

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:

Hren, B. 2012. Razvoj CEM metode za oceno reoloških lastnosti svežega betona. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Hočevar, A.): 55 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:

Hren, B. 2012. Razvoj CEM metode za oceno reoloških lastnosti svežega betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Hočevar, A.): 55 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:

**BLAŽ HREN**

**RAZVOJ CEM METODE ZA OCENO REOLOŠKIH  
LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA**

Diplomska naloga št.: 23/OG-MK

**DEVELOPMENT OF CEM METHOD FOR ESTIMATION  
OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRESH  
CONCRETE**

Graduation thesis No.: 23/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, 25. 09. 2012

## IZJAVE

Podpisani Blaž Hren izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Razvoj CEM metode za oceno reoloških lastnosti svežega betona«.

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

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

Ljubljana, 10. 9. 2012

Blaž Hren

**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK****UDK:** 691.32:(043.2)**Avtor:** Hren Blaž**Mentor:** izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov univ. dipl. ing. grad.**Somentor:** Andraž Hočevar univ. dipl. ing. grad.**Naslov:** Razvoj CEM metode za oceno reoloških lastnosti svežega betona**Obseg in oprema:** 55 str., 29 pregl., 23 sl.**Ključne besede:** Svež beton, sveža malta, pričakovan razlez, CEM metoda, reologija svežih cementnih mešanic**Izveček**

V sklopu diplomske naloge smo opravili preiskave, katerih glavni namen je bil razviti oziroma modificirati metode za projektiranje sestave ekvivalentnih malt iz sestave betonov. Optimalna metoda formulacije naj bi se določila na podlagi preiskav razleza in reoloških lastnosti določenih z reometrom ConTec Viscometer 5. Na podlagi sestav betonov, ki so bile določene in preskušene v okviru drugih diplomskih nalog, smo sestavili pet etalonskih mešanic referenčnih malt, ki smo jih nato modificirali z namenom, da ugotovimo, če se reološkim lastnostim betona res najbolj približa tista mešanica malte, ki je bila iz tega betona izpeljana ali je ustrežnejša katera od modificiranih malta. Vse mešanice so bile sestavljene iz vode, agregata, cementa in dodatkov. Voda in agregat se pri maltah nista spreminjala, uporabili pa smo dve različni vrsti cementa. Pri štirih mešanicah smo del cementa nadomestili z mineralnima dodatkom mikrosiliko in žlindro, kar se tiče kemijskih dodatkov, pa smo uporabili superplastifikator in aerant. Največ pozornosti smo namenili preiskavi z razlezom, ki nam je predstavljala osnovo za oceno reoloških lastnosti ekvivalentnih maltnih mešanic, ki smo jih nato primerjali z betoni in ugotavljali korelacije. Na podlagi podobnosti razlezov smo v nadaljevanju primerjali tudi reološke parametre malt in betonov, ki smo jih dobili z reometrom ConTec Viscometer 5.

## BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

**UDC:** 691.32:(043.2)

**Author:** Hren Blaž

**Supervisor:** Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov Ph. D.

**Cosupervisor:** Andraž Hočevar univ. dipl. ing. grad.

**Title:** Development of CEM method for the evaluation of rheological properties of fresh concrete

**Scope and tools:** 55 p., 29 tab., 23 fig.

**Keywords:** Fresh concrete, fresh mortar, expected flow value, CEM method, rheology of fresh cement mixtures

### Abstract

The main purpose of the research work in framework of this thesis was the development or modification of CEM (“concrete equivalent method”) for the design of equivalent mortar composition from concrete composition. The optimal formulation method should be determined based on the flow table test and rheological characteristics obtained by ConTec Viscometer 5. Based on the composition of concretes designed and tested in the framework of other diploma works we designed five reference mortar mixtures, which were later modified. We wanted to find out whether the reference mortar mixture is the best mixture to estimate the rheological properties of concrete or one of modified mixtures could be a better choice. All mixtures were composed of water, aggregate, cement and additives. The type of water and aggregate were the same for all mortars and we used two types of cement. In four mixtures we substituted part of the cement with mineral additive, microsilica or slag. As chemical admixtures we selected superplasticizer and air entraining agent. We focused on the results of flow table test, which represented the basis for the estimation of rheological characteristics of the equivalent mortar mixtures; these were later compared with the results obtained on concretes and correlations were made. Finally, based on the similar flow values we also compared rheological parameters of mortars and concretes acquired with the rheometer ConTec Viscometer 5.

## ZAHVALA

Za strokovno pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici izr.prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov in somentorju Andražu Hočevanju, univ. dipl. inž. grad. Posebna zahvala velja tudi Katedri za preskušanje materialov in konstrukcij, ki mi je omogočila opravljanje preiskav v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju.

Ob tej priložnosti bi se zahvalil vsem kolegom, ki so mi pomagali s svojimi nasveti in nesebično pomočjo ter družini za vso podporo in razumevanje v vseh letih študija.

## **KAZALO VSEBINE**

<b>KAZALO VSEBINE</b> .....	<b>V</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC</b> .....	<b>VIII</b>
<b>KAZALO SLIK</b> .....	<b>X</b>
<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OSNOVNO O BETONU</b> .....	<b>3</b>
2.1 Sestavine betona .....	3
2.1.1 Cement .....	3
2.1.2 Agregat.....	10
2.1.3 Voda .....	12
2.1.4 Dodatki.....	13
2.1.4.1 Mineralni dodatki.....	13
2.1.4.2 Kemijski dodatki.....	16
2.2 Lastnosti betona v svežem stanju.....	18
2.2.1 Preskušanje svežih cementnih mešanic .....	20
2.3 Nekatere lastnosti betona v strjenem stanju.....	21
<b>3 REOLOGIJA SVEŽIH BETONOV IN MALT</b> .....	<b>23</b>
3.1 Splošno .....	23
3.2 Vpliv sestavin betona na reološke lastnosti sveže mešanice .....	24

3.3 Rotacijski reometri in principi merjenja.....	26
<b>4 LASTNE PREISKAVE NA SVEŽIH CEMENTNIH MEŠANICAH .....</b>	<b>28</b>
4.1 Uvod in cilji.....	28
4.1.1 Metoda CEM.....	28
4.2 Metode preiskav .....	31
4.2.1 Določanje konsistence cementne malte in betona z razlezom.....	31
4.2.2 Preskus z reometrom.....	32
4.3 Uporabljeni materiali .....	33
4.3.1 Cement .....	33
4.3.2 Agregat.....	34
4.3.3 Voda.....	34
4.3.4 Mineralni dodatki .....	35
4.3.4.1 Žlindra.....	35
4.3.4.2 Mikrosilika .....	35
4.3.5 Kemijski dodatki.....	35
4.3.5.1 Aerant.....	36
4.3.5.2 Superplastifikator.....	37
4.4 Priprava in sestava cementnih mešanic.....	38
4.4.1 Postopek mešanja .....	38
4.4.2 Sestava cementih mešanic .....	39



<b>5 REZULTATI IN KOMENTAR.....</b>	<b>41</b>
5.1 Preskus z razlezom.....	41
5.1.1 Izračun pričakovanega razleza.....	41
5.1.2 Primerjava razlezov .....	42
5.2 Rezultati preiskav z reometrom .....	46
<b>6 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>52</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>54</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Trdnostni razredi cementov [MPa] [2].....	8
Preglednica 2: Proizvodi iz družine običajnih cementov [2].....	9
Preglednica 3: Vpliv lastnosti agregata na lastnosti betona [7].....	11
Preglednica 4: Dopustne vrednosti vsebnosti dodatkov v vodi [11].....	13
Preglednica 5: Učinek elektrofiltrskega pepela na lastnosti betona [8] .....	14
Preglednica 6: Učinek mikrosilike na lastnosti betona [8].....	14
Preglednica 7: Tipična sestava plavžne žilindre [9].....	15
Preglednica 8: Učinek aerantov na nekatere lastnosti betona [8] .....	16
Preglednica 9: Učinek pospeševalcev na nekatere lastnosti betona [8] .....	16
Preglednica 10: Učinek dodatkov za zmanjševanje vode na nekatere lastnosti betona [8].....	17
Preglednica 11: Razredi preskusnih metod svežega betona po Tattersallu [28].....	21
Preglednica 12: Razredi preskusnih metod svežega betona po NIST [28] .....	21
Preglednica 13: Dimenzije nekaterih pripomočkov za razlez malte in betona [3,4].....	31
Preglednica 14: Pregled karakteristik cementa CEM I 42,5R [23].....	33
Preglednica 15: Pregled karakteristik cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5R [20] .....	34
Preglednica 16: Deklarirane vrednosti z odstopanji po standardu SIST EN 13263-1 za mikrosiliko [22] .....	35
Preglednica 17: Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji za uporabljen aerant [22] .....	37
Preglednica 18: Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji za uporabljen superplastifikator [22].	38

Preglednica 19: Število obratov mešalca RILEM-CEN v obeh hitrostih .....	38
Preglednica 20: Sestava družine mešanic mr1 .....	39
Preglednica 21: Sestava družine mešanic mp1 .....	40
Preglednica 22: Sestava družine mešanic ma1 .....	40
Preglednica 23: Sestava družine mešanic md .....	41
Preglednica 24: Sestava družine mešanic ma2 .....	41
Preglednica 25: Primerjava pričakovanih razlezov mešanic mr1 z referenčno mešanico mr1e .....	42
Preglednica 26: Primerjava pričakovanih razlezov mešanic mp1 z referenčno mešanico mp1e .....	43
Preglednica 27: Primerjava pričakovanih razlezov mešanic ma1 z referenčno mešanico ma1e .....	43
Preglednica 28: Primerjava pričakovanih razlezov mešanic md z referenčno mešanico mp1e .....	43
Preglednica 29: Primerjava pričakovanih razlezov mešanic z mikrosiliko in žlindro glede na referenčno mešanico ma3 .....	44

**KAZALO SLIK**

<i>Slika 1:</i> Vpliv nege (levo) in vodocementnega faktorja (desno) na tlačno trdnost betona [1] .....	22
<i>Slika 2:</i> Modeli za opis tekočin [18] .....	23
<i>Slika 3:</i> Vplivi sestavin betona na reološke lastnosti sveže mešanice [24] .....	25
<i>Slika 4:</i> Vpliv lastnosti agregata na reološke lastnosti sveže mešanice [24] .....	26
<i>Slika 5:</i> Reometer CEMAGREF-IMG [16].....	27
<i>Slika 6:</i> Reometer BTRHEOM [17] .....	27
<i>Slika 7:</i> Korelacija med posedom betona in razlezom ekvivalentne malte [5].....	30
<i>Slika 8:</i> Pripomočki za test z razlezom za betone (levo) in za malte (desno) [25,19] .....	32
<i>Slika 9:</i> ConTec Viscometer 5 v laboratoriju FGG .....	32
<i>Slika 10:</i> Krivulja zrnivosti za agregat 0/2 .....	34
<i>Slika 11:</i> Delovanja aeranta v cementni mešanici [27] .....	36
<i>Slika 12:</i> Shematični prikaz delovanja polikarboksilata [26].....	37
<i>Slika 13:</i> Uporabljene dimenzije stožcev in razlezov za izračun pričakovanega razleza malt .....	42
<i>Slika 14:</i> Korelacija razlezov betona in izračunanega razleza.....	45
<i>Slika 15:</i> Korelacija med razlezi betona in razlezi pripadajočih malt.....	45
<i>Slika 16:</i> Korelacija med razlezi betona in razlezi najustreznejših malt .....	46
<i>Slika 17:</i> Korelacija med my betonov in my pripadajočih malt .....	47
<i>Slika 18:</i> Korelacija med my betonov in my najustreznejših malt glede na razlez.....	47

<i>Slika 19:</i> Korelacija med $\tau$ betona in $\tau$ pripadajoče malte.....	48
<i>Slika 20:</i> Korelacija med $\tau_0$ betona in $\tau_0$ najustrežnejše malte glede na razlez .....	48
<i>Slika 21:</i> Primerjava korelacijskega faktorja za reološke parametre malte in betone z upoštevanjem in izločitvijo mešanic z aerantom .....	49
<i>Slika 22:</i> Vrednosti reoloških parametrov $\tau$ in $m_y$ ob zmanjševanju zamesne vode .....	50
<i>Slika 23:</i> Vrednosti reoloških parametrov $\tau$ in $m_y$ ob zmanjševanju superplastifikatorja .....	51

## 1 UVOD

Lastnosti betona, kot so njegova tlačna trdnost, raznovrstnost, obstojnost in ekonomska dostopnost ter sposobnost prevzeti obliko opaža, ko je v svežem stanju, so pripomogle k temu, da je beton že nekaj desetletij najbolj uporabljan material v gradbeništvu. Beton je v osnovi kompozit cementne paste in agregata, dodajajo pa se lahko še razni mineralni in kemijski dodatki, ki pripomorejo k izboljšanju lastnosti betona, tako v svežem kot v strjenem stanju. V preteklosti se je veliko pozornosti posvečalo lastnostim strjenega betona, zadnje čase pa se daje vse večji pomen tudi betonu v svežem stanju. Za sveže betone so bile v preteklosti že razvite preskusne metode, ki so se dodobra uveljavile v praksi, vendar pa dandanes njihova uporaba postaja nekoliko omejena, saj so te metode najprimernejše za običajne betone. Na trgu so se v zadnjih letih namreč pojavile nove vrste betonov (samozgoščevalni betoni, betoni z raznimi dodatki,...), za oceno obdelavnosti katerih so bile razvite nove preskusne metode. Cilj razvijalcev je, da bi obstoječe metode lahko nadomestili z eno samo in temu se zaenkrat najbolj približa metoda določanja reoloških lastnosti svežega betona z reometrom ali viskometrom, katere smo se poslužili tudi v okviru preiskav.

Pri projektiranju mešanic smo se oprli na francosko metodo CEM (concrete equivalent mortar), ki je bila zasnovana z namenom zmanjšanja količine betonskih mešanic za preskušanje cementnih mešanic z dodatki. Ideja je v tem, da se beton nadomesti z betonu ekvivalentno malto, ki ima nekatere podobnosti z betonom, njena uporaba pa precej olajša procese mešanja, vzorčenja in preskušanja.

Malte, ki smo jih zasnovali za potrebe preskusov so bile projektirane na betonih, ki so bili že preskušeni v okviru diplomskih nalog Nejca Andrejke in Bojana Kresala, Osnovna ideja je bila, da na podlagi sestave betona sprojektiramo sestavo malte. Na podlagi tega smo določili nekaj osnovnih mešanic malt, ostale pa so predstavljale korigirane mešanice, ki smo jim spreminjali vsebnosti komponent, največkrat vode in superplastifikatorja. Tako je bilo sprojektiranih, zamešanih in preskušanih 29 različnih mešanic cementnih malt, njihova sestava pa je bila zelo različna, tako po komponentah kot po količinskem razmerju teh komponent. Vse mešanice so vsebovale vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja, enak pri vseh pa je bil tudi agregat in sicer apnenčast agregat frakcije 0/2. Uporabljeni sta bili dve vrsti cementa, med njima pa smo izbirali na podlagi osnovne mešanice betona, ki je narekovala sestavo malt. Pri nekaterih mešanicah je bil tako uporabljen cement CEM I 42,5R, pri drugih pa cement z dodatkom apnenca in žindre CEM II A-M(LL-S) 42,5R. Eno najpomembnejših komponent v večini naših mešanic pa so predstavljali kemijski in mineralni dodatki. Izmed kemijskih dodatkov smo največkrat uporabili superplastifikator, v nekaterih mešanicah pa še

aerant. Mineralne dodatke smo uporabili samo v štirih mešanicah, kjer smo del cementa nadomestili z mikrosiliko ali mleto granulirano plavžno žlindro.

V okviru diplomskega dela smo se posvetili tudi preiskavam na svežih maltah. Osredotočili smo se na reološke lastnosti mešanic, za njihovo vrednotenje pa smo izbrali dve vrsti preiskav. Prva je bila dobro uveljavljena preiskava z razlezom na stresalni mizici, opravljena po standardu SIST EN 1015-3, druga pa je bila preiskava z reometrom, ki smo jo izvedli na koaksialnem valjastem reometru ConTec Viscometer 5 z merilnim sistemom prirejenim za merjenje na maltah. Najprej smo izvedli preiskavo z razlezom, z njo pa smo določili, katera izmed mešanic malt ima razlez najbližji pričakovanemu razlezu, izračunanemu na podlagi razleza betonske mešanice, iz katere smo izhajali. Preiskava z reometrom pa nam je omogočila, da smo preko reoloških parametrov nato med sabo primerjali še: malto, ki najbolj ustreza glede na razlez, osnovno mešanico malte, ki je bila izračunana na podlagi betona ter samo betonsko mešanico.

## 2 OSNOVNO O BETONU

Beton je gradbeni proizvod, sestavljen iz cementa, agregata, vode in dodatkov. Cement, voda in različni dodatki tvorijo cementno pasto, iz katere preko procesa hidratacije in strjevanja nastane cementni kamen. Ta tvori od 25 do 40 % celotne prostornine betona, ostali del, torej od 60 do 75 % pa tvori agregat.

Na trgu je veliko različnih vrst betona, ki jih oblikujemo iz komponent, opisanih v nadaljevanju, njihova kombinacija pa je odvisna od želenih lastnosti betona, bodisi v svežem ali strjenem stanju.

### 2.1 Sestavine betona

#### 2.1.1 Cement

Cement je hidravlično vezivo, ki ob stiku z vodo reagira in začne vezati in se strjevati. Med tem procesom, imenovanim hidratacija, cement z vodo tvori najprej cementno pasto, ki se kasneje strdi v cementni kamen. Cement je že vrsto let najbolj uporabljano vezivo v gradbeništvu predvsem zaradi svojih dobrih lastnosti, kot so visoke trdnosti, odpornost na okoljske vplive in vdor kemikalij ter najpomembneje, zaradi izjemnih vezivnih lastnosti, ki jih ta material premore. [13]

### PROCES PROIZVODNJE

Proces proizvodnje cementa poteka v grobem v štirih fazah in sicer:

- proizvodnja surovin,
- mletje surovinske moke,
- pečenje klinkerja,
- mletje cementa.

#### Proizvodnja surovin in mletje surovinske moke

Proizvodnja cementa temelji na naravnem laporju, ki kot zmes apnenih in glinenih komponent predstavlja osnovno surovino. Ker pa so nahajališča naravnega laporja že skoraj iztrošena se ta surovina nadomesti z mešanico apnenih ( $\text{CaCO}_3$ ) in glinenih ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) materialov.



Osnovne surovine se pridobivajo v kamnolomih in se po eksploataciji zdrobijo v drobilnikih, kjer se material zdrobi na granulacijo pod 30 mm. Po končani fazi drobljenja je potrebno surovinski material, zaradi različnih komponent, še homogenizirati. Ta postopek zavisi od odločitve proizvajalca. Za prihajajoč postopek mletja je potrebno surovinsko mešanico transportirati v cementarno, kjer z več mlini zmeljemo mešanico v surovinsko moko. Med tem procesom se mešanici dodajo tudi dodatki s katerimi popravimo vsebnosti nekaterih elementov, najpogosteje se dodaja materiale kot so piritni ogorki, apnenec in kremenčev pesek. Končni produkt mletja je sivo rumena surovinska moka, skladiščena v silosih.

### Pečenje klinkerja

Glede na temperaturno območje in reakcije, ki pri segrevanju materiala v izmenjevalniku toplote in v peči potekajo, lahko v grobem razdelimo proces pečenja na tri dele: interval do 1300 °C, interval med 1300 in 1500 °C ter hlajenje. Najpomembnejše reakcije v intervalu do 1300 °C so razpad karbonatov in glinenih materialov ter nastanek dikalcijevega silikata (belita), trikalcijevega aluminata in tetrakalcijevega aluminat ferita. Pri tej temperaturi se tudi že pojavi talina. V temperaturnem območju med 1300 °C in 1500 °C zavzema talina znaten delež (20-30 %), predvsem na račun trikalcijevega aluminata in tetrakalcijevega aluminat ferita. V reakciji med belitom in apnom nastaja trikalcijev silikat (alit). Hlajenje je izredno pomembna stopnja v procesu proizvodnje klinkerja, ki lahko odločilno vpliva na njegovo kvaliteto. V tej stopnji prihaja do kristalizacije taline ter do polimorfnih pretvorb alita in belita. Najboljši klinker dobimo, če je hitrost hlajenja do 1250 °C počasna (5°C/min), nato pa sledi hitro hlajenje (20 °C/min). Končni produkt pečenja je cementni klinker v obliki temno sivih granul premera 3 cm, katerega glavni minerali so že prej omenjeni: dikalcijev silikat, trikalcijev silikat, trikalcijev aluminat, in tetrakalcijev aluminat ferit.

### Mletje cementa

Za mletje klinkerja z dodatki se uporabljajo krogelni mlini, iz katerih dobimo droben sivo zelen prah – cement. Ta faza je tudi priložnost, da cementu v skladu s standardi primešamo razne dodatke, ki mu bodo pomagali doseči želeni lastnosti, medtem ko na nekatere lahko vplivamo kar s finostjo mletja. Cement po zaključenem procesu mletja skladiščimo v silosih, odpremljamo pa ga v razsutem stanju ali v vrečah.

## SESTAVINE CEMENTA

Kot najpomembnejšo sestavino obravnavamo portland cementni klinker (K), ki nastane s spajanjem glinenih in karbonatnih mineralov. Glede na standard SIST ENV 197-1 morajo dve tretjine celotne mase zavzemati kalcijevi silikati, razmerje med masami CaO in SiO<sub>2</sub> ne sme biti pod vrednostjo 2 in MgO ne sme presegati 5 % mase.

Mineralne sestavine kot so granulirana plavžna žindra (S), pucolani (P,Q), elektrofiltrski pepel (V,W) in mikrosilika so vse pomembne, podrobneje pa so opisane kasneje v poglavju o mineralnih dodatkih v betonu.

Žgani skrilavec (T) nastaja v pečeh pri temperaturi približno 800 °C. Sestoji iz nekaterih komponent klinkerja, obenem pa vsebuje precejšen delež pucolansko aktivnih oksidov, zaradi česar mu pripisujemo tako hidravlične, kot tudi pucolanske lastnosti.

Apnenec (L,LL) ima v cementu vlogo polnila in v zadnjih letih pridobiva na uporabi. Če ga želimo uporabiti kot glavno sestavino (njegova vrednost je v tem primeru večja od 5%), moramo po standardu SIST EN 197-1 zadostiti zahtevam glede vsebnosti CaCO<sub>3</sub>, gline in skupnega organskega ogljika.

Polnila so dodatki cementu, ki so lahko naravnega ali umetnega izvora. Njihova vsebnost naj ne bi presegala 5%, razlog za dodajanje pa je v izboljšanju nekaterih lastnosti cementa. Njihove lastnosti so lahko različne, nekatera polnila sploh ne reagirajo, medtem ko je za druge značilno hidravlično ali pucolansko obnašanje.

## HIDRATACIJA CEMENTA

Hidratacija cementa je eksotermni kemični proces, je reakcija cementa in vode pri katerem cement preide iz prašnate v pastozno in na koncu v trdno snov (Kavčič 1999).

Večino mase portland cementa predstavljajo štirje bistveni minerali: trikalcijev silikat (C<sub>3</sub>S), dikalcijev silikat (C<sub>2</sub>S), trikalcijev aluminat (C<sub>3</sub>A) in tetrakalcijev aluminat ferit (C<sub>4</sub>AF). Proces hidratacije najlažje razdelimo v štiri osnovne faze hidratacije.

Prvo fazo imenujemo pred-indukcijsko obdobje, ki traja le začetnih nekaj minut. V tem času poteka hitro raztapljanje spojin ter prve reakcije mineralov klinkerja z različnimi spojinami. C<sub>4</sub>AF in C<sub>3</sub>A se v

manjši meri raztapljata in reagirata s sulfatnimi ioni, mineral  $C_3S$  reagira le od 2 do 10%, delež reagiranega minerala  $C_2S$  pa je še manjši.

Naslednjih nekaj ur traja indukcijsko obdobje, ki pomeni zmanjšanje začetne hidratacije. Zaenkrat sta znani dve teoriji, ki pojasnjujeta ta fenomen. Prva je teorija zaščitne plasti po kateri naj bi se že med pred-indukcijskem obdobjem cementna zrna obdala s hidratacijskimi produkti, ki oblikujejo neke vrste zaščitno plast, ki ovira napredovanje hidratacije nezreaganega dela cementnih zrn. Zapčitna plast se skozi indukcijsko obdobje spreminja in počasi postaja prepustna, kar spet pospeši hidratacijo cementa kasneje.

Približno od tretje do dvanajste ure poteka obdobje pospešene hidratacije, v katerem se oblikuje cementni gel, ki je tekoč in gost, zrna v njem pa so enakomerno razporejena. Minerala  $C_2S$  in  $C_3S$  v tem času dosežeta maksimalne vrednosti hidratacije.

Do konca procesa hidratacija pojema. Kot rezultat hidratacije  $C_2S$  in  $C_3S$  se tvori C-S-H gel, nehidratizirana  $C_3A$  in  $C_3AF$  pa reagirata z etringitom, ki je nastal v pred-induckijskem obdobju. Nastajajo še nekatere nove spojine, iz cementnega gela pa se oblikuje cementni kamen.

## FIZIKALNE LASTNOSTI CEMENTA

Vse fizikalne lastnosti cementa se preverjajo s preiskavami opisanimi v standardih. Vzorce odvezamemo s sondo, nato pa jih razdelimo na tri dele. Prvi del uporabimo za preiskave, drugi del je namenjen primerjalnim analizam, medtem ko tretji del vzorca za vsak primer shranimo za poznejše preiskave.

- Specifična masa

Specifična masa cementa je definirana kot masa cementnih zrn brez por in votlin v določeni prostorninski enoti. Merimo jo s piknometrom in znaša od 3,0-3,25 g/cm<sup>3</sup>. Cement v razsutem stanju ima gostoto od 0,8-1,2 g/cm<sup>3</sup>, če pa ga zbijemo, lahko doseže gostoto do 1,8 g/cm<sup>3</sup>.

- Finost mletja

Cementi sestojijo iz majhnih oglatih delcev različnih velikosti, povprečno pa so veliki okoli 15 mikrometrov. Velikost delcev oziroma finost mletja se v največji meri izrazi v procesu hidratacije, pri čemer manjši delci razvijejo več toplote, saj se v večji meri hidratizirajo, zaradi večje specifične

površine zrn. Poznamo dve metodi za ovrednotenje finosti cementa in sicer sedimentacijska metoda z Wagnerjevim turbidimetrom in metoda z zračnim tokom, kjer za pripomoček uporabljamo Blainov permeabilimeter.

- Konsistenca

Konsistenco cemente paste preverjamo z Vicatovim aparatom, ki ga sestavlja 300 gramška sonda premera 10 mm. Sondo aparata nastavimo na sredino konusnega prstana, napolnjenega s pasto in jo spustimo, da začne prodirati v pasto. Po izteku 30 sekund na skali preverimo položaj sonde na skali. Standardna konsistenca pomeni, da se je sonda ustavila 4-8 mm nad stekleno ploščo.

- Prostorninska stabilnost

Ta lastnost se nanaša na sposobnost strjene cementne paste, da ohrani svojo prostornino. Pasta namreč nabreka v vodi in se krči v zraku, kar povzroči razpoke v cemetnem kamnu. Poleg tega nabrekanje povzročijo tudi nekateri nehidratizirani deli cementa, predvsem MgO in apneni delci. Za preverjanje prostorninske stabilnosti uporabljamo tri vrste preiskav in sicer preiskave v avtoklavu, preiskave po Le Chatelierju in preiskave s kolački.

- Lezenje

Deformacije zaradi lezenja so povezane predvsem z daljšim časovnim obdobjem obremenjevanja cementnega kamna. Te deformacije so lahko tudi do trikrat večje od deformacij, ki nastanejo zaradi enake trenutne obtežbe. Proces lezenja se zaustavi šele po 5-10 letih. Na velikost deformacij zaradi lezenja vplivajo vodocementni faktor, vrsta cementa, temperatura in vlaga v okolju ter intenziteta in časovni potek obremenitev.

- Standardna in zgodnja trdnost

Trdnost preskušamo na prizmah pripravljenih iz standardne cementne malte. Po vgradnji v kalupe malto staramo 2 ali 7 dni za določanje zgodnje trdnosti ter 28 dni za določanje standardne trdnosti, nato pa v skladu s standardi izvedemo tlačni preskus. Na podlagi rezultatov preskusov določimo standardno in zgodnjo trdnost obravnavanega cementa.

**Preglednica 1:** Trdnostni razredi cementov [MPa] [2]

Trdnostni razred	Zgodnja trdnost		Trdnost po 28 dneh	
	2. dan	7. dan	Minimalna	Maksimalna
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\geq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	-	$\geq 32,5$	$\geq 52,5$
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\geq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$	-	$\geq 42,5$	$\geq 62,5$
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	$\geq 30,0$	-	$\geq 52,5$	-

## OBIČAJNI CEMENTI

Glede na standard SIST EN 197-1 po sestavi ločimo običajne cemente na pet vrst. Označeni so z oznako CEM, kateri sledi rimska številka, ki nam pove vrsto cementa. Poleg teh oznak je treba navesti še številko 32,5, 42,5 ali 52,5, ki označuje trdnostni razred. Za označitev zgodnje trdnosti cementa dodamo še ustrezno črko N ali R (Preglednica 1).

**Preglednica 2:** Proizvodi iz družine običajnih cementov [2]

Glavne vrste	Oznaka 27 proizvodov (vrste običajnih cementov)		Sestava (odstotek mase <sup>a</sup> )											
			Glavne sestavine											
			Klinker	Granulirana plavžna žindra	Mikrosilika	Pucolan		Elektrofilterski pepel		Žgani skrilavec	Apnenec		Manj pomembne sestavine	
K	S	D <sup>b)</sup>	P	Q	P	Q	T	L	LL					
CEM I	Portlandski cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandski cement z dodatkom žindre	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandski cement z dodatkom mikrosilike	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		Portlandski cement z dodatkom pucolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-
	CEM II/B-P		65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-Q		80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-Q		65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandski cement z dodatkom elektrofilterskega pepela	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portlandski cement z dodatkom žganega skrilavca	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portlandski cement z dodatkom apnenca	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portlandski mešani cement <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-94	<-----6-20----->										0-5
		CEM II/B-M	65-79	<-----21-35----->										0-5
	CEM III	Žlindrin cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pucolanski cement <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	-	<-----11-35----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<-----36-55----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Mešani cement <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	<-----18-30----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	<-----31-50----->			-	-	-	-		

a) Vrednosti v raprednici se nanašajo na vsoto glavnih in manj pomembnih sestavin.

b) Delež mikrosilike je omejen na 10%.

c) Pri mešanih portlandskih cementih CEM II/A-M in CEM II/B-M, pucolanskih cementih CEM IV/A in CEM IV/B ter mešanih cementih CEM V/A in CEM V/B morajo biti glavne sestavine, razen klinkerja, navedene v oznaki cementa.

### 2.1.2 Agregat

Agregat je komponenta betona, ki je v mešanici zastopana v največjem obsegu, zato ni presenetljivo, da njegove lastnosti pomembno vplivajo na lastnosti betona, tako svežega kot tudi strjenega. [7]

- Glede na prostorninsko maso ločimo agregate za pripravo betonov na:
- težke ( $\gamma > 3000 \text{ kg/m}^3$ ) – magnetit, barit
- normalne ( $2000 < \gamma < 3000 \text{ kg/m}^3$ ) – apnenci, dolomiti, eruptivci
- lahke ( $\gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$ )
  - naravni lahki
    - ekspandirana glina
    - ekspandirani perlit
    - ekspandirani vermikulit
  - umetni lahki
    - ekspandirani polisteren – stiropor
    - granulirana guma

### PRIDOBIVANJE AGREGATA

V namen pridobivanja agregata uporabljamo tri različne načine, vsak od njih pa pomeni tudi drugačen tip pridobljenega agregata. Prodnati agregat dobimo po mokrem postopku v gramoznicah ali peskokopih, medtem ko po suhem postopku v kamnolomih dobimo drobljeni agregat. Poleg teh dveh postopkov obstaja še skupina industrijskih predelav, med katere štejemo temperaturno obdelavo, drobljenje, rezanje in sekanje, poslužujemo pa se jih predvsem za pridobivanje lahkih agregatov.

### UPORABA V PRAKSI

Fracije agregatov, ki se v praksi najbolj uporabljajo delimo na drobne (0/1, 0/2 ali 0/4) in grobe frakcije (4/8, 8/16, 16/22, 16/32,...) . Iz teh nato sestavljamo skupne sestave za betone in sicer:

- 0/2 mm ali 0/4 mm (malte)
- 0/8 mm
- 0/16 mm

- 0/32 mm
- 0/45 ali 0/63 mm (zelo redko)

**Preglednica 3:** Vpliv lastnosti agregata na lastnosti betona [7]

LASTNOSTI BETONA	BISTVENE LASTNOSTI AGREGATA
odpornost proti zmrzovanju/tajanju	obstojnost
	poroznost
	struktura por
	prepustnost
	stopnja zasičenosti
	natezna trdnost
	tekstura in struktura
	zamuljenost in glineni delci
odpornost proti sušenju in vlaženju	struktura por
	modul elastičnosti
odpornost na povišane temperature	termični koeficient ekspanzije
erozijska odpornost	trdnost
alkalno-agregatna reakcija	mineraloško-petrografska sestava
trdnost	trdnost
	tekstura
	čistost
	oblika zrn
	največje zrno
krčenja	modul elastičnosti
	oblika zrn
	čistost
	največje zrno
	granulometrijska sestava
	zamuljenost in glineni delci
termični koeficient ekspanzije	termični koeficient ekspanzije
	modul elastičnosti
termična prevodnost	termična prevodnost
specifična toplotna kapaciteta	specifična toplotna kapaciteta
prostorninska masa	gostota
	oblika zrn
	granulometrijska sestava
	največje zrno
modul elastičnosti	modul elastičnosti



	Poissonov koeficient
drsnost	polirnost
ekonomičnost	oblika zrn
	granulometrijska sestava
	največje zrno
	potrebni obseg predelave
	razpoložljivi izbor agregatov

## AGREGATI V SLOVENIJI

Najpogosteje se v Sloveniji srečamo z drobljenci, bodisi apnenčevega bodisi dolomitnega izvora. Agregati magmatskega izvora so na razpolago v precej manjših količinah, pridobivamo jih po potrebi v kamnolomih. Eden takih se nahaja v Kamni Gorici. Prodnati agregati, ki jih najdemo v porečjih večjih slovenskih rek, so silikatnega in karbonatnega izvora. Predstavnike prvih najdemo predvsem v porečjih Mure in Drave, medtem ko se karbonatni prodnati agregati nahajajo v porečjih rek Soče in Save.

Prav ti prodnati agregati so med najbolj zaželenimi v gradbeni stroki, saj so primerni za pripravo vseh vrst betonov. Njihovim lastnostim se zelo približajo še drobljeni apnenci, medtem ko so drobljeni dolomitni agregati primerljivi le v nekaterih kopih, velikokrat pa pride do odstopanja od kriterijev kakovosti zaradi naslednjih pomanjkljivosti:

- prevelika vsebnost finih delcev
- prevelika drobljivost
- premajhna žilavost
- preslaba odpornost proti zmrzovanju/tajanju

### 2.1.3 Voda

Večino naravnih vod, ki so pitne in obenem nimajo posebnega okusa ali vonja, lahko uporabimo kot vodo za pripravo betona.

Če v primernost vode nismo prepričani, se vedno lahko odločimo za izdelavo in primerjavo prizem, narejenih iz vode znane in neznane kvalitete.

Prevelika količina nečistoč v vodi lahko poleg tega, da znatno vpliva na hidratacijo in končno trdnost, povzroči še površinsko izločanje soli, madeže, korozijo armature in zmanjšano trajnost konstrukcije.

**Preglednica 4:** Dopustne vrednosti vsebnosti dodatkov v vodi [11]

LASTNOSTI VODE	ZAHTEVANE LASTNOSTI	
	ARMIRAN BETON	PREDNAPET BETON
pH vrednost	4,5 - 9,5	4,5 - 9,5
Vsebnost kloridov (Cl <sup>-</sup> )	≤ 300 mg/l	≤ 100 mg/l
Vsebnost sulfatov (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	≤ 2700 mg/l	≤ 100 mg/l
Vsebnost sulfidov (S <sup>2-</sup> )	-	≤ 100 mg/l
Vsebnost nitratov (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	≤ 500 mg/l	≤ 500 mg/l
Vsebnost fosfatov (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	≤ 100 mg/l	≤ 100 mg/l

## 2.1.4 Dodatki

### 2.1.4.1 Mineralni dodatki

Z mineralnimi dodatki nadomeščamo del cementa v betonskih mešanica in jim s tem nekoliko spremenimo tudi nekatere lastnosti. Med najbolj bistvene spada gostejša struktura cementne paste, ki je posledica reakcije mineralnih dodatkov z nekaterimi minerali v cementu. Nastane nova CSH faza, ki zapolni praznine v pasti in posledično izboljša marsikatero lastnost cementnega kamna. Izmed mineralnih dodatkov se v praksi največ uporabljata elektrofiltrski pepel in mikrosilika.

#### 2.1.4.1.1 Elektrofiltrski pepel

Dandanes je elektrofiltrski pepel eden najbolj razširjenih nadomestkov cementa v betonu. Nastane kot stranski produkt pri zgorevanju premoga v termoelektrarnah. V osnovi je sestavljen iz silikatnega stekla, ki vsebuje SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in CaO. V manjših količinah se v njem nahajajo še elementi kot so magnezij, žveplo, natrij, kalij in ogljik. Relativna gostota elektrofiltrskega pepela se navadno giblje med 1.9 in 2.8. Praviloma je sive ali kožne barve.

**Preglednica 5:** Učinek elektrofilterskega pepela na lastnosti betona [8]

Lastnost betona	Učinek elektrofilterskega pepela
Potreba po vodi	zmanjša potrebo po vodi do 10%
Obdelovalnost	se izboljša
Izcejanje vode	se zmanjša
Možnost segregacije	se zmanjša
Čas vezanja	se podaljša
Trdnost	zgodnja trdnost se zniža, končna pa zviša
Vez med armaturo in betonom	se izboljša
Hidratacijska toplota	se zniža
Prepustnost	se zniža
Korozija armature	zavira korozijo

#### 2.1.4.1.2 Mikrosilika

Mikrosilika je fino zrnat silicijev dioksid v nekristalizirani obliki. Nastane kot stranski produkt pri proizvodnji ferosilicija. Zrno mikrosilike je v povprečju tudi do 50 krat manjše od zrna cementa. Mikrosiliko lahko običajno kupimo v razsutem stanju, izjemoma pa je na voljo tudi v obliki disperzije. V razsutem stanju njena gostota znaša samo 130 – 430 kg/m<sup>3</sup>, medtem ko je njena relativna gostota 2200 – 2500 kg/m<sup>3</sup>. V betonsko mešanico jo dodajamo glede na maso cementa in sicer nekje 5 – 10 %. Kljub temu, da gre za stranski produkt, na trgu dosega relativno visoko ceno, zato jo uporabljamo le v redkih primerih, ko želimo zagotoviti visoko stopnjo obstojnosti in neprepustnosti (agresivno okolje) ter pri nekaterih betonih visokih trdnosti.

**Preglednica 6:** Učinek mikrosilike na lastnosti betona [8]

Lastnost betona	Učinek mikrosilike
Potreba po vodi	se poveča
Obdelovalnost	se izboljša
Izcejanje vode	se zmanjša
Možnost segregacije	se zmanjša
Delež zračnih por	se zmanjša
Trdnost	beton na začetku hitreje pridobiva na trdnosti, končna trdnost se praviloma poveča
Prepustnost	se zniža

### 2.1.4.1.3 Žindra

Granulirana plavžna žindra je nekovinski stranski produkt proizvodnje železa v plavžih. Glavne sestavine plavžne žindre so silicijev dioksid, aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ), kalcij, magnezij, v manjših količinah pa najdemo še žveplo ter železove in manganove okside. (Preglednica 7) [9]

**Preglednica 7:** Tipična sestava plavžne žindre [9]

	delež v [%]		delež v [%]
Silicijev dioksid ( $SiO_2$ )	32-42	Žveplo	1-2
Aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ )	7 -16	Železo (FeO)	1-1,5
Kalcij (CaO)	32-45	Mangan (MnO)	0,2-1,0
Magnezij (MgO)	5-15		

Fizikalne lastnosti žindre, kot so specifična teža, velikost delcev, lastnosti sestave, itd. se lahko precej razlikujejo glede na metodo, ki je bila uporabljena v procesu predelave žindre. Njena gostota v razsutem stanju znaša  $1121 - 1281 \text{ kg/m}^3$ , relativna gostota pa je večinoma nekje od 2000 do  $2500 \text{ kg/m}^3$ . Prva lastnost, ki jo lahko opazimo po uporabi žindre v betonih je barva betona, saj ta postane nekoliko svetlejšega odtenka, sicer pa so njeni najpomembnejši vplivi upočasnjena hidratacija, višja končna trdnost ter izboljšana vez med cementno pasto in agregatom, kar neposredno vpliva na lastnosti kot sta vodoneprepustnost in upor proti vdoru soli.

### 2.1.4.1.4 Tuf

Prva uporaba tufa v gradbeništvu sega nekaj tisočletij nazaj, ko so ga za gradnjo različnih sakralnih objektov uporabljali Kitajci, kasneje pa so ga zaradi dostopnosti uporabljali tudi Rimljani. Najprej so ga uporabljali le kot dodatek k apnu, šele kasneje pa so bile ugotovljene njegove lastnosti vezanja. Podobno kot žindra, tudi tuf nekoliko upočasni začetek hidratacije, obenem pa se tudi zniža sama trdnost strjenega betona. Njegova največja prednost danes je ta, da zaradi svoje strukture zapolni prazne prostore med zrni cementa ter tako znatno poveča vodoneprepustnost betona. Zaradi omenjenih lastnosti se ga zelo redko uporablja kot samostojen nadomestek cementa. Največkrat tako le v manjših količinah nadomesti cement, z namenom znižati prepustnost strjenega betona.

### 2.1.4.2 Kemijski dodatki

Kemijski dodatki so se v tehnologiji betona prvič uporabili v 50. letih prejšnjega stoletja in so vse od tedaj nepogrešljivi pri proizvodnji betona, saj omogočajo projektiranje betonov z želenimi lastnostmi. Kemijske dodatke običajno dodajamo v majhnih količinah glede na maso cementa, kar pa še ne pomeni da z njimi lahko nadomestimo del cementa. Pogosto se uporablja tudi več dodatkov skupaj, v tem primeru moramo paziti, da so dodatki kompatibilni.

#### 2.1.4.2.1 Aeranti

Aerante dodajamo v svežo betonsko mešanico z namenom, da se v njej umetno ustvarijo drobni zračni mehurčki, ki so običajno velikosti med 10 in 800  $\mu\text{m}$ , medtem ko optimalna velikost znaša okoli 400  $\mu\text{m}$ . Poleg velikosti je pomemben še faktor oddaljenosti, ki je odvisen od količine in razporeditve mehurčkov. Ugotavljamo ga s postopkom linijske mikroskopske analize, njegova vrednost pa mora biti pod 0,2 mm, če želimo betonu zagotoviti odpornost na zmrzovanje in tajanje brez in v prisotnosti soli.

**Preglednica 8:** Učinek aerantov na nekatere lastnosti betona [8]

Lastnost betona	Učinek aerantov
Obdelovalnost	znatno izboljšana
Trdnost	nekoliko zmanjšana, zaradi vnosa fine poroznosti
Obstojnost	znatno poveča obstojnost proti učinku zmrzovanja/tajanja

#### 2.1.4.2.2 Pospeševalci

Pospeševalci imajo v sveži cementni mešanici dva bistvena vpliva in sicer povečajo hitrost hidratacije cementa, kar pomeni hitrejšo vezanje, dodajajo pa se tudi z namenom hitrejšega razvoja trdnosti.

**Preglednica 9:** Učinek pospeševalcev na nekatere lastnosti betona [8]

Lastnost betona	Učinek pospeševalcev
Čas vezanja	skrajšan začetek in konec vezanja betona
Zmrzovanje vode v betonu	v normalnih dozah minimalno znižano zmrzišče vode
Aeracija	ni vpliva
Trdnost	hitrejši prirast trdnosti na začetku, končna trdnost nižja

Prostorninske spremembe	zmanjšane spremembe prostornine med strjevanjem
Obstojnost	izboljšana obstojnost mladega betona
Korozijska armature	ni nevarnosti za razvoj korozijske na armaturi

#### 2.1.4.2.3 Dodatki za zmanjševanje potrebe po vodi

Dodatke, ki zmanjšujejo potrebno količino vode v betonski mešanici imenujemo plastifikatorji in superplastifikatorji. Plastifikatorji poleg zmanjševanja potrebne vode vplivajo tudi na potek hidratacije in sicer delujejo kot zaviralci. Iz tega razloga se jih doda največ do 1,5% glede na maso cementa, saj bi bilo v nasprotnem primeru zaviranje vezanja preveliko.

**Preglednica 10:** Učinek dodatkov za zmanjševanje vode na nekatere lastnosti betona [8]

<b>Lastnost betona</b>	<b>Učinek dodatkov za zmanjšanje potrebne vode</b>
Potreba po vodi	plastifikatorji zmanjšajo potrebo po vodi za 12%, superplastifikatorji pa tudi do 30%
Potreba po cementu	zaradi nižjega v/c se zmanjša
Aeracija	nekateri vrste plastifikatorjev vnesejo v mešanico do 3% zraka v obliki zračnih mehurčkov
Obdelovalnost	se izboljša
Hidratacijska toplota	zniža se zaradi manjše količine cementa
Trdnost	zaradi nižjega v/c in spremenjene mikrotekture cementne paste se trdnost močno zviša
Krčenje in lezenje	zaradi višjih trdnosti se zmanjša
Obstojnost	zaradi nižjega v/c razmerja se v določenih primerih obstojnost bistveno poveča

#### 2.1.4.2.4 Ostali kemijski dodatki

Poleg prej naštetih in opisanih dodatkov, se v praksi uporablja še cela paleta drugih dodatkov, ki betonu dodajo ali odvzamejo določene lastnosti. V nadaljevanju je opisanih nekaj takih dodatkov.

Z zavlačevalci povzročimo, da se hidratacija v svežem betonu upočasni ali pa celo ustavi. Njihova uporaba je pogosta pri daljših prevozih betonske mešanice na gradbišče in poleti, ko bi visoke temperature lahko povzročile prehitro vezanje betona. Pigmente uporabljamo takrat, kadar želimo

beton obarvati, obenem pa z njimi ne vplivamo na ostale lastnosti betona, bodisi v svežem bodisi v strjenem stanju. Pigmenti so lahko naravni ali pa sintetični, dodajamo pa jih na maso cementa in sicer največ 10%.

Gostilci so kemijski dodatki s katerimi zmanjšamo izločanje vode iz betona, posredno pa vplivamo na lastnosti kot sta zmanjšanje nevarnosti segregacije in večja vodoneprepustnost. Primerni so za uporabo skupaj s plastifikatorji, posebej v primerih betonov visokih razlezov in samozgoščevalnih betonov, z namenom da se izognemo segregaciji. [8]

## 2.2 Lastnosti betona v svežem stanju

V zadnjih letih se je razvoj betona nagnil na stran svežega betona, saj je beton v strjeni obliki že dodobra poznan, lastnosti svežega betona pa šele v zadnjih letih dobivajo na pomenu in se jim namenja večja pozornost. V nadaljevanju so opisani nekateri pojmi, ki so močno povezani s svežim betonom in njegovimi lastnostmi.

- Mešanje

Postopek zagotavljanja homogene mešanice osnovnih sestavin betona zahteva precej pazljivosti in truda. Zaporedje dodajanja posamezne sestavine lahko igra pomembno vlogo pri zagotavljanju kakovosti končnega produkta, kljub temu pa so lahko zaporedja dodajanja razlikujejo, vendar moramo pri tem prilagoditi faktorje, kot so čas dodajanja vode v suho mešanico, skupno število obratov in hitrost obračanja lopatic mešalca. Ostali parametri, ki tudi pomembno vplivajo na postopek mešanja so še: razmerje med količino mešanice in celotno prostornino mešalnega bobna pa tudi model, nastavitve in stanje v katerem se nahaja mešalec in njegove komponente.

- Obdelovalnost, vgradljivost in pomen reoloških lastnosti

Obdelovalnost betona je relativna lastnost. Lahko jo definiramo kot količino notranje energije, ki je potrebna za popolno zgoščen beton, tj. količina energije, potrebna, da premagamo notranji upor med posameznimi delci v betonu. Obdelovalnost v širšem pomenu pa vključuje še lastnosti povezane z mešanjem, transportom, vgrajevanjem v opaž, zgoščevanjem in finalno obdelavo površine betona, torej vse do trenutka, ko beton zavzame svojo končno obliko. Ker gre za precej kompliciran pojem, ki

se v praksi težko ovrednoti, se v zadnjem času namesto tega uveljavljajo reološki parametri, ki jih dobimo z reološkimi preiskavami. Njihova glavna prednost je, da jih lahko ovrednotimo, primerni pa so za širok spekter betonov.

- Zgoščevanje betona

Svež beton zgoščujemo z vibriranjem s čimer zmanjšamo trenje med delci in jih poženemo v gibanje. Pri tem se mešanica začne obnašati kot gosta tekočina. Postopek vibriranja nam omogoča uporabo bolj toge mešanice, ki vsebuje več grobih in manj finih zrn v agregatu. Večja količina grobih zrn pa pomeni, da bo skupna površina zrn agregata manjša, kar zniža tudi potrebo pa pasti, torej po cementu in vodi.

Dobra zgostitev lahko precej izboljša kvaliteto in zmanjša stroške, medtem ko slabo izveden postopek lahko pomeni porozen beton slabe kvalitete, bistveno pa je zmanjšana tudi trajnost.

- Izcejanje vode

Izcejanje vode ali »krvavenje betona« imenujemo pojav, ko se na vrhnji plasti sveže vgrajenega betona pojavi sloj vode. Povzroči ga posedanje trdnih delcev (cementa in agregata) in hkratni dvig vode. Izcejanje vode je normalno in ne bi smelo vplivati na kvaliteto betona, ki je bil pravilno vgrajen in negovan. V manjših količinah je izcejanje celo koristno, saj s tem preprečimo oziroma omejimo pojav razpok, ki so posledica plastičnega krčenja.

- Vezanje in strjevanje betona

Proces vezanja cementne paste je podrobneje opisan v poglavju o cementu.

Strjevanje betona skorajda ne vpliva na bruto prostornino, res pa je da strjen beton vsebuje pore z vodo in zrakom, ki ne prispevajo k trdnosti. Trdnost namreč zagotavlja trden del cementnega kamna, predvsem C-S-H (kalcijev silikat hidrat) in ostali p.

Poroznejši beton pomeni manjšo končno trdnost, zato je pomembno, da je količina vode, ki jo dodamo pri mešanju najmanjša glede na zahtevane kriterije obdelavnosti in plastičnosti.



Pri planiranju izvedbe betoniranja je pomembno, da se zavedamo količine toplote, ki se sprosti pri hidrataciji. V zimskih razmerah je toplota dobrodošla in koristna, saj pomaga zaščititi beton proti zmrzali. Toplota pa je lahko tudi škodljiva in sicer pri gradnji masivnih konstrukcij, kot so pregrade, kjer sproščena toplota povzroča toplotne razlike, ki pomenijo notranje napetosti in razpoke.

Pametno je poznati tudi hitrost vezanja med cementom in vodo, saj ta direktno določa prehod betonske mešanice iz plastičnega v trdno agregatno stanje. V začetku mora reakcija steči dovolj počasi, da zagotovimo zadosti časa, potrebnega za prevoz in vgrajevanje betona. Ko pa je postopek vgrajevanja betona enkrat zaključen, je zaželeno da se beton čim hitreje začne strjevati. Na proces vezanja vpliva več faktorjev, kot so finost mletja cementa, dodatki (zaviralci in pospeševalci vezanja), količina dodane vode in temperatura materialov v času mešanja. [1]

### **2.2.1 Preskušanje svežih cementnih mešanic**

Beton je zaradi svojih dobrih lastnosti v svežem in strjenem stanju najbolj uporabljan gradbeni material danes. Kljub temu, da v takšni ali drugačni obliki obstaja že stoletja, pa smo še vedno priča različnim težavam, ki so največkrat povezane z lastnostmi cementnih mešanic v svežem stanju. Skupek teh lastnosti najlaže opišemo z besedo obdelavnost, za ugotavljanje katere nam je na voljo kar precej metod, standardiziranih in nestandardiziranih. Nekatero izmed teh metod v praksi obstajajo že precej desetletij, medtem ko se novejša metode razvijajo skupaj z razvojem novih tipov betonov, kot so samozgoščevalni in lahko-vgradljivi betoni ter betoni z raznimi dodanimi materiali (žlindra, elektrofiltrski pepel, kamena moka, polimeri, vlakna). [14]

Preskusnih metod je precej, kategoriziramo pa jih lahko na več načinov. Eden izmed njih je po Tattersallu, ki je razdelil metode v tri razrede (preglednica 11), pri čemer lahko večino metod uvrstimo v II. In III. razred. Drugi način, ki je dandanes najbolj dosleden, pa je delo NIST (National Institute of Standards and Technology), ki je razdelil obstoječe preskuse glede na vrsto toka betona, ki se ustvari med preskušanjem. (preglednica 12).

**Preglednica 11:** Razredi preskusnih metod svežega betona po Tattersallu [28]

<b>Razred I Kvalitativno</b> Obdelavnost, Tečenje, Zgoščevalnost, Črpnost	Uporabno za splošen opis brez kvalificiranja
<b>Razred II Empirično kvantitativno</b> Posed, Stopnja zgoščenosti, Vebe čas, Razlez	Uporabno za preprost kvantitativen opis obnašanja pod določenimi pogoji in v določenih okoliščinah
<b>Razred III Temeljno kvantitativno</b> Viskoznost, Mobilnost, Napetost na meji tečenja	Uporabno strogo skladno z definicijami standarda

**Preglednica 12:** Razredi preskusnih metod svežega betona po NIST [28]

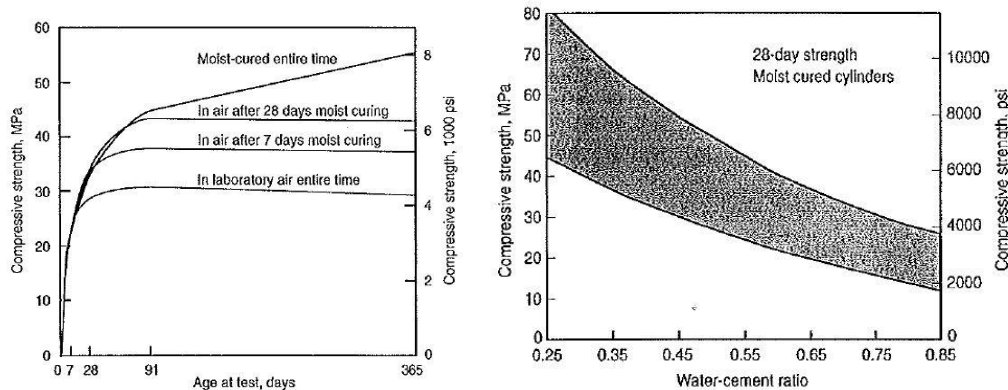
<b>Kategorija</b>	<b>Definicija</b>
Omejen tok	Material teče zaradi lastne teže ali pod določenim pritiskom skozi ozko odprtino
Prosti tok	Material teče zaradi lastne teže ali vanj, zaradi gravitacije, prodira nek predmet
Preskus z vibracijami	Material teče zaradi vibracij
Rotacijski reometri	Material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

### 2.3 Nekatere lastnosti betona v strjenem stanju

Trdnost enkrat vgrajenega betona s časom narašča v večji meri, če je zadoščeno nekaterim pogojem. Prvi izmed štirih kriterijev je ta, da je v betonu še vedno prisoten nehidratiziran cement. Drugi pogoj narekuje, da beton ostaja vlažen do te mere, da njegova relativna vlažnost ne pade pod 80%. Ostala dva pogoja sta še temperatura nad lediščem ter zadostna količina prostora, da se cement lahko dokončno hidratizira.

Ko je govora o trdnosti betona največkrat govorimo o tlačni trdnosti  $f_c$ . Definiramo jo lahko kot največjo izmerjeno odpornost betonskega vzorca (prizme ali valja) na tlačno osno silo. Običajno jo izrazimo v megapaskalih (MPa). Merimo pa jo praviloma po pretečenih 28 dneh od vgraditve.

Sedemdnevna trdnost ponavadi znaša 75% 28-dnevne, 56- in 90- dnevna trdnost pa sta še za 10-15% večji od 28-dnevne. Tlačna trdnost, ki jo vzorec betona doseže, je v veliki meri odvisna od vodocementnega faktorja, stopnje hidratacije, nege, okolja ter starosti betona.



Slika 1: Vpliv nege (levo) in vodocementnega faktorja (desno) na tlačno trdnost betona [1]

Natezna trdnost betona je bistveno manjša od njegove tlačne trdnosti, kljub temu pa nekaj doprinese k nosilnosti, ko je to potrebno. Glede na obremenitev jo razdelimo na dve vrsti. Upogibno natezno trdnost betona potrebujemo pri dimenzioniranju hodnikov in plošč, njena velikost pa je premosorazmerna s tlačno trdnostjo in sicer znaša od 15-20% tlačne trdnosti betona. Cepilno natezno trdnost betona največkrat potrebujemo za račun obremenitev, ki povzročajo razpoke v betonu. Njena velikost znaša približno 7-10% tlačne trdnosti betona  $f'_c$ .

Ena najpomembnejših lastnosti strjenega betona je tudi trajnost. To lahko definiramo kot sposobnost betona, da ohrani svoje fizikalne lastnosti kljub različnim vremenskim vplivom, vdoru kemikalij in obrabi. Različni betoni imajo različne zahteve po trajnosti, odvisno od vplivov okolja, katerim je beton podvržen in od želenih lastnosti.

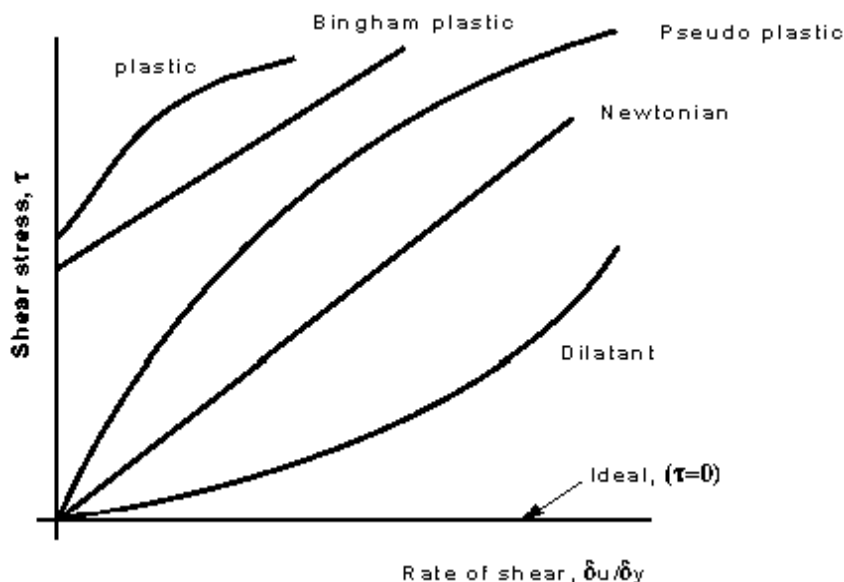
Življenjsko dobo betona določajo sestavine betona, količinska razmerja med sestavinami, kompatibilnost sestavin, ter način vgradnje in nege betona. [1]

### 3 REOLOGIJA SVEŽIH BETONOV IN MALT

#### 3.1 Splošno

Reologija je veda, ki se ukvarja z deformiranjem in tečenjem snovi, pri čemer snov lahko predstavlja bodisi trdno snov, bodisi tekočino. Reologija preučuje povezavo med silo in deformacijo v nekem časovnem obdobju. V okviru reologije večkrat slišimo še izraza viskometrija in viskoznost. Prvi pomeni podskupino reologije, ki se natančneje ukvarja z relacijo med silo in hitrostjo deformiranja, viskoznost pa je definirana kot upor proti tečenju oziroma upor, s katerim se tekočina upira deformaciji. Uporaba reologije na področju cementnih mešanic ima marsikatero prednost. Tako lahko lažje razumemo interakcije med komponentami mešanic, dobimo pa tudi vpogled v samo strukturo materiala. Reološke meritve so primerne tudi za kontrolo kakovosti, tako surovin kot tudi končnih produktov, uporabljamo pa jih tudi za preskušanje in kontrolo novih produktov na trgu.

Reometri za betone in/ali malte, ki jih najdemo na tržišču, pri svojih meritvah predpostavijo, da velja za oba materiala model Binghamove ali Nenevtonske tekočina, kljub temu, da se velikokrat obnašajo kot Newtonska tekočina, vendar imajo na meji tečenja ponavadi relativno veliko strižno napetost.



Slika 2: Modeli za opis tekočin [18]

Binghamov model opišemo z enačbo:

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

V tej enačbi sta dve konstanti,  $\tau_0$  in  $\mu$ , ki opisujeta obnašanje materiala.  $\tau_0$  pomeni napetost na meji tečenja,  $\mu$  pa predstavlja koeficient viskoznosti, ki povezuje linearno odvisni strižno napetost ( $\tau$ ) in strižno hitrost ( $\dot{\gamma}$ ). Ker konstant  $\tau_0$  in  $\mu$  neposredno ne moremo določiti, za potrebe meritev izpeljemo nove enačbe z merljivimi parametri. Tako rezultat meritve najpogosteje podamo v obliki enačbe z relativnimi paramettri:

$$T = Y + V \cdot N$$

Pri tem T pomeni navor oziroma upor proti striženju, Y predstavlja silo pri kateri se beton začne gibati, V je mera za odpornost betona proti naraščajoči hitrosti gibanja in N je hitrost vrtenja.

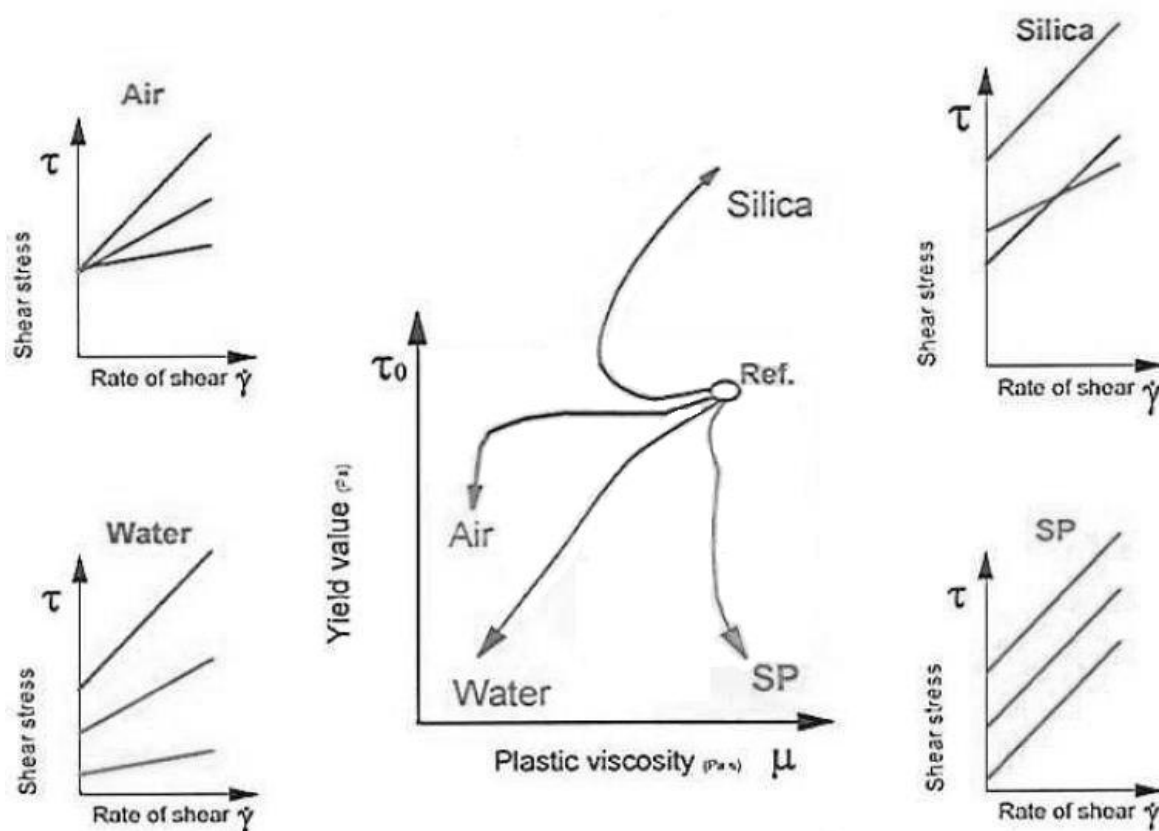
Parametra  $\tau_0$  in  $\mu$  pa določimo iz Y in V s pomočjo Reiner-Riwlingovih izrazov [24].

Rezultate reoloških preiskav najlažje in najboljše opiše diagram, ki mu rečemo "reograf". Sestavljata ga dve količini in sicer strižna napetost na meji tečenja ( $\tau_0$ ) na y-osi ter koeficient viskoznosti ( $\mu$ ) na x-osi. [14]

### 3.2 Vpliv sestavin betona na reološke lastnosti sveže mešanice

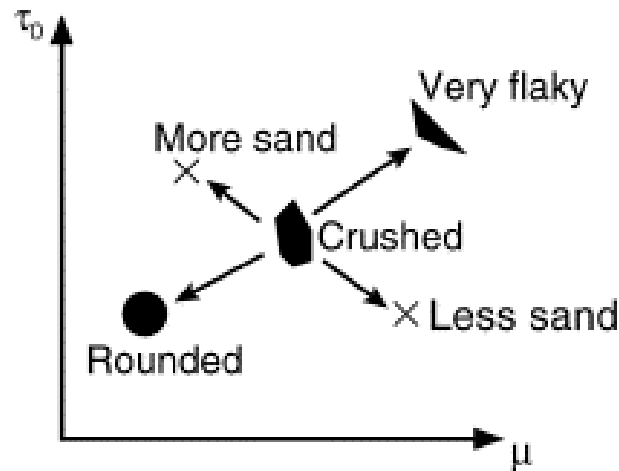
Raznolikost betonske sestave močno vpliva tudi na reološke parametre. S pomočjo reografa je v nadaljevanju predstavljenih nekaj primerov različnih vplivov komponent betona, ki tako ali drugače spreminjajo obliko diagrama, torej razmerje med strižno napetostjo na meji tečenja in viskoznostjo.

Na sliki 3 so prikazani vplivi vode, zraka, plastifikatorja ter mikrosilike glede na referenčno točko reografa. Iz diagrama je razvidno, da večja količina vode pomeni pomikanje točke proti izhodišču, kar pomeni da se zmanjšata oba parametra, tako strižna napetost na meji tečenja, kot tudi viskoznost. Vsebnost zraka v manjših količinah učinkuje samo na viskoznost betona, v primeru večje vsebnosti por pa se spremeni tudi strižna napetost  $\tau_0$ . Plastifikator in mikrosilika na diagram delujeta precej podobno, največji vpliv imata na strižno napetost na meji tečenja, medtem ko se vrednost viskoznosti bistveno ne spreminja. [14]



Slika 3: Vplivi sestavin betona na reološke lastnosti sveže mešanice [24]

Reograf na sliki 4 pa predstavlja, kako različne vrste agregata vplivajo na reološka parametra  $\tau_0$  in  $\mu$ . Referenčno točko predstavlja drobljen agregat. Kot lahko vidimo, zaobljen agregat deluje podobno kot voda, saj pomakne točko proti izhodišču. Ravno nasprotno pa se točka pomakne v primeru ostrorobega ploščatega agregata, ki poveča oba parametra in točko premakne v smeri stran od izhodišča. Prikazano je še delovanje drobnih frakcij, katerega bistvo je, da večja količina drobnih frakcij poveča vrednost strižne napetosti na meji tečenja, obenem pa zmanjšuje viskoznost. Zmanjševanje drobnih frakcij ima ravno nasprotno delovanje, torej se strižna napetost na meji tečenja zmanjšuje medtem ko se na drugi strani viša viskoznost. [14]



Slika 4: Vpliv lastnosti agregata na reološke lastnosti sveže mešanice [24]

### 3.3 Rotacijski reometri in principi merjenja

Naprave, ki merijo strižno napetost materiala pri različnih hitrostih, imenujemo reometri. Preskušanje betona na reometrih, namenjenih tekočinam in polimerom ne da uporabnih rezultatov, zato je bilo potrebno najti nove rešitve na tem področju in razvitih je bilo precej različnih naprav, ki so primerne za specifičnost preskušanja malt in betonov. Po principu delovanja tako reometre razdelimo na tri skupine in sicer na koaksialne valjaste reometre, reometre z vzporednimi ploščami ter mešalne reometre z rotorjem.

Princip delovanja koaksialnih cilindričnih reometrov temelji na dveh cilindrih: notranjem in zunanem. Eden izmed valjev se vrti z določeno kotno hitrostjo, medtem ko drugi valj miruje. Predstavnika te vrste reometrov in sicer ConTec Viscometer 5 smo uporabljali tudi v naših preiskavah, še eden izmed takih reometrov pa je CEMAGREF-IMG, ki je sicer precej večji in težji, ampak kljub temu zelo uporaben, saj je nameščen na prikolico in zaradi tega lahko prenosljiv.



*Slika 5: Reometer CEMAGREF-IMG [16]*

Druga vrsta reometrov so reometri z vzporednimi ploščami, ki jih razvijalci v zadnjem času pospešeno razvijajo. Rezultate meritev dobimo na podlagi striženja betona, ki ga povzročita vrtljivi, horizontalno postavljeni plošči. Vrednosti, ki jih dobimo, so običajno višje od tistih, ki jih pridobimo na podlagi preiskav s koaksialnimi reometri. Primer takega reometra je BTRHEOM.



*Slika 6: Reometer BTRHEOM [17]*

Tretjo skupino reometrov predstavljajo reometri, ki imajo na navpično lociranem rotorju nameščene lopatice. Reometri v tej skupini se med seboj razlikujejo predvsem po različnih lopaticah, ki služijo ustvarjanju upora, katerega nato merimo. Princip delovanja te skupine reometrov omogoča relativno majhne dimenzije napram ostalim reometrom, zato se tovrstne naprave veliko uporabljajo za delo na



terenu. Tipični primeri takih reometrov za običajne betone so ICAR Rheometer, Two – point rheometer, Fresh concrete Rheometer BT2 in IBB rheometer, za samozgoščevalne betone pa se uporablja ConTec Rheometer-4SCC. [15]

## **4 LASTNE PREISKAVE NA SVEŽIH CEMENTNIH MEŠANICAH**

### **4.1 Uvod in cilji**

Poudarek eksperimentalnega dela je bil predvsem na preiskavah reoloških lastnosti svežih malt, katerih sestavo smo določili na podlagi sestave izbranih betonov ter primerjava dobljenih rezultatov z rezultati na izbranih betonih, ki so bili pridobljeni v okviru drugih diplomskih nalog. Vse preiskave smo opravili v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Glavni cilj preiskav je bil razviti oziroma modificirati metodo za formulacijo ekvivalentne malte iz betona. Preko primerjave preiskave razleza ter reoloških lastnosti malt in betonov se bo določila optimalna metoda formulacije ekvivalentne malte.

Za namen preiskav smo zasnovali 29 mešanic cementnih malt, vse pa so torej izhajale iz predhodno preskušanih betonov.

Osnovo nam je predstavljala mešanica betona, na podlagi katere smo po metodi CEM določili osnovno mešanico malte, tej pa smo nato dodajali razne kemijske in mineralne dodatke, spreminjali smo ji vodocementno razmerje, količino cementne paste ter sestavo agregata.

Za primerjavo in ovrednotenje konsistence malt in betonov smo izbrali preiskavo z razlezom, ki smo jo izvedli po standardih SIST EN 12350-5 in SIST EN 1015-3.

Poleg standardnih preiskav z razlezom smo na mešanicah izvajali predvsem preiskave z rotacijskim reometrom ConTec Viscometer 5, z merilnim sistemom prirejenim za merjenje na maltah, ki nam je dal še natančnejši vpogled v reologijo malt.

#### **4.1.1 Metoda CEM**

Glavni cilj pri razvoju metode CEM je bil zmanjšati število mešanic betona, potrebnih za določitev optimalne količine dodatkov. Princip CEM metode temelji na razvoju betonom ekvivalentnih malt, ki imajo primerljive reološke lastnosti z lastnostmi betona.

Pojem ekvivalentne malte je v metodi definiran kot mešanica, v kateri največja frakcija agregata ne presega 5mm, kar omogoča uporabo mešalcev za malto pri pripravi sveže mešanice. Pomembno je tudi, da reološke lastnosti malt lahko direktno, s preprostim preračunom, povežemo z reološkimi lastnostmi betonov. Ekvivalentna malta je bila v osnovi določena tako, da se je konkretna mešanica betona presegala na situ 5mm. Tako se pasta in agregat, ki ne padeta skozi sito izločita. Ker je sejanje betona čez sito 5mm dolgotrajno in težavno, smo pri našem pristopu preprosto izločili agregat grobih frakcij nad 4mm z računom.

V okviru sprejetega pristopa je bilo nato potrebno opredeliti preskuse, ki bodo karakterizirali ekvivalentno malto in tako potrdili želeno hipotezo. Glavni kriteriji pri izbiri merilne metode so zahtevali, da je metoda preprosta, omogoča izvedbo na betonu in maltah, pomembno pa je tudi, da ne zahteva velike in drage opreme. Upoštevajoč te kriterije je bila izbrana metoda z razlezom.

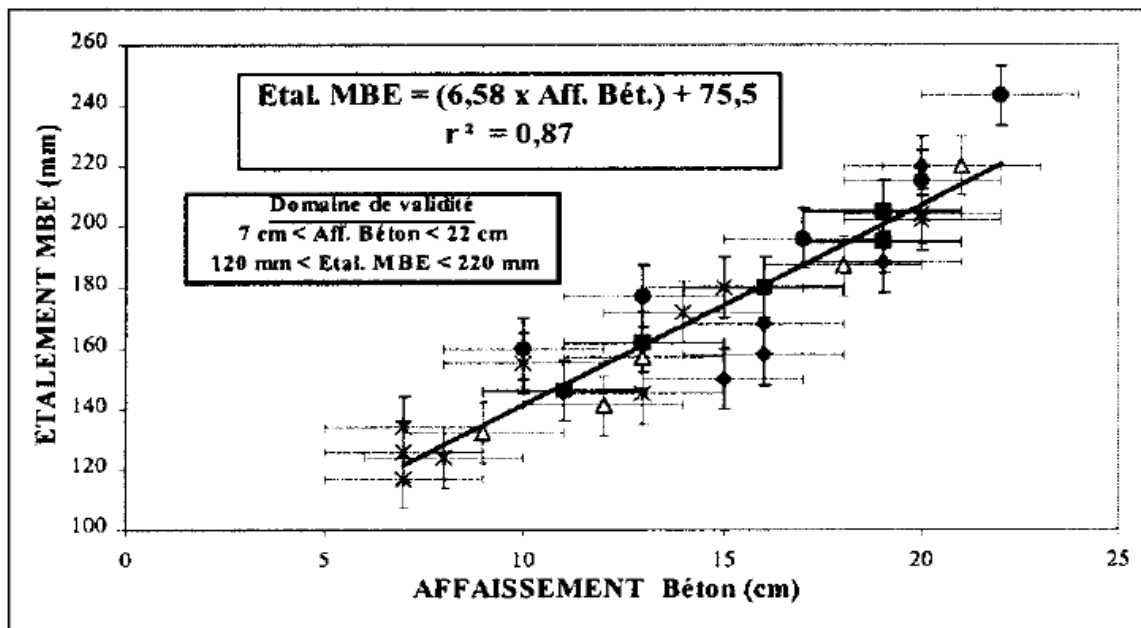
Za namen preiskave je bilo sestavljenih pet mešanic, od katerih vsaka temelji na drugačnem principu sestave:

1. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona (klasična cementna malta).
2. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona, dodana so groba zrna agregata pod 4mm.
3. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona, dodano je toliko finega agregata, da je specifična površina zrn enaka tako v malti kot v betonu.
4. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona, dodana so fina in groba zrna agregata in sicer v taki količini, da je skupni masni delež agregata v malti enak deležu agregata v betonu.
5. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona, dodana so fina in groba zrna agregata v taki količini, da se ujema skupna specifična površina zrn v malti in betonu.

Pri količini zamesne vode upoštevamo tako količino vode v sestavi, kot vodo iz agregata. Količino agregata 0/4 v sestavi malte dobimo z izračunom in sicer tako da količini agregata frakcije 0/4 v betonu prištejemo še nadomestek za vsa večja zrna, ki jih v malti prav tako predstavlja agregat 0/4. Ta nadomestek agregata lahko izračunamo po principu mase, kar je razmeroma preprosto, v mešanicah 3 in 5 pa je vpeljan pojem specifične površine agregatnih zrn. Izračunamo ga tako, da posamezne vrednosti mas grobih frakcij (večjih od 4 mm) v betonu pomnožimo s pripadajočo specifično površino zrn. Te vrednosti nato seštejemo in vsoto delimo s skupno površino zrn v betonu, dobljeno vrednost pa prištejemo k masi agregata 0/4, ki je bil uporabljen v betonu. Dobimo ekvivalentno maso agregata frakcije 0/4, ki ga uporabimo v sestavi ekvivalentne malte.

Za namene mešanja in kasnejših preiskav je pomembno, da je ves agregat okroglih zrn, biti pa mora nasičen z vodo, vendar površinsko suh, saj le tako lahko ohranimo konsistentnost preiskav.

Na podlagi preskušanj teh mešanic ob dodatku različnih superplastifikatorjev je bilo ugotovljeno, da so reološke lastnosti betonov in njim ekvivalentnih malt med seboj povezane, korelacijski faktor preiskav je znašal  $R^2 = 0,87$  (slika 7).



Slika 7: Korelacija med posedom betona in razlezom ekvivalentne malte [5]

Metoda CEM je zelo uporabna pri načrtovanju vrste in količine dodatka v betonih. S pomočjo reoloških lastnosti omogoča primerjavo različnih mešanic betonov in malt. V primeru, da poznamo pravo korelacijo lahko posed ali razlez betona tudi ocenimo, vendar pa moramo biti pri vsem tem zelo pazljivi, saj korelacija ni univerzalna, določa se jo eksperimentalno za vsako mešanico posebej, razen pri betonih, kjer v sestavi spreminjamo le količino dodatka. [5]

## 4.2 Metode preiskav

### 4.2.1 Določanje konsistence cementne malte in betona z razlezom

Postopek za preskušanje razleza na maltah po standardu EN 1015-3:1999 je zelo podoben tistemu na betonih (standard EN 12350-5:2009), razlika je le v dimenzijah pripomočkov, katerih vrednosti so v nadaljevanju podane v preglednici. Največja razlika je sicer v stresalni mizici, konstrukciji za preskušanje obeh tipov cementnih mešanic sta narejeni po različnih principih.

**Preglednica 13:** Dimenzije nekaterih pripomočkov za razlez malte in betona [3,4]

Pripomoček	Razlez malte	Razlez betona
Vrhna plošča na stresalni mizici	<i>Okrogle oblike premera 300 mm in debeline 4 mm</i>	<i>Kvadratne oblike, dimenzij 700x700 mm</i>
Konusni lijak	<i>višine 60 mm, premera spodaj 100 mm, premera zgoraj 70 mm in debeline 2 mm</i>	<i>višine 200 mm, premera spodaj 200 mm, premera zgoraj 130 mm in debeline vsaj 1,5 mm</i>
Nabijač	<i>okroglega prereza, premera 40 mm, dolžine cca. 200 mm in mase 0,250 kg</i>	<i>kvadratnega prereza dimenzij 40x40 mm dolžine cca. 200 mm, masa ni predpisana</i>
Merilni trak	<i>sposobnost merjenja premerov do 300 mm na milimeter natančno</i>	<i>sposobnost merjenja premerov do 700 mm na milimeter natančno</i>

Pred vsakim testom najprej obrišemo ploščo na stresalni mizici in notranjo površino konusnega lijaka, ter ju navlažimo. Konusni lijak nato postavimo na sredino plošče ter vanj vgradimo mešanico. Vgradimo jo v dveh plasteh, pri čemer vsako plast nabijemo z lesenim nabijačem z vsaj 10 udarci. Po končanem vgrajevanju počakamo 15 sekund, preden konusni lijak pazljivo vertikalno dvignemo s stresalne mizice. Nato začnemo s stresanjem mizice, čigar hitrost mora biti čim bolj konstantna, izvedemo približno en padec na sekundo, skupno pa 15 padcev.

Po končanem stresanju izmerimo razlez cementne mešanice v dveh pravokotnih smereh, končni rezultat pa je povprečna vrednost teh dveh meritev. [3,4]



Slika 8: Pripomočki za test z razlezom za betone (levo) in za malte (desno) [25,19]

#### 4.2.2 Preskus z reometrom

Pri naših preiskavah smo uporabili napravo ConTec Viscometer 5, ki spada med koaksialne cilindrične viskometre. Zasnovan je na osnovi Couette viskometra, ki deluje po principu notranjega in zunanjega cilindra. Notranji cilindar meri navor, medtem ko se zunanji cilindar vrti z določeno kotno hitrostjo.



Slika 9: ConTec Viscometer 5 v laboratoriju FGG

Naprava je popolnoma avtomatizirana, upravlja pa jo programsko orodje imenovano FreshWin. Vsak test traja približno od 3 do 5 minut, sam material pa je podvržen strižnim silam okoli ene minute.

Notranji cilindri so sestavljeni iz treh delov. Najpomembnejši je zgornji del cilindra, ki je tudi merilno orodje same naprave. Spodnji del je namenjen zmanjšanju oziroma izločitvi vplivov, ki nastanejo zaradi bližine dna posode. S tem je omogočeno, da se material prestriže samo v dveh glavnih smereh, kar je bistvenega pomena za navor, ki ga izmeri naprava. Tretji del cilindra pa predstavlja zgornji obroč, katerega vloga je zagotavljati konstantno višino  $h$ , kar pozneje omogoča nekatere poenostavitve v izračunih za določitev koeficienta viskoznosti  $\mu$  in meje tečenja  $\tau_0$ .

### 4.3 Uporabljeni materiali

#### 4.3.1 Cement

Pri naših preiskavah smo vzorce malt pripravili z dvema vrstama cementa. Cement CEM I 42-5R smo uporabili pri skupinah mešanic *mr1*, *mp1*, *pa* in *md1*. Gre za portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 in z visoko zgodnjo trdnostjo. Delež klinkerja v tem cementu znaša vsaj 95%. Uporaba te vrste cementa je zelo razširjena, primeren je tudi za najzahtevnejše gradnje. [23]

**Preglednica 14:** Pregled karakteristik cementa CEM I 42,5R [23]

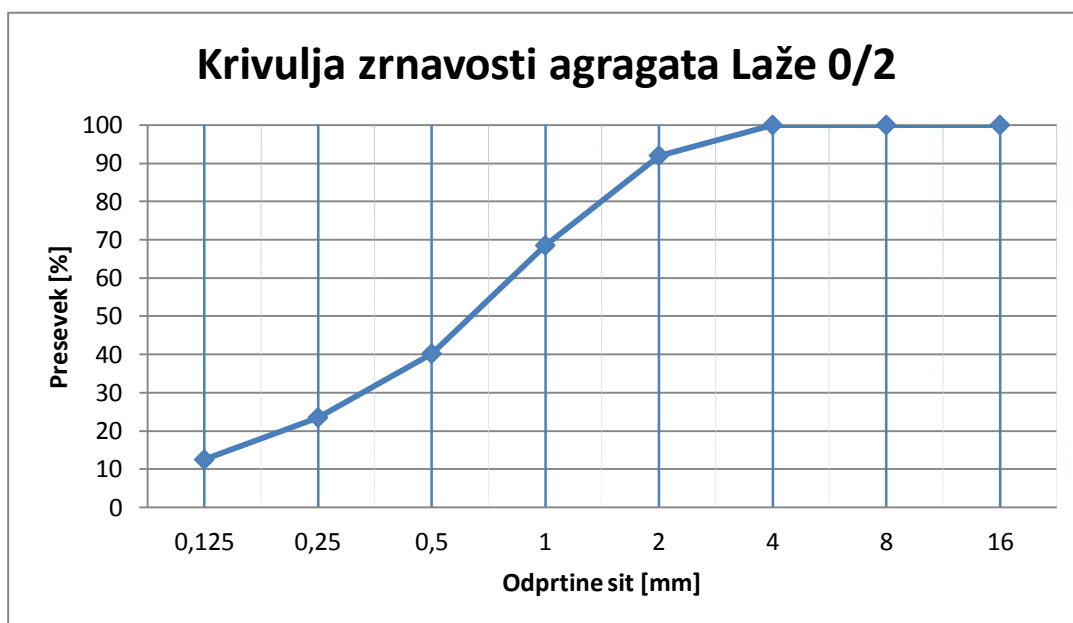
	Zahteve standarda	Dosežene povprečne vrednosti
<b>Kemijske zahteve</b>		
Vsebnost sulfata (SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0 %	> 3,0 %
<b>Mehanske in fizikalne zahteve</b>		
Zgodnja trdnost, 2 dneva	≥ 20,0 MPa	28,0 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5 - 62,5 MPa	54,0 MPa
Čas začetka vezanja	≥ 60 min	100 min
Prostorninska obstojnost	≤ 10 mm	≤ 1 mm

Druga vrsta cementa, ki smo jo uporabili pa je CEM II/A-M (LL-S) 42,5R. To je portlandski mešani cement z dvema mineralnima dodatkomoma in sicer apnencem in žlindro. Vsebuje vsaj 80% klinkerja, apnec in žlindra zavzemata od 6 do 20%, do 5% pa se v njem nahaja tudi polnil. V našem primeru smo ga uporabili za mešanice *ma1*, *ma2* in *ma3*, sicer pa se v praksi uporablja predvsem za zahtevnejše gradnje, pri katerih je pomembna visoka zgodnja trdnost, s tem cementom pa se pripravljata tudi precej specialnih betonov kot sta brizgani in samozgoščevalni (SCC) beton. [20]

**Preglednica 15:** Pregled karakteristik cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5R [20]

	Zahteve standarda	Dosežene povprečne vrednosti
<b>Kemijske zahteve</b>		
Vsebnost sulfata (SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0 %	2,80 %
Vsebnost klorida	≤ 0,1 %	0,05 %
<b>Mehanske in fizikalne zahteve</b>		
Zgodnja trdnost, 2 dneva	≥ 20,0 MPa	27,0 MPa
Standarda trdnost, 28 dni	42,5 - 62,5 MPa	52,0 MPa
Čas začetka vezanja	≥ 60 min	180 min
Prostorninska obstojnost	≤ 10 mm	≤ 1 mm

#### 4.3.2 Agregat



Slika 10: Krivulja zrnivosti za agregat 0/2

#### 4.3.3 Voda

Za pripravo vseh cementnih mešanic smo uporabljali pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

#### 4.3.4 Mineralni dodatki

Od mineralnih dodatkov smo za potrebe naših preiskav uporabili samo dva in sicer mikrosiliko ter granulirano plavžno žlindro.

##### 4.3.4.1 Žlindra

Žlindro smo kot dodatek uporabili kot nadomestek za delež cementa v sestavi v dveh mešanicah. Za naše potrebe smo uporabili žlindro tržaške železarne. Gre za steklasto žlindro s 100% amorfno fazo homogene sestave s pretežno oglatimi zrnji različnih velikosti. Specifična masa žindre znaša 2,85 g/cm<sup>3</sup>, medtem ko je specifična površina 2.930 cm<sup>2</sup>/g. [22]

##### 4.3.4.2 Mikrosilika

Drugi praškast material, ki smo ga uporabili je mikrosilika s katero smo prav tako zamenjali del cementa v sestavi mešanice. Njena najpomembnejša lastnost je velika specifična površina zrn, zaradi katere se znatno poveča potreba po zamesni vodi. Iz tega razloga se mikrosiliko skoraj vedno uporablja v kombinaciji s kompatibilnim superplastifikatorjem. Uporabili smo izdelek slovenskega proizvajalca, ki zagotavlja, da mikrosilika izpolnjuje kriterije glede fizikalnih in kemijskih lastnosti navedenih v standardu SIST EN 13263 (Preglednica 16).

**Preglednica 16:** Deklarirane vrednosti z odstopanji po standardu SIST EN 13263-1 za mikrosiliko [22]

Lastnost	Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji
Vsebnost SiO <sub>2</sub>	> 85 %
Vsebnost kloridov (Cl)	< 3,0 %
Specifična površina	min. 15 m <sup>2</sup> /g, max 35 m <sup>2</sup> /g
Index aktivnosti	100%

#### 4.3.5 Kemijski dodatki

Tudi od kemijskih dodatkov smo uporabili samo dve vrsti, vendar smo tem vrstam dodatkov dali precej večji pomen, kar se odraža tudi v količini mešanic, ki vsebujejo enega ali pa celo oba dodatka,

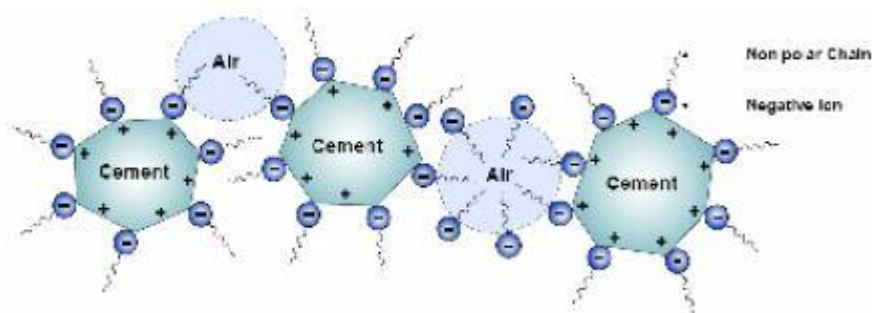


superplasifikator ter aerant, pri čemer je pomembno, da sta kompatibilna. Oba dodatka sta proizvod slovenskega proizvajalca in sta dobro uveljavljena v praksi.

#### 4.3.5.1 Aerant

Aerant smo v beton dodajali z namenom povečati stabilnost sveže mešanice. Za produkt, ki smo ga uprobili velja, da se ga dozira od 0,02 – 0,3 % glede na težo cementa. Proizvajalec v navodilih priporoča, da se ga dozira razredčenega v zamesni vodi. Količina por, ki je priporočljiva za beton se giblje od 3-5 %, odstotek pa je odvisen od namena uporabe betona in njegove sestave.

Aerant deluje tako, da v svež beton uvaja stabilne zračne mikro mehurčke, ki v strjenem betonu nato omogočajo sprostitev notranjih napetosti, ki nastanejo zaradi povečanja volumna pri zmrzovanju vode v kapilarnih porah. Hkrati prekinjajo kapilarni sistem por in na ta način delujejo kot zapora, ki zmanjšuje prodiranje vode oz. raztopin soli s površine betona v notranjost ter tako izboljšajo vodoneprepustnost betona, izboljša pa se tudi obdelavnost sveže mešanice.



Slika 11: Delovanja aeranta v cementni mešanici [27]

Izdelek je skladen s standardoma SIST EN 934-1 in SIST EN 934-2, kar pomeni da izpolnjuje zahteve glede fizikalnih in kemijskih lastnosti. (Preglednica 17)

**Preglednica 17:** Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji za uporabljen aerant [22]

Lastnost	Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji
Izgled	tekočina rumeno-rjave barve
Gostota	1,01 kg/dm <sup>3</sup> (> 1 kg/dm <sup>3</sup> - 1,03 kg/dm <sup>3</sup> )
Vsebnost suhe snovi	5,0 ± 0,5 %
pH	12 ± 1
Vsebnost kloridov (Cl <sup>-</sup> )	ne vsebuje kloridov
Vsebnost alkalij	< 1,0 %

#### 4.3.5.2 Superplastifikator

Za potrebe našega eksperimentalnega dela smo uporabili superplastifikator nove generacije (hiperplastifikator) na osnovi polikarboksilatov. Polikarboksilati delujejo tako, da v mešanici povzročijo elektrostatični odboj med delci, struktura superplastifikatorja v obliki dolgih prečnih verig molekul pa deluje kot ovira med cementnimi delci (prostorska stabilizacija), ki so zaradi tega dlje časa razpršeni. S tem je daljši čas preprečeno njihovo kosmičenje, kar zmanjša potrebo po vodi in izboljša obdelavnost.



Slika 12: Shematični prikaz delovanja polikarboksilata [26]

Proizvajalec superplastifikatorja v tehničnem listu priporoča, da se ga dozira v količini 0,2-1,5 % glede na maso cementa. Za normalne betone je primerna dozacija do 0,6 % za SCC betone pa je primerna dozacija nekoliko večja. Superplastifikator se, podobno kot večina kemijskih dodatkov, dodaja skupaj z zamesno vodo, pri čemer je priporočljivo da ga dodamo, potem ko smo najprej dodali 70-80 % zamesne vode.

Superplastifikator je po svojih lastnostih skladen s standardom SIST EN 934-1. (Preglednica 18)

**Preglednica 18:** Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji za uporabljen superplastifikator [22]

Lastnost	Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji
Izgled	tekočina rjavo-rumene barve
Gostota	$1,06 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$
pH	$3 \pm 1$
Vsebnost kloridov (Cl)	ne vsebuje kloridov
Vsebnost alkalij	$< 3,0 \%$

#### 4.4 Priprava in sestava cementnih mešanic

##### 4.4.1 Postopek mešanja

Naše cementne mešanice smo pripravili v specialnem mešalcu RILEM-CEN, ki se istočasno obrača okoli dveh osi, in sicer okoli svoje vzdolžne ter planetarno okoli pogonske osi. Omogoča nam dve hitrosti mešanja (Preglednica 19)

**Preglednica 19:** Število obratov mešalca RILEM-CEN v obeh hitrostih

Hitrost mešanja	Število obratov na minuto okoli lastne osi	Število obratov na minuto okoli pogonske osi
I	$140 \pm 5$	$62 \pm 5$
II	$285 \pm 10$	$125 \pm 10$

V našem primeru smo postopek priprave cementnih mešanic začeli tako, da smo najprej stehali vse potrebne komponente. Najprej smo v osušeno posodo za mešanje dali cement. Nato smo vklopili mešalec, ki začne z mešanjem v prvi hitrosti. V prvih 30 sekundah smo dodali vodo in kemijske dodatke, če so bili ti zahtevani. V naslednjih 30 sekundah smo ob mešanju v posodo previdno dodali še agregat. V tej fazi smo dodajali tudi mineralne dodatke, če so bili ti prisotni v recepturi. Mešalec smo nato preklopili na drugo hitrost in tako mešali nadaljnjih 30 sekund. Zatem smo mešalec ustavili in stene posode očistili prilepljene mešanice, ki se je tam nabrala med mešanjem. Po končanem čiščenju mešamo še 60 sekund na visoki hitrosti in vzorec je pripravljen na nadaljnje preskušanje. [2]

#### 4.4.2 Sestava cementih mešanic

Cementne mešanice smo sestavljali iz predhodno opisanih materialov, torej iz agregata, cementa, vode ter nekaterih kemijskih in mineralnih dodatkov. Zaradi uporabljenega drobnega agregata frakcije 0/2 naše cementne mešanice tehnično imenujemo malte.

##### SESTAVE MALT PO SKUPINAH

Prvo skupino mešanic smo pripravili po principu zmanjševanja vode, paste in dodajanja frakcije agregata. Za etalon smo uporabili mešanico mr1e, pri naslednjih treh pa smo zmanjšali količino vode za 5, 10 in 15 odstotkov glede na etalon. Pri mešanici mr1pa smo zmanjšali celotno količino cementne paste, torej cementa in vode, za 4,38 % glede na prvotno vrednost. Zadnjo mešanico smo prav tako pripravili z zmanjšano količino paste, dodali pa smo nekaj agregata frakcije 1/2, kot nadomestek za frakcijo 2/4 po principu CEM metode.

##### **Preglednica 20:** Sestava družine mešanic mr1

materiali	mešanice					
	mr1e	mr15	mr110	mr115	mr1pa	mr1p12
agregat [g]	6050	6050	6050	6050	6050	6050
cement [g]	2600	2600	2600	2600	2486	2486
voda [g]	1362	1294	1226	1158	1302	1302
dodatek <sup>a)</sup> [g]	-	-	-	-	-	224

<sup>a)</sup> kot dodatek smo uporabili agregat frakcije 1/2

Pri drugi skupini mešanic smo malte sestavili podobno kot pri prvi, največja razlika pa je dodan plastifikator pri mešanicah mp1. Etalon je sestavljen iz agregata, cementa, vode in plastifikatorja, naslednje tri mešanice pa ohranijo vse sestavine v enaki meri kot etalon, spremeni se zopet samo vsebnost vode, ki se manjša za 5 %. Naslednje tri mešanice (mp1pa, mp1p12 in mp1pp) imajo vse zmanjšano količino paste za 4,38 %, s tem da je pri mp1p12 dodana frakcija agregata 1/2, pri zadnji mešanici pa je količina superplastifikatorja prilagojena na zmanjšano količino cementa. Frakcija 1/2 je prav tako kot pri prejšni skupini mešanic dodana z namenom nadomestiti frakcijo 2/4, ki je del frakcije 0/4 po principu, opisanem v CEM metodi.

**Preglednica 21:** Sestava družine mešanic mp1

materiali	mešanice						
	mp1e	mp15	mp110	mp115	mp1pa	mp1p12	mp1pp
agregat [g]	6050	6050	6050	6050	6050	6050	6050
cement [g]	2600	2600	2600	2600	2486	2486	2486
voda [g]	1356	1294	1226	1158	1302	1302	1302
dodatek1 <sup>a)</sup> [g]	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,46
dodatek2 <sup>b)</sup> [g]	-	-	-	-	-	224	-
a) kot dodatek smo uporabili superplastifikator							
b) kot dodatek smo uporabili agregat frakcije 1/2							

V tej družini malt je bistvenega pomena dodajanje aeranta, sicer pa je princip dodajanja ostal enak kot pri prejšnji skupini. Prva mešanica je etalon, pri naslednjih treh smo zmanjševali vodo za 5 % in pri zadnjih treh smo zmanjšali cementno pasto za 4,38 %, pri čemer smo pri mešanici ma1p12 dodali frakcijo 1/2, mešanici ma1pp pa smo prilagodili količini superplastifikatorja in aeranta, saj se ta potreba po teh dveh dodatkih izračuna iz količine cementa, le ta pa je bila zmanjšana.

**Preglednica 22:** Sestava družine mešanic ma1

materiali	mešanice						
	ma1e	ma15	ma110	ma115	ma1pa	ma1p12	ma1pp
agregat [g]	6045	6045	6045	6045	6045	6045	6050
cement [g]	2600	2600	2600	2600	2486	2486	2486
voda [g]	1360	1292	1224	1156	1300	1300	1302
dodatek1 <sup>a)</sup> [g]	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,49
dodatek2 <sup>b)</sup> [g]	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,49
dodatek3 <sup>c)</sup> [g]	-	-	-	-	-	224	-
a) kot dodatek smo uporabili superplastifikator							
b) kot dodatek smo uporabili aerant							
c) kot dodatek smo uporabili agregat frakcije 1/2							

Etalon za skupino malt md predstavlja mešanica mp1e. Pri sledečih cementih mešanicah pa smo glede na etalonsko mešanico mp1e spreminjali količino superplastifikatorja in sicer smo ga zmanjšali za 5, 10, 15, 25 in 35 %. Te mešanice ne vsebujejo nobenih ostalih dodatkov.

**Preglednica 23:** Sestava družine mešanic md

materiali	mešanice				
	md5	md10	md15	md25	md35
agregat [g]	6040	6040	6040	6040	6040
cement [g]	2600	2600	2600	2486	2486
voda [g]	1356	1356	1356	1356	1356
dodatek <sup>a)</sup> [g]	7,41	7,02	6,63	5,85	5,07

<sup>a)</sup> kot dodatek smo uporabili superplastifikator

Sestava naslednjih mešanic je temeljila na ideji, da del cementa v maltah nadomestimo z mineralnimi dodatki in sicer s siliko, žlindro in tufom. Pri vseh treh maltah je bil prisoten tudi superplastifikator, ki je bil določen na celotno maso veziva, ki ga v tem predstavljata cement in mineralni dodatek skupaj. V malti ma3zl je odstotek plastifikatorja glede na vezivo znašal 0,2 % v ma3sil pa je bil 0,3 %. Ti dve mešanici tudi predstavljata etalon za to skupino. Superplastifikator je bil pri maltah ma2 zmanjšan za 35 %.

**Preglednica 24:** Sestava družine mešanic ma2

materiali	mešanice			
	ma3zl	ma3sil	ma2zl	ma2sil
agregat [g]	6082	6094	6082	6094
cement [g]	1560	2340	1560	2340
voda [g]	1356	1320	1356	1320
silika [g]	-	190	-	190
žlindra [g]	988	-	988	-
tuf [g]	-	-	-	-
dodatek <sup>a)</sup> [g]	5,1	7,59	3,32	4,93

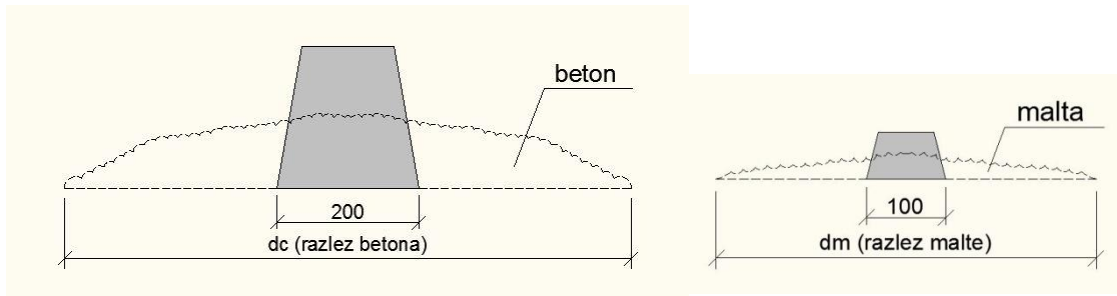
<sup>a)</sup> kot dodatek smo uporabili superplastifikator

## 5 REZULTATI IN KOMENTAR

### 5.1 Preskus z razlezom

#### 5.1.1 Izračun pričakovanega razleza

Naš princip izračuna pričakovanega razleza malt je temeljil na osnovi premerov baz stožcev za preiskavo z razlezom pri maltah oziroma betonih.



Slika 13: Uporabljene dimenzije stožcev in razlezov za izračun pričakovanega razleza malt

Za izračun pričakovanega razleza malt ( $d_M$ ) smo uporabili naslednjo formulo:

$$d_M = (d_C - 200) / 200 * 100 + 100$$

### 5.1.2 Primerjava razlezov

Pri prvi skupini mešanic smo pričakovan razlez izračunali na podlagi razleza betone enake sestave. Pričakovan razlez je znašal 215 mm, ki pa ga z nobeno od mešanic nismo dosegli. Še najbolj smo se približali z osnovno mešanico mr1e, z zmanjševanjem vode pa se je seveda zmanjševal tudi razlez. Povečal se je zopet pri zadnjih dveh sestavah, torej pri mešanicah z manjšo količino paste, zadnja pa ima dodano še frakcijo agregata 1/2.

**Preglednica 25:** Primerjava pričakovanih razlezov mešanic mr1 z referenčno mešanico mr1e

	mešanice					
	mr1e	mr15	mr110	mr115	mr1pa	mr1p12
razlez betona	430					
pričakovan razlez malte	215					
dejanski razlez malte	<b>199</b>	174	169	159	191	192

Pri mešanicah z dodanim plastifikatorjem so bili rezultati nekoliko drugačni. Izračunan pričakovan razlez je znašal 272,5 mm, ki smo ga z večino mešanic močno presegle. Pri osnovni mešanici mp1e in pri zadnjih treh mešanicah smo razlez 300 mm, kolikor znaša tudi premer plošče na stresalni mizici,

dosegli še preden smo mizico stresli 15 – krat. Zelo blizu pričakovanemu razlezu smo bili tako z mešanico mp110, katere posebnost je, da ima količino vode zmanjšano za 10 %.

**Preglednica 26:** Primerjava pričakovanih razlezov mešanic mp1 z referenčno mešanico mp1e

	mešanice						
	mp1e	mp15	mp110	mp115	mp1pa	mp1p12	mp1pp
razlez betona	545						
pričakovan razlez malte	272,5						
dejanski razlez malte	300 (11)	279	<b>268</b>	264	300 (5)	300 (8)	300 (8)

V naslednji družini mešanic je posebnost aerant, katerega vsebnost je bistveno vplivala na rezultate, saj smo s to skupino dobili rezultate, ki so najbolj odstopali od pričakovanih. Pričakovan razlez je namreč znašal 290 mm, naše mešanice pa se temu niso niti približale. Največji razlez smo dosegli z osnovno mešanico in sicer 228 mm, vse ostale pa so imele razlez precej manjši.

**Preglednica 27:** Primerjava pričakovanih razlezov mešanic ma1 z referenčno mešanico ma1e

	mešanice						
	ma1e	ma15	ma110	ma115	ma1pa	ma1p12	ma1pp
razlez betona	580						
pričakovan razlez malte	290						
dejanski razlez malte	<b>228</b>	210	176	161	204	225	214

V družini mešanic, kjer se za razliko od ostalih ne spreminja voda, temveč plastifikator, osnovo predstavlja mp1e. Če smo pri skupini mešanic mp1 za najboljši približek pričakovanemu razlezu morali zmanjšati vodo za 10 %, smo morali v tem primeru za podoben rezultat zmanjšati plastifikator kar za 35 %. Pričakovan razlez je znašal 272,5 mm, izmerjen razlez mešanice md35 pa 269 mm.

**Preglednica 28:** Primerjava pričakovanih razlezov mešanic md z referenčno mešanico mp1e

	mp1e	mešanice				
		md5	md10	md15	md25	md35
razlez betona	545					
pričakovan razlez malte	272,5					
dejanski razlez malte	300 (11)	300 (11)	300 (9)	300 (12)	300	<b>269</b>

Mešanice z mineralnima dodatkom, siliko in žlindro so nam dale najboljše rezultate. Osnovo glede na predhodno preskušane betonske mešanice predstavljata ma3zl in ma3sil, glede na katere smo tudi izračunali pričakovane razleze, ti so znašali 262,5 mm za mešanico z žlindro in 232,5 mm za mešanico

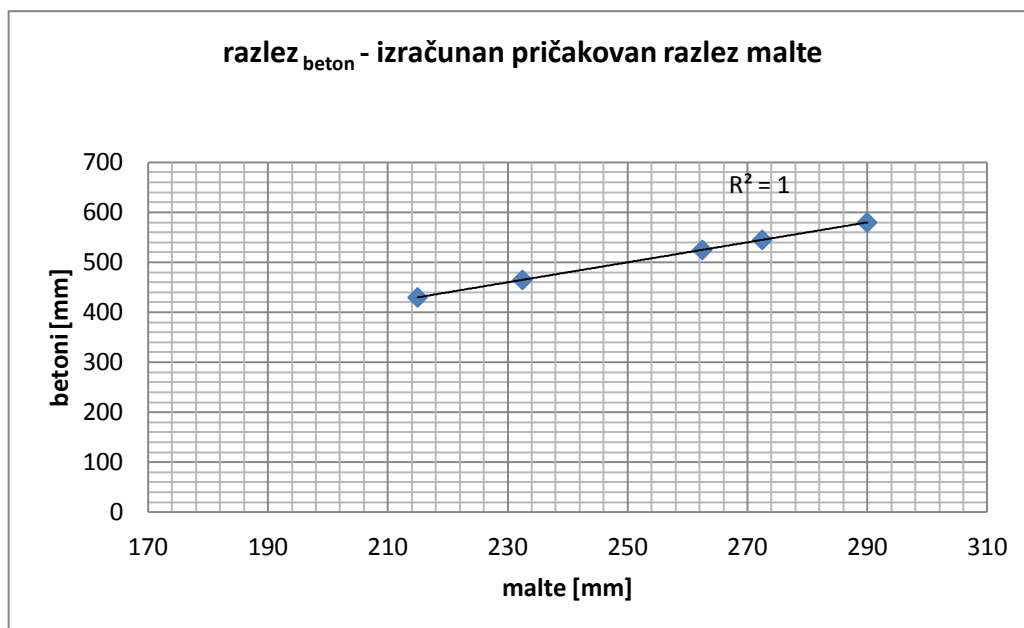


z dodano mikrosiliko. Dejanski razlez pri ma3zl je precej presegel pričakovanega, saj se je malta razlila preko plošče še preden smo 15-krat stresli mizico, zato pa smo toliko boljši rezultat dobili z mešanico ma2zl, kjer smo se s 265 mm pričakovanemu razlezu približali na zanemarljivih 2,5 mm. Pri vzorcih z mikrosiliko je bila situacija ravno obratna, saj smo najboljši približek dosegli kar z osnovo ma3sil, izmerili smo namreč 236 mm razleza, pričakovan pa je znašal le nekaj milimetrov manj (232,5 mm). Razlez ma2sil je bil izmerjen na 194 mm, kar pomeni da je bil kar precej pod pričakovanim. Na splošno lahko vidimo, da smo s principom sestave mešanic ma2 dosegali povprečno okoli 40 mm manjše razleze kot z mešanicami ma3.

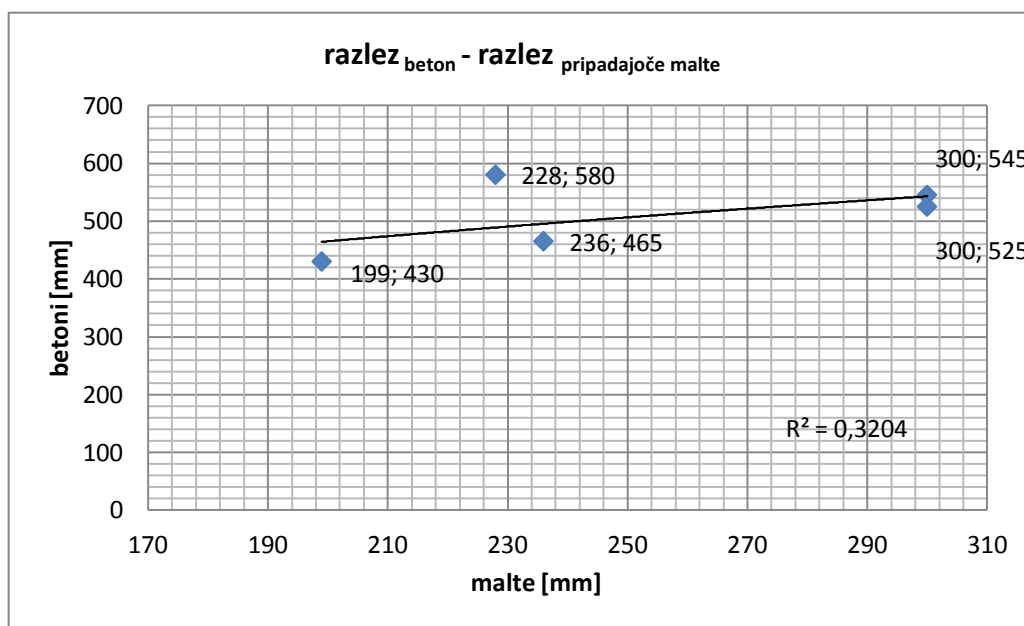
**Preglednica 29:** Primerjava pričakovanih razlezov mešanic z mikrosiliko in žlindro glede na referenčno mešanico ma3

	mešanice			
	ma3zl	ma3sil	ma2zl	ma2sil
razlez betona	525	465		
pričakovan razlez malte	262,5	232,5		
dejanski razlez malte	300 (13)	<b>236</b>	<b>265</b>	194

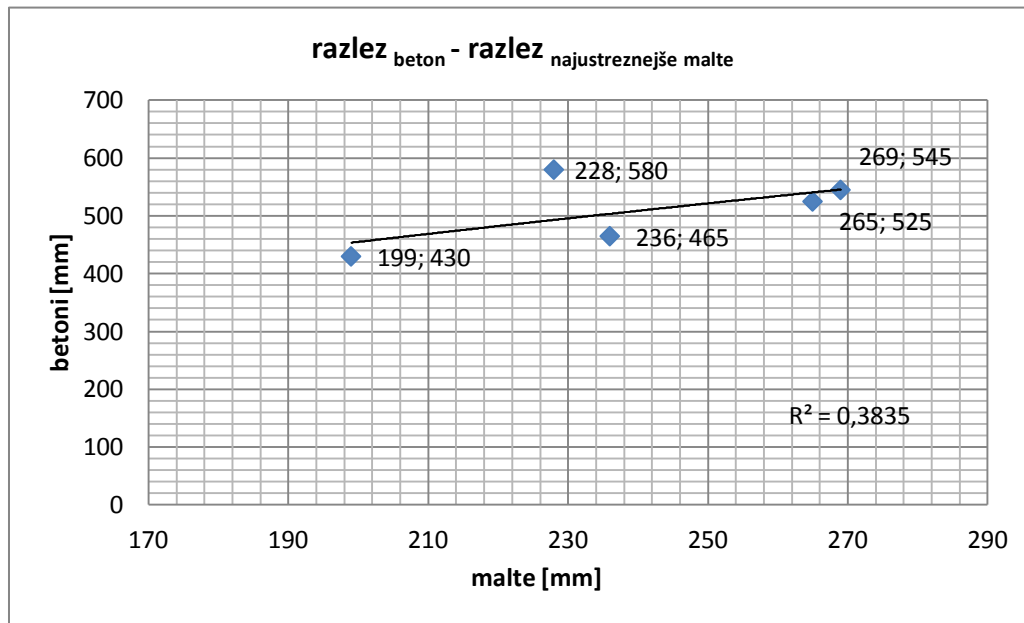
Za grafični prikaz smo izbrali primerjavo razlezov betona s tremi različnimi razlezi malt. Na sliki 14 je prikazana relacija med razlezom betona in pričakovanim razlezom malte. Korelacijski faktor je seveda 1, kar pomeni da bi imele malte s takim razlezom popolnoma enake ali korelirane reološke lastnosti kot pripadajoča betonska mešanica. Seveda pa take mešanice v realnosti ne obstajajo. Glede na našo hipotezo smo se jim poskušali približati z ekvivalentnimi maltami, ki smo jih nato korigirali. Na sliki 15 vidimo korelacijo med betoni in maltami, katerih sestava je bila direktno izračunana iz betonov. Opazimo, da je korelacijski faktor enak 0,3204. Le ta pa se zviša na naslednjem diagramu, kjer smo primerjali betone z maltami, ki imajo razleze najbližje pričakovanim razlezom. Korelacijski faktor se zviša na 0,3835, zato smo za te mešanice predpostavili boljšo korelacijo reoloških lastnosti.



Slika 14: Korelacija razlezov betona in izračunanega razleza



Slika 15: Korelacija med razlezi betona in razlezi pripadajočih malt

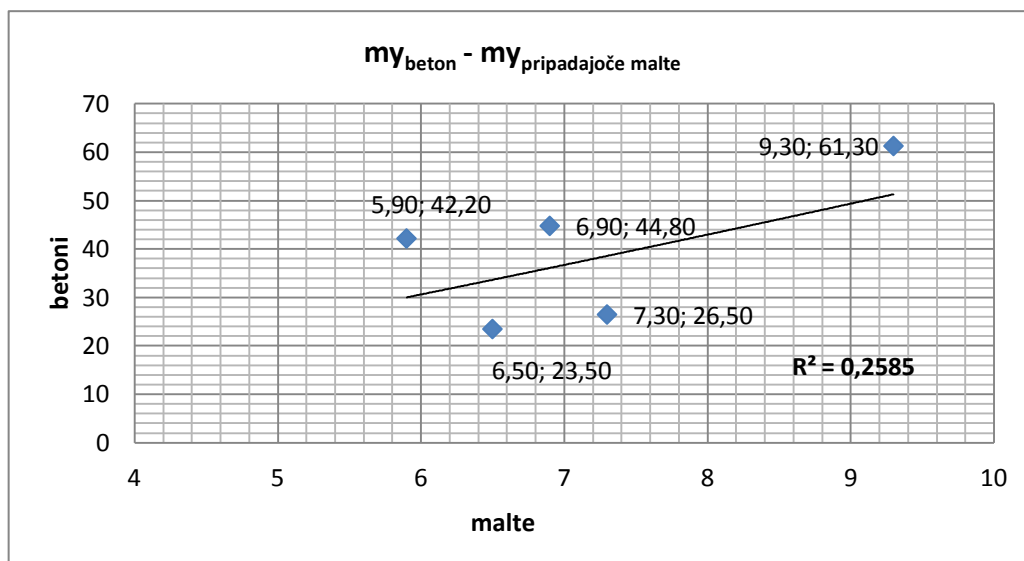


Slika 16: Korelacija med razlezi betona in razlezi najustreznejših malt

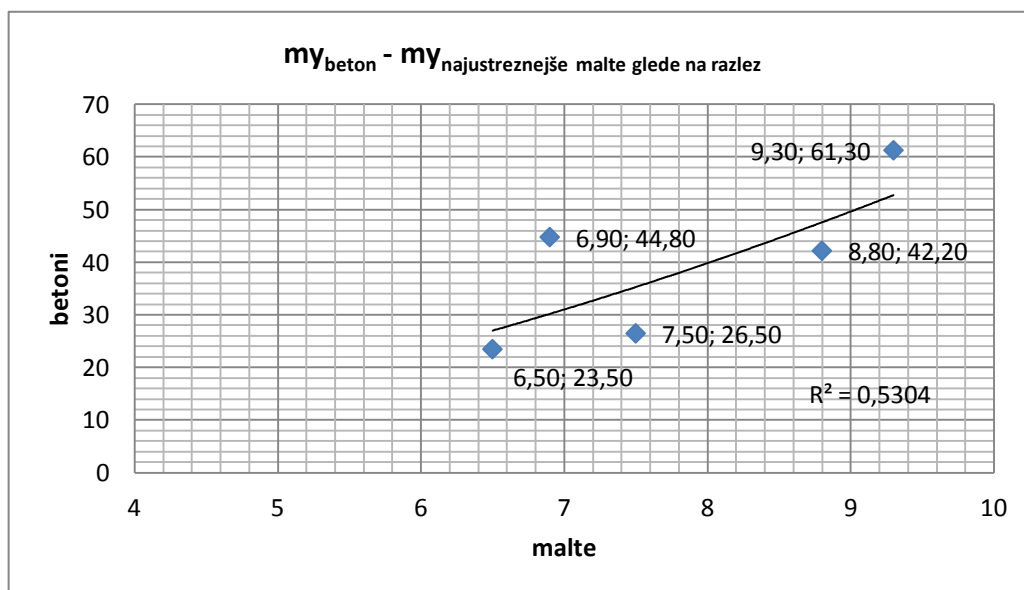
## 5.2 Rezultati preiskav z reometrom

Za opis našega eksperimentalnega dela na reometru ConTec Viscometer 5 smo si izbrali diagrame z dvema reološkima parametroma, ki smo jih za mešanice iz vrednotili s tem aparatom.

Najprej smo primerjali dve korelacije glede na koeficient viskoznosti mešanic. Na sliki 17 na diagramu vidimo prikazano korelacijo med  $\mu$  (my) betonov in  $\mu$  (my) pripadajočih malt. Opazimo lahko, da je korelacijski koeficient precej nizek, znaša samo 0,2585, kar pomeni, da s koeficientom viskoznosti težko opišemo povezavo med betoni in ekvivalentnimi maltami. Za več kot še enkrat pa se korelacijski faktor poveča, ko primerjamo viskoznost betonov in malt, ki so najustreznejše betonom glede na razlez (slika 18). Faktor  $R^2$  znaša kar 0,5304 iz česar lahko sklepamo, da obstaja povezava med razlezom mešanic in viskoznostjo.



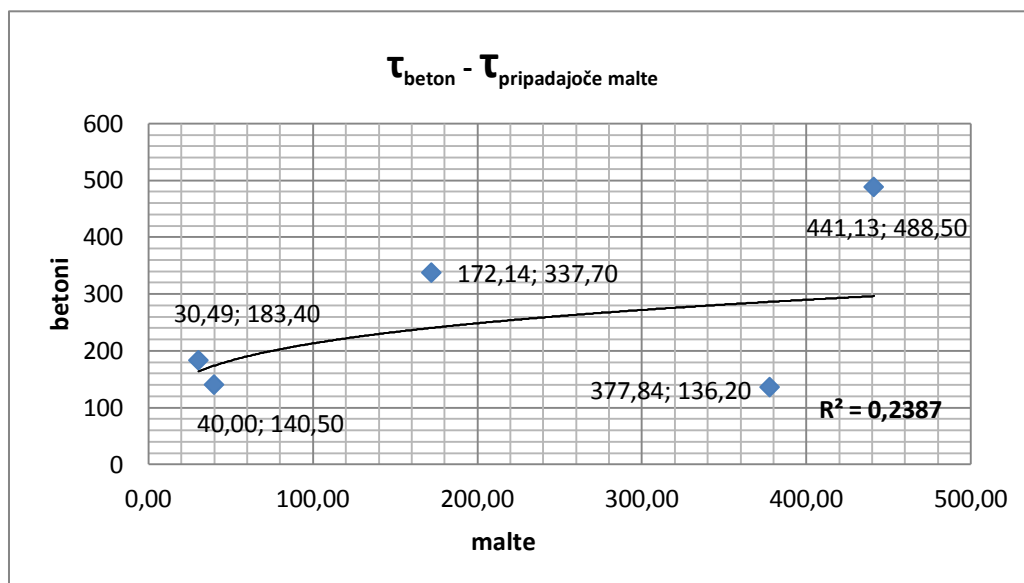
Slika 17: Korelacija med my betonov in my pripadajočih malt



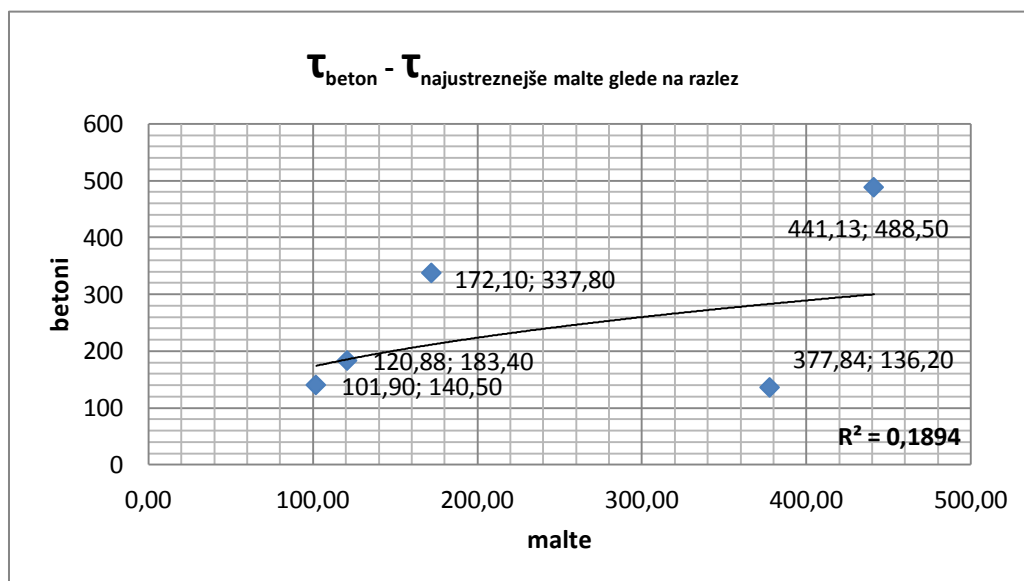
Slika 18: Korelacija med my betonov in my najustreznejših malt glede na razlez

Drugi parameter, ki smo si ga izbrali za vrednotenje reoloških lastnosti mešanic z reometrom je strižna napetost materiala na meji tečenja ( $\tau_0$ ). Pri tem parametru smo prišli do zelo zanimivih rezultatov, saj se je prvič zgodilo, da je bila korelacija med betoni in pripadajočimi maltami boljša od tiste, kjer smo

primerjali betone z najustrežnejšimi maltami glede na razlez. Razlika med korelacijskima faktorjema je znašala 0,0493. Pri tem je potrebno omeniti, da sta bila oba korelacijska faktorja zelo nizka (0,2387 in 0,1894), zaradi česar nekoliko boljša korelacija pri primerjavi betonov s pripadajočimi maltami niti nima večje vloge. Pri tako nizkih korelacijah lahko namreč ugotovimo, da povezava med razlezi in napetostjo na meji tečenja ne obstaja.



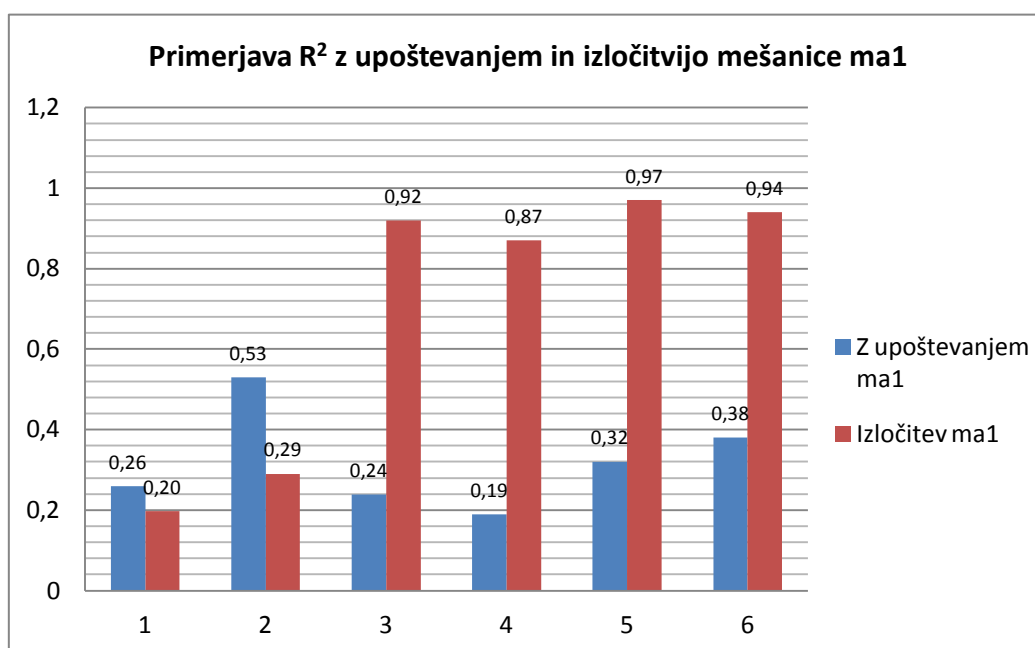
Slika 19: Korelacija med  $\tau$  betona in  $\tau$  pripadajoče malte



Slika 20: Korelacija med  $\tau_0$  betona in  $\tau_0$  najustrežnejše malte glede na razlez

## IZLOČITEV MEŠANIC Z AERANTOM

Opazili smo, da nam najslabše rezultate dajejo mešanice skupine ma1, ki vsebujejo aerant. V ta namen smo jih v grafičnih prikazih izločili iz obravnave in tako dobili bistveno boljše rezultate, kar se tiče razlezov in strižne napetosti na meji tečenja ( $\tau_0$ ). Korelacijski faktorji so se tam zelo približali 1, kar pomeni, da je korelacija med reološkimi lastnostmi neaeriranih malt in betonov zelo dobra. Boljše rezultate smo tokrat, zanimivo, dobili pri pripadajočih maltah in ne pri tistih, ki imajo ustrežnejši razlez, ampak razlike so bile relativno majhne.



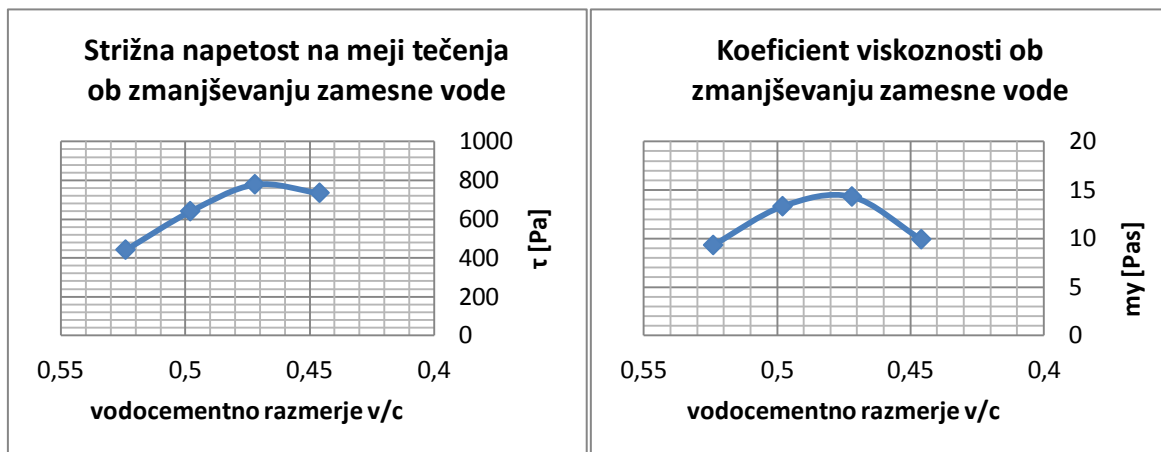
Slika 21: Primerjava korelacijskega faktorja za reološke parametre malte in betone z upoštevanjem in izločitvijo mešanic z aerantom

Na sliki 21 je primerjanih 6 primerov, stolpci, obarvani modro vedno predstavljajo korelacijo med betonom in pripadajočo malto, drugi, rdeče obarvani stolpci pa predstavljajo korelacijo med reološkimi parametri betona in najustreznejše malte glede na razlez. Stolpci pod številka 1 in 2 primerjajo koeficiente korelacije na podlagi reološkega parametra  $\mu$  (my), stolpci pod številka 3 in 4 so odvisni od napetosti na meji tečenja ( $\tau_0$ ), zadnja dva para stolpcev pa sta rezultat primerjave korelacije med razlezi betonov in malt.

## SPREMINJANJE REOLOŠKIH PARAMETROV OB SPREMINJANJU VODE IN PLASTIFIKATORJA

Da bi boljše razumeli, kako voda in plastifikator vplivata na reologijo svežega betona, smo za konec še grafično prikazali spreminjanje reoloških parametrov  $\mu$  (my) in  $\tau_0$  ob zmanjševanju vode in plastifikatorja.

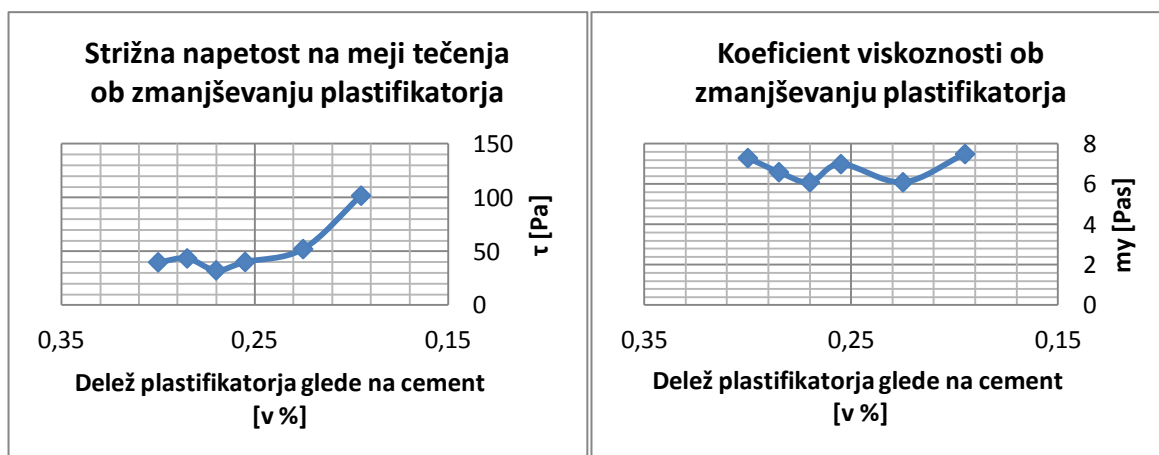
Ko pogledamo grafična prikaza spremembe reoloških parametrov zaradi zmanjševanja vode (Slika 22) vidimo, da imata oba grafa podobno obliko narobe obrnjene črke U, kar ni v skladu z nekaterimi trditvami v dostopni literaturi, ki pravijo, da obe vrednosti ob manjšanju vodocementnega razmerja naraščata. [24] To se pri nas ni zgodilo, zaradi česar moramo poiskati vzroke drugje. Ko smo pogledali razlez mešanice mr115, ki nam da zadnjo točko na grafu, smo ugotovili da je bila njegova vrednost samo 159 mm, kar pomeni da je bila malta pregosta oziroma presuha za pridobitev uporabnih rezultatov meritev s ConTec Viscometer 5. Uporabljena oprema namreč omogoča določitev reoloških parametrov od ustrezno plastičnih do tekočih mešanic.



Slika 22: Vrednosti reoloških parametrov  $\tau$  in  $my$  ob zmanjševanju zmesne vode

V naslednjem primeru smo naredili še grafični prikaz spreminjanja reoloških parametrov ob zmanjševanju količine plastifikatorja v sestavi. Rezultati so v tem primeru zelo nihali, tako pri strižni napetosti na meji tečenja kot pri koeficientu viskoznosti. Na podlagi literature [24] smo opredelili naša pričakovanja glede rezultatov in sicer naj manjšanje količine superplastifikatorja bistveno ne bi vplivalo na viskoznost, strižna napetost na meji tečenja pa naj bi se povečevala. Kot vidimo iz naših grafičnih prikazov (slika 23) smo ti dve trditvi potrdili. Pri viskoznosti so rezultati nekoliko nihali

okoli povprečne vrednosti, zato lahko ocenimo, da se viskoznost malte s spreminjanjem deleža superplastifikatorja ni spreminjala. Kar se tiče strižne napetosti na meji tečenja, pa se vrednost bistveno poveča šele pri mešanici z najmanjšim deležem superplastifikatorja (0,19 %), manjše naraščanje napetosti na meji tečenja pa dobimo od 0,27 % deleža superplastifikatorja pa navzdol. Potrebno je omeniti, da so bile mešanice vse zelo tekoče in vse kaže, da smo pri deležih superplastifikatorja večjih od 0,27 % dosegli zasičenje. Predpostavko bi verjetno lahko potrdili, če bi izdelali dodatne maltne mešanice z deleži superplastifikatorja med 0,23 % in 0,19 %.



Slika 23: Vrednosti reoloških parametrov  $\tau$  in  $m_y$  ob zmanjševanju superplastifikatorja



## 6 ZAKLJUČEK

Glavni cilj diplomske naloge je bil potrditi predpostavko, da lahko s preprosto oceno reoloških lastnosti cementnih suspenzij z grobimi delci, kot je razlez na stresalni mizi, potrdimo primernost sestave ekvivalentnih malt, sestavljenih z upoštevanjem CEM metode, za oceno reoloških lastnosti betonov, ki jih te malte predstavljajo. Izračunali smo pričakovan razlez ekvivalentnih malt in ga primerjali z doseženimi razlezi. To nam je predstavljalo osnovo tudi za vse nadaljnje primerjave reoloških lastnosti malt in betonov.

Potem, ko smo dobili rezultate razlezov vseh maltnih mešanic, ki so bile predmet naših raziskav, smo jih primerjali s pričakovanimi razlezi in ugotovili, da v nekaterih primerih bolje ustrezajo nekatere modificirane sestave malt. To smo upoštevali pri grafičnih prikazih rezultatov preskusa z rotacijskim reometrom, katerih glavni namen je bil potrditi povezavo med reološkimi lastnostmi betona in malte s pomočjo koeficientov korelacije. Ti so bili relativno nizki, vseeno pa smo lahko potrdili tezo, da obstaja povezava med razlezi in reološkimi lastnostmi betonov in ekvivalentnih ali korigiranih malt.

Nizki koeficienti korelacije  $R^2$  so bili pobuda, da poglobimo pogledamo rezultate naših preiskav in ugotovili smo, da na naših grafih najbolj odstopajo mešanice, v katerih smo uporabili aerant kot drugi dodatek (mešanice ma1). Ko smo te mešanice izločili, so se koeficienti korelacije med betoni in maltami precej izboljšali v primerih napetosti na meji tečenja  $\tau_0$  oziroma razlezov. Edini parameter, na katerega izločitev aeranta ni vplivala, je bil koeficient viskoznosti  $\mu$ , pri katerem se je korelacija celo nekoliko poslabšala.

Za konec smo opazovali še spreminjanje reoloških parametrov ob znižanju količine zamesne vode (vodocementnega razmerja) ali plastifikatorja v sestavah mešanic. Uporabili smo mešanice malt skupin mr1 za zmanjševanje vode in md za zmanjševanje količine plastifikatorja. Z rezultati smo želeli potrditi nekatere teze v literaturi. Za zmanjševanje vode je tako značilno, da se tako strižna napetost na meji tečenja kot koeficient viskoznosti povečujeta. Iz naših grafičnih prikazov na prvi pogled to ni bilo razvidno, saj ima graf konkavno obliko. Potrebno je bilo še enkrat poglobljeno pogledati mešanice in na podlagi rezultatov razlezov smo sklenili, da so bile odstopajoče mešanice najbrž pregoste za pridobitev relevantnih rezultatov s ConTec Viscometrom 5. Pri zmanjševanju deleža superplastifikatorja pa so bile stvari bistveno drugačne, saj na prvi pogled nismo dobili oprijemljivih rezultatov. Ob upoštevanju informacij v relevantni literaturi pa so naši rezultati vseeno pokazali pričakovan trend. [24] Ob zmanjševanju plastifikatorja namreč velja, da se reološki parameter  $\mu$  ne spreminja, vrednost reološkega parametra  $\tau$  pa naj bi se zviševala. Rezultati prvega so bili zelo blizu tej trditvi, saj so se

gibali okoli povprečne vrednosti, vrednosti  $\tau$  pa so se začele zviševati šele pri manjših deležih superplastifikatorja, pred tem pa so bile vrednosti precej konstantne. Ocenjujemo, da je razlog za tovrsten odziv lahko zasičenje superplastifikatorja pri večjih deležih tega dodatka maltni mešanici.

**VIRI**

- [1] Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., 2003. Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, 14th edition. Skokie, Illinois, USA, Portland Cement Association.
- [2] Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V., Dujić, B. 2008/09. Gradiva vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 142 strani
- [3] SIST EN 12350-5:2001. Preskušanje svežega betona – 5. del: Razlez
- [4] EN 1015-3:1999. Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar by flow table.
- [5] Schwarzentuber, A., Catherine, C. 1999. La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, Materials and Structures 33. 2000: str. 475-482.
- [6] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 351 str.
- [7] Ukrainczyk, V., Šušteršič, J., 2006. Vpliv lastnosti agregatov na lastnosti betonov. Zajc, A. (ur.). 13. slovenski kolokvij o betonih – Agregati v betonih. Ljubljana, maj 2006.
- [8] Zajc, A., 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. Zajc, A. (ur.). 14. slovenski kolokvij o betonih – Posebne lastnosti betonov z dodatki. Ljubljana, maj 2007.
- [9] Uranjek, M., 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine, doktorska naloga, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 261 strani.
- [10] SIST EN 12620: 2002. Agregati za beton.
- [11] SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preksušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona.
- [12] SIST EN 197-1. 2002. Cement – 1. del: Sestava, zahteve, merilo in skladnosti za običajne cemente.
- [13] Vuk, T., Pešič, T., Reščič, L., Strupi Šuput, J. 1999. Cementi: vrste, lastnosti, uporabnost ter prilaganje evropskim standardom. V: Kavčič, L. (ur.). Nova spoznanja pri proizvodnji in uporabi betonskih mešanic: Objekti na cestah in visoke gradnje. Gornja Radgona, 14. April, 1999.
- [14] Kavčič, F., Hočevar, A. 2010. Reološke preiskave superplastifikatorjev: eksperimenti na malti in betonu. Srečanje TKK Srpenica, oktober 2010.
- [15] Hočevar, A., Bokan-Bosiljkov, V., Kavčič, F., 2010. Uporabna vrednost meritev reoloških lastnosti svežega betona. Konferenca Beton 21. stoletja, Lipica, marec 2010.

- [16] Slika reometra CEMAGREF-IMG. <http://www.baunat.boku.ac.at/9704.html>  
(pridobljeno 25.7. 2012)
- [17] Slika reometra BTRHEOM. [http://www.igm.fr/en/Equipement-mlpcei/BTRHEOM-Rheome-tre\\_1350.html](http://www.igm.fr/en/Equipement-mlpcei/BTRHEOM-Rheome-tre_1350.html) (pridobljeno 25.7. 2012)
- [18] Slika modela za opis tekočin.  
<http://www.cartage.org.lb/en/themes/sciences/physics/mechanics/fluidmechanics/fluidmechanics/naturefluids/naturefluids.htm> (pridobljeno 19.8.2012)
- [19] Slika pripomočkov za test z razlezom malte. <http://www.nl-test.com/ViewCatalog.asp?ID=249&MainId=&pageno=18> (pridobljeno 19.8.2012)
- [20] Salonit Anhovo d.d, Gradbeni materiali – Cementi, ([www.salonit.si](http://www.salonit.si)) pridobljeno 14.8.2012
- [21] Granulirana plavžna žlindra. <http://www.nationalslag.org/> (pridobljeno 19.8.2012)
- [22] TKK Srpenica d.d, ([www.tkk.si](http://www.tkk.si)) pridobljeno 14.8.2012
- [23] Lafarge cement d.o.o, (<http://www.lafarge.si/>) pridobljeno 14.8.2012
- [24] Wallewik, O.H. 2009. Introduction to rheology of fresh concrete, ICI rheocenter course. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219 str.
- [25] Slika pripomočkov za test z razlezom betona. <http://www.nl-test.com/ViewCatalog.asp?ID=274&MainId=16&pageno=1> (pridobljeno 20.8.2012)
- [26] Violeta Bokan Bosiljkov, Roko Žarnič. 2006. Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov. Končno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanja materialov in konstrukcij: str. 1-92.
- [27] Mehta P. K., Mehta P. K., J. M. Monteiro, J. M. P., 2006. Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill: 659 str.
- [28] Koehler, E.p., Fowler, D.W. 2003. Summary of concrete workability methods, Research report ICAR-105-1, Austin, TX, Aggregates Foundation for Technology, Research and Education: 92 str.