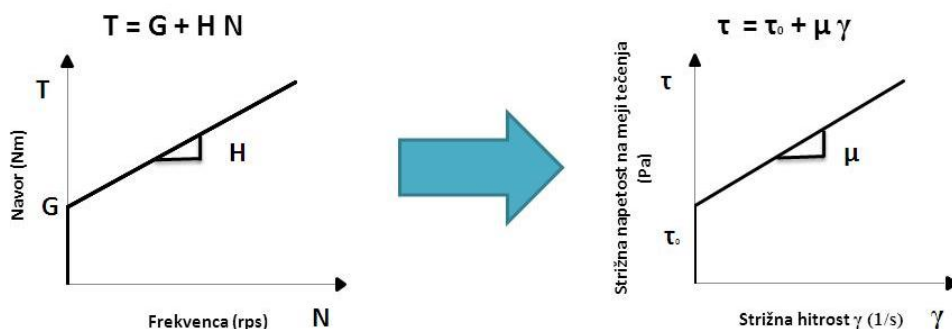
3.5 Bingham-ov model tekočine

Najpreprostejše obnašanje tekočine je Newtonska tekočina, ki jo lahko opišemo z linearno odvisnostjo med strižno napetostjo (τ) in strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$). Strižna hitrost je pravzaprav hitrost deformiranja materiala. Glavna lastnost take tekočine je, da se pojavi tok tekočine tudi pri napetosti skoraj enaki nič. Razmerje med strižno napetostjo in strižno hitrostjo imenujemo plastična viskoznost (μ) materiala. Že vizualno lahko ocenimo, da beton ni newtonska tekočina in da potrebuje vsaj neko minimalno napetost, da steče. To napetost imenujemo strižna napetost na meji tečenja ($\tau_{0,s}$). Drugače pa model ohranja linearno odvisnost med strižno napetostjo svežega betona in strižno hitrostjo. Model opišemo z enačbo : $\tau = \tau_{0,s} + \mu \cdot \dot{\gamma}$.

Konstant τ_0 in μ ne moremo določiti neposredno. Lahko pa s pomočjo teh konstant izpeljemo enačbe s parametri katere lahko merimo. Izpeljemo lahko enačbe za obnašanje tekočine med vrtečimi se valji ter obnašanje tekočine med gibanjem po cevi. Rezultat preiskave reoloških parametrov svežega betona z reometrom je tako največkrat podan v obliki: $T = G+H \cdot N$.

V enačbi T predstavlja navor (upor proti striženju), N je frekvenca vrtenja, H je mera za odpornost betona proti naraščajoči hitrosti gibanja (koeficient viskoznosti) in G je mera za navor, ki je potreben za začetek gibanja betona (navor na meji tečenja). V tem primeru je to dinamični navor na meji tečenja, saj meritev poteka od največje hitrosti vrtenja proti najmanjši. G predstavlja presečišče

premice z navpično osjo. V kolikor meritev poteka le pri eni hitrosti vrtenja, dobimo statično odpornost proti tečenju, ki jo določa največji izmerjeni navor. Kalibrirani reometri omogočajo preračun vrednosti G in H na osnovne Binghamove parametre τ_0 in μ (napetost na meji tečenja in plastična viskoznost (ICAR, 2007, Hočevnar, 2011)).



Slika 3.4: Razmerje med navorom na meji tečenja (G) in koeficientom viskoznosti (H) in med strižno napetostjo na meji tečenja (τ_0) in plastično viskoznostjo (μ)

Preglednica 3.1: Opis Bingham-ovega modela tekočne (ICAR, 2007, Hočevnar, 2011)

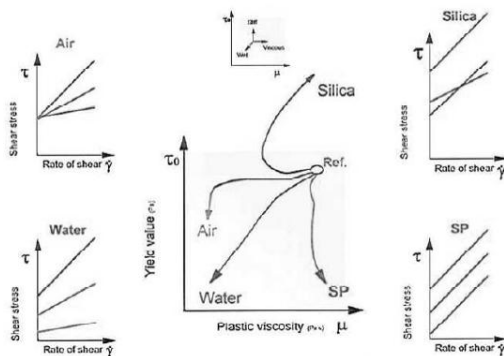
Relativni parametri	Osnovni parametri
$T = G + H \cdot N$	$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma$
T = navor (Nm) G = 'G-vrednost' (Nm), povezana s τ_0 H = 'H-vrednost' (Nm.s), povezana z μ N = frekvenca vrtenja (rps)	τ = strižna napetost (Pa) τ_0 = strižna napetost na meji tečenja (Pa) μ = plastična viskoznost (Pa.s) γ = strižna hitrost (1/s)

Z reometrom lahko merimo:

- statično strižno napetost na meji tečenja sveže mešanice s cementnim vezivom, ki si jo lahko predstavljamo kot minimalno potrebno napetost, da sprožimo tečenje mirujoče mešanice,
- dinamično strižno napetost na meji tečenja sveže mešanice s cementnim vezivom si lahko predstavljamo kot napetost, ki je potrebna, da mešanica teče,
- plastično viskoznost (μ) sveže mešanice s cementnim vezivom, ki predstavlja upor spremembi hitrosti striženja. Iz meritev upora, ki ga nudi sveža mešanica pri različnih hitrostih striženja dobimo premico, katere naklon je plastična viskoznost sveže mešanice s cementnim vezivom.

4 EKSPERIMENTALNO DELO

4.1 Uvod v eksperimentalno delo



Slika 4.1: Reograf - vpliv posameznih sestavin na lastnosti svežega betona (τ_0/μ) (Wallevik, O.H., 2009)

Kot je že omenjeno v uvodu diplomskega dela, sem se pri raziskovanju reoloških lastnosti svežih betonskih mešanic osredotočil na vpliv mineralnih dodatkov, tufa, žlindre in mikrosilike. Poleg tega sem v delo vključil tudi vpliv superplastifikatorja in vpliv vodo-cementnega razmerja. Meritve, ki smo jih pridobil s standardnima preizkusnima metodama s posedom in razlezom ter reometerom ConTech Viscometer 5, smo za vsak vzorec izvedli pri štirih različnih časih $t = 0, 20, 40$ in 60 min.

Da bi dosegli boljšo kvaliteto in pravilnost rezultatov pridobljenih z reometrom, smo ob vsakem času ponovili meritev trikrat in upoštevali povprečje. Preizkusov s posedom in razlezom nismo ponavljali, ker za njih v intervalu meritev, ki so si sledile na 20 min, ni bilo časa.

Vsem trem uporabljenim mineralnim dodatkom je skupno, da imajo večjo potrebo po vodi kot cement, zato je pri istem vodo-cementnem razmerju beton manj obdelaven in ima višjo strižno napetost na meji tečenja. Prevelika strižna napetost na meji tečenja lahko povzroči slabe in nezanesljive meritve, zato smo nekaterim mešanicam dodali tudi superplastifikator. Delovanje tega je opisano v poglavju 2 Osnovne komponente betona. Njegov vpliv je analiziran v poglavju 5 Rezultati. Za vse tri dodatke je tudi značilno, da zmanjšajo možnost nastanka segregacije in izcejanja vode. To se zgodi predvsem zato, ker je velikost njihovih delcev manjša, kot velikost delcev portlandskega cementa. Obseg izcejanja vode je namreč praviloma odvisen od razmerja med skupno površino trdih delcev in enoto volumna vode. Voda namreč ovije delce v betonu in če je vode preveč oz. delcev premalo, se odvečna voda iz betona izloči. Do izcejanja vode iz betona lahko pride tudi ob pretirani uporabi plastifikatorja.

4.2 Metode preiskav

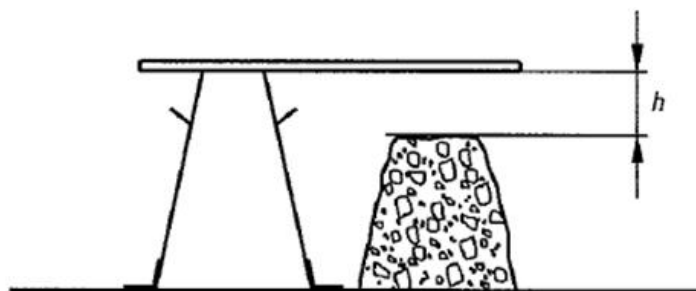
4.2.1 Preizkus s posedom



Slika 4.2: Oprema za preizkus s posedom

Metoda s posedom je namenjena določevanju konsistence svežega betona in je bi bila prvič uporabljena leta 1910 v ZDA. Preizkus s posedom omogoča določitev konsistence svežih betonov od trdo-plastične in tekoče konsistence, kar pomeni, da je primerna za posede med 10 mm in 210 mm. Za posede izven teh meja je metoda neprimerna. Za takšne posede se uporabljajo druge metode. Je najbolj razširjena metoda za ugotavljanje obdelavnosti. Njen slabost je v tem, da ne obravnava lastnosti tečenja svežega betona, kar je npr. nujno potrebna informacija za izdelavo črpnih in SCC betonov. Tam je bolj kot sama konsistenca pomembno ravno vedenje o tečenju betona. Preizkus smo izvajali v skladu s slovenskim standardom SIST EN 12350-2.

S preizkusom merimo razliko v višini vzorca svežega betona, ki ga vgradimo v treh plasteh (vsako plast zgostimo s 25 udarci z zgoščevalno palico). Ko kalup odstranimo (dvignemo), s pomočjo zgoščevalne palice in kalupa izmerimo višino poseda vzorca, kot je to prikazano na sliki 4.3.



Slika 4.3: Meritev poseda

Za potrebe preizkusa potrebujemo:

- kalup za oblikovanje preizkušanca,
- lijak,
- zgoščevalna palica,
- merilo,
- osnovna plošča/površina,
- posoda za mešanje,
- štirioglata lopatica (zidarska žlica),
- vlažna krpa,
- lopatica,
- ura,
- vodna tehnica.

Možne so štiri oblike poseda:

- pravičen posed - Betonski preizkušavec se posede, vendar zadrži razločno vidno simetrično obliko. Obstaja izmerljiva oblika,
- brez poseda - Ni možno izmeriti višinske razlike med višino kalupa in višino preizkušanca po odstranitvi kalupa,
- posed s poružitvijo preizkušanca - Betonski preizkušavec se razleze po osnovni plošči in preneha posedovati razločno vidno sled svoje prvotne stožaste oblike,
- posed s strižno poružitvijo - Del posednega betona se zruši, preostal del pa zadrži obliko posednega stožca. V tovrstnih primerih se preizkus s posedom ponovi.



a). Pravičen posed b). Posed s poružitvijo preizkušanca

Slika 4.4: Obliki poseda

Konistenco preizkušanca torej ocenimo z meritvijo poseda in ji pripišemo eno izmed petih stopenj, določenih po standardu SIST EN 206-1 (Preglednica 4.1).

Preglednica 4.1: Stopnje poseda

Stopnja	Posed v (mm)
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥220

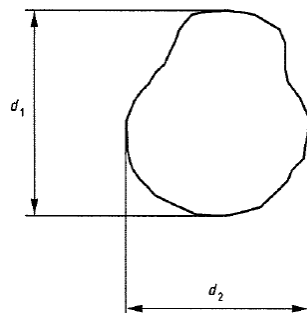
4.2.2 Preizkus z razlezom



Slika 4.5: Oprema za preizkus z razlezom

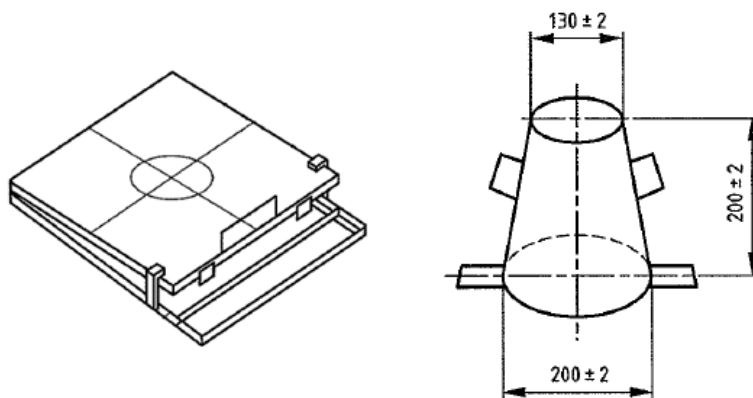
Metoda z razlezom je bila razvita v tridesetih letih dvajsetega stoletja in je namenjena ugotavljanju lastnosti tečenja svežega betona. Preizkus ni primeren za samo-zgoščevalne (SCC) betone in za betone, katerih največje zrno je večje od 63 mm. Razlez se meri v skladu z določili slovenskega standarda SIST EN 12350-5. Ta nam določa naslednje:

V kalup v obliki votlega prisekanega stožca predpisanih dimenzij vgradimo beton. Beton vgradimo v dveh slojih in vsak sloj v stožcu zgostimo z udarjanjem z nabijalom 10 krat. Vrh stožca zgladimo z zidarsko žlico. Stožec vertikalno vzdignemo, pri tem pa se vzorec posede pod lastno težo. Ko polnimo stožec, mora ta stati na sredini predpisane ravne plošče (slika 4.7). Poseden beton se nato z dviganjem plošče strese 15 krat, s čimer se doseže končni razlez. Vrednost se izračuna na podlagi povprečja dveh meritev vzorca, kot to kaže slika 4.6.



Slika 4.6: Primer razleza - meritev razleza $d = (d_1 + d_2) / 2$

Preizkus z razlezom omogoča določitev konsistence svežih betonov od srednje-plastične do tekoče konsistence, kar pomeni, da je metoda primerna za razleze med 340 mm in 620 mm.



Slika 4.7: Miza za razlez in kalup

Za potrebe preizkusa potrebujemo:

- miza za razlez,
- kalup,
- nabijalo,
- ravnilo,
- posoda za mešanje,
- zidarska žlica,
- lopatica,
- ura,
- vodna tehnica.

Konsistenco preizkušanca torej ocenimo z meritvijo razleza in ji pripišemo eno izmed šestih stopenj, določenih po standardu SIST EN 206-1 (Preglednica 4.2).

Preglednica 4.2: Stopnje razleza

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

4.2.3 Reometer



Slika 4.8: ConTec Viscometer 5

Z uporabo številnih dodatkov postane beton kompleksna emulzija, zaradi česar je njihov vpliv na reološke lastnosti betona težko določljiv. Ker so zahteve po vizualnem izgledu betona in njegovi kakovosti vedno višje, se na trgu pojavljajo številni novi proizvodi kot dodatki za beton, katerih vpliv nam ni dobro poznan. Zato vse bolj narašča potreba po bolj zmogljivih preizkusnih metodah za sveže betonske mešanice kamor prav gotovo sodijo meritve reoloških lastnosti betona. Z reometri ali viskometri merimo strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala. Ker proizvajalci opreme izhajajo iz različnih modelov strižnega deformiranja tekočine, rezultati meritev, opravljenih z različno opremo, niso primerljivi. Poleg tega ne obstaja standard za tovrstne preiskave. Zato se za ugotavljanje

lastnosti sveže cementne mešanice še vedno največ uporablja preizkušene standardne metode preiskav, kot sta prej opisani metodi poseda in razleza.

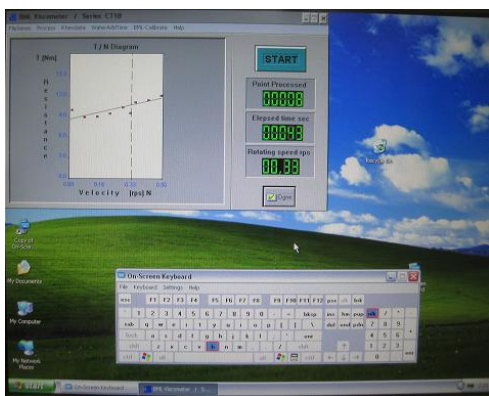
Reometre delimo na tri osnovne tipe (Banfill, 2001, Hočevar, 2011):

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

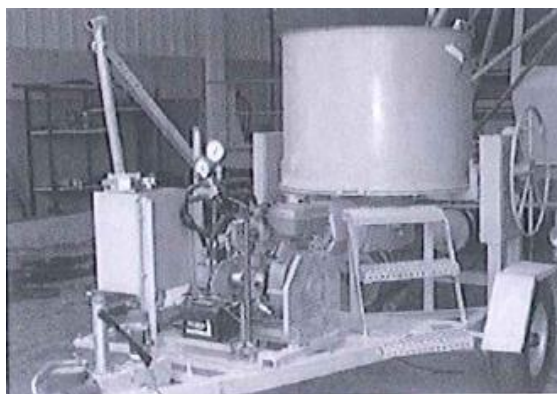
4.2.3.1 Koaksialni valjasti reometri

Koaksialni valjasti reometri delujejo na principu vrtenja zunanega ali notranjega valja, medtem ko drugi valj miruje. Površini obeh valjev sta narebreni, da preprečujeta zdrs. Primera takšnih reometrov sta: ConTec Viscometer 5 (slika 4.8) in CEMAGREF – IMG (slika 4.10).

V diplomski nalogi sem uporabil ConTec Viscometer 5, ki ga sestavljajo notranji in zunanji cilinder, električni motor ter računalnik, ki upravlja z motorjem. Viscometer 5 deluje tako, da motor vrti posodo (zunanji valj), medtem pa tipala v zgornjem delu notranjega cilindra merijo upor, ki ga povzroča merjena tekočina. Tipala sproti posredujejo podatke računalniku, kjer jih nato preko programa FRESHwin lahko shranimo, oblikujemo in analiziramo. Rezultat meritev je momentno-hitrostni diagram, iz katerega program po linearni regresiji izračuna faktorja G in H. Shranjene podatke je moč izvoziti v program Microsoft Excel, kar nam zelo olajša analizo.



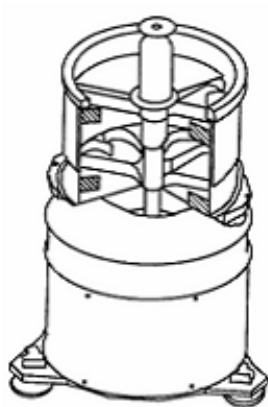
Slika 4.9 levo: Program FRESHwin



Slika 4.10 desno: Cemagref IMG (Hočevar, 2011)

4.2.3.2 Reometri z vzporednimi ploščami

Reometri z vzporednimi ploščami delujejo na principu vrtenja dveh horizontalnih plošč, ki strižeta beton. Predstavnik takšnih reometrov je BTRHEOM reometer (slika 4.11).

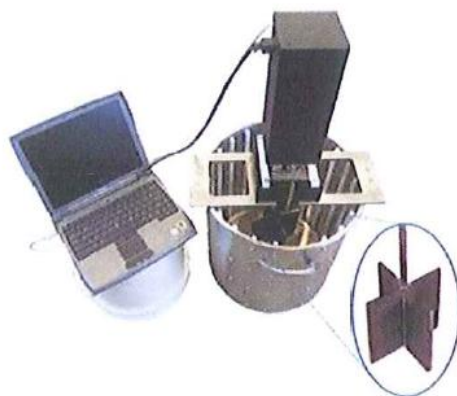


Slika 4.11: BTRHEOM (Hočevar, 2011)

4.2.3.3 Mešalni reometer z rotorjem

ešalni reometer z rotorjem ima na rotorju v navpični osi nameščene lopatice. Ko se lopatice v betonu vrtijo, se ustvarja upor, ki ga merimo. Obstaja več različnih vrst lopatic, od pravokotnih do takšnih v obliki kril. Takšni tipi reometrov so primerni tudi za delo na terenu, saj omogočajo izvedbo naprav manjših dimenzij. Primeri mešalnih reometrov z rotorjem so:

- ICAR Rheometer,
- IBB rheometer,
- Two-point rheometer,
- ConTec Rheometer -4SCC,
- Fresh concrete Rheometer BT2.



Slika 4.12: ICAR Rheometer (Hočevar, 2011)



Slika 4.13: Rheometer BT2 (Hočevar, 2011)

4.3 Opis materialov uporabljenih v eksperimentu in njihov vpliv

4.3.1 Cement in voda

V raziskavah smo uporabili čisti portlandski cement CEM I 42,5 R, ki ga sestavlja najmanj 95 % klinkerja ter sadra, ki deluje kot regulator vezanja. Prostorninska masa cementa brez por in votlin je $3,01 \text{ g/cm}^3$. Cement je primeren za vse vrste betonov in malt, kjer niso zahtevane določene posebne lastnosti, kot npr.: odpornost na sulfatno reakcijo, odpornost na zmrzal, manjše sproščanje toplote ob hidrataciji. Uporablja se za gradnjo armirano betonskih zgradb, mostov, tlakov, rezervoarjev za tekočine, zidanih objektov in različnih prefabriciranih betonskih elementov.

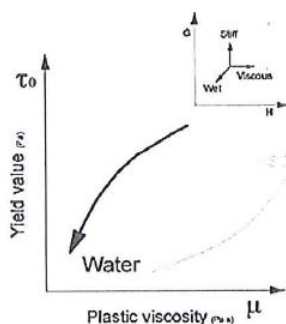
Mehanske lastnosti (vrednosti so povprečne in so povzete po navedbah proizvajalca):

- zgodnja trdnost, 2 dneva: 28,0 MPa,
- standardna trdnost, 28 dni: 54,0 MPa,
- čas začetka vezanja 100 min,
- prostorninska obstojnost ≤ 1 mm.

Uporabljena voda je bila odvzeta iz lokalnega vodovodnega omrežja in je po standardu SIST EN 1008 ni bilo potrebno predhodno preizkusiti.

4.3.1.1 Vpliv vodo-cementnega razmerja na lastnosti sveže betonske mešanice

Vodo-cementno razmerje je eno ključnih elementov, ki vplivajo na lastnosti sveže betonske mešanice. Da je dosežena popolna hidratacija zadostuje praviloma že razmerje $V/C = 0,4$. Vendar je takšna mešanica, če ne vsebuje dodatka tipa plastifikator ali superplastifikator, praviloma težko obdelavna. Zato običajno uporabljamo višja V/C razmerja. Spremembo V/C razmerja lahko dosežemo na dva načina, z zmanjšanjem/dodajanjem vode ali z dodajanjem/zmanjšanjem cementa. To privede praviloma do enake trdnosti strjenega betona (trdnost je odvisna od V/C razmerja), vpliv na lastnosti sveže mešanice pa je različen. Oba načina povečata plastično viskoznost (μ), vendar z različno intenziteto. Sprememba mase vode pa na plastično viskoznost vpliva precej bolj, kot sprememba mase cementa.



Slika 4.13: Vpliv vode na vrednosti τ_0/μ

V splošnem velja, da dodajanje vode vedno vodi proti izhodišču diagram $\tau_0 - \mu$, kot to prikazuje slika 4.13 in se je potrdilo tudi v mojem primeru.

4.3.2 Agregat

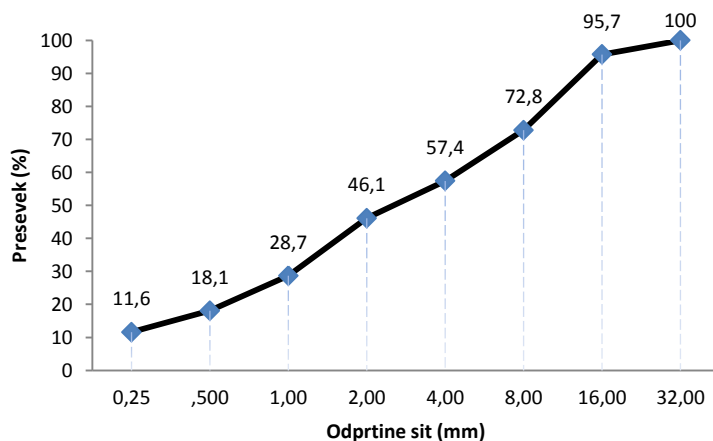
Krivuljo zrnovostne sestave smo sestavili iz štirih frakcij, kot je to prikazano na grafikonu 4.1. Delež posamezne frakcije je znašal 22 % mase za frakcijo 0/2 mm, 33 % mase za frakcijo 0/4 mm, 18 % mase 4/8 mm in 27 % mase 8/16 mm. Uporabili smo prostorninsko suh drobljen apnenčev agregat, ki smo ga označili AL.

Preglednica 4.3: Zrnovost posameznih frakcij

Vrsta agregata	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0
0/2 Laže	10,6	11,0	14,0	22,0	35,0	57,0	91,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0/4 Laže	9,4	10,0	13,0	20,0	31,0	49,0	78,0	98,0	100,0	100,0	100,0
4/8 Laže	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	17,0	97,0	100,0	100,0
8/16 Laže	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	84,0	100,0

Preglednica 4.4: Zrnovost mešanice agregata za beton

Vrsta agregata	Proc	Odprtina v sitih										
		0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0
0/2 Laže	22	2,3	2,4	3,1	4,8	7,7	12,5	20	22	22	22	22
0/4 Laže	33	3,1	3,3	4,3	6,6	10,2	16,2	25,7	32,3	33	33	33
4/8 Laže	18	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0,4	3,1	17,5	18	18
8/16 Laže	27	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0,3	22,7	27
Seštevek	100	5,6	5,9	7,6	11,6	18,1	28,7	46,1	57,4	72,8	95,7	100



Grafikon 4.1 :Sejalna krivulja agregata

4.3.2.1 Vpliv agregata na lastnosti sveže betonske mešanice

Agregat običajno zavzema med 60 in 75 % volumna betona, s čimer pomembno vpliva na lastnosti svežega in strjenega betona. Na svež beton vpliva predvsem vrsta agregata, ki je lahko gramoz ali drobljenec. V primeru gramozja so zrna zaobljena in imajo gladko površino, s čimer se med delci ustvarja manj trenja kot pri drobljencu. Zaradi tega je obdelavnost svežih betonov z gramozom večja, kot betona z drobljencem.

4.3.3 Mikrosilika

Uporabljena mikrosilika se proizvaja v Franciji. Njena prostorninska masa brez por in votlin je 2200 kg/m³, njena razvita površina pa 200'000 cm²/g.

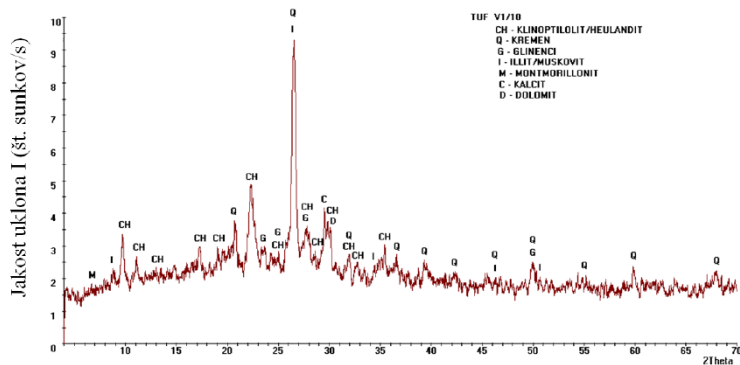
4.3.3.1 Vpliv mikrosilike na lastnosti svežega betona

Mikrosilika je znana po tem, da občutno zmanjša plastično viskoznost (μ), tudi do 50 %, vendar se ta pojav z večanjem količine mikrosilike ustavi. Vrednost, ko se manjšanje plastične viskoznosti ustavi, imenujemo vmesna meja. Ta je odvisna predvsem od količine cementa in vode v betonu. Pojav si lahko razložimo kot posledico efekta kroglic mikrosilike, ki zmanjšajo medsebojno trenje delcev cementa. Za razliko od plastične viskoznosti, pa se strižna napetost na meji tečenja (τ_0) do vmesne meje, skoraj ne spremeni, se pa poveča po njeni prekoračitvi, kar gre na račun večje količine adsorbirane vode in večje homogenosti, s čimer kroglice izgubijo svoj mazivni efekt. Plastična viskoznost se po prekoračitvi te meje v začetku sicer še nekoliko zmanjša (za okoli 5 %), vendar kasneje rahlo naraste.

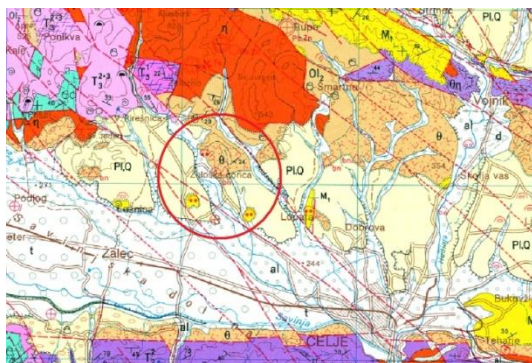
4.3.4 Tuf

Pri raziskavah smo uporabili slovenski andezitni tuf iz kamnoloma pri Zaloški gorici (slika 4.15). Na njem je bila predhodno narejena mineraloška analiza z rentgensko difrakcijsko analizo ter vrstična elektronska mikroskopija (SEM). Mineralna analiza je pokazala, da je mineralna sestava tufa polimineralna s 45 mas. % klinoptilotita/heulandita, 35 mas. % kremena, 11 mas. % glinencev, 7 mas. % ilita/muskovita ter 2 mas. % montmotilonita (slika 4.14). Zrna vzorca so bila zaobljena in ostroroba, velikosti do 200 μ m (Uranjek, M., 2011).

Predhodno sta bili za tuf po standardu SIST EN 196-6:1995 določeni tudi prostorninska masa brez por in votlin in specifična površina tufa. Prostorninska masa je bila 2410 kg/m^3 , specifična površina pa $2910 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Uranjek, M., 2011).



Slika 4.14: Difraktogram vzorca tufa (Uranjek, 2011)



Slika 4.15: Karta geološke sestave tal v okolici Zaloške gorice (Geološki zavod, 1977)

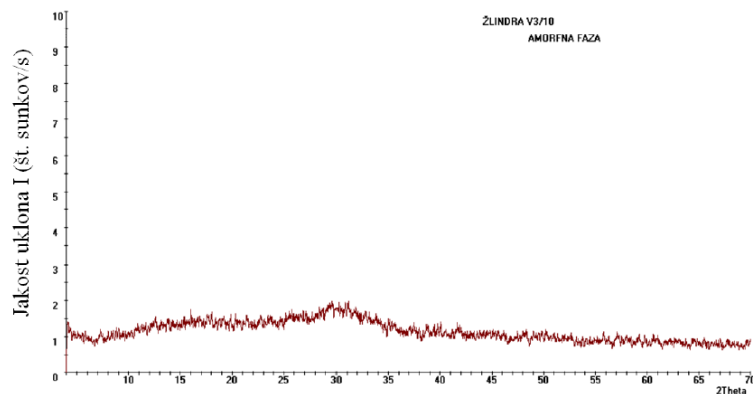
4.3.4.1 Vpliv tufa na lastnosti svežega betona

Tuf zgosti betonsko mešanico, s čimer se povečata tako plastična viskoznost kot tudi strižna napetost na meji tečenja.

4.3.5 Mleta granulirana plavžna žindra

Tudi na žindri sta bili predhodno narejeni mineraloška analiza z rentgensko difrakcijsko analizo ter vrstična elektronska mikroskopija (SEM). Analiza je pokazala, da gre za steklasto žindro s 100% amorfnno fazo homogene sestave (slika 4.16) s pretežno oglatimi zrnji različne velikosti (Uranjek, M., 2011).

Prav tako je bila na žlindri izvedena tudi analiza fizikalnih lastnosti, kjer je doktorand po standardu SIST EN 196-6:1995 določil prostorninsko maso (2850 kg/m^3) in specifično površino ($2930 \text{ cm}^2/\text{g}$) (Uranjek, M., 2011).



Slika 4.16: Difraktogram vzorca žindre (Uranjek, M., 2011)

4.3.5.1 Vpliv žindre na lastnosti svežega betona

Obdelavnost

Po zapisu raziskovalcev (Wood 1981, Fulton 1974, Wu in Roy 1982) uporaba GGBS v betonu ugodno vpliva na njegovo obdelavnost in kohezivnost. Po njihovih poročilih GGBS v betonu vpije manj vode kot cement, kar pomeni, da je za ohranitev konsistence pri večanju deleža GGBS potrebno zmanjšati količino vode. Znano je tudi, da se betoni, ki vsebujejo GGBS z uporabo zgoščevalnih naprav, lažje konsolidirajo, kot tisti ki vsebujejo samo pucolanski mineralni dodatek.

Čas zakasnitve vezanja

V splošnem velja, da GGBS nekoliko podaljša čas vezanja, vendar ga ob posebnih pogojih lahko tudi skrajša. To je odvisno predvsem od temperature betona, deleža žindre, vodo-cementnega razmerja in karakteristik portland cementa.

Izcejanje vode

Vpliv žindre na izcejanje vode je odvisen od njene finosti v primerjavi s portland cementom. Če je finejša od portland cementa, se praviloma izcejanje vode iz betona zmanjša, če pa je zrnavost GGBS večja kot pri portland cementu, se izcejanje vode poveča.

4.3.6 Plastifikator

V raziskavah smo uporabili superplastifikator nove generacije ki je po navedbah proizvajalca primeren za izdelavo vseh vrst gradbiščnih in transportnih betonov, tudi za izdelavo SCC betonov.

Povečevanje količine superplastifikatorja primarno poveča posed ter zmanjša strižno napetost na meji tečenja, nima pa bistvenega vpliva na viskoznost betona.

4.4 Sestava betonskih mešanic

4.4.1 Receptura betona

Receptura je opisana za najbolj osnoven primer betona brez dodatkov. Za izvedbo preizkusov s posedom in razlezom, ter meritve reoloških lastnosti v štirih različnih časih je bilo potrebnih približno 40 litrov betona. Recepturo za 40 litrov betona se dobi tako, da izračunamo mase komponent za 1 m³ betona. Pri tem predpostavimo maso cementa, vodo-cementno razmerje ter volumen zraka, od koder lahko izračunamo maso površinsko suhega agregata.

Predpostavke:

$$V/C = 0,5$$

$$m_{\text{cem}} = 400 \text{ kg}$$

$$m_{\text{vode}} = 0,5 * m_{\text{cem}} = 200 \text{ kg}$$

$$V_{\text{zrak}} = 2 \%$$

Prostorninske mase ali gostote sestavin:

$$\rho_{\text{cem}} = 3010 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{p.suh.agr}} = 2700 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{vode}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{cem}} = \frac{m_{\text{cem}}}{\rho_{\text{cem}}} = 0,133 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{vode}'} = \frac{m_{\text{vode}'}}{\rho_{\text{vode}}} = 0,2 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{zrak}} = 1\text{m}^3 * 0,02 = 0,02 \text{ m}^3$$

$$V_{p.suh.agr} = 1m^3 - V_{cem} - V_{vode} - V_{zrak} = 0,647m^3$$

$$m_{p.suh.agr} = V_{p.suh.agr} * \rho_{agr} = 0,647m^3 * 2700 \frac{kg}{m^3} = 1747 kg$$

Ko imamo maso površinsko suhega agregata, je to potrebno porazdeliti na posamezne frakcije po sejalni krivulji, ki je prikazana na grafikonu 4.1. Površinsko suh agregat je agregat, ki je zasičen z vodo:

$$m_{p.suh.agr\frac{0}{2}} = 22 \% (m_{p.suh.agr}) \rightarrow = 384,34 kg$$

$$m_{p.suh.agr\frac{2}{4}} = 33 \% (m_{p.suh.agr}) \rightarrow = 576,51 kg$$

$$m_{p.suh.agr\frac{4}{8}} = 18 \% (m_{p.suh.agr}) \rightarrow = 314,46 kg$$

$$m_{p.suh.agr\frac{8}{16}} = 27 \% (m_{p.suh.agr}) \rightarrow = 471,69 kg$$

Ker smo v eksperimentalnem delu uporabili suh agregat, je potrebno mase površinsko suhega agregata priversti na mase suhega agregata, kar storimo z upoštevanjem vodovpojnosti. Z odebeljeno pisavo je prikazan njen delež pri posamezni frakciji agregata.

$$m_{suh.agr\frac{0}{2}} = (100 - \mathbf{0,99}) \% (m_{p.suh.agr\frac{0}{2}}) \rightarrow = 380,54 kg$$

$$m_{suh.agr\frac{2}{4}} = (100 - \mathbf{0,72}) \% (m_{p.suh.agr\frac{2}{4}}) \rightarrow = 572,42 kg$$

$$m_{suh.agr\frac{4}{8}} = (100 - \mathbf{0,75}) \% (m_{p.suh.agr\frac{4}{8}}) \rightarrow = 312,14 kg$$

$$m_{suh.agr\frac{8}{16}} = (100 - \mathbf{0,35}) \% (m_{p.suh.agr\frac{4}{8}}) \rightarrow = 470,09 kg$$

Ker bo suh agregat ob zamešanju betona nekaj vode vpil, je potrebno to vodo nadomestiti. Njeno količino izračunamo tako, da masi vsake frakcije površinsko suhega agregata odštejemo maso frakcije suhega agregata.

$$m_{vode\frac{0}{2}} = 384,38 kg - 380,54 kg = 3,84 kg$$

$$m_{vode\frac{2}{4}} = 576,57 kg - 572,42 kg = 4,15 kg$$

$$m_{vode\frac{4}{8}} = 314,5 kg - 312,14 kg = 2,36 kg$$

$$m_{vode\frac{8}{16}} = 471,74 kg - 470,09 kg = 1,65 kg$$

Seštejemo maso vode, ki jo vpije agregat in prištejemo vrednost mase vode.

$$m_{\text{dod.vode}} = \sum m_{\text{vode} \frac{0}{16}} = 12 \text{ kg}$$

$$m_{\text{vode}} = m_{\text{dod.vode}} + m_{\text{vode}'} = 12 \text{ kg} + 200 \text{ kg} = 212 \text{ kg}$$

Da dobimo končne vrednosti za željen volumen 40 litrov, je potrebno mase vseh komponent zmanjšati za 25 krat.

$$m_{\text{cem}} = 16 \text{ kg} \quad m_{0/2} = 15,22 \text{ kg}$$

$$m_{\text{vode}} = 8,48 \text{ kg} \quad m_{2/4} = 22,98 \text{ kg}$$

$$m_{4/8} = 12,49 \text{ kg}$$

$$m_{8/16} = 18,8 \text{ kg}$$

4.4.1.1 Deleži in količine mineralnih dodatkov pri posameznih mešanicah za 1 m³ betona

Prostorninska masa mikrosilike je 2200 kg/m³.

Ime mešanice	Delež mikrosilike	m _{cem}	m _{silike}
CM1a	2,5 %	390,0 kg	7,25 kg
CM1b	5 %	380 kg	14,5 kg
CM1c	10 %	360 kg	29,0 kg

Prostorninska masa tufa je 2410 kg/m³.

Ime mešanice	Delež tufa	m _{cem}	m _{tufa}
CT1a	5 %	380,0 kg	16,0 kg
CT1b	10 %	360,0 kg	32,0 kg
CT1c	20 %	320,0 kg	64,0 kg

Prostorninska masa žlindre je 2850 kg/m³.

Ime mešanice	Delež žlindre	m _{cem}	M _{žindre}
CZ1a	20 %	320,0 kg	76,0 kg
CZ1b	40 %	240,0 kg	152,5 kg
CZ1c	60 %	160,0 kg	228 kg

4.4.1.2 Deleži in količine vode pri mešanicah CL1 in CV1.

Ime mešanice	V/C	m_{cem}	m_{vode}
CL1	0,5	400 kg	200 kg
CV1a	0,53	400 kg	212 kg
CV1b	0,56	400 kg	224 kg
CV1c	0,59	400 kg	236 kg

4.4.2 Mešanice s spreminjanjem V/C razmerja

Ime mešanice	V/C	SP	Čas poteka preiskave	Čas od prvega stika vode s cementom do prvega preizkusa
CL1	0,50	/	1:09:40	0:04:33
CV1a	0,53	/	1:10:06	0:04:22
CV1b	0,56	/	1:09:50	0:04:26
CV1c	0,59	/	1:06:53	0:04:16

Pri tej skupini preizkusov je bil naš namen ugotoviti, kakšen vpliv ima povečanje vodo-cementnega razmerja na lastnosti svežega betona. Za povečanje V/C razmerja smo povečali količino vode v betonu. Preiskave smo opravili v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju (KPL) Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Kot prvo je bilo potrebno stehtati in pripraviti vse potrebne sestavine za mešanje. Za tem je sledilo suho mešanje 30 s v mešalcu na sliki 4.17. Sestavine za suho mešanje se strese v mešalec v določenem zaporedju, da dosežemo kar se da kvalitetno zmes velikih in malih delcev. Kot prvo dodamo v boben agregata frakciji 4/8 mm in 8/16 mm, nato cement, za tem pa še agregat preostalih dveh frakcij. Po 30 sekundah mešanja smo dodali v mešalec vodo. Če je mešanica vsebovala superplastifikator, je bil le-ta dodan skupaj z vodo. Ob tem smo začeli z merjenjem časa poteka preiskave. Mokro mešanje je potekalo 3 minute, dokler ni bilo več nikakršnega sledu o suhih delcih in je bila mešanica homogeno premešana.

Da bi ugotovili tudi, kako se lastnosti svežega betona spreminjajo s časom, smo na vsakem betonu opravili preizkuse v štirih različnih časovnih intervalih ($t=0, 20, 40, 60$ min). V vsakem času smo najprej opravili meritve z reometrom, za tem pa še meritvi poseda in razleza. Da je bila kvaliteta meritev z reometrom boljša, smo za vsak dvajset minutni interval opravili tri meritve in njihove vrednosti povprečili. Meritvi poseda in razleza smo opravili v skladu s standardoma SIST EN 12350-5:2009 (razlez) in SIST EN 12350-2:2009 (posed), kar pomeni tudi, da smo ob vsakem neprimernem posedu ali razlezu meritve ponovili.

4.4.3 Mešanice s spreminjanjem SP

Ime mešanice	V/C	SP	Čas poteka preiskave	Čas od prvega stika vode s cementom do prvega preizkusa
CL1	0,50	/	1:09:40	0:04:33
CL1a	0,50	0,1 %	1:10:06	0:04:22
CL1b	0,50	0,2 %	1:08:15	0:04:24
CL1c	0,50	0,3 %	1:09:15	0:04:43

Pri dodajanju superplastifikatorja se postopek mešanja, od prejšnjega s spreminjanjem V/C razlikuje le po dodanem superplastifikatorju, ki se ga doda med mešanjem sočasno z vodo. Vpliv superplastifikatorja je viden takoj že s prostim očesom, ko pa z njim operiraš z zidarsko žlico, je njegov vpliv še bolj očiten. Delež SP se doda na maso cementa, je pa njegov vpliv zelo odvisen od vrste cementa.



Slika 4.17: Laboratorijski mešalec za beton



Slika 4.18: Tehtnica z natančnostjo 20g

4.4.4 Mešanice z dodajanjem tufa

Ime mešanice	Delež tufa	SP	Čas poteka preiskave	Čas od prvega stika vode s cementom do prvega preizkusa
CT1a	5 %	0,5 %	1:07:55	0:04:32
CT1b	10 %	0,5 %	1:14:21	0:10:41
CL1c	20 %	0,5 %	0:30:36	0:04:59

Mineralni dodatki se dodajajo cementu (povečanje količine veziva) ali zamenjajo del cementa (konstantna prostornina veziva). Dodatek ali zamenjavo izrazimo kot delež na maso cementa. Ker je prostorninska masa zrn dodatka praviloma različna od prostorninske mase zrn cementa, je zato masa dodatka v enoti prostornine drugačna od mase cementa v enoti prostornine. Račun je prikazan v prejšnjem poglavju o recepturi betona. V mešalec se jih doda sočasno s cementom. Sledi suho mešanje ter mokro z dodajanjem vode ter SP. Kot prvo smo opravili meritev na mešanici z 10 % tufa z 0,3 % SP. V hipu je bilo razvidno, da je tuf močno vplival na obdelavnost, saj je imela mešanica zelo nizko obdelavnost. Ker so vse tri metode preiskav namenjene obdelavnejšim mešanicam, smo se odločili da povečamo količino SP na 0,5 %. Dodatno mešanje je tokratni preizkus podaljšalo za dodatne 3-4 minute, kot je to razvidno v zgornji preglednici, kar smo v nadaljevanju zanemarili. Mešanica, ki je sledila, je vsebovala 20 % tufa. Kot se je izkazalo, je kljub relativno visokemu V/C razmerju in količini SP, bilo tufa preveč, saj smo morali preiskavo zaradi neustreznih meritev po 30 min ustaviti. Tuf je tako močno zgostil zmes, da je ta postala zelo slabo obdelavna. V tem primeru je bilo jasno razvidno, kako tuf kot naravni pucolan deluje na svež beton in kako se z dodajanjem SP v zadostni količini negativne učinke tufa lahko enostavno popravi. Mešanica je bila nekoliko temnejšega videza kot običajno.

4.4.5 Mešanice z dodano mikrosiliko

Ime mešanice	Delež mikrosilike	SP	Čas poteka preiskave	Čas od prvega stika vode s cementom do prvega preizkusa
CL1c	0	0,3 %	1:09:15	0:04:43
CM1a	2,5 %	0,3 %	1:12:30	0:11:05
CM1b	5 %	0,3 %	1:14:17	0:04:28
CM1c	10 %	0,3 %	1:10:02	0:05:03

Mešanje sestavin je potekalo po enakem vrstnem redu kot pri tufu. Mešanica je delovala zelo homogeno in kompaktno. Opaziti je bilo povečanje prostorninske mase v primerjavi s skupino primerov CL1. Mikrosilika namreč zgosti strukturo betona, zaradi česar je posledično količina zračnih por v betonu manjša. Večjih nepravilnosti pri meritvah ni bilo zaznati.

4.4.5 Mešanice z dodano žlindro

Ime mešanice	Delež žindre	SP	Čas poteka preiskave	Čas od prvega stika vode s cementom do prvega preizkusa
CL1b	0	0,2 %	1:09:15	0:04:43
CZ1a	20 %	0,2 %	1:08:15	0:04:24
CZ1b	40 %	0,2 %	1:08:16	0:08:29
CZ1c	60 %	0,2 %	1:08:23	0:07:05

Mešanje je potekalo po enakem zaporedju, kot je opisan pri tufu. V prvi meritvi z 20 % žindre smo preizkusili obnašanje svežega betona brez dodanega SP in izvedli preizkus s posedom. Ker je bil posed premajhen (le 50 mm) in ker smo pričakovali, da bo kohezivnost z večanjem deleža žindre naraščala, smo dodali 0,2 % SP na maso veziva.

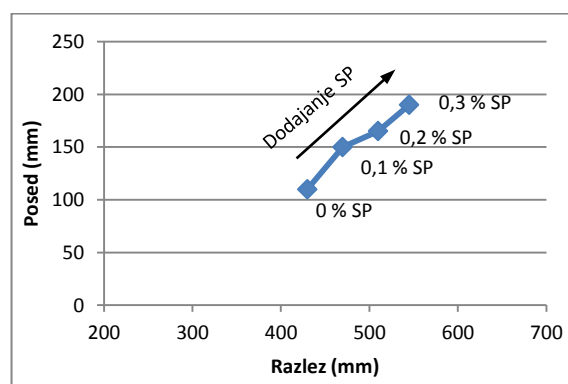
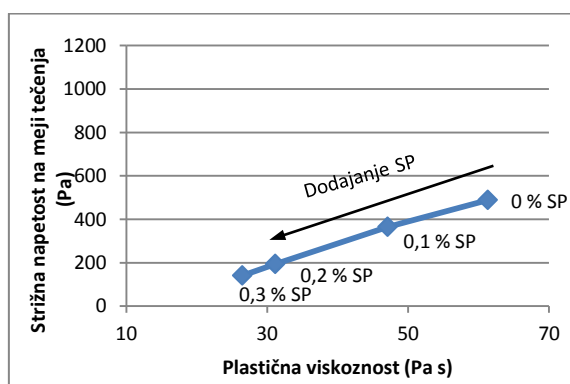
5 REZULTATI

Analizo rezultatov meritev sem razdelil v pet poglavij. V prvem sem opisal vpliv superplastifikatorja, saj je bil uporabljen v vseh betonih z vsebovanim mineralnim dodatkom in je pomembno vplival na njihove lastnosti. V drugem poglavju je predstavljen vpliv vodo-cementnega razmerja. V tretjem, četrtem in petem poglavju so predstavljeni vplivi mineralnih dodatkov mikrosilike, tufa in granulirane plavžne žlindre.

V vsakem izmed poglavij so rezultati predstavljeni v obliki grafikonov in preglednic. Prva dva grafikona v vsakem izmed poglavij opisujeta vpliv spremembe deleža izbranega materiala na reološke lastnosti (prvi grafikon) in obdelavnosti (drugi grafikon) betona v času $t = 0$, naslednji grafikoni pa prikazujejo vpliv izbranega materiala na iste lastnosti v odvisnosti od časa. Na koncu vsakega poglavja je prikazan primerjalni grafikon vseh vzorcev po času.

5.1 Mešanice z različnimi deleži SP

Grafikona 1 in 2 prikazujeta, kako se lastnosti svežega betona spreminjajo v odvisnosti od deleža superplastifikatorja. Iz obeh grafikonov se vidi, da ima SP precej velik vpliv na vse štiri karakteristike, ki so bile predmet preiskav. Še posebej dodajane SP veliko prispeva k plastični viskoznosti in razlezu, kar je precej nenavaden in presenetljiv vpliv SP. Pretekle raziskave o vplivu SP pravijo, da ta vpliva predvsem na zmanjšanje SNMT, medtem ko na plastično viskoznost nima večjega vpliva. Nenavadno je tudi to, da je v našem primeru vpliv spreminjanja doziranja SP zelo podoben vplivu spreminjanja doziranja vode, saj naj bi imela ta dva za posledico popolnoma drugačen vpliv.



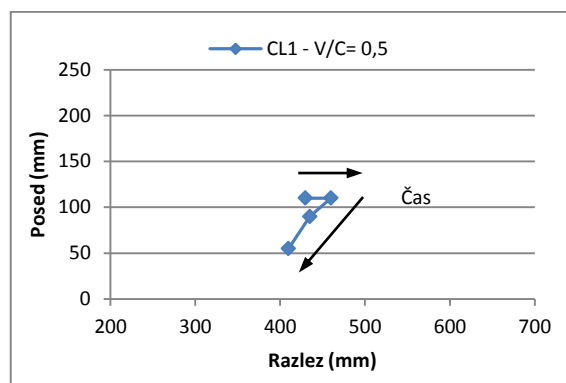
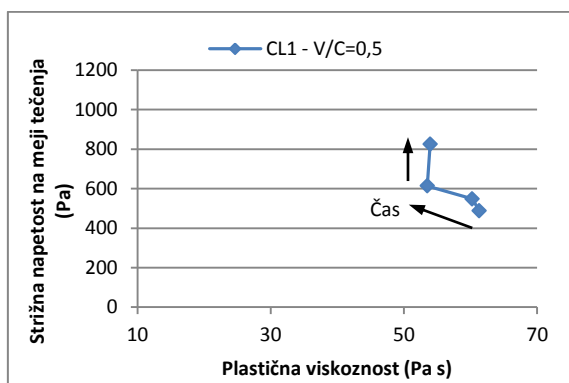
Grafikon 1 levo: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža superplastifikatorja

Grafikon 2 desno: Posed in razlez v odvisnosti od deleža superplastifikatorja

Preglednica 5.1: Rezultati meritev s SP pri času $t = 0$

Ime mešanice	Delež	μ	τ_0	Posed	Razlez
	%	Pa·s	Pa	mm	mm
CL1	0	61	489	110	430
CL1a	0,1	47	365	150	470
CL1b	0,2	31	194	165	510
CL1c	0,3	26	140	190	545

CL1 **V/C = 0,50** **SP = 0**



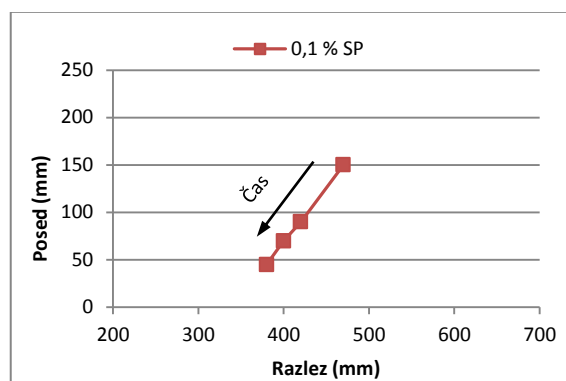
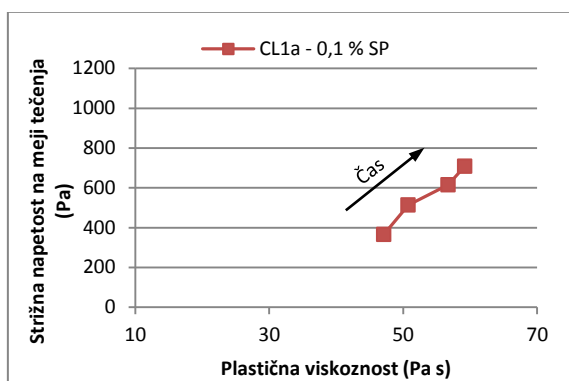
Grafikon 3 desno: Plastična viskoznost in SNMT v odvisnosti od časa za primer CL1

Grafikon 4 levo: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CL1

Pri najbolj osnovnem primeru brez mineralnih dodatkov in SP, se je strižna napetost na meji tečenja s časom povečevala, na plastično viskoznost pa čas skoraj ni imel vpliva. Le pri meritvi $t = 40$ min, se je pojavilo manjše zmanjšanje viskoznosti, kar je lahko posledica napake meritve.

Majhen posed in razlez pri času 0 min kažeta na to, da je bila mešanica brez uporabe superplastifikatorja zelo kohezivna in težko obdelavna. Po standardu SIST EN 12350-2 jih lahko uvrstimo v skupini S2 in F2.

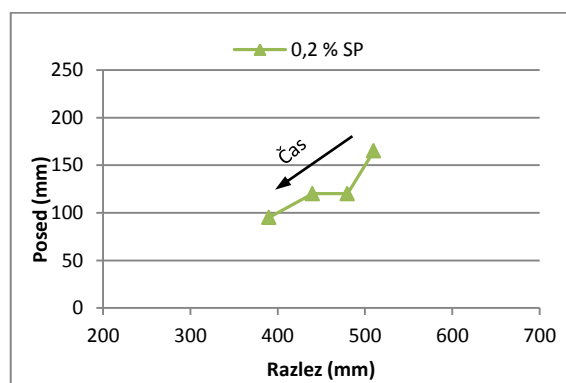
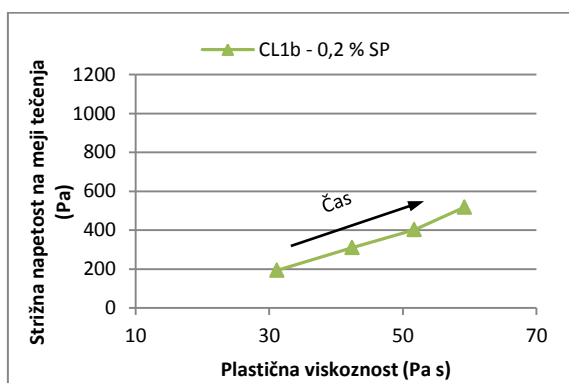
CL1a **V/C = 0,50** **SP = 0,1 %**



Grafikon 5 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CL1a

Grafikon 6 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CL1a

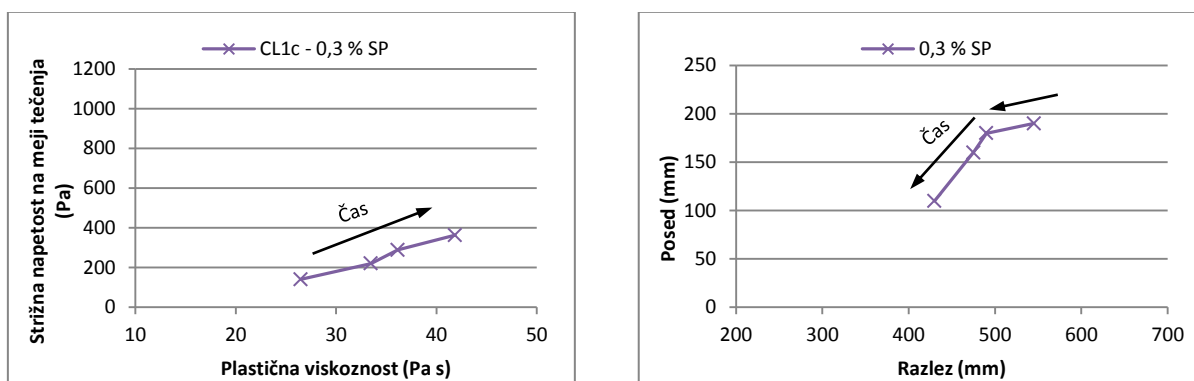
CL1b **V/C = 0,50** **SP = 0,2 %**



Grafikon 7 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CL1b

Grafikon 8 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CL1b

CL1c V/C = 0,50 SP = 0,3 %



Grafikon 9 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CL1c

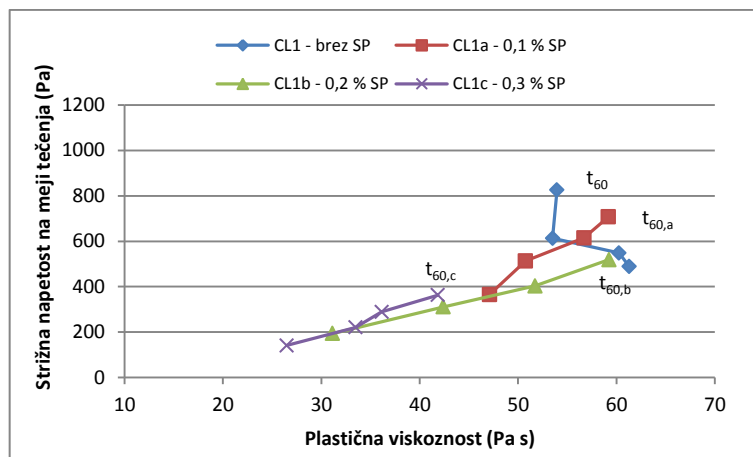
Grafikon 10 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CL1c

Meritve so pokazale, da ima superplastifikator precejšen vpliv na spremembo strižne napetosti na meji tečenja ter plastične viskoznosti s časom. Iz grafikona 11 se vidi, da se zadnje točke mešanic s SP ($t=60$ min) približujejo točki t_{60} za beton brez SP, kar pomeni, da s časom SP izgublja svojo sposobnost, vendar je razbrati, da se hitrost pešanja vpliva SP zmanjša s povečanjem njegovega deleža. Enostavno povedano, več kot je SP, dalj časa mešanica ostaja v območju obdelavnosti, ki ga želimo.

Preglednica 5.2 prikazuje, kako se vpliv SP odraža v naraščanju strižne napetosti na meji tečenja in pl. viskoznosti v določenem časovnem obdobju, v našem primeru v 60 minutah. Zakaj se pojavi zmanjšanje teh razlik pri mešanici CL1c nam ni znano.

Preglednica 5.2 : Vpliv SP na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času t . ($x(t_{60}) - x(t_0)$)

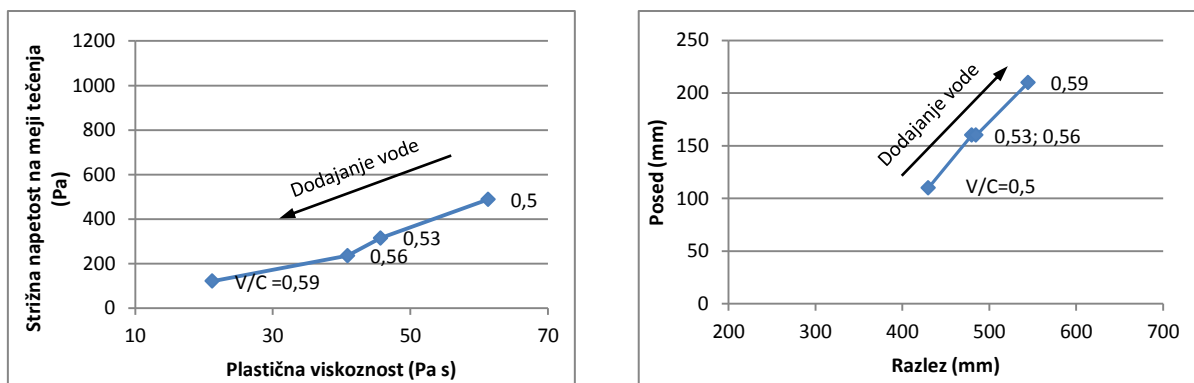
	CL1 0 SP	CL1a - 0,1 % SP	CL1b - 0,2 % SP	CL1c - 0,3 % SP
a) SNMT (Pa)	313	342	470	236
b) Pl. viskoznost (Pa s)	1	12	28	13



Grafikon 11: Plastične viskoznosti in strižne napetosti na meji tečenja v odvisnosti od časa za betone CL1

5.2 Mešanice s spreminjanjem V/C razmerja

Grafikon 12 prikazuje, kako se spreminjata strižna napetost na meji tečenja (τ_0) in plastična viskoznost (μ) z dodajanjem vode. Iz istega grafikona je razvidno, da dodajanje vode zmanjša obe količini, tako viskoznost kot tudi strižno napetost na meji tečenja, kar je potrdilo predhodne teoretične raziskave, da se obe količini ob dodajanju vode približujeta izhodišču. Razvidno je tudi, da je razlika vrednosti med drugo in tretjo meritvijo nesorazmerna ostalim, kljub istemu deležu dodane vode. Slednje se je potrdilo tudi pri meritvi poseda in razleza, ki ga prikazuje grafikon 13, kar pomeni, da meritev z reometrom ni napačna. Ena izmed razlag za nastanek takšne nesorazmernosti v meritvi je lahko nekoliko drugačen odzvem agregata kot sicer. Iz primerjave grafikona 12 in 13, je razvidno, da je tudi rezultat drugega grafikona smiseln, saj je znano, da obstaja povezava med posedom in strižno napetostjo na meji tečenja ter razlezom in plastično viskoznostjo.



Grafikon 12 levo: Odvisnost plastične viskoznosti in SNMT od dodajanje vode

Grafikon 13 desno: Odvisnost poseda in razleza od dodajanje vode

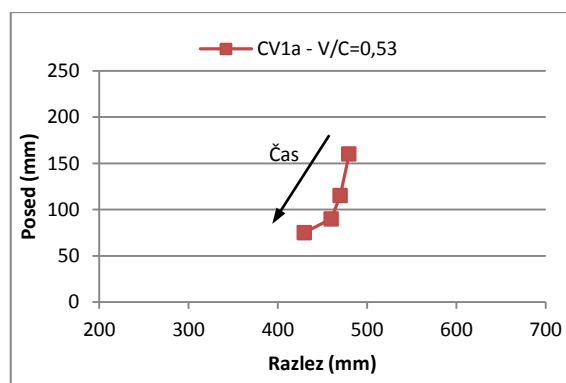
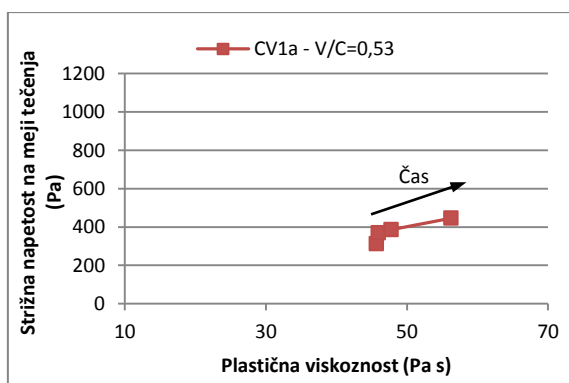
Preglednica 5.3: Rezultati meritev z dodajanjem vode pri času $t = 0$

Ime mešanice	Razmerje	μ	τ_0	Posed	Razlez
	V/C	Pa·s	Pa	mm	mm
CV1c	0	61	489	110	430
CV1a	0,53	46	314	160	480
CV1b	0,56	41	236	160	485
CV1c	0,59	21	121	210	545

CL1 **V/C = 0,5** **SP = 0**

Analiza meritve je opisana že v poglavju 5.1 Mešanice s različnimi deleži SP.

CV1a **V/C = 0,53** **SP = 0**

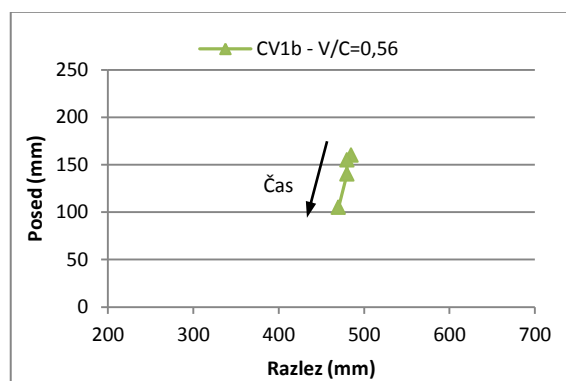
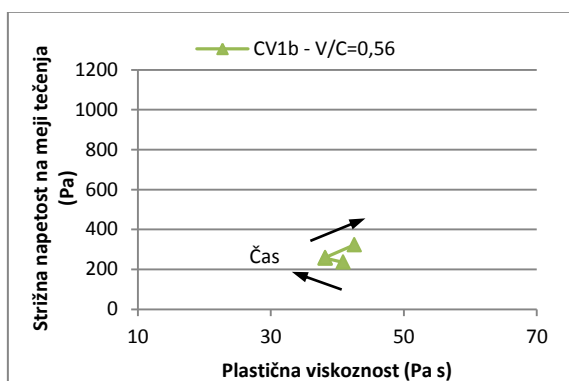


Grafikon 14 levo: Plastična viskoznost in SNMT v odvisnosti od časa za primer CV1a

Grafikon 15 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CV1a

Pri CV1a se v primerjavi s primerom CL1 odvisnost obeh parametrov, tako plastične viskoznosti kot strižne napetosti na meji tečenja s časom spremeni. Pri primeru CV1a se s časom bistveno poveča plastična viskoznost, strižna napetost na meji tečenja pa se poveča le malenkostno. SNMT se za primer CL1 med začetkom in koncem preiskave poveča za 333 Pa, SNMT za primer CV1a pa kar za 200 Pa manj. Iz primerjave grafikona 14 in grafikona 15 se zdi, da ni prave korelacije med rezultati z reometrom ter posedom in razlezom betona pri času $t = 60$ min. Razlika posedov med začetkom in koncem preiskave je 55 mm za CL1 in 85 mm za CV1a.

CV1b **V/C = 0,56** **SP = 0**



Grafikon 16 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CV1b

Grafikon 17 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CV1b

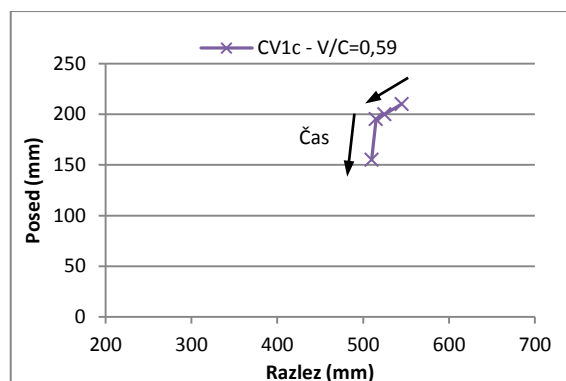
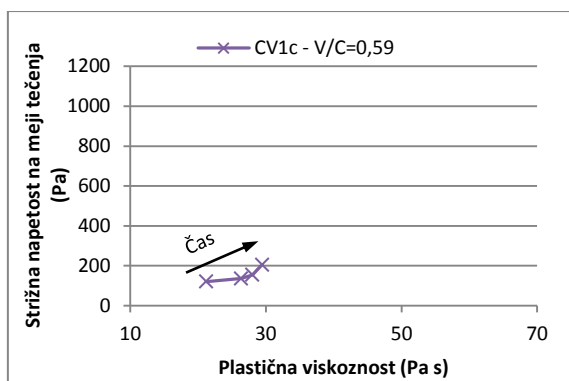
Meritev CV1b po času t je pokazala, da se tako plastična viskoznost, kot tudi SNMT s časom nista bistveno spremenila. Da ima voda velik vpliv na obe vrednosti merjeni z reometrom, je potrjeno tudi z naslednjo primerjavo:

$$\tau_{CL1} (t=60 \text{ min}) = 802 \text{ Pa} \quad \tau_{CV1b} (t=60 \text{ min}) = 323 \text{ Pa}$$

$$\mu_{CL1} (t=60 \text{ min}) = 62 \text{ Pa s} \quad \mu_{CV1b} (t=60 \text{ min}) = 43 \text{ Pa s}$$

Podoben trend zmanjševanja vrednosti končnih meritev prikazuje tudi grafikon 20.

CV1c **V/C = 0,59** **SP = 0**

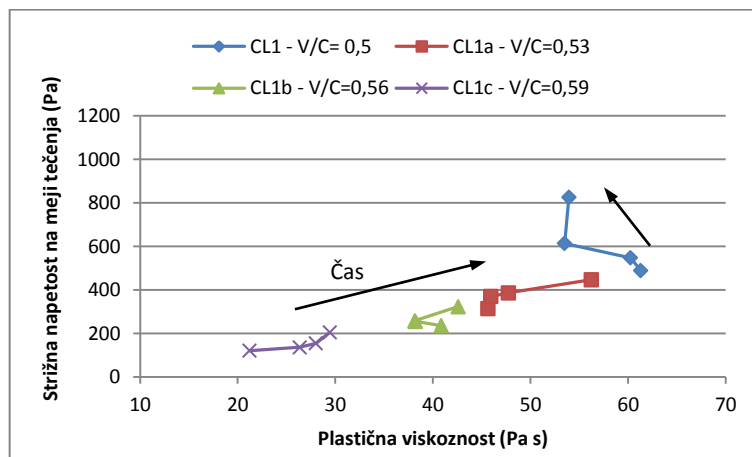


Grafikon 18 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CV1c

Grafikon 19 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CV1c

Meritev CV1c je bila opravljena pri vodo-cementnem razmerju 0,59, kar je razmeroma visoko razmerje in se v praksi redko uporablja. S časom se SNMT pri meritvi CV1c skoraj ni spremenila, se pa je za 8 Pa spremenila plastična viskoznost.

Pri meritvi poseda in razleza se je s časom spremenila predvsem vrednost poseda, kar je v nasprotju z ugotovitvami iz meritev reometra.



Grafikon 20: Primerjava plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za vse vzorce z različnim V/C razmerjem

Primerjava vseh meritev kaže na to, da povečevanje deleža vode v betonu zmanjšuje spreminjanje SNMT po času.

Preglednica 5.4: Vpliv vode na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času. ($x(t_{60}) - x(t_0)$)

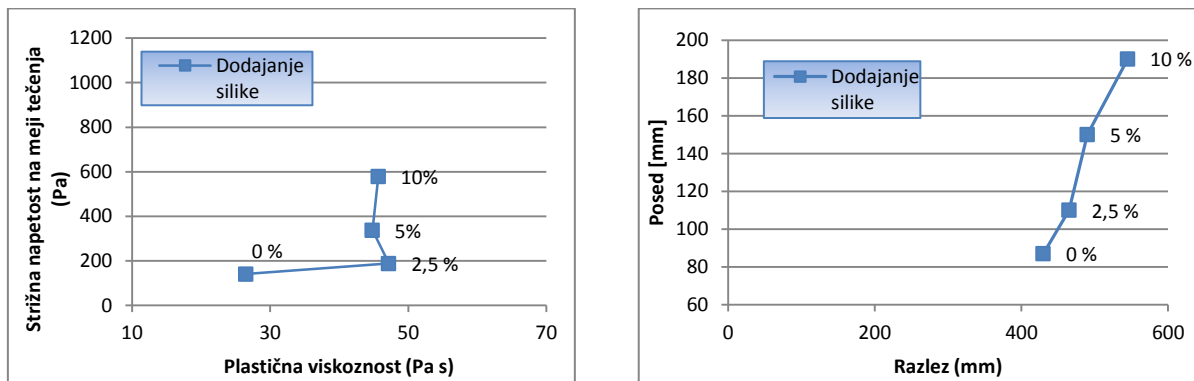
	CL1 – V/C=0,5	CV1a – V/C=0,53	CV1b – V/C=0,56	CV1c – V/C=0,59
a) SNMT (Pa)	313	131	87	34
b) Pl. viskoznost (Pa·s)	1	10	2	7

5.3 Mešanice v kombinaciji z mikrosiliko

Če primerjamo beton, ki vsebuje mikrosiliko in klasični beton, bo imel tisti z mikrosiliko precej nižjo plastično viskoznost, vendar zanimivo, le malenkost višjo strižno napetost na meji tečenja.

Raziskave smo opravili na treh mešanicah z različnimi deleži mikrosilike. Ker mikrosilika služi bolj kot dodatek k cementu in ne nadomestek, je njen maksimalni delež v betonu manjši od deleža tufa in

žlindre. Pri prvi mešanici smo nadomestili 2,5 %, pri drugi 5 % in pri tretji 10 % portlandskega cementa. Da so bile mešanice dovolj obdelavne, smo vsem dodali 0,3 % superplastifikatorja. Za primerjavo rezultatov sem izbral tudi opravljen preizkus brez mineralnih dodatkov CL1 z 0,3 % SP.



Grafikon 21 levo: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža mikrosilike

Grafikon 22 desno: Posed in razlez v odvisnosti od deleža mikrosilike

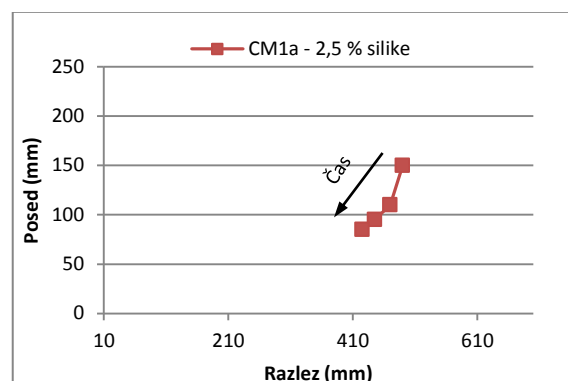
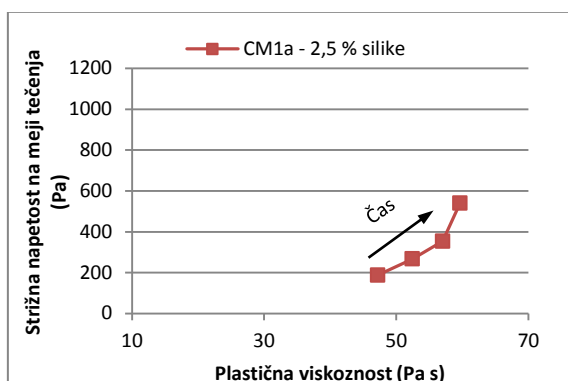
Preglednica 5.5: Rezultati meritev z mikrosilikom pri času $t = 0$

Ime mešanice	Delež	μ	τ_0	Posed	Razlez
	%	Pa·s	Pa	mm	mm
CL1c	0	26	140	190	545
CM1a	2,5	47	188	150	490
CM1b	5	45	338	110	465
CM1c	10	46	579	87	430

Iz grafikona 21 se vidi, kako mikrosilika v različnih deležih vpliva na reološke lastnosti betona. Vidi se, da ta občutno poveča plastično viskoznost ob najmanjši dozaciji mikrosilike, kar je v nasprotju s splošnim vedenjem, da je mikrosilika eden najprimernejših dodatkov za njeno zmanjšanje. Sicer pa se kasneje ob povečevanju mikrosilike, μ res zmanjša, vendar ne občutno. Velja namreč, da mikrosilika občutno vpliva na zmanjšanje plastične viskoznosti pri manjših dozacijah ($< 5\%$), pri večjih pa se vpliv zmanjša. Rezultat plastične viskoznosti se predvsem v delu med 0 in 2,5% deležem mikrosilike precej razlikujejo od rezultatov navedenih v literaturi Wallevik, O.H., 2009 *Rheology of cement suspensions*.

Bolj podobni rezultatom v citirani literaturi Wallevik, O.H., 2009 *Rheology of cement suspensions* so rezultati za strižno napetost na meji tečenja (τ_0), ki se ob dodani mikrosiliki nad določenim deležem res poveča.

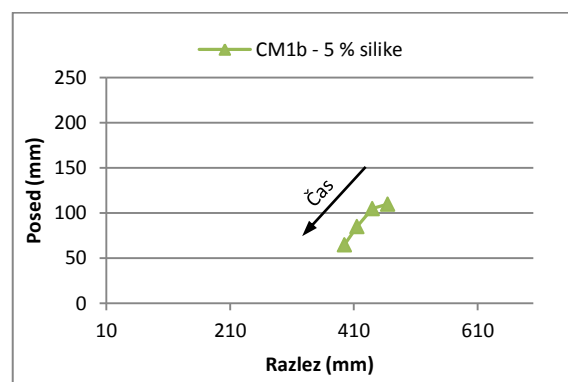
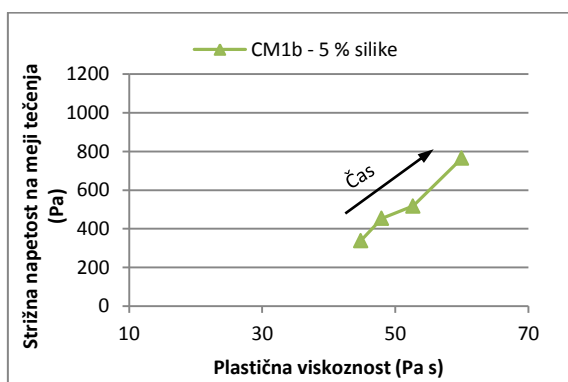
CM1a **V/C = 0,50** **SP = 0,3 %** **Delež mikrosilike = 2,5 %**



Grafikon 23 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CM1a

Grafikon 24 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CM1a

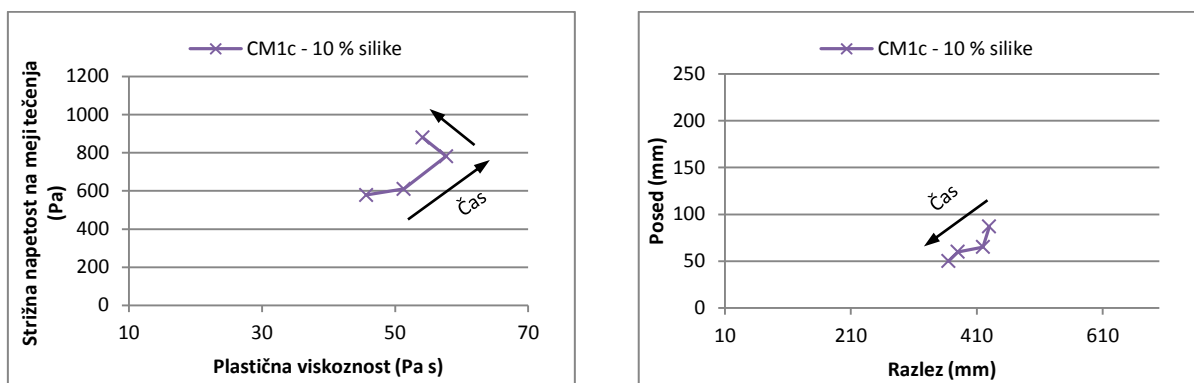
CM1b **V/C = 0,50** **SP = 0,3 %** **Delež mikrosilike = 5 %**



Grafikon 25 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CM1b

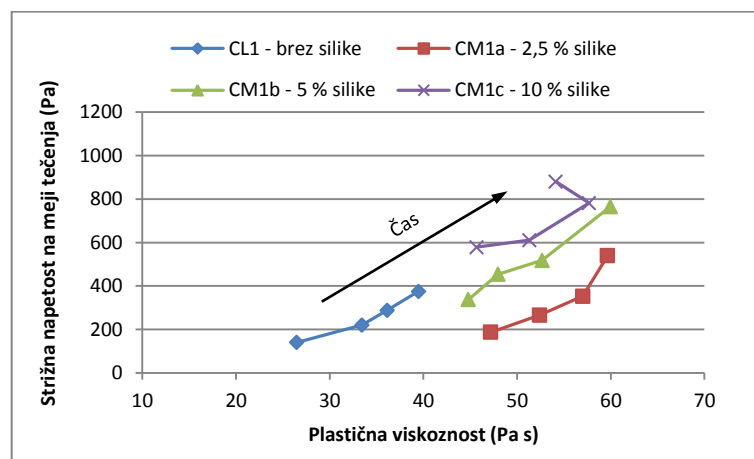
Grafikon 26 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CM1b

CM1c V/C = 0,50 SP = 0,3 % Delež mikrosilike = 10 %



Grafikon 27 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CM1c

Grafikon 28 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CM1c



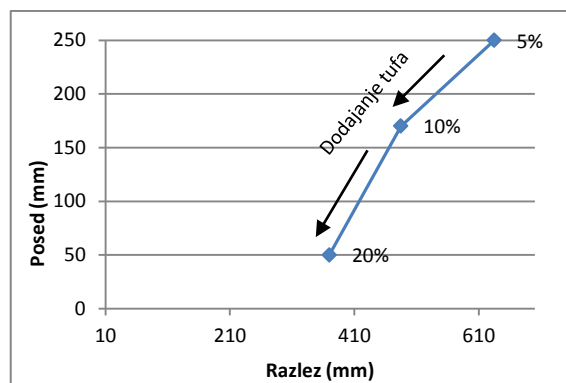
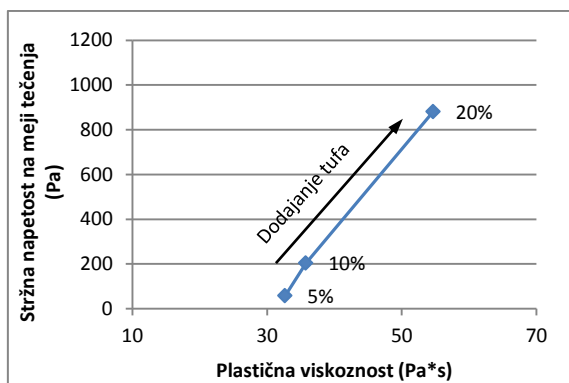
Grafikon 29: Primerjava plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za vse vzorce z mikrosiliko

Iz rezultatov naših meritev lahko ugotovimo, da dodana mikrosilika s časom na spreminjanje plastične viskoznosti in SNMT ni imela bistvenega vpliva. Iz grafikona 29 je razvidno, da primer CL1 v plastični viskoznosti bistveno odstopa od pričakovanih vrednosti. Razlog zato je lahko nekoliko drugačna zrnavostna sestava posameznih frakcij pri odvzemu agregata iz vreč, saj je bil primer CL1 v okviru preiskav izveden kot en izmed prvih, ostali primeri z mikrosiliko pa so bili izvedeni proti koncu laboratorijskih preiskav. Drug razlog za tako odstopajočo meritev je bil lahko tudi v naši izurjenosti v izvajanju preiskav, saj smo se o delu z reometrom, kot z novo napravo vsi sproti učili.

Preglednica 5.6 : Vpliv mikrosilike na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času. ($x(t_{60}) - x(t_0)$)

	CL1 – 0 %	CM1a – 2,5 %	CM1b – 5 %	CM1c – 10 %
a) SNMT (Pa)	263	352	428	302
b) Pl. viskoznost (Pa s)	12	13	15	8

5.4 Mešanice v kombinaciji s tufom



Grafikon 30 levo: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža tufa

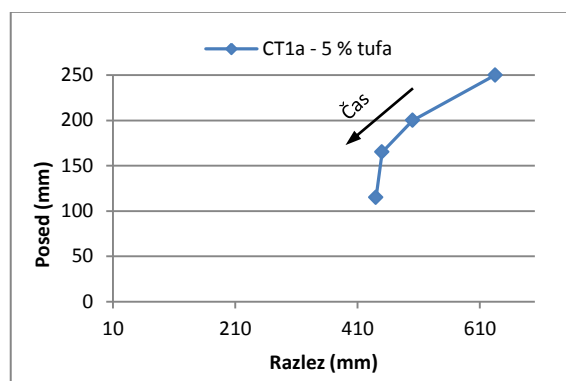
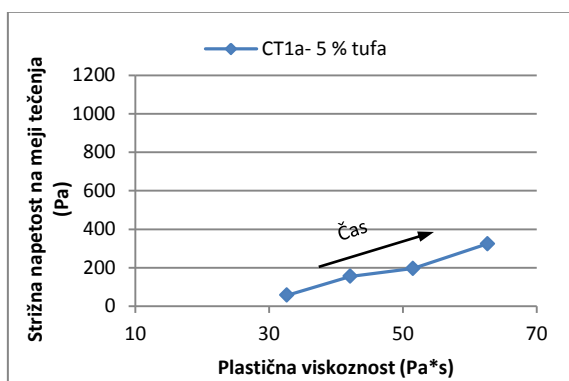
Grafikon 31 desno: Posed in razlez v odvisnosti od deleža tufa

Tuf je že pri majhnih količinah močno zgostil mešanico. Dodajanje količine tufa se odraža v veliki spremembi v vseh štirih merilnih količinah. Ta pojav si lahko razložimo kot posledico velike vodovpojnosti tufa, kar močno zgosti mešanico.

Preglednica 5.7: Rezultati meritev s tufom pri času $t = 0$

Ime mešanice	Delež	μ	τ	Posed	Razlez
	%	Pa·s	Pa	mm	mm
CT1a	5	33	58	250	635
CT1b	10	36	203	170	485
CT1c	20	55	881	50	370

CT1a **V/C = 0,50** **SP = 0,5 %** **Delež tufa = 5 %**

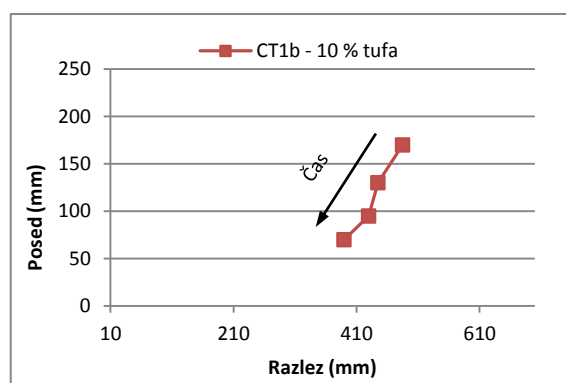
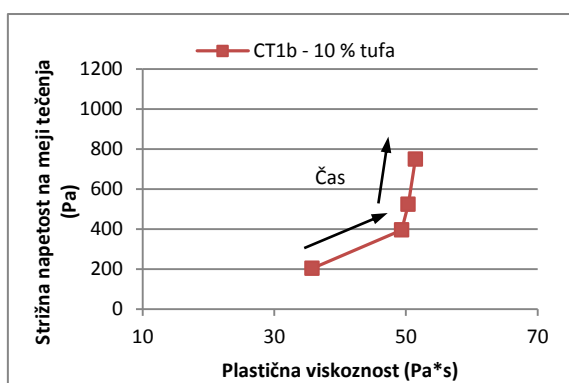


Grafikon 32 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CT1a

Grafikon 33 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CT1a

Plastična viskoznost (μ), kot tudi strišna napetost na meji tečenja (τ_0) se predvsem zaradi vpijanja vode s časom povečujeta (grafikon 32). Podobno se zgodi s posedom in razlezom, ki se zmanjšata.

CT1b **V/C = 0,50** **SP = 0,5 %** **Delež tufa = 10 %**

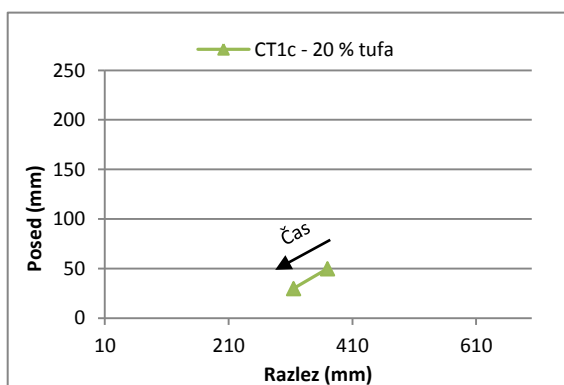


Grafikon 34 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CT1b

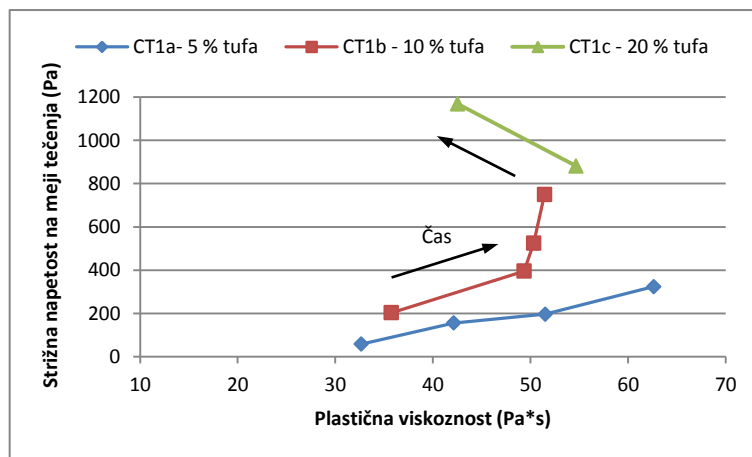
Grafikon 35 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CT1b

CT1c V/C = 0,50 SP = 0,5 % Delež tufa = 20 %

Kljub večji uporabi superplastifikatorja, kot pri svežem betonu z mikrosiliko in žlindro, se nam je preizkušanelec CT1c z 20 % tufa tako močno zgostil, da so bile vrednosti pridobljene pri drugi meritvi neuporabne, zato smo preiskavo prekinili. Za vrednosti poseda in razleza sta bili merodajni meritvi le tisti pri časih $t = 0$ in 20 min, ki sta prikazani na grafikonu 36.



Grafikon 36: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CT1a



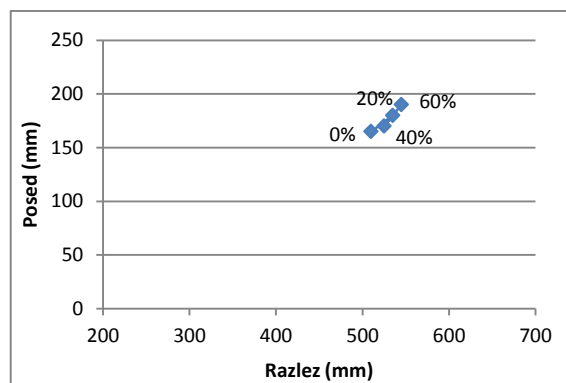
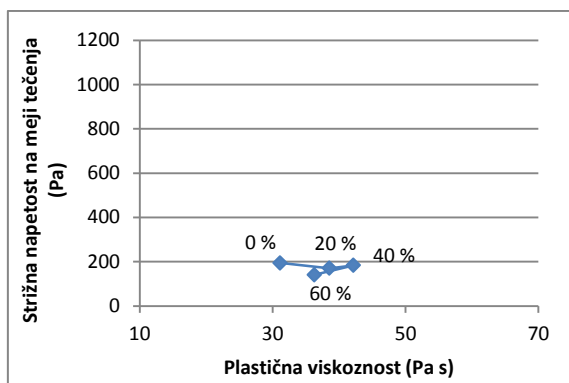
Grafikon 37: Strižna napetost na meji tečenja (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od časa za primere s tufom

Iz primerjave mešanic (grafikon 37) po času, sta se SNMT in plastična viskoznost izrazito povečali, kar negativno vpliva na časovno odvisno obdelavnost betona. S časom se je mešanici z večjo količino tufa hitreje povečevala SNMT, kot tisti z manjšo, po drugi strani pa se je njeno naraščanje plastične viskoznosti skoraj ustavilo. Vpliv dodatka na svež beton po času se lahko z večanjem njegovega deleža spreminja.

Preglednica 5.8 : Vpliv tufa na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času. ($x(t_{60}) - x(t_0)$)

	CM1a – 5 %	CM1b – 10 %	CM1c – 20 %
a) SNMT (Pa)	266	546	/
b) Pl. viskoznost (Pa s)	30	15	/

5.5 Mešanice v kombinaciji z mletu granulirano plavžno žindro



Grafikon 38 levo: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža žindre

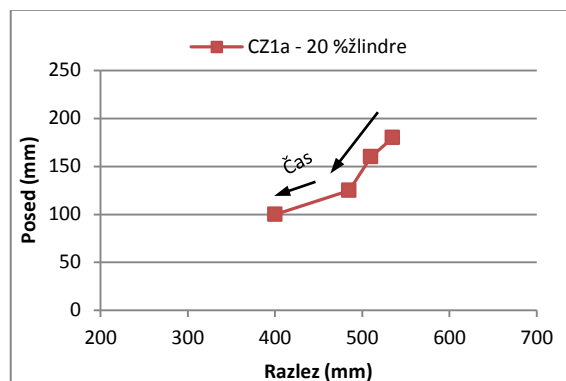
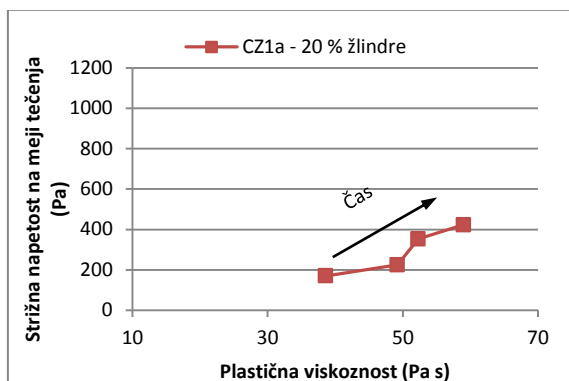
Grafikon 39 desno: Posed in razlez v odvisnosti od deleža žindre

Preglednica 5.9: Rezultati meritev z žindro pri času $t = 0$

Ime mešanice	Delež %	μ Pa·s	τ_0 Pa	Posed mm	Razlez mm
CL1b	0	31	194	165	510
CZ1a	20	39	170	180	535
CZ1b	40	42	183	170	525
CZ1c	60	36	141	190	545

Mleta granulirana plavžna žindra je bila uporabljena v največjih deležih v primerjavi z ostalima mineralnima dodatkoma vendar je bil kljub temu njen vpliv na obdelavnost betona majhen. Kot je razvidno iz grafikona 38, žindra na SNMT, kljub velikemu deležu, ni imela vpliva, manjši vpliv je imela le na plastično viskoznost, ki je sprva narasla, pozneje pa se je njen trend obrnil. Podobno sliko o minimalnem vplivu potrjujejo tudi meritve poseda in razleza (grafikon 39).

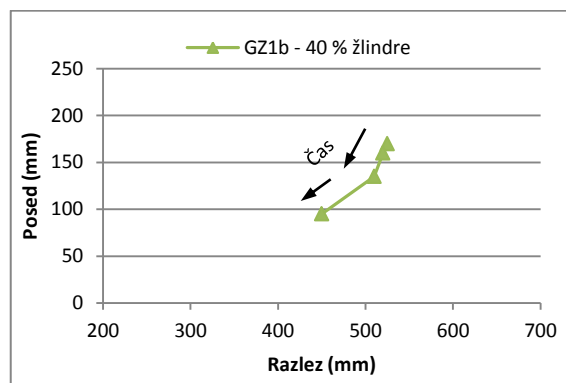
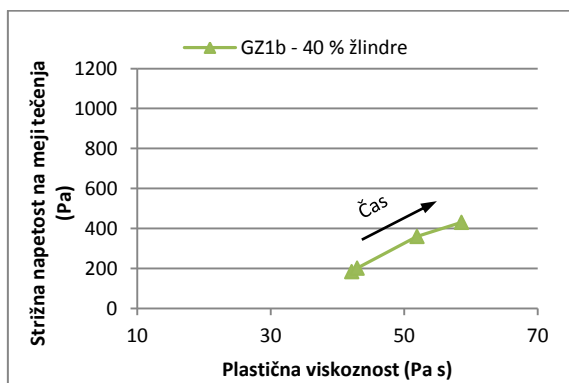
CZ1a **V/C = 0,50** **SP = 0,2 %** **Delež žindre = 20 %**



Grafikon 40 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CZ1a

Grafikon 41 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CZ1a

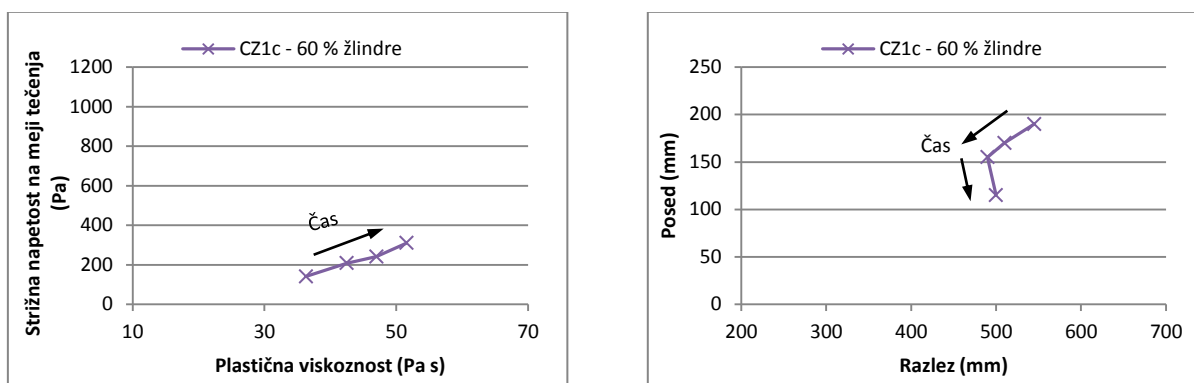
CZ1b **V/C = 0,50** **SP = 0,2 %** **Delež žindre = 40 %**



Grafikon 42 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CZ1b

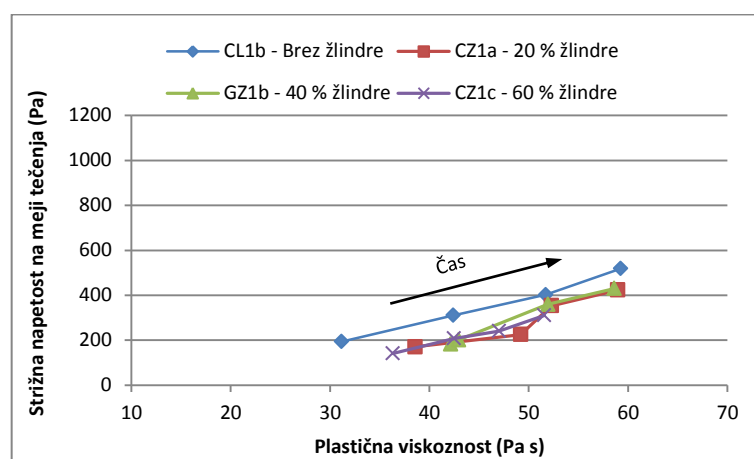
Grafikon 43 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CZ1b

CZ1c V/C = 0,50 SP = 0,2 % Delež žlindre = 60 %



Grafikon 44 levo: Plastične viskoznosti in SNMT v odvisnosti od časa za primer CZ1c

Grafikon 45 desno: Posed in razlez v odvisnosti od časa t za primer CZ1c



Grafikon 46: Strižna napetost na meji tečenja (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od časa za primere z žlindro

Iz primerjave vseh štirih mešanic z grafikona 46 ugotovimo, da je povečevanje deleža žlindre zmanjšalo časovno naraščanje SNMT (τ_0) in plastične viskoznosti (μ) po času. Razlog za to je lahko v manjšem vpijanju vode žlindre, v primerjavi s cementom. Razvidno je, da beton z višjim deležem žlindre manj spreminja reološke lastnosti s časom, kot tisti z manjšim deležem. To prikazuje tudi preglednica 5.10.

Preglednica 5.10: Vpliv žlindre na spreminjanje SNMT (x) in pl. viskoznosti (x) po času t ($x(t_{60}) - x(t_0)$)

	CL1b - 0 %	CZ1a - 20 %	CZ1b - 40 %	CZ1c - 60 %
a) SNMT (Pa)	325	253	170	169
b) Pl. viskoznost (Pa s)	28	20	10	15

5 ZAKLJUČEK

Raziskave o svežem betonu so potrdile dejstvo, da je beton izjemno zapleten kompozit, ki kljub letom raziskav še vedno ponuja številne uganke in bo temu z razvojem vedno novih mineralnih in kemijskih dodatkov ter tehnologij verjetno tako tudi v prihodnje. Reometer ponuja boljše možnost analize lastnosti svežega betona kot standardni metodi poseda in razleza, vendar ima prav tako svoje omejitve. Pri raziskavah v okviru diplomske naloge se je pokazalo, da reometer daje boljše rezultate pri mešanicah z nižjo strižno napetostjo na meji tečenja in pri bolj tekočih mešanicah. Od tod sklepam, da je njegova uporaba bolj smiselna v preučevanju in kontroli SCC ter lahkogradljivih betonov.

Meritve so se v večini izkazale kot ustrezne, z razliko nekaj manjših izjem.

- Vpliv superplastifikatorja je bil nekoliko drugačen od pričakovanega, kar je lahko posledica uporabe drugega superplastifikatorja z drugačnimi učinki, kot jih je imel tisti, katerega vpliv je podan v literaturi. Izkazalo se je tudi, da je njegov vpliv s časom pešal.
- Sprememba V/C razmerja je na svež beton vplivala po pričakovanjih. Tako strižna napetost na meji tečenja kot plastična viskoznost sta se ob povečevanju V/C razmerja približevali izhodišču.
- Pri rezultatih svežega betona z dodano mikrosiliko so bili rezultati pričakovani, le meritev brez mikrosilike, ki je bila izvedena nekaj mesecev prej, ni ustrezala pričakovanjem.
- Vpliv tufa je bil pričakovan, saj so se zaradi velike potrebe po vodi bistveno spremenile vse štiri merile količine.
- Granulirana plavža žindra se je izkazala kot odlična zamenjava portlandskega cementa, saj je bil njen vpliv na lastnosti svežega betona minimalen, tudi pri največjem deležu 60 %.

Med mineralnimi dodatki, ki sem jih uporabil v raziskavah, se je glede na rezultate preiskav edino žindra izkazala kot primerna zamenjava portlandskega cementa v večjih deležih. Glede na rezultate preiskav sta tuf in mikrosilika bolj primerna kot dodatka za ustrezno modifikacijo lastnosti svežega betona, saj je bil njun vpliv na svež beton že z manjšimi deleži relativno velik. Vsi trije mineralni dodatki imajo vplive tudi na mehanske in tehnološke lastnosti strjenega betona, kar bi bilo smiselno preveriti, vendar v sklopu diplomske naloge tega nisem raziskal.

VIRI

Materiali:

Žarnić, R., 2005. Študijski učbenik na fakulteti za gradbeništvo in geodezijo za predmet Gradiva.

Pozzolan. 2011. Wikipedia.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Pozzolan> (Pridobljeno 6. 2. 2012)

Turanli, L., Uzal, B., Bektas, F. 2003. *Effect of material characteristic on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. Patentna prijava: Cement and Concrete Research 34 (2004) 2277-2282. 06531 Ankara, Middle East Technical University, Turkey Department of Civil Engineering.*

Turanli, L., Uzal, B. 2003. *Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. Patentna prijava: Cement and Concrete Research 33 (2003) 1777-1781. 06531 Ankara, Middle East Technical University, Turkey Department of Civil Engineering.*

Vrabec, M., 2005. *Sedimentologija. Študijsko gradivo. Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geodezijo.*

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

Virgalitte, S. J., Luther, M. D., Jere, H. R., Mather, B., 2000. *Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete. Reported by ACI Committee 233R -95.*

Geološki zavod, 1977. *Osnovna geološka karta 1:100 000 in tolmač. Območje Celje L 33-67.*

SIST EN 197-1:2002. *Cement – 1. Del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cimente*

SIST EN 12620:2002+A1:2008. *Agregati za beton*

SIST EN 1008:2002. *Voda za pripravo betona*

Cem I:

http://www.lafarge.si/?stran=show_znamka_text&id=103&znamka=13&selectedMeni=1&selectedMeniText={C}rni%20cement (Pridobljeno 12.7. 2012)

Hiperplastifikator:

<http://www.tkk.si/default.asp?id=3894> (Pridobljeno 5.4. 2012)

Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine. Diplomaska naloga. Ljubljana,

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek)

Bokan Bosiljkov, V., 2006 Izdelava metodologije za presojo varnosti, Končno poročilo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij.

Proizvodnja cementa:

http://www.lafarge.si/?stran=show_text&id=120&znamka=16&selectedMeni=1&selectedMeniText=Proizvodnja%20cementa (Pridobljeno 5.5.2012)

Področje uporabe tufa:

<http://www.montana-zalec.si> (Pridobljeno 28. 7. 2012)

Beton, lastnosti svežega in strjenega betona:

Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., 2002. Disign and Control of Concrete Mixtures

Hočevar, A. 2011. Novi materiali, Seminar: Reologija cementnih suspenzij in analiza variance.

Hočevar, A., Kavčič, F., Bokan Bosiljkov, V., Članek: Zanesljivost reoloških meritev svežih malt in betonov.

Zgodovina betona:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete> (Pridobljeno 5.7.2012)

Tattersall, G.H., Banfill, P.F.G., 1983. Rheology of fresh concrete.

Wallevik, O.H., 2009 Rheology of cement suspensions

SIST EN 206-1:2000. Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja, skladnost

SIST EN 12350-2:2009. Preskušanje svežega betona – 2. del: Preskus s posedom stožca

SIST EN 12350-5:2009. Preskušanje svežega betona – 5. del: Preskus z razlezom