

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Komunalna smer

Kandidat:

**Damjan Golob**

# **Vpliv vrste polimerne disperzije na mehanske in fizikalne lastnosti sanacijskih malt in betonov**

**Diplomska naloga št.: 2987**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 17. 12. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **DAMJAN GOLOB** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom  
**VPLIV VRSTE POLIMERNE DISPERZIJE NA MEHANSKE IN FIZIKALNE  
LASTNOSTI SANACIJSKIH MALT IN BETONOV.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani.

Ljubljana, 3. 12. 2007

---

(podpis)

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 691.32+691.33+691.53(043.2)  
**Avtor:** Damjan Golob  
**Mentor:** doc. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov  
**Naslov:** Vpliv vrste polimerne disperzije na mehanske in fizikalne lastnosti sanacijskih malt in betonov  
**Obseg in oprema:** 69 str., 5 pregl., 31 slik, 11 en.  
**Ključne besede:** polimer, polimerna disperzija, tlačna trdnost, upogibna trdnost, zmrzovanje/tajanje, krčenje, vpijanje vode, malta.

### **Izvleček**

V okviru diplomske naloge smo študirali vpliv treh različnih polimernih disperzij na mehanske in fizikalne lastnosti materialov s polimerno-cementnim vezivom pri različnih polimerno/cementnih razmerjih (0,05, 0,075 in 0,1). Materiali s polimerno-cementnim vezivom so bili izdelani z dvema različnima vrstama agregata in z dvema različnima običajnima cementoma. Zaradi velikega števila spremenljivk, smo preiskave opravili na maltah. Tako smo najprej določili 24 različnih receptur maltnih mešanic, na katerih smo opravili različne preiskave. Na svežih mešanicah smo določali konsistenco z razlezom, poroznost in prostorninsko maso, na strjenih maltah pa njihovo tlačno in upogibno trdnost pri dveh različnih negah (suhi in mokri). Sledile so preiskave krčenja zaradi sušenja in preiskave vpijanja vode, na koncu pa smo ocenili še spremembo upogibne in tlačne trdnosti malt zaradi predhodne izpostavitve ciklom zmrzovanje/tajanje.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 691.32+691.33+691.53(043.2)

**Author:** Damjan Golob

**Supervisor:** Ph.D. Violeta Bokan-Bosiljkov, Assist. Prof.

**Title:** The influence of polymer latex type on mechanical and physical properties of mortars and concretes used for repair

**Notes:** 69 p., 5 tab., 31 fig., 11 eq.

**Key words:** polymer, polymer latex, compressive strength, flexural strength, freezing/thawing, shrinkage, water absorption, mortar.

### **Abstract**

The diploma thesis deals with the influence of three different types of polymer latexes on mechanical and physical properties of materials with polymer-cement binder at different polymer/cement ratios (0,05, 0,075 and 0,10). Materials with polymer-cement binder were made using two different aggregates and two different ordinary cements. Due to big number of variables the tests were carried out on mortars. Firstly 24 different mixtures of mortars were defined on which different tests were carried out. On fresh mortar mixes flow value, air content and density were determined and on hardened mortar mixes first compressive and flexural tests were carried out on specimens cured in two different ways (wet and dry curing). After that shrinkage and water absorption tests were carried out on hardened mortars and at the end we checked the influence of freezing/thawing cycles on the flexural and compressive strength of the specimen.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici doc.dr. Violeti Bokan – Bosiljkov in tehničnemu sodelavcu Franciju Čeponu.

Zahvalil bi se rad tudi svoji družini, ki me je vsa leta študija podpirala in vzpodbujala.

## KAZALO

1	UVOD	1
2	PROPADANJE BETONA	3
2.1	Vplivi na propad AB konstrukcij	3
2.2	Sanacija propadlega betona [Lutman,2004]	5
2.2.1	Odstranitev poškodovanega betona	5
2.2.2	Betoniranje nove plasti	8
2.2.3	Nega novozabetonirane plasti	9
3	BETON	11
3.1	Cement	12
3.2	Agregat	16
3.3	Voda	19
3.4	Dodatki za beton	20
4	POLIMERI V BETONIH	22
4.1.1	Polimeri	24
4.1.2	Projektiranje materialov s polimerno-cementnim vezivom	26
4.1.3	Oblikovanje polimernega filma	27
4.1.4	Pogoji nege med procesom strjevanja	28
4.1.5	Lastnosti sveže polimerno cementne mešanice	29
4.1.6	Lastnosti strjenih polimerno cementnih malt in betonov	30
5	RAZISKAVE NA MALTAH	34
5.1	Raziskave na svežih mešanicah	34
5.1.1	Razlez na stresalni mizici	34
5.1.2	Vsebnost zraka v sveži malti	35
5.1.3	Prostorninska masa malte	36
5.2	Raziskave na strjenih maltah	37
5.2.1	Preiskava upogibne trdnosti	37
5.2.2	Preiskava tlačne trdnosti	38
5.2.3	Preiskava vpijanja vode	39

<b>5.2.4</b>	<b>Preiskava vpliva zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost malt</b>	<b>40</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Preiskava krčenja</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>LASTNE RAZISKAVE</b>	<b>42</b>
<b>6.1</b>	<b>Splošni opis</b>	<b>42</b>
<b>6.2</b>	<b>Projektiranje malt</b>	<b>42</b>
<b>6.3</b>	<b>Uporabljeni materiali</b>	<b>46</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Cement</b>	<b>46</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Agregat</b>	<b>47</b>
<b>6.3.3</b>	<b>Voda</b>	<b>48</b>
<b>6.3.4</b>	<b>Superplastifikator</b>	<b>48</b>
<b>6.3.5</b>	<b>Polimeri</b>	<b>48</b>
<b>6.4</b>	<b>Preiskave na svežih maltah</b>	<b>50</b>
<b>6.4.1</b>	<b>Mešanje malte</b>	<b>50</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Razlez, prostorninska masa in vsebnost zraka</b>	<b>51</b>
<b>6.5</b>	<b>Raziskave na strjenih maltah</b>	<b>54</b>
<b>6.5.1</b>	<b>Preiskava upogibne trdnosti</b>	<b>54</b>
<b>6.5.2</b>	<b>Preiskava tlačne trdnosti</b>	<b>57</b>
<b>6.5.3</b>	<b>Vpijanje vode</b>	<b>59</b>
<b>6.5.4</b>	<b>Krčenje</b>	<b>62</b>
<b>6.5.5</b>	<b>Vpliv zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost modificiranih malt</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>69</b>
<b>VIRI</b>		<b>70</b>

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 3.1: Mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti	15
Preglednica 3.2: 27 proizvodov iz družine običajnih cementov [SIST EN 197-1].	16
Preglednica 6.1: Lastnosti polimerne disperzije A.	49
Preglednica 6.2: Lastnosti polimerne disperzije B.	49
Preglednica 6.3: Lastnosti polimerne disperzije C.	49



## KAZALO SLIK

Slika 2.1: Površina betona po odstranitvi poškodovanega sloja.	6
Slika 2.2: Primer opreme za peskanje z jeklenimi kroglicami.	7
Slika 2.3: Primer opreme za rezkanje betona.	8
Slika 2.4: Primer betoniranja s samonosilno vibracijsko letvijo.	9
Slika 2.5: Nega s sredstvom za nego betona.	10
Slika 3.1: Shema proizvodnje cementa [www.salonit.si].	14
Slika 3.2: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm po SIST 1026:2004.	19
Slika 4.1: Vrste betonov, ki vsebujejo polimere [Bokan-Bosiljkov, 1996]	22
Slika 4.2: Faze strjevanje polimera [Žarnić, 2005].	27
Slika 4.3: Povečava s polimeri modificiranega betona pri P/C 0,2 [Bokan-Bosiljkov, 1996].	28
Slika 4.4: Primerjava različnih neg betona [Ohama, 1984].	29
Slika 4.5: Konsistenca betona z dodatkom polimerne disperzije SBR (V/C=0,43) v odvisnosti od P/C razmerja [Ohama, 1984].	30
Slika 4.6: Vpliv P/C razmerja na tlačno trdnost betona (z uporabo polimerne disperzija SBR in brez protipenila) [Ohama, 1984].	31
Slika 4.7: Vpijanje vode v odvisnosti od časa in P/C razmerja pri uporabi SBR lateksa [Ohama, 1984].	32
Slika 4.8: Diagrami $\sigma - \epsilon$ betona modificiranega z SBR lateksom (modul elastičnosti v GPa)[Ohama, 1984].	33
Slika 5.1: Stresalna mizica s konusnim lijakom in nastavkom za polnjenje.	35
Slika 5.2: Poroziometer.	36
Slika 5.3: Skica preiskave upogibne trdnosti.	37
Slika 5.4: Preiskava upogibne trdnosti v laboratoriju.	38
Slika 5.5: Skica preiskave tlačne trdnosti.	38
Slika 5.6: Preiskava tlačne trdnosti v laboratoriju.	39
Slika 5.7: Vzorec pripravljen za merjenje vpijanja vode in vzorci na katerih že poteka preiskava vpijanja vode.	40

Slika 5.8: Vzorci v zamrzovalniku, na drugi sliki pa po zmrzovanju v vodo potopljeni vzorci.	40
Slika 5.9: Graf-Kaufmanov deformeter.	41
Slika 6.2: Zrnastostna krivulja za prod.	48
Slika 6.3: Mešalec.	50
Slika 6.4: Primerjava upogibne trdnosti.	55
Slika 6.5: Primerjava tlačne trdnosti.	58
Slika 6.6: Vpijanje vode po 10-ih in 90-ih minutah.	60
Slika 6.9: Primerjava upogibnih trdnosti po ciklih zmrzovanja/tajanja.	65
Slika 6.10: Primerjava tlačnih trdnosti po ciklih zmrzovanje/tajanje.	67

## 1 UVOD

Beton je najbolj razširjen gradbeni material današnjega časa. Lahko ga je pripraviti, je sorazmerno poceni in ga lahko zelo enostavno vgrajujemo na različne načine v najrazličnejše konstrukcije. Njegova najšibkejša točka pa je obstojnost. Na začetku masovne uporabe betona so predvidevali obstojnost 40-50 let z malo oziroma brez vzdrževanja. V idealnih razmerah bi to bilo res, v resnici pa vemo, da zaradi izpostavljenosti različnim vplivom in zaradi napak pri projektiranju in izvedbi propade že mnogo prej. Neprimerna izbira vrste in količine cementa in/ali agregata, prevelika količina vode, nepravilna vgradnja in nega svežega betona vodijo k prehitrim poškodbam betona. Propadanje betona lahko povzročijo mehanski vplivi, kot so preobremenitev, udarci, vibracije, kemijski vplivi med katere štejemo alkalno agregatno reakcijo ter reakcije med škodljivimi snovmi iz okolja in produkti hidratacije cementa, biološki vplivi in fizikalni vplivi, kot so zmrzovanje/tajanje, erozija, temperaturna nihanja in krčenje. Poškodovane konstrukcije praviloma ne porušimo, ampak jo poskusimo sanirati. Sanacija mora biti izvedena tako, da ne pride do ponovnih poškodb.

Učinkovito sanacijo poskušamo velikokrat izvesti s pomočjo novih tehnologij, materialov in dodatkov. Vendar pa morajo ti materiali imeti pozitivne lastnosti, po katerih se bistveno razlikujejo od lastnosti materiala, ki je propadel in je predmet sanacije. Zato jih včasih imenujemo tudi visokovredni, visoko zmogljivi ali specialni materiali. Mednje sodijo tudi s polimeri modificirane malte in betoni, o katerih bo govor v tej diplomski nalogi. V okviru diplomske naloge smo namreč ugotavljali vpliv posameznih polimernih disperzij, vpliv različnih neg, vpliv vrste agregata ter vpliv vrste cementa na lastnosti s polimeri modificiranih malt. Rezultate smo primerjali z rezultati preiskav, ki smo jih opravili na primerjalnih maltah brez vključenega polimera.

V okviru lastnih eksperimentalnih raziskav smo pripravili 24 različnih receptur. Spreminjali smo vrsto polimerne disperzije (tri polimerne disperzije), polimerno-cementno razmerje (0,05, 0,075 in 0,10), vrsto cementa (dve vrsti) in vrsto agregata (dve vrsti). Maltam smo izmerili razlez, vsebnost zraka in prostorninsko maso. Potem smo vzorce negovali na dva različna

načina: polovico ves čas v vodi, polovico pa tri dni v vodi potem pa na zraku. Po 28-ih dneh smo na vzorcih opravili preiskave upogibne in tlačne trdnosti, vpijanje vode, krčenja ter vpliva zmrzovanja/tajanja na posamezne lastnosti malt.

V prvem delu diplomske naloge so opisani vzroki poškodb in načini sanacij le teh. V nadaljevanju sledi opis lastnosti osnovnih komponent s polimeri modificiranih malt in betonov. Naslednje poglavje govori o lastnih raziskavah s polimeri modificiranih malt, ki smo jih opravili v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Na koncu so prikazani in analizirani rezultati raziskav.

## **2 PROPADANJE BETONA**

Zadnjih 30 let obravnavamo beton kot material, ki je od vgradnje dalje izpostavljen propadanju [Gerbec, 2006]. Propadanje povzročajo najrazličnejši zunanji vplivi. Zato moramo sprojektirati beton, ki bo kljuboval tem vplivom oziroma posamezni stopnji izpostavljenosti okolja. Slovenski standard SIST EN 206-1 obravnava naslednje stopnje izpostavljenosti:

- ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja okolja (z oznako stopnje X0),
- korozija zaradi karbonatizacije (z oznako stopenj XC1 do XC4),
- korozija zaradi kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode (z oznako stopenj XD1 do XD3),
- korozija zaradi kloridov iz morske vode (z oznako stopenj XS1 do XS3),
- zmrzovanje/tajanje (z oznako stopenj XF1 do XF4) in
- kemično delovanje (z oznako stopenj XA1 do XA3).

Ko vemo, kateri stopnji bo beton izpostavljen, tudi vemo kakšen beton moramo sprojektirati.

### **2.1 Vplivi na propad AB konstrukcij**

Glede na vzroke za nastanek poškodb v betonu razdelimo vplive na:

- mehanske,
- kemijske in
- fizikalne.

Mehanski vplivi, ki povzročajo propadanje armiranobetonskih konstrukcij so preobremenitev, udarna preobremenitev, deformacije in/ali utrujanje. Njihov rezultat je nastanek razpok na armiranobetonski konstrukciji, ki potem omogočajo lažji vstop agresivnih medijev v beton.

Fizikalne, kemijske in biološke vplive, ki povzročajo propadanje betonskih konstrukcij, imenujemo korozija betona. Korozijo betona lahko spremlja tudi korozija armature.

Med fizikalne vzroke za propad betona štejemo abrazijo, erozijo in kavitacijo, zmrzovanje/tajanje, krčenje, kristalizacijo soli v porah betona pri izsuševanju betona, prekrizalizacijo hidratiranih cementnih mineralov, temperaturno nekompatibilnost materialov različnih delov konstrukcije, ciklično spreminjajočo se temperaturo in vlago ter visoke temperature pri požarih, katerih posledica je porušenje kristalne strukture, kar povzroči močno znižanje mehanskih lastnosti betona in nastanek razpok [Gerbec,2006].

Med kemijskimi vzroki za propad betona se pri nas največkrat pojavlja korozija zaradi delovanja naravnih in odpadnih vod ali kontanimiranega zraka. Zelo redko je pri nas vzrok za kemijsko korozijo alkalno agregatna reakcija. Pogosteje je za korozijo vzrok kontaminiran zrak, ponavadi v industrijskem okolju. Vsebuje ogljikov dioksid ter dušikove in žveplove okside, ki agresivno delujejo na beton.

Karbonatizacija na površini betona lahko učinkuje tudi pozitivno na njegovo trajnost, če iz betona izluženo apno, ki nastaja pri hidrataciji cementnih mineralov, karbonatizira le na površini, kjer zapolnjuje pore in lasaste razpoke ter tako zmanjšuje betonsko poroznost oziroma ustvarja zaščitno plast proti prodoru agresivnih medijev v notranjost betona. Vendar pa karbonatizacija oziroma padec alkalnosti s pH pod 9 v betonu ne sme segati do jeklene armature.

Biološki vplivi na korozijo betona, ki ga povzročajo alge, glivice, lišaji, bakterije in drugi mikroorganizmi, je posreden. Pri njihovi presnovi se izločajo kisli toksini, ki nažirajo alkalni cementni kamen. Z njihovim propadanjem se povečuje poroznost in zmanjšuje trdnost betona.

V nadaljevanju se bomo posvetili sanaciji cestnih premostitvenih objektov. Na teh pride do predčasnih poškodb poleg zgoraj omenjenih vplivov tudi zaradi pomanjkljivosti pri projektiranju in gradnji, ki se kažejo predvsem v nezadostni debelini zaščitnega betona nad jekleno armaturo, in neustrezno izvedeno odvodnjavanje. Poškodbe povzroča tudi pomanjkljivo vzdrževanje.

## **2.2 Sanacija propadlega betona [Lutman,2007]**

### **2.2.1 Odstranitev poškodovanega betona**

Pri sanaciji najprej odstranimo poškodovani del betona. Odstraniti moramo ves poškodovan in kontaminiran beton. Po odstranitvi se preveri vsebnost kloridov v preostalem betonu. Le ta mora biti manjša od 0,4 masnih % na težo cementa, če ne se odstrani še dodatna plast [Kavčič, 2006]. Za odstranitev poznamo pri nas naslednje tri postopke:

- metoda z vodnim curkom pod visokim pritiskom,
- metoda s peskanjem z jeklenimi kroglicami in
- metoda z rezkanjem betona.

#### **Metoda z vodnim curkom pod visokim pritiskom**

Ta metoda se je uveljavila pri nas v letu 1995 s sanacijo zelo poškodovanega viadukta Ravbarkomanda. Od takrat se metoda dela za večino obnov objektov na avtocestah ni bistveno spremenila. Metoda temelji na strojnem odstranjevanju betona z robotom s potujočo vodno šobo pod visokim pritiskom, v splošnem do 1500 barov in čiščenju odpadkov z vodnimi pištolami s pritiskom do 600 barov, z odmikom 30 cm od podlage. Za zaključno čiščenje je uporabljen še stisnjen zrak. Metoda omogoča ekonomično pripravo površine, to je odstranjevanje betona 1 cm pod zgornjo jekleno armaturo oziroma v globino betona do največ 10 cm. Prečna širina odstranjevanja z enim pohodom je 150 cm.

Prednosti metode so:

- upravljanje samo z enim človekom in neprekinjeno delo,
- selektivno odstranjevanje betona,
- ni vibracij in mikro razpok na obstoječem betonu,
- popolnoma očisti korodirano armaturo in
- hrapavost betonske površine.

Ima pa ta metoda tudi nekaj pomanjkljivosti:

- za večje objekte in trše betone je treba predvideti daljši čas dela,

- oskrba z zadostno količino vode včasih predstavlja problem,
- oprema ni dopolnjena z vakuumskim sesalcem za pobiranje ruševin, vode in mulja in
- odplakovanje odvečne vode lahko predstavlja ekološki problem.



*Slika 2.1: Površina betona po odstranitvi poškodovanega sloja.*

### **Metoda s peskanjem z jeklenimi kroglicami**

Ta metoda se je uveljavila pri nas v istem času kot metoda z vodnim curkom, vendar le pri novogradnjah oziroma pri predhodni obdelavi-hrapavljenju površin betona pred polaganjem bitumsne hidroizolacije ter manj za namen obnov voziščnih plošč (samo manjši objekti do 25 m). Metoda temelji na strojnem odstranjevanju strjenega cementnega kamna s peskanjem z jeklenimi kroglicami in čiščenju odpadkov z vakuumskim odsesavanjem. Globina hrapavljenja običajno pri nas ne presega 1 mm. Prečna širina delovanja je 75 cm.

Prednosti metode so:

- upravljanje samo z enim človekom in neprekinjeno delo,
- ni vibracij in mikro razpok na obstoječem betonu,
- nahrapavi in čisti obenem,
- površine ostanejo suhe in čiste, brez odvečnih letečih prašnih delcev,
- uspešna zamenjava z ostalimi metodami čiščenja (npr. čiščenje tlakov s kislino) in
- zanesljiv curek in možen širok izbor abrazivnega sredstva za zagotavljanje zelene strukture površine.

Pomanjkljivosti metode so naslednje:

- za večje objekte in trše betone je treba predvideti daljši čas dela,
- razpoke, ki so vidne pred obdelavo, se navidezno skrijejo (zapršijo) in
- manjša hrapavost, peskanje le z jeklenimi kroglicami.





*Slika 2.2: Primer opreme za peskanje z jeklenimi kroglicami.*

### **Metoda z rezkanjem betona**

To metodo so v Sloveniji preizkusili prvič leta 1995 za popravilo neravnin voziščne plošče novogradnje mostu Grapa, kasneje pa še za betonska vozišča v predorih Debeli hrib in Malence. Ker se metoda dela za te objekte ni obnesla, za obnovo objektov na avtocestah ni bila več predvidena. Metoda temelji na strojnem površinskem odstranjevanju betona z rezkalno glavo z diamantnimi zobmi. Danes se praviloma uporablja le za odstranjevanje poškodovanih asfaltnih slojev na voziščih in premostitvenih objektih.

Prednosti metode:

- hitro rezkanje betona,
- hrapavost betonske površine znaša do 10 mm in
- najbolj ekonomičen način odstranjevanja betona, tudi do jeklene armature.

Pomanjkljivost metode je, da rezkalne glave puščajo za seboj poškodovan beton. Prisotne so mikro razpoke na stiku cementni kamen-agregat, tik pod površino rezkanega betona. Na razpolago je sicer množica rezkarjev, ki vsak zase različno vpliva na poškodbe podlage tako, da je potrebno raziskati vpliv posameznega sloja posebej. Manjše rezkalne glave manj poškodujejo beton kot večje glave.



*Slika 2.3: Primer opreme za rezkanje betona.*

### **2.2.2 Betoniranje nove plasti**

Ko je korodiran beton odstranjen se lahko dobetonira nova plast s sanacijskimi materiali. Vendar pa morajo ti izkazovati pozitivne lastnosti, po katerih se bistveno razlikujejo od lastnosti materiala, zaradi katerih je le ta propadel in je predmet sanacije ali pa morajo posredno omogočiti spremembo stanja, zaradi katerih so vgrajeni materiali ali konstrukcije kakorkoli ogroženi. Zato jih včasih imenujemo tudi visokovredni, visoko zmogljivi ali specialni materiali.

Za dobetoniranje se je uveljavila metoda dela s samonosilno vibracijsko letvijo po celem prečnem prerezu voziščne plošče. Največja hitrost pomika električnega vretena letve znaša 1-1,5 m/minuto. Metoda je primerna za prečne preseke voziščnih plošč do 25 m.

Prednosti metode so:

- upravljanje letve samo z enim človekom in možnost neprekinjenega dela,
- višinsko obvladovanje površine betona,
- vibracije za zgoščevanje so z ekscentri enakomerno razporejene po celi dolžini letve in
- popolnoma gladka površina betona pri pravilnem delu.

Pomanjkljivosti metode:

- za razprostiranje betona potreben delavec/m delovnega odseka letve,
- oskrba z zadostno količino betona včasih predstavlja problem, zato se letev zaustavlja in običajno pušča za seboj grbine,

- oprema ni dopolnjena s sistemom za nego z meglo.



*Slika 2.4: Primer betoniranja s samonosilno vibracijsko letvijo.*

### **2.2.3 Nega novozabetonirane plasti**

Po zabetoniranju je izredno pomembna nega vgrajenega betona. Sveži beton moramo zavarovati predvsem pred:

- predčasno izsušitvijo zaradi vetra, sonca, suhega mraza,
- pred ekstremnimi temperaturami (mrazom, vročino) in škodljivimi hitrimi temperaturnimi spremembami,
- dežjem in
- tresenjem.

Brez ustreznih ukrepov pride do izgube tistega dela vode, ki je potreben za nadaljnjo hidratacijo cementa. Posledice so:

- trdnost na površini se zmanjša,
- večja prepustnost za vodo,
- zgodnje razpoke zaradi krčenja betona in
- povečana nevarnost kasnejših razpok zaradi izgube vode

Da do tega ne pride izvajamo naslednje ukrepe:

- razpršitev sredstva za nego betona na osnovi parafina. Brž ko je mogoče, na odprtih površinah pa takoj ko površina začne postajati motna,
- pokrivanje s folijo. Na horizontalnih površinah moramo paziti na pravilno prekrivanje folije in naleganje. Na vidnih betonih se folija ne sme položiti direktno na beton (kondenz, nevarnost cvetenja). Preprečiti je potrebno prepah,
- pokrivanje z mokro juto. Juto redno močimo, da ostane vlažna ali dodatno prekrijemo s folijo,
- omočenje, vzdrževanje mokrote. Horizontalne površine so lahko zalite z vodo, ker je izmenično škropljenje škodljivo, saj zaradi šokov prav pri masivnem betonu lahko nastajajo razpoke.



*Slika 2.5: Nega s sredstvom za nego betona.*

### 3 BETON

Beton je najbolj razširjen gradbeni material današnjega časa. Lahko ga je pripraviti, je sorazmerno poceni in ga lahko vgrajujemo na različne načine v najrazličnejše konstrukcije. Beton je material, ki nastane z mešanjem cementa, grobega in finega agregata ter vode. Dodamo mu lahko še kemijske in mineralne dodatke. Svoje lastnosti razvije s hidratacijo cementa. Poleg teh komponent vsebuje še zračne pore. Glede na gostoto ločimo tri vrste betonov:

- lahki z gostoto do  $1900 \text{ kg/m}^3$ ,
- običajni z gostoto od  $1900 \text{ pa do } 2500 \text{ kg/m}^3$  in
- težki betoni z gostoto nad  $2500 \text{ kg/m}^3$ .

Mi se bomo ukvarjali z običajnimi betoni. Na kakovost betona zelo vpliva količina vode v njem. To izrazimo z vodocementnim (V/C) razmerjem, ki nam pove razmerje med vodo in cementom v samem betonu. Za samo hidratacijo cementa potrebujemo V/C razmerje 0,38, vendar je to razmerje velikokrat večje, da lahko beton kvalitetno vgradimo. Kljub temu je treba stremeti k čim nižji količini vode, saj s tem vplivamo na sledeče lastnosti betona:

- zvišanje mehanskih lastnosti,
- zvišanje vodoneprepustnosti in znižanje vpijanja vode,
- zvišanje odpornosti na vremenske vplive in na agresivnost okolja,
- boljšo sprijemnost med plastmi betona in med betonom ter armaturo,
- zmanjšanje prostorninskih sprememb pri sušenju in namakanju in
- znižanje števila in velikosti razpok zaradi krčenja.

Obvezne komponente betona so cement, pesek in voda, dodamo pa mu lahko tudi mineralne in kemijske dodatke kot so plastifikatorji, aeranti, antifrizi, pospeševalci,...

### 3.1 Cement

Cement je mineralno hidravlično vezivo. To pomeni, da se strjuje tako na zraku, kakor tudi v vodi. Zaradi visoke trdnosti in trajnosti betona je eden od najpomembnejših veziv na svetu. V osnovi je fini prah sive barve s premerom delcev od 0,001 pa do 0,1 mm. Za začetek vezanja ga je potrebno zmešati z vodo, da se spremeni v plastično zmes. Cement veže in se strjuje zaradi kemične reakcije, ki jo imenujemo hidratacija cementa. Pri hidrataciji cementa se sprošča toplota, ki je značilna za vsako vrsto cementa posebej. S hidratacijo nastane trd in trden cementni kamen, ki tudi v vodi ohrani trdnost in stabilnost. Zahteve glede običajnih cementov določa standard SIST EN 197-1.

Specifična masa cementa (tudi prostorninska masa cementa brez por in votlin) znaša 3,1 g/cm<sup>3</sup>. Določamo jo s piknometrom. Zelo pomembna je finost mletja (od 2000 do 5000 cm<sup>2</sup>/g). Bolj kot je cement fin, večjo tlačno trdnost doseže. Razvijajo pa taki cementi več hidratacijske toplote in se bolj krčijo. Ravno ta lastnost je pri cementu zelo nezaželena in moramo biti nanjo zelo pozorni. Poleg hidratacije pride do krčenja še zaradi slabe nege v prvih dneh in zaradi izhlapevanja vode.

Osnovna surovina cementa so naravni lapor, apnenec in glina, ki vsebujejo kalcijev (CaO), silicijev (Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), aluminijev (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in železov (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oksid. Te se po izkopu zmelje, potem pa se jih žge v rotacijski peči pri temperaturi 1350-1450°C. Pri tem nastane močno porozna zmes podobna pepelu imenovana portlandcementni klinker. Osnovne spojine, ki tvorijo komponente klinkerja so:

- CaO – komponenta C (60-67%),
- SiO<sub>2</sub> – komponenta S (17-25%),
- (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – komponenta A (3-8%),
- (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – komponenta F (0,5-6%),
- alkalije (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O) (0,2-1,3%) in
- primesi (nevezan CaO do 2% in MgO do 4%).

Klinker potem zmeljemo, med tem pa mu pogosto dodajamo:

- sadro, ki je obvezen dodatek za regulacijo vezenja cementa,
- granulirano plavžno žlindro (S),
- naravne (P) ali umetne pucolane (Q),
- apnenec (L,LL),
- elektrofilterski pepel (V,W),
- mikrosiliko (D) in
- žgani skrilavec (T).

Minerali cementnega klinkerja so:

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| • trikalcijev silikat ali alit | $C_3S$ ali $3CaO \cdot SiO_2$                  |
| • dikalcijev silikat ali belit | $C_2S$ ali $2CaO \cdot SiO_2$                  |
| • trikalcijev aluminat         | $C_3A$ ali $3CaO \cdot Al_2O_3$                |
| • tetrakalcijev aluminat ferit | $C_4AF$ ali $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ |

Najpomembnejši mineral običajnih portlandcementnih klinkerjev je  $C_3S$ . Ima največji delež v klinkerju in sicer 40-70%. Močno reagira in hitro strjuje. Od vseh mineralov najhitreje pridobiva na trdnosti in že po treh dneh doseže več kot polovico trdnosti, ki jo ima po 28-ih dneh. Razvije pa tudi največ hidratacijske toplote, zato je v cementih z nizko stopnjo hidratacije zastopan z manjšim deležem.  $C_2S$  strjuje počasi vendar dalj časa pridobiva na trdnosti ter pri tem sprošča mnogo manj hidratacijske toplote kot  $C_3S$ .  $C_3A$  na začetku reagira zelo hitro in sprosti veliko hidratacijske toplote, vendar lahko to reakcijo reguliramo z dodatkom sadre. K trdnosti prinese najmanj. Je občutljiv na sulfatno korozijo, zato mora biti pri sulfatno odpornih betonih njegov delež v klinkerju pod 5%.  $C_4AF$  strjuje počasi in je bolj odporen na sulfatno korozijo kot  $C_3A$ . Je produkt vhodnih surovin, ki jih uporabljamo za zmanjšanje temperature pri sintranju. Cementu daje značilno sivo barvo.

Standard SIST EN 197-1 določa 27 vrst cementa in jih razvršča v pet glavnih vrst:

- CEM I portlandski cement
- CEM II mešani portlantski cement
- CEM III žlindrin cement
- CEM IV pucolanski cement

- CEM V mešani cement



Slika 3.1: Shema proizvodnje cementsa [www.salonit.si].



Standard loči tudi tri trdnostne razrede (marke cementa):

- 32,5
- 42,5
- 52,5

Vsak razred ima še oznako:

- N (normal) za cemente z običajno zgodnjo trdnostjo ali
- R (rapid) za cemente z visoko zgornjo trdnostjo.

Naslednji dve preglednici prikazujeta vseh 27 vrst cementa in mehanske in fizikalne zahteve posameznih trdnostnih razredov po standardu SIST EN 197-1.

*Preglednica 3.1: Mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti[SIST EN 197-1].*

Trdnostni razred	Tlačna trdnost MPa			Čas začetka vezanja	Prostorninska obstojnost (ekspanzija)
	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost		
	2 dneva	7 dni	28 dni		
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	
52,5 R	≥ 30,0	-			

Preglednica 3.2: 27 proizvodov iz družine običajnih cementov [SIST EN 197-1].

Tip cementa	Oznaka 27 proizvodov = (vrste običajnih cementov)		SESTAVA (utežni deleži v cementu v %)										
			GLAVNE SESTAVINE										Ostali dodatki
			Klinker	Žlindra	Mikrosilika	Naravni pucolan	Naravni kalcinirani pucolan	Silicijski EF pepel	Kalcijski EF pepel	Žgani skrilavec	Apnec		
Ime	Tip	K	S	D <sup>1</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>2</sup>	LL <sup>3</sup>		
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland cement z žlindro	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland cement z mikrosilikom	CEM II/A-D	90-94	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland cement z pucolani	CEM II/A-P	80-94	-	-	43983	-	-	-	-	-	-	0-5
		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
	Portland cement z EF pepelom	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	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
	Portland cement z skrilavcem	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland cement z apnecem	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	
	Kompozitni portland cement	CEM II/A-M	80-94	6-20								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	21-35								0-5	
CEM III	Cement z žlindro	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pucolanski cement	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5
CEM V	Kompozitni cement	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50			-	-	-	-	0-5

<sup>1</sup> Količina mikrosilike je omejena na 10%.  
<sup>2</sup> Skupna količina organskega karbona ne sme presežati 0,2%.  
<sup>3</sup> Skupna količina organskega karbona ne sme presežati 0,5%.

### 3.2 Agregat

Agregat zavzema od 70 pa do 80% prostornine betona (Muravljov, 2000). Zato ima zelo pomembno vlogo pri izdelavi kakovostnega betona. S svojo gostoto, trdnostjo, teksturo,

zrnovostno sestavo in obliko vpliva tako na lastnosti sveže kot že strjene betonske mešanice. Agregat je večinoma sestavljen iz grobih in finih zrn, vsebuje pa tudi zrna drobirja in prah. Glede na izvor ločimo:

- drobljenec,
- prod.

Drobljenec pridobivamo v kamnolomih z mletjem večjih skal v zrna premera 32 mm in manj. Zrna drobljenca so nepravilnih oblik z ostrimi robovi, kar povzroča slabšo vgradljivost. Je pa možnost, da se zaradi svoje oblike zrna zaklinjo, s čimer dobimo višje trdnosti betona. Površina je hrapava kar omogoča boljšo sprejemljivost cementne paste z agregatom. Mineraloška sestava kamna, iz katerega proizvajajo agregat, je večinoma enaka, ker se v enem kamnolomu izkorišča običajno ista vrsta kamnine, tako da se njena kakovost spreminja kvečjemu s položajem miniranja. Uporaba drobljenca se povečuje, saj z novimi tehnologijami vgradnje betona in novimi kemijskimi dodatki (predvsem superplastifikatorji) dobivamo boljše rezultate kot s prodom.

Prod kopljemo iz rečnih strug. Zaradi tega ga je potrebno očistiti organskih primesi, ki se lahko nahajajo na dnu struge. Zrna proda so zaobljena in z gladko površino. Sicer s tem dobimo boljšo vgradljivost, vendar je oprijem cementne paste z agregatom slabši. Sestavljen je iz zrn z različno mineraloško sestavo, ki se spreminja od nahajališča do nahajališča ter, glede na položaj in mesto izkopa, kar vse vpliva na kakovost izkopanega proda.

Naloge agregata v betonu so:

- znižuje ceno betona, saj je razmeroma poceni,
- ustrezno sestavljen po frakcijah ustvarja koheziven beton, ki ga je lahko obdelovati v svežem stanju,
- znižuje hidrationsko toploto betona in jo odvajata,
- zmanjšuje krčenje betona, ker na večino agregatov voda ne deluje in zato lahko omejujejo krčenje cementne paste med hidratacijo,
- uravnavanje površinske trdote, ker so večinoma bolj odporni na obrus kot cementni kamen, ki povezuje agregat,

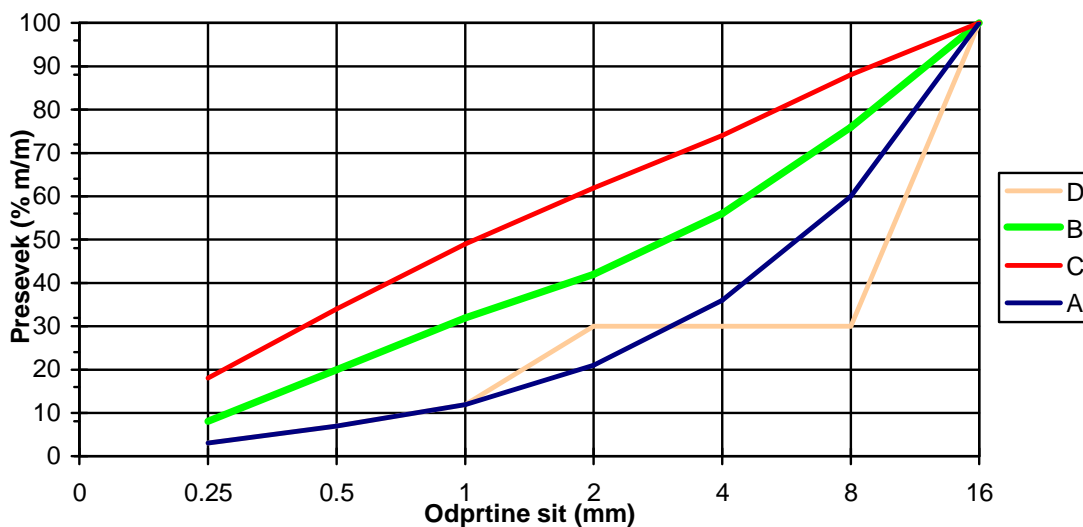
- ustvarjanje barvite betonske površine,
- kontrola gostote in
- zvišanje požarne odpornosti.

Da agregat lahko izpolni te zahteve, moramo upoštevati naslednje:

- agregat mora biti čist,
- če ne uporabimo kemijskega dodatka tipa plastifikator ali superplastifikator, naj vsebuje čim manjši delež prašnih delcev, ker imajo veliko specifično površino. Zato moramo pri pripravi betona dodati večjo količino vode za zagotavljanje ustrezne vgradljivosti in več cementa za doseganje iste trdnosti. Obenem se prašni delci primejo na večja zrna in preprečujejo povezavo zrna s cementno pasto,
- ne sme vsebovati organskih primesi, ker so po naravi kisle in zmanjšujejo alkalnost cementne paste, ki je nujna za proces hidratacije,
- ne sme vsebovati soli zaradi armiranih konstrukcij,
- nezaželena so ploščata in podolgovata zrna,
- zaželena so hrapava zrna, zaradi boljše sprijemljivosti agregata s cementno pasto,
- še posebno pozorni pa moramo biti na prisotnost amorfnega silicijevega dioksida. Ta povzroča alkalno-silikatno reakcijo v betonu, pri kateri prihaja do notranjih napetosti, posledično razpok in postopnega razpadanja betona.

Kot smo že omenili, agregat sestavljajo večja in manjša zrna. Razmerje med velikostjo zrn nam podaja zrnovostna krivulja, ki jo dobimo s sejalno analizo. Vzorec agregata presejemo skozi niz sit, ki so postavljena eno nad drugim. Osnovni komplet sit vsebuje sita z odprtinami 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm in 63 mm. Sito z največjo odprtino je na vrhu. Agregat presejemo in stehtamo koliko agregata je ostalo na posameznem situ. Dobljene rezultate prikažemo na grafu. Na abscisni osi so prikazane velikosti kvadratnih odprtin sit, na ordinatni osi pa v odstotkih delež zrn, ki padejo skozi posamezno sito. Količino agregata, ki pade skozi sito z določeno velikostjo odprtin in ostane na situ z manjšo velikostjo odprtin, imenujemo frakcija. Označimo jo s  $d/D$ , pri čemer je  $d$  velikost odprtine manjšega sita,  $D$  pa velikost odprtine večjega. Agregat, ki vsebuje samo grobo frakcijo (npr. 8/16), ni najprimernejši za izdelavo betona. Če namreč predpostavimo, da so zrna okrogla, enake

velikosti in da se dotikajo, potem med njimi ostane nezapolnjen prostor. Ta prostor mora namesto drobnejših frakcij agregata zapolniti cementna pasta. To pa je neekonomično, hkrati pa pride tudi do večjega krčenja betona. Zaradi tega obstajajo mejne zrnastostne krivulje, znotraj katerih naj bi se nahajala zrnastostna sestava agregata. Te mejne krivulje so prikazane na sliki 3.2. Če je krivulja v bližini krivulje B, je agregat dober. V primeru, da leži nad krivuljo A in pod krivuljo C, pa so potrebne dodatne preiskave. Krivulja D predstavlja agregat za posebne betone, npr. drenažne betone.



Slika 3.2: Priporočene mejne krivulje zrnastosti za mešanico agregata 0/16 mm po SIST 1026:2004.

### 3.3 Voda

Voda predstavlja nepogrešljivo komponento vsake betonske mešanice. Brez nje proces hidratacije ni mogoč. Poleg tega je potrebna tudi za dobro vgraditev betona. Zato betonski mešanici dodamo več vode, kot jo potrebuje za samo hidratacijo, to je 38% glede na maso cementa. Običajna pitna voda je vedno primerna za pripravo betonske mešanice. V ostalih primerih, če uporabimo vodo iz rek ali drugih zajetih, je potrebno kvaliteto vode vedno preveriti. Vsebuje lahko snovi, ki vplivajo na hidratacijo cementa ali pa povzročijo korozijo armature. Drobni delci kot glina in organske snovi, lahko ustvarijo prevleke na agregatu in s

tem onemogočijo dober stik s cementno pasto. Lahko pa vsebovane snovi vplivajo tudi mehanske lastnosti betona.

Zahteve glede kvalitete vode podaja standard SIST EN 1008:2003.

### **3.4 Dodatki za beton**

Betonski mešanici pogosto dodajamo kemijske in/ali mineralne dodatke. Ti s svojimi fizikalnim in kemičnim delovanjem vplivajo na lastnosti sveže betonske mešanice in/ali na strjen beton. Dodamo jih pred ali med mešanjem, odvisno pač od dodatka. Dozira se jih glede na maso cementa v mešanici in sicer od 1 ‰ pa do nekaj procentov. Pri uporabi dveh ali več dodatkov naenkrat moramo preveriti, če so dodatki kompatibilni med seboj. Z njimi lahko dosežemo:

- boljše fizikalne in mehanske lastnosti betona,
- lažje vgrajevanje betona,
- nižjo ceno betona in
- betoniranje v ekstremnih razmerah.

Glavni betonski kemijski dodatki so:

- plastifikatorji,
- aeranti,
- pospeševalci vezanja,
- antifrizi,
- polimeri (polimerne disperzije) in
- zaviralci vezanja.

**Plastifikatorji** so dodatek, s katerim dosežemo večjo plastičnost betona in s tem mnogo boljšo vgradljivost ali zmanjšanje V/C razmerja pri isti vgradljivosti. Uporabljajo se za črpne betone, za betone, ki jih vgrajujemo v opaže z gosto nameščeno armaturo, samozgoščevalne betone,... Plastifikatorji, ki so danes na trgu, se ločijo po svoji učinkovitosti. Najbolj učinkoviti so t.i. superplastifikatorji.

**Aeranti** se uporabljajo za doseganje zmrzlinško odpornega betona. Z njihovo pomočjo vnesemo v beton ogromno mikroskopskih zračnih mehurčkov velikosti 20-2000  $\mu\text{m}$ . Ti prekinejo kapilarne pore in zmanjšajo notranje napetosti pri povečevanju prostornine vode pri zmrzovanju. Aeranti omogočajo tudi lažjo vgradljivost, povečajo vodotesnost in zmanjšajo možnost nastajanja razpok.

**Pospeševalci** pospešujejo vezanje in povečujejo zgodnje trdnosti betona. Pri uporabi moramo paziti na predoziranje, da ne pride do prevelikega krčenja betona, manjših končnih trdnosti ali korozije armature. Uporabljajo se za betoniranje v mrzlih dneh in v industriji prefabrikatov za hitrejše razopaženje.

**Zaviralci** upočasnjujejo vezanje betona, obenem pa povečujejo čas, ki je na razpolago za vgrajevanje betonov. Uporabljajo se za betoniranje pri visokih temperaturah in pri transportnih betonih.

**Antifrizi** se uporabljajo za betoniranje pri nizkih temperaturah (0 °C). Delujejo tako, da znižajo tališče vode. Prevelike količine antifriza v betonu niso zaželene, ker lahko povzročijo korozijo armature.

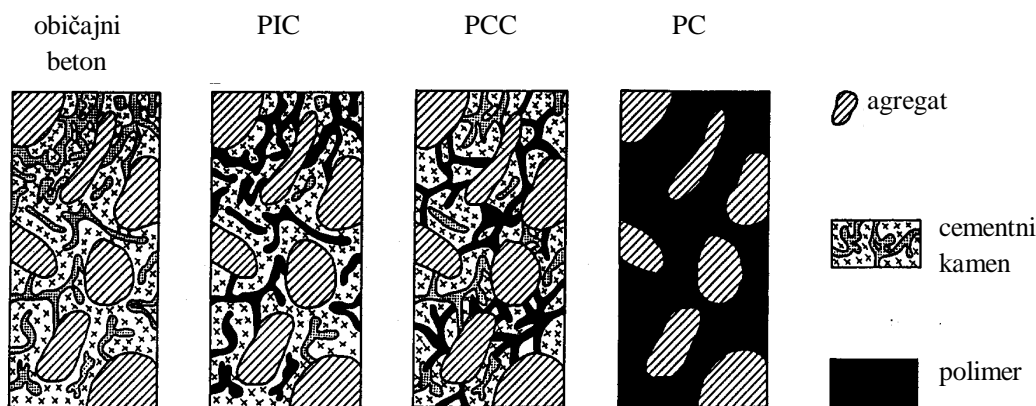
O polimernih dodatkih bo več govora v naslednjem poglavju. Vsi do sedaj predstavljeni dodatki so kemijski. Mineralni dodatki pa so fino presejani materiali, ki se uporabljajo za izboljšanje določenih lastnosti. Delimo jih v dve skupini:

- tip I, to so mineralna polnila kot sta apnenčeva in dolomitna kamena moka. Pod to kategorijo spadajo tudi pigmenti na bazi železovega oksida. Ti dodatki so nepucolanski,
- tip II, sem spadajo pucolanski dodatki kot so elektrofiltrski pepel, mikrosilika in granulirana plavžna žindra.

## 4 POLIMERI V BETONIH

Malte in betoni izdelani iz portland cementa so zelo popularni konstrukcijski materiali razširjeni po celem svetu zadnjih 160 let. Kot vemo, imajo ti materiali poleg dobrih lastnosti tudi nekaj slabih, kot so nizka natezna trdnost, oblikovanje razpok pri sušenju in slaba kemijska odpornost. V izogib tem slabostim se je v novejšem času veliko časa in truda posvetilo raziskovanju raznih dodatkov za izboljševanje mehanskih in fizikalnih lastnosti malt in betonov. Ena izmed rešitev je tudi modifikacija betona s polimeri. Uporabimo jih lahko za:

- s polimeri impregniran beton (PIC),
- s polimeri modificiran portland cementni beton (PCC),
- polimerni beton (PC).



Slika 4.1: Vrste betonov, ki vsebujejo polimere [Bokan-Bosiljkov, 1996]

Pri običajnem portland cementnem betonu cementni kamen poveže zrna agregata, ki tvorijo skelet betonskega elementa, v trdno celoto. Mehanske lastnosti betona so odvisne predvsem od samega cementnega kamna in njegove povezave z zrnji agregata, to je od kvalitete stičnega območja med zrnji agregata in cementnim kamnom. Ker ima pri običajnih betonih cementni kamen praviloma nižjo trdnost od agregata, poleg tega pa je tudi trdnost adhezijskega stika med cementnim kamnom in agregatom slaba, se s cementnega kamna na agregat lahko prenašajo le natezne napetosti do določene vrednosti.



Pri s polimerom impregniranem betonu nizko viskozne reakcijske smole zapolnijo pore v cementnem kamnu strjenega betona. Z običajnim postopkom impregniranja so s polimerom zapolnjene predvsem pore, ki se nahajajo bližje površini betonskega elementa. Zaradi povečanega tesnjenja strukture se na ta način ne vzpostavi samo hidrofobnost površine betonskega elementa, ampak se izrazito izboljšajo tudi mehanske lastnosti betona in njegova odpornost na delovanje kemikalij. Zapolnjenje por na večji oddaljenosti od površine betonskega elementa je možno le s posebnim postopkom impregniranja, ki ga za zdaj uporabljajo le pri prefabriciranih betonskih elementih.

Pri s polimerom modificiranim portland cementnem betonu je vezivo sestavljeno iz mineralnega in polimernega deleža. Kot umetne snovi se uporabljajo ne eni strani elastomeri in plastomeri v obliki vodnih disperzij ali praškov, na drugi strani pa duromeri, ki se zamešajo v beton v obliki finodispergiranih monomernih sistemov. Kot kažejo izsledki številnih raziskav, dosežemo z dodatkom polimera predvsem izrazito izboljšanje trajnosti in kemijske odpornosti betonov.

Pri polimernem betonu nadomesti umetna snov cementni kamen v celoti. Iz zornega kota tehnologije umetnih snovi gre v tem primeru za z mineralnim agregatom polnjen duromer. Pri polimernih betonih vezivo bistveno določa lastnosti končnega izdelka. Za te betone je značilno hitro strjevanje, visoka kemijska odpornost in izredne trdnostne lastnosti. Dobre trdnostne lastnosti so predvsem posledica odlične sprijemljivosti med agregatnimi zrni in vezivom. Kljub izrednim karakteristikam materiala se polimerni betoni, zaradi visoke cene polimernega veziva, uporabljajo le v posebnih primerih [Bokan-Bosiljkov, 1996].

Glede raziskav in uporabe s polimeri modificiranih betonov so najdlje na Japonskem in v Ameriki. Japonci so s polimeri modificiran beton začeli uporabljati že v petdesetih letih prejšnjega stoletja. Imajo izdelane tudi standarde za izdelavo polimerno cementnega betona. Uporabljajo ga za izdelavo novih konstrukcij in za sanacije.

V nadaljevanju bomo podrobneje pogledali lastnosti s polimeri modificiranega portland cementnega betona.

## 4.1 S polimeri modificiran portland cementni beton

Kot smo že prej povedali, je to beton, kjer del cementa zamenjamo s polimerom. Seveda na začetku uporabe polimerov ni šlo brez težav. Problemi so bili predvsem s povečanim deležem vnesenih zračnih por v betonu. Posledica so bile slabe mehanske in fizikalne lastnosti s polimeri modificiranih betonov, kar je številne raziskovalce pripeljalo do napačnih zaključkov o vplivu polimernih disperzij na lastnosti betona.

Pri majhnem deležu polimera v betonu so polimerni delci enakomerno porazdeljeni z brez ali malo medsebojnimi stiki. Pri večjih količinah dodanega polimera pa lahko oblikujejo znotraj cementnega kamna povezan, enakomerno porazdeljen skelet. Zato govorimo o modifikaciji portland cementnega betona, ko je P/C razmerje vsaj 0,05.

### 4.1.1 Polimeri

Beseda polimer izhaja iz grške besede *poly*, ki pomeni mnogo in *meros*, ki pomeni del. Torej kot že ime pove, so polimeri makromolekule, ki pa so sestavljene iz od sto pa do več tisoč majhnih molekul (monomerov), ki se ponavljajo. Monomeri so lahko sestavljeni iz dveh pa do 30 ogljikovih atomov. Monomeri se povežejo v polimere preko valenčnih vezi. Kemijsko reakcijo pri kateri se monomeri povezujejo v polimere imenujemo polimerizacija. Molekule polimerov so tako zgrajene iz zelo dolgih verig ogljikovih atomov, ki so lahko prekinjene z drugimi elementi (N, O, S,...). Polimere, ki so zgrajeni iz enakih ponavljajočih se monomerov, imenujemo homopolimere, polimere, ki pa so zgrajeni iz več različnih monomerov, pa kopolimere. Po obliki se molekule polimerov ločijo na linearne, razvejane, letvaste in zamrežene, kar potem vpliva na lastnosti polimerov. Polimeri so lahko naravni ali sintetični, organski ali anorganski.

Po uporabnosti jih razdelimo na dve veliki skupini:

- termoplaste ali plastomere in
- duroplaste ali duromere.

Termoplasti so tako po različnosti kot po številu večja skupina. So snovi iz nitastih molekul, ki so znotraj povezane z močnimi kovalentnimi vezmi. Niti so lahko med seboj povezane s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi ali šibko elektrostatično povezavo med vodikovimi atomi in drugimi elementi. Lastnosti termoplastov so zelo odvisne od temperature. Pri sobni temperaturi je termoplast tog in krhek. Z višanjem temperature pride do gibanja molekul. Zaradi tega se verige medsebojno sprostijo ter premikajo, ko se material obremeni. Za posamezno vrsto polimera je značilna temperatura steklastega prehoda  $T_g$ , pri kateri lahko nastopi večje premikanje molekul in pri kateri se mehanske in ostale lastnosti materiala bistveno spremenijo. Zaradi tega termoplasti po segrevanju nad temperaturo zmečkaišča, ki je nekje med 100 in 250 °C, ali pod obremenitvijo postanejo plastični in se zato dajo oblikovati [Žarnić, 2005].

Duroplasti so snovi z mrežasto strukturo, ki so znotraj povezane z močnimi kovalentnimi vezmi. Zato so togi, trdi in krhki in netaljivi oz. odporni na organska topila. Po oblikovanju ohranijo svojo obliko tudi pri višjih temperaturah in se termično ne dajo več preoblikovati. Posebna podskupina duromerov so elastoplasti (elastomeri). To so snovi iz prožnih polimernih verig, ki se po razbremenitvi povrnejo v prvotno obliko. Verige so pogosto prepletene v klobčiče, kar omogoča velike elastične deformacije materiala. Ko je elastoplast segret nad temperaturo steklastega prehoda ima sposobnost, da se po razbremenitvi povrne v prvotno obliko. Rečemo, da ima sposobnost plastičnega spomina.

### **Agregatna stanja:**

Agregatna stanja so posledica gibljivosti molekul pri različni temperaturi in tlaku. Pri enostavnih molekulah poteka sprememba agregatnega stanja pri točno določenih razmerah. Pri polimerih prehodi iz enega v drugo stanje niso tako točno določeni, temveč potekajo v nekem širšem območju temperature.  $T_g$  je temperatura steklastega prehoda in je prehod iz trdega v elastično trdno stanje.  $T_f$  je slabo definiran prehod iz elastičnega v tekoče stanje. V steklastem stanju je gibljivost molekul močno omejena. Deformacija je majhna, trenutno nastane in izgine, zanjo velja približen Hookov zakon elastičnosti. Polimer je krhek. V viskoelastičnem območju se molekula orientira v smeri zunanje sile. Deformacija je velika in povratna. V kapljevinastem območju je gibljivost molekul tako velika, da se te nepovratno gibljejo v smeri delovanja zunanje sile.

V gradbeništvu se najpogosteje uporabljajo naslednji monomeri:

- etilen
- akrilni estri in kisline
- stiren
- vinil acetat
- vinil propionat
- vinil klorid
- butadien

iz katerih dobimo s polimerizacijo med ostalimi tudi:

- stirenbutadien kavčuk (SBR)
- poliakrilni ester (PAE)
- poli(etilen-vinilacetat) (EVA)
- poli(vinilidenklorid-vinilklorid) (PVDC)
- poli(vinilacetat) (PVAC)
- poli(vinilpropionat) (PVP)
- polistirenakrilat (SA)

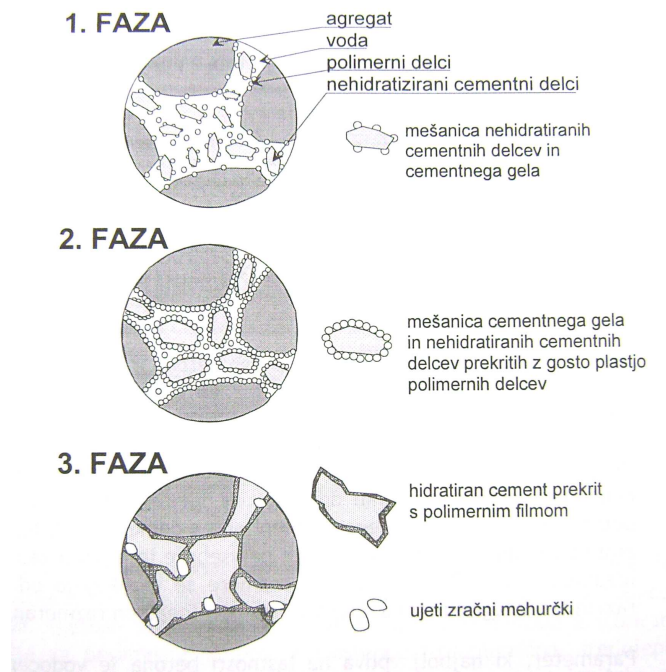
#### **4.1.2 Projektiranje materialov s polimerno-cementnim vezivom**

Projektiranje s polimeri modificiranih malt in betonov poteka enako kot pri običajnih cementnih maltah in betonih, le da imamo tu dodatno komponento. Namen je, da zagotovimo optimalne vrednosti tistih lastnosti, ki jih želimo izboljšati v primerjavi z materiali s cementnim vezivom. To so natezna in upogibna natezna trdnost, deformabilnost, sprejemljivost s podlago in kemijska odpornost. Delež polimera v betonu je od 5% pa do 15% glede na maso cementa, pri maltah pa od 5% pa do 20%. Za doseganje zelenih lastnosti ima polimernocementno (P/C) razmerje večji vpliv kot vodocementno (V/C) [Ohama]. Ko projektiramo, moramo poznati delež polimerov v disperziji (delež suhe snovi) in vodo disperzije odšteti od vode potrebne za doseg V/C razmerja. Pri mešanju moramo paziti, da orodje po uporabi takoj očistimo, saj je pozneje to skoraj nemogoče zaradi zelo dobre

sprejemljivosti polimera. Tudi sam čas obdelave betona je nekoliko krajši in je nekje največ eno uro [Ohama].

### 4.1.3 Oblikovanje polimernega filma

Sam proces strjevanja sveže polimerno cementne mešanice poteka malo drugače od običajne mešanice. Različne faze strjevanja prikazuje slika 4.2. Takoj po mešanju so delci polimerov enakomerno porazdeljeni v sveži betonski mešanici. Potem se na površino cementnega gela, na površino še nehidratiziranih cementnih delcev in na površino agregatnih zrn postopoma odlagajo delci polimera (1. faza). Z nadaljevanjem hidratacije izgineva voda iz por in zato se delci polimera sprijemajo v zvezno in na gosto zbito plast, ki prekriva cementni gel in agregatna zrna (2. faza). Proti koncu procesa hidratacije cementa iz por skoraj povsem izgine voda. Iz gosto zbitih delcev polimera nastane nepretrgan film, ki tvori monolitno polimerno mrežo (3. faza). Ta mreža prepreča hidratiziran cementni gel, zapolnjuje večje pore ter povezuje agregat in cementni kamen [Žarnić, 2005].



Slika 4.2: Faze strjevanje polimera [Žarnić, 2005].

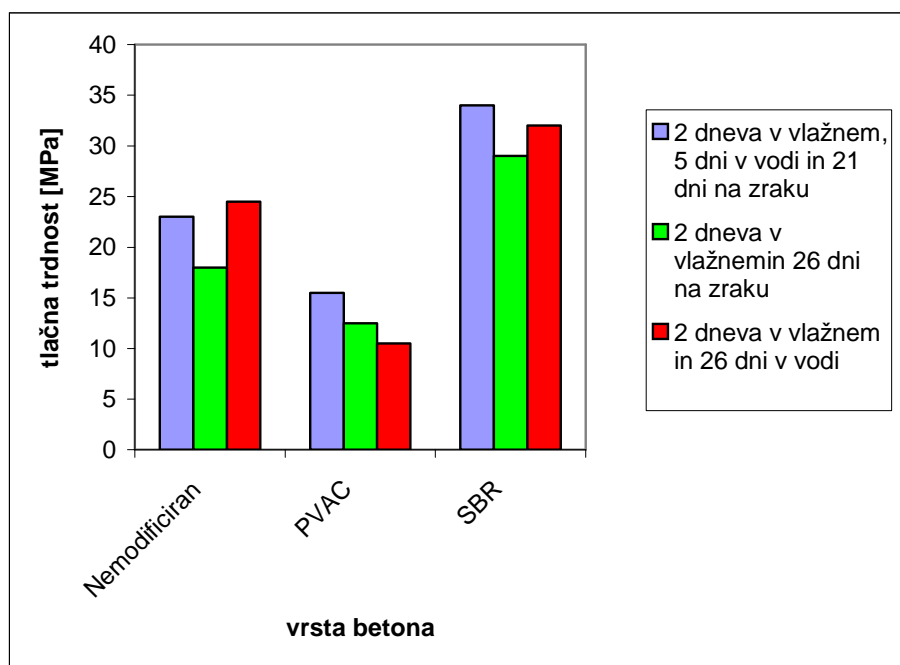


Slika 4.3: Povečava s polimeri modificiranega betona pri P/C 0,2 [Bokan-Bosiljkov, 1996].

#### 4.1.4 Pogoji nege med procesom strjevanja

Parameter, ki pomembno vpliva na lastnosti polimerno-cementnih malt in betonov, je nega. Izhajamo iz predpostavke, da so pogoji ugodni za oblikovanje polimernega filma. Potem je strjevanje polimernega veziva izključno posledica odvzemanja disperzijskega medija in izhlapevanje tega v okolico. Zato se polimerni film oblikuje le v okolici z nizko relativno vlago. Prav nasprotno pa je s cementnim vezivom. Ta razvije optimalne trdnosti v vlažnih pogojih, kot sta potopitev v vodo ali visoka relativna vlaga okolja. Se pravi, da bi polimerno-cementne malte in betoni razvili optimalne lastnosti, če bi bilo ves čas na razpolago dovolj vode za hidratacijo cementa, hkrati pa bi bilo omogočeno izsuševanje materiala. Ker obeh zahtev hkrati ni mogoče izpolniti, dosežemo realno najugodnejše lastnosti polimerno-cementnih betonov z ustrezno kombinacijo vlažne in suhe nege [Bokan Bosiljkov, 1996].

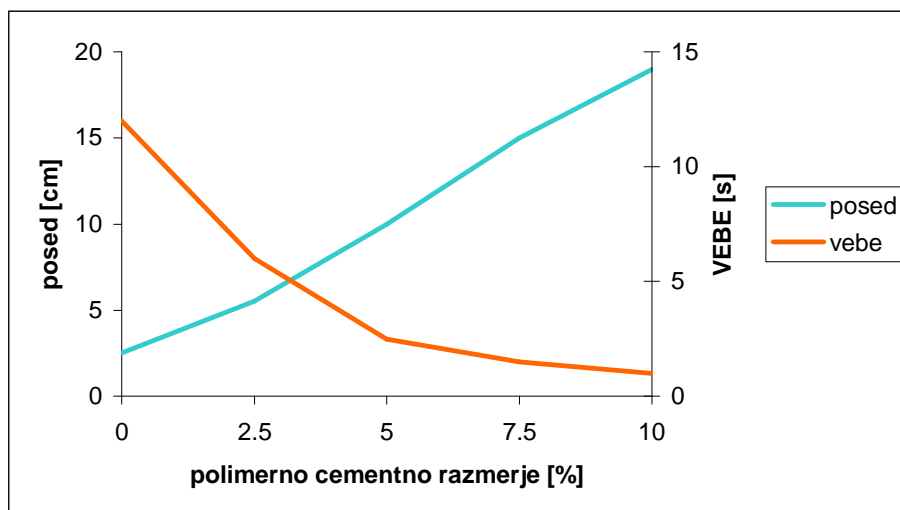
Mnogi raziskovalci, ki so preučevali vpliv nege, so prišli do spoznanja, da je najboljše nekaj dni beton negovati v vlažnem oz. v mokrem okolju, ostale dni pa na zraku. Razlike med različnimi negami je podal Ohama in so prikazane na sliki 4.4. Kot lahko vidimo, običajnemu betonu najbolj ustreza nega v mokrem, polimerno-cementnemu betonu pa nekaj dni v mokrem, potem pa v suhem okolju.



Slika 4.4: Primerjava različnih neg betona [Ohama, 1984].

#### 4.1.5 Lastnosti sveže polimerno-cementne mešanice

Polimerno-cementne malte in betoni se v svežem stanju zaradi dodanega polimera razlikujejo od običajnih malt in betonov. Razlike so odvisne od vrste polimera, polimernocementnega ter vodocementnega razmerja. Glavna razlika je v konsistenci mešanice. Z dodatkom polimera je konsistenca bolj plastična. Ko mešanici dodamo polimerno disperzijo, emulgatorji in stabilizatorji, ki so del disperzije, zmanjšajo površinsko napetost vode, kroglasti polimerni delci pa delujejo na svežo betonsko mešanico kot mazivo [Bokan-Bosiljkov, 1996]. Torej ima polimer plastifikacijski učinek. Razlez in posed se povečujeta s povečanjem P/C in V/C razmerja. Ta tendenca je bolj enakomerna pri večjih deležih cementa v mešanici [Ohama]. Vpliv polimera je viden na sliki 4.5.



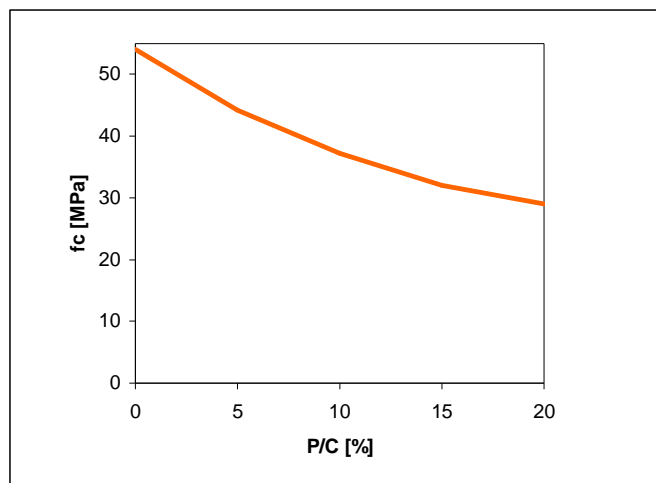
Slika 4.5: Konsistenca betona z dodatkom polimerne disperzije SBR ( $V/C=0,43$ ) v odvisnosti od P/C razmerja [Ohama, 1984].

Pri večini polimernocementnih malt in betonov je zaznati tudi povečano število zračnih por. To je posledica emulgatorjev in stabilizatorjev v polimernih disperzijah. Majhna količina dodatnih zračnih por poveča vgradljivost malte ali betona. Čim pa je ta količina večja, povzroči zmanjšanje tlačne trdnosti. Zato proizvajalci polimernih disperzij že serijsko dodajajo protipenilce, za kontrolo dodatno vnesenih zračnih por.

#### 4.1.6 Lastnosti strjenih polimerno cementnih malt in betonov

Kot smo že povedali, se je razvoj polimerno cementnih malt in betonov začel zaradi težnje po izboljšavi določenih lastnosti običajnih malt in betonov. V glavnem so vse spremembe pozitivne, razen ene, to je zmanjšanje tlačne trdnosti. To je sorazmereno s povečevanjem P/C razmerja, kar prikazuje graf na sliki 4.6. Do zmanjšanja tlačne trdnosti pride zaradi povečanja poroznosti betona in zaradi nižje tlačne trdnosti polimernega veziva v primerjavi s cementnim vezivom. Problem zmanjšanja trdnosti zaradi povečane poroznosti lahko rešimo z uporabo protipenila. Pomanjkljivost je tudi slabša odpornost na vodo, saj polimerno cementne malte in betoni ob izpostavitvi visoki relativni vlagi ali vodi izgubijo na trdnosti. Ta izguba je bolj opazna na upogibni kot na tlačni trdnosti, je pa upogibna trdnost še vedno večja kot pri običajnih maltah in betonih.

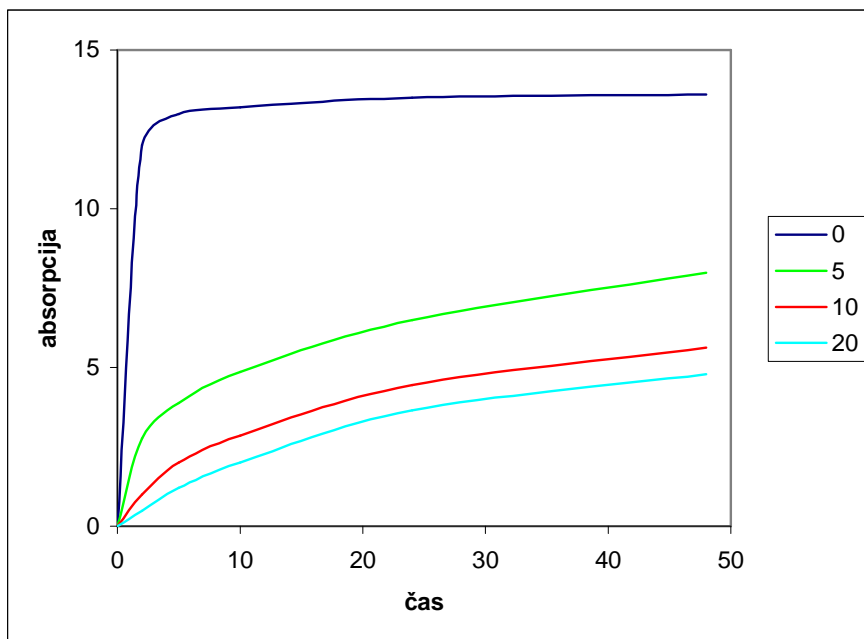




Slika 4.6: Vpliv P/C razmerja na tlačno trdnost betona (z uporabo polimerne disperzije SBR in brez protipenila) [Ohama, 1984].

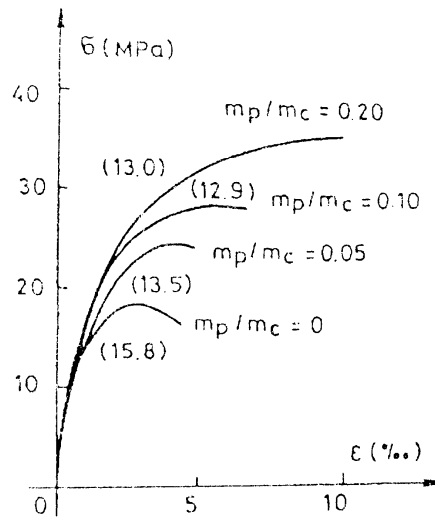
Eden glavnih razlogov za vključitev polimerov v cementno matrico je bilo krčenje, ki spremlja sušenje cementnega kamna. Krčenje polimerno-cementnih malt in betonov je lahko večje ali manjše od krčenja običajnih malt in betonov in zavisi od izbire polimera in njegovega deleža. S povečevanjem P/C razmerja krčenje v glavnem upada. Seveda za uporabo izberemo polimerne disperzije, ki zmanjšajo krčenje. Tako je na primer krčenje malt modificiranih s SBR kavčukom in P/C razmerjem večjim od 0,1 bistveno manjše kot pri nemodificiranih malti ter rahlo narašča z naraščanjem mejnega deleža stirena. Krčenje doseže končno vrednost po 28 dneh [Ohama].

Pri polimerno-cementnih maltah in betonih so večje pore zapolnjene s polimerom ali pa so zaprte s polimernim filmom. Večje je P/C razmerje, večji je zapolnilni oz. preplastitveni učinek. Zaradi tega imajo s polimeri modificirane malte in betoni manjšo absorpcijo vode in vodoprepustnost (slika 4.7). To pa prispeva k večji kemijski in zmrzliniski odpornosti teh materialov. Večja je tudi odpornost na udarno obremenitev in obrabo. To pa zato, ker imajo polimeri sami veliko odpornost na udarno obremenitev. Ti dve lastnosti se enako kot ostale izboljšujeta z večanjem P/C razmerja. Malte modificirane s SBR kavčukom s P/C 0,20 imajo odpornost na udarce okoli 10-krat večjo od običajnih malt [Ohama]. Pri obrabi je ta odpornost še boljše in se pri P/C 0,20 poveča kar za 20 do 50-krat.



Slika 4.7: Vpijanje vode v odvisnosti od časa in P/C razmerja pri uporabi SBR lateksa [Ohama, 1984].

Polimeri, ki jih uporabljamo za modifikacijo malt in betonov imajo elastični modul od 0,001 pa do 10 GPa in je dosti manjši od modula elastičnosti cementnega kamna, ki znaša od 10 pa do 30 GPa. Zaradi tega pride do razlik v sposobnosti deformiranja in duktilnosti med običajnimi in s polimeri modificiranimi maltami in betoni. Slednji v glavnem dosežejo večjo deformacijo in imajo večjo duktilnost in elastičnost od običajnih. Lastnosti so seveda odvisne od vrste in deleža polimera v maltah ali betonih. Z večanjem P/C razmerja maksimalna tlačna napetost pri porušitvi raste. Pri P/C 0,20 je napetost od 2 pa do 3-krat višja kot pri nemodificiranih maltah [Ohama]. Na sliki 4.8 je prikazan modul elastičnosti v odvisnosti od P/C razmerja. Kot lahko vidimo, modul elastičnosti z večanjem P/C razmerja pada. V oklepajih so napisani moduli elastičnosti za posamezno P/C razmerje.



Slika 4.8: Diagrami  $\sigma - \varepsilon$  betona modificiranega z SBR lateksom (modul elastičnosti v GPa)[Ohama, 1984].

Zelo dobrodošla lastnost modificiranih malt in betonov je boljša prijemnost z ostalimi materiali kot pri običajnih maltah in betonih. Ta lastnost je zelo dobrodošla pri sanacijah, kjer dotrajano plast odstranimo in jo nadomestimo z novo.

## 5 RAZISKAVE NA MALTAH

### 5.1 Raziskave na svežih mešanicah

Za doseganje dobrih rezultatov strjenih malt in betonov, so zelo pomembne že lastnosti svežih malt in betonov. Konsistenca je tisti parameter, ki nam pove plastičnost malte. Zadostno konsistenco potrebujemo za dobro vgrajevanje. Čim pa je konsistenca že preveč tekoča, imamo po nepotrebnem preveliko V/C razmerje ali pa smo po nepotrebnem uporabili plastifikator ali preveč plastifikatorja. Za merjenje konsistence smo uporabili metodo z razlezom. Poleg konsistence smo merili še poroznost malte, zaradi znanega aerantskega učinka polimera. Na koncu smo malti izmerili še prostorninsko maso.

#### 5.1.1 Razlez na stresalni mizici

S pomočjo razleza na stresalni mizici smo ugotavljali konsistenco malte. Ta je bila predpisana za dosego primerne vgradljivosti malte. Za določitev razleza potrebujemo:

- konusni lijak, narejen iz kovine, ki je odporna proti agresivnemu delovanju cementne paste. Notrajost lijaka je gladka, brez izboklin in udrtin,
- nastavek za polnjenje,
- stresalno mizico s premerom plošče 300 mm. Pri vsakem obratu stresalna mizica pade za 10 mm,
- leseno nabijalo in
- ravnilo.

Razlez se preveri takoj, ko se zameša malto in sicer na sledeč način. Pred vgrajevanjem navlažimo konusni lijak in stresalno mizico. Malto vgradimo v konusni lijak, ki je skupaj z nastavkom za polnjenje na stresalni mizici. Malto vgrajujemo v dveh plasteh, pri čemer vsako plast nabijemo z lesenim nabijačem s po 20 udarci. Eno minuto po končanem vgrajevanju

konusni lijak pazljivo dvignemo in začnemo s tresenjem stresalne mizice. Hitrost tresenja znaša en padec v sekundi. Po 15 padcih izmerimo razlez polimernocementne malte. Rezultat je povprečje dveh meritev v pravokotnih smereh.



*Slika 5.1: Stresalna mizica s konusnim lijakom in nastavkom za polnjenje.*

### **5.1.2 Vsebnost zraka v sveži malti**

Za določitev vsebnosti zraka v sveži malti potrebujemo:

- osnovno posodo s prostornino  $1 \text{ dm}^3$ ,
- pokrov s črpalko in manometrom in
- zidarsko žlico.

Osnovno posodo napolnimo s svežo malto. Vgradimo jo v dveh slojih in sicer, posodo napolnimo do polovice in malto nabijemo z lesenim nabijačem s po 15 udarci. Nato posodo prenapolnimo ter še drugo plast zbijemo s 15 udarci. Višek materiala odstranimo z zidarsko žlico. Nalegajoče površine osnovne posode in pokrova pazljivo očistimo in pokrov namestimo na osnovno posodo. Skozi odprtino z ventilom vlijemo vodo, s katero zapolnimo prostor med osnovno posodo in pokrovom. Ko prenehajo izhajati zračni mehurčki, ventila zapremo. Z ročno črpalko vnesemo toliko zraka, da kazalec na manometru pokaže ničlo. Nekaj sekund

kasneje odpremo ventil in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks, ki je hkrati tudi delež zraka v % glede na celotno prostornino sveže malte v posodi.



*Slika 5.2: Porozimeter.*

### **5.1.3 Prostorninska masa malte**

Za določitev prostorninske mase malte potrebujemo:

- neprepustno posodo s prostornino  $1 \text{ dm}^3$ , dovolj trda, da ne spremeni oblike, izdelana iz kovine, ki ne reagira s cementno pasto,
- tehtnico,
- leseno nabijalo in
- zidarsko žlico.

Posodo postavimo na tehtnico in jo stehamo ali pa pritismo taro (masa posode se odšteje). Potem posodo napolnimo do polovice in malto nabijemo z lesenim nabijačem s 15 udarci. Posodo prenapolnimo ter še drugo plast zbijemo s 15 udarci. Potem presežek malte odstranimo z zidarsko žlico in posodo stehamo. V primeru, da smo pritisnili taro, odčitek na tehtnici že predstavlja prostorninsko maso malte v  $\text{g/dm}^3$ , drugače pa odštejemo maso posode in dobimo prostorninsko maso malte v  $\text{g/dm}^3$ .

## 5.2 Raziskave na strjenih maltah

Da lahko ovrednotimo razlike med nemodificiranimi in s polimeri modificiranimi maltami oziroma, da lahko ugotovimo ali so dodatki dali želen rezultat, moramo narediti še raziskave na strjenih maltah. Preiskave smo opravili na prizmicah 4x4x16 cm. V našem primeru smo opravili naslednje preiskave:

- preiskava upogibne trdnosti,
- preiskava tlačne trdnosti,
- preiskava vpijanja vode,
- preiskava vpliva zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost in
- preiskava krčenja.

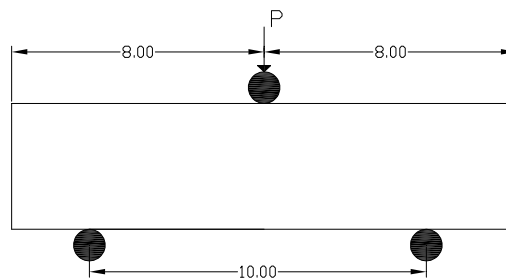
### 5.2.1 Preiskava upogibne trdnosti

Preiskave upogibne trdnosti izvajamo po standardu SIST EN 196-1 na prizmicah starih 28 dni. Obremenjujemo jih kot prikazuje slika 5.3. Hitrost obremenjevanja je predpisana. Ko dobimo porušno silo  $P_m$  lahko izračunamo upogibno trdnost  $\beta_f$ .

$$\beta_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda \cdot P_m}{a^3} = \frac{P_m}{4} \cdot 9,375 \text{ [MPa]}, \quad (5.1)$$

kjer so:

- $\lambda$  razmik med podporami [cm],
- $a$  dimenzija prečnega prereza prizmice [cm],
- $P_m$  sila ob poružitvi in
- $\beta_f$  upogibna trdnost.



Slika 5.3: Skica preiskave upogibne trdnosti.

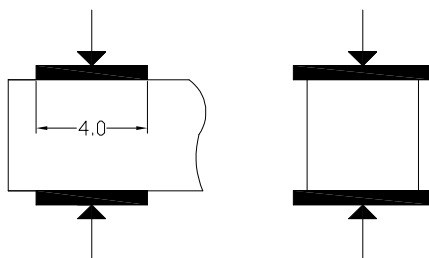


Slika 5.4: Preiskava upogibne trdnosti v laboratoriju.

### 5.2.2 Preiskava tlačne trdnosti

Tlačno trdnost malte določamo po standardu SIST EN 196-1. Polovice, dobljene pri preiskavi upogibne trdnosti, ustavimo v poseben jarem, nato pa pričnemo z obremenjevanjem s predpisano hitrostjo. Ob porušitvi računalnik zabeleži največjo silo, s katero potem izračunamo tlačno trdnost po formuli:

$$\beta_p = \frac{P_m}{a^2} = \frac{P_m}{16} \cdot 10 \text{ [MPa]}. \quad (5.2)$$



Slika 5.5: Skica preiskave tlačne trdnosti.





*Slika 5.6: Preiskava tlačne trdnosti v laboratoriju.*

### **5.2.3 Preiskava vpijanja vode**

Preiskavo vpijanja vode smo naredili po standardu EN 1015-18:2002(E). Po sušenju vzorcev do konstantne mase potopimo vzorce (polovičke prizmic) v vodo od globine 5 do 10 mm. Na dno posode položimo mrežico, da je zagotovljeno lažje vpijanje vode. V našem primeru smo potopili prelomljen del vzorca. Daljše ploskve vzorca oblepimo z neprepustnim trakom ali pa premažemo s silikonom, da preprečimo izhlapevanje. Le to je omogočeno na zgornji, manjši ploskvi. Vpianje vode določimo s spremembo mase. To izmerimo po 10 min (M1), 90 min (M2) in po 24 urah (M3) ter jo primerjamo z začetno maso (M0). V našem primeru smo zabeležili še maso po 4 dneh.



*Slika 5.7: Vzorec pripravljen za merjenje vpijanja vode in vzorci na katerih že poteka preiskava vpijanja vode.*

#### **5.2.4 Preiskava vpliva zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost malt**

Preiskavo vpliva zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost malt smo izvajali tako, da smo 14 dni stare prizmice izpostavili zmrzovanju pri temperaturi  $-20^{\circ}\text{C}$  za 16 ur in tajanju v vodi pri temperaturi  $+20^{\circ}\text{C}$  za 8 ur. Število ciklov zmrzovanje/tajanje je bilo enako 14. Po končanem cikličnem zmrzovanju/tajanju smo na prizmicah opravili preiskave upogibne in tlačne trdnosti in dobljene rezultate primerjali z rezultati, ki smo jih dobili na primerjalnih prizmicah, ki niso bile izpostavljene zmrzovanju/tajanju.

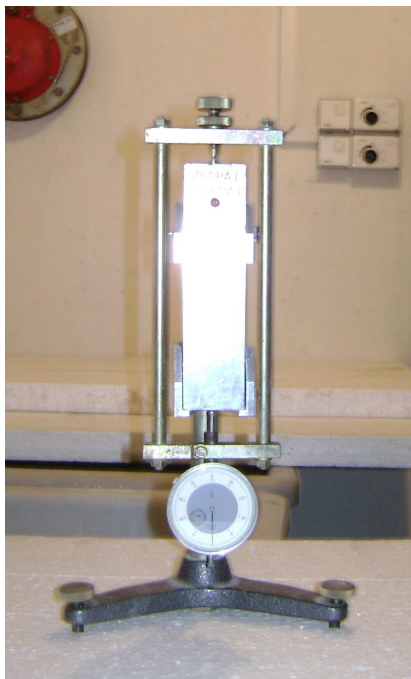


*Slika 5.8: Vzorci v zamrzovalniku, na drugi sliki pa po zmrzovanju v vodo potopljeni vzorci.*

### 5.2.5 Preiskava krčenja

Krčenje se meri na prizmicah z vgrajenimi reperji. Te vstavimo v kalup pred vgraditvijo malte. Paziti moramo, da je del reperja, ki se bo nahajal v malti, čist in da na njem ni olja, da zagotovimo dober stik med reperjem in malto.

Krčenje merimo s pomočjo Graf-Kaufmanovega deformetra (slika 5.9). Izdelan je prav za merjenje deformacij prizmic 4x4x16 cm. Opremljen je z merilno urico obsega 10 mm z natančnostjo 0,01 mm. Začetno nastavitvev merilne urice, ki mora biti za posamezno prizmico cel čas preiskave enaka, preverjamo s pomočjo primerjalne prizmice, ki je izdelana iz posebne legure, in sicer pred in po vsaki seriji merjenj. Prvo merjenje je po 72 urah od trenutka izdelave prizmic. Pred tem se prizmice negujejo v vodi, da se krčenje še ne prične. Naslednja merjenja so po 4., 7., 21. in 28 dneh.



Slika 5.9: Graf-Kaufmanov deformeter.

## **6 LASTNE RAZISKAVE**

### **6.1 Splošni opis**

Na tržišču je veliko polimernih disperzij. Zato smo se odločili, da v okviru diplomske naloge raziščemo tri polimerne disperzije in izberemo najugodnejšo za uporabo pri sanaciji vozlišč. Uporabili smo jih v treh različnih P/C razmerjih (0,05, 0,075, 0,1) in v kombinaciji z dvema različnima cementoma in agregatoma. Poleg tega smo naredili še primerjalne malte brez polimerne disperzije.

Zaradi velikega števila spremenljivk smo preiskave izvajali na maltah, ker so preiskave enostavnejše, a še vedno dovolj natančne. Na sveži mešanici smo merili razlez, prostorninsko maso in poroznost. Po 28 dneh smo izmerili tlačno in upogibno trdnost malte. Nato smo še enkrat izdelali vzorce iz vseh 24 receptur ter na njih opravili še preiskave vpliva zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost, krčenja ter vpijanja vode.

Istovčasno smo raziskovali še vpliv nege na lastnosti malt. Zato smo tri vzorce po razkalupljenju ves čas negovali v vodi, druge tri pa smo dva dni negovali v vodi, potem pa v komori pri temperaturi 20°C in relativni vlagi 50%.

### **6.2 Projektiranje malt**

Pred začetkom projektiranja malt smo določili vodocementno razmerje  $V/C=0,45$  in predpostavili volumen por. Ta znaša  $30 \text{ dm}^3$  za  $1000 \text{ dm}^3$  betona. V nadaljevanju je kot primer prikazano projektiranje polimernocementne malte s polimernocementnim razmerjem  $P/C=0,05$ .

Primer:

$$V_{betona} = V_{cementa} + V_{vode} + V_{polimera} + V_{agregata} + V_{zraka} \quad (6.1)$$

$$m_{veziva} = m_{cementa} + m_{polimera} = 400kg \quad (6.2)$$

$$P / C = 0,05 \Rightarrow$$

$$m_{cementa} = 0,95 \cdot 400kg = 380kg$$

$$m_{polimera} = 0,05 \cdot 400kg = 20kg$$

$$V / C = 0,45 \Rightarrow$$

$$m_{vode} = 0,45 \cdot 380kg = 171kg$$

Ker imamo iz tehničnih listov le podatek o prostorninski masi polimerne disperzije (1,03 kg/m<sup>3</sup>), moramo iz tega izračunati prostorninsko maso polimera. Za polimerno disperzijo C velja, da je v njej 46% suhe snovi. Iz tega sledi, da je v 1000 dm<sup>3</sup> polimerne disperzije

$$m_{polimera} = 1030kg \cdot 0,46 = 474kg$$

$$m_{disperzije} = m_{vode} + m_{polimera} \quad (6.3)$$

$$m_{vode} = m_{disperzije} - m_{polimera} = 1030kg - 474kg = 556kg$$

Prostornina 556 kg vode je 556 dm<sup>3</sup>. Iz tega sledi da je prostornina polimera

$$V_{polimera} = V_{disperzije} - V_{vode} \quad (6.4)$$

$$V_{polimera} = 1000dm^3 - 556dm^3 = 444dm^3$$

Sedaj ko imamo maso in prostornino polimera v 1000 dm<sup>3</sup> disperzije, lahko izračunamo gostoto polimera:

$$\rho_{polimera} = \frac{m_{polimera}}{V_{polimera}} \quad (6.5)$$

$$\rho_{polimera} = \frac{474kg}{444dm^3} = 1,07 \frac{kg}{dm^3}$$

$$1000dm^3 = \frac{m_{cementa}}{\rho_{cementa}} + \frac{m_{vode}}{\rho_{vode}} + \frac{m_{polimera}}{\rho_{polimera}} + \frac{m_{agregata}}{\rho_{agregata}} + V_{zraka}$$

$$1000dm^3 = \frac{380kg}{3,08} dm^3 + \frac{0,45 \cdot 380kg}{1kg} dm^3 + \frac{20kg}{1,07kg} dm^3 + \frac{m_{agregata}}{2,7kg} dm^3 + 30dm^3 \Rightarrow \quad (6.6)$$

$$m_{agregata} = 1773kg$$

Dobili smo količine za 1000 dm<sup>3</sup> betona. Mi pa potrebujemo količine za malto. Iz izbrane zrnastostne sestave agregata razberemo, da je presevek skozi sito 4mm 56%. Iz certifikata agregata dobimo podatek, da je prostorninska masa zrn agregata 2,7 kg/m<sup>3</sup>. Iz tega sledi:

$$m_{4/16} = (100 - 0,56) \cdot m_{agregata}$$

$$m_{4/16} = (100 - 0,56) \cdot 1773kg = 780kg \Rightarrow \quad (6.7)$$

$$V_{4/16}^{agregata} = \frac{m_{4/16}}{\rho_{agregata}} = \frac{780kg}{2,7kg} dm^3 = 289dm^3$$

Ker za malto potrebujemo le agregat frakcije 0/4, frakcijo 4/16 izločimo. Tako dobimo prostornino malte:

$$V_{malte} = 1000dm^3 - V_{4/16}^{agregata}$$

$$V_{malte} = 1000dm^3 - 289dm^3 = 711dm^3 \quad (6.8)$$

Iz posamezne maltne mešanice bomo izdelali šest prizmic. Na malti bomo preverili razlez, prostorninsko maso ter poroznost. Za vse skupaj bomo potrebovali 2 dm<sup>3</sup> malte. Da dobimo ustrezne količine, moramo vse skupaj deliti s količnikom:

$$kolicnik = \frac{711dm^3}{2dm^3} = 355,5 \quad (6.9)$$

Preizkus:

$$2dm^3 = \frac{711dm^3}{355,5} = \frac{380kg}{3,08 \cdot 355,5} dm^3 + \frac{171kg}{1kg \cdot 355,5} dm^3 + \frac{20kg}{1,07kg \cdot 355,5} dm^3 + \frac{993kg}{2,7kg \cdot 355,5} dm^3 + \frac{30dm^3}{355,5}$$
$$2dm^3 = \frac{1,069kg}{3,08kg} dm^3 + \frac{0,481kg}{1kg} dm^3 + \frac{0,056kg}{1,07kg} dm^3 + \frac{2,793kg}{2,7kg} dm^3 + 0,084dm^3 = 1,999dm^3 \approx 2dm^3$$

Dobili smo količine za 2 dm<sup>3</sup> malte:

- m<sub>cementa</sub> = 1069g,
- m<sub>agregata</sub> = 2793g,
- m<sub>vode</sub> = 481g,
- m<sub>polimera</sub> = 56g.

Ker imamo polimer v obliki polimerne disperzije, moramo izračunati količino potrebne disperzije. V disperziji je 46% suhe snovi (polimera). Torej rabimo:

$$m_{disperzije} = \frac{56g}{0,46} = 122g$$

V disperziji je tudi voda zato dejansko rabimo le:

$$m_{vode}^{dejanske} = m_{vode} - (m_{disperzije} - m_{polimera}) \quad (6.10)$$
$$m_{vode}^{dejanske} = 481g - (122g - 56g) = 415g$$

vode.

Za malto bomo uporabili agregat frakcij 0/4 in 0/2. Največjo prostorninsko maso agregata v zbitem stanju dobimo, če uporabimo 80% frakcije 0/2 in 20% 0/4. Iz tega sledi, da rabimo:

$$m_{0/2} = 0,80 \cdot m_{agregata}$$

$$m_{0/2} = 0,80 \cdot 2793 \text{ g} = 2234 \text{ g}$$

(6.11)

$$m_{0/4} = 0,20 \cdot m_{agregata}$$

$$m_{0/4} = 0,20 \cdot 2793 \text{ g} = 559 \text{ g}$$

Dejanske količine cementa, disperzije, vode in agregata za  $2\text{dm}^3$  malte so:

- **$m_{\text{cementa}} = 1069 \text{ g}$ ,**
- **$m_{0/2} = 2234 \text{ g}$ ,**
- **$m_{0/4} = 559 \text{ g}$ ,**
- **$m_{\text{vode}} = 415 \text{ g}$ ,**
- **$m_{\text{disperzije}} = 112 \text{ g}$ .**

## 6.3 Uporabljeni materiali

### 6.3.1 Cement

Za izdelavo polimerno cementnih malt smo uporabili dva različna cementa in sicer:

- CEM I 42,5R (v nadaljevanju cement I) in
- CEM II/A-S 42,5R (v nadaljevanju cement II).

Cement I je portlandski cement z največ 5% dodatkov (CEM I), trdnostnega razreda 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo (R).

Cement II je tudi portlandski cement z dodatkom žindre (S), trdnostnega razreda 42,5, z visoko zgodnjo trdnostjo. Oba cementa izpolnjujeta zahteve standarda SIST EN 197-1.



### 6.3.2 Agregat

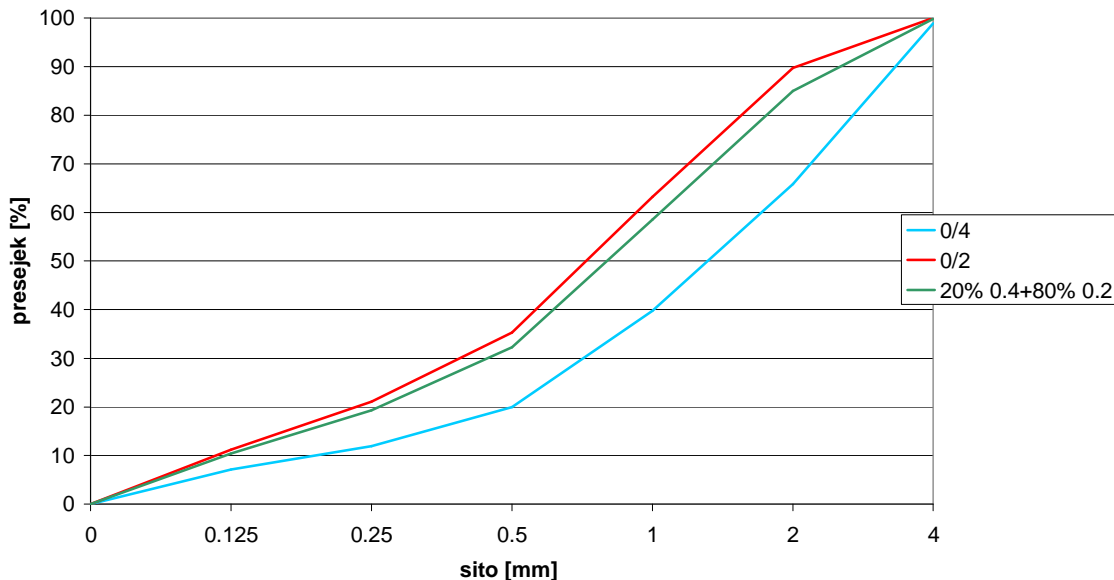
Uporabili smo dve vrsti agregatov:

- drobljenec in
- prod.

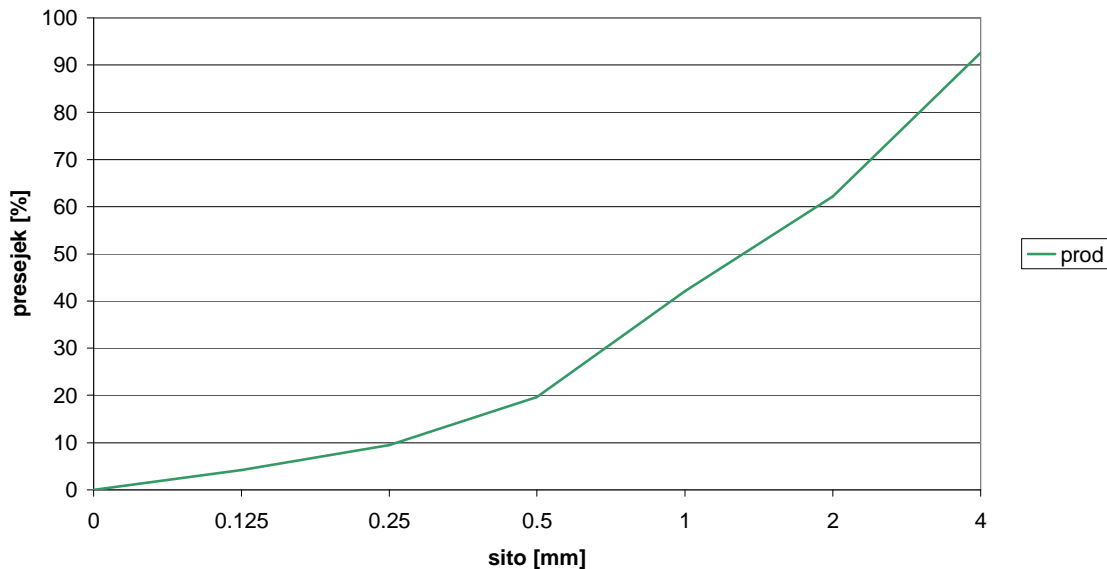
Pri drobljencu smo imeli dve frakciji in sicer frakcijo 0/2 ter frakcijo 0/4. S sejnalno analizo smo določili zrnavostno krivuljo obeh frakcij. Kot lahko vidimo na sliki 6.1, je v obeh frakcijah veliko prašnih delcev. Za izdelavo prizmic smo uporabili 20 masnih % frakcije 0/2 in 80 masnih % frakcije 0/4. S tem razmerjem smo dobili največjo prostorninsko maso agregata v zbitem stanju. Pri drobljencu pričakujemo višje trdnosti zaradi boljše sprejemljivosti in zaklinitve zrn.

Prodnat agregat je iz reke Save. Pri sejalni analizi smo naleteli na precej nadmernih zrn. Zato smo morali la ta pred uporabo agregata za malto izločiti s ponovnim sejanjem čez sito 8 mm. V produ je bilo videti tudi delce premoga, kar bo verjetno imelo negativen vpliv na rezultate na maltah izdelanih s prodom.

Oba agregata ustrezata zahtevam standarda SIST EN 12620.



Slika 6.1: Zrnavostna krivulja za drobljen agregat.



Slika 6.2: Zrnastostna krivulja za prod.

### 6.3.3 Voda

Uporabili smo navadno vodo iz vodovoda.

### 6.3.4 Superplastifikator

Za doseganje ustrezne konsistence smo pri nekaterih recepturah uporabili tudi učinkovit superplastifikator nove generacije - hiperplastifikator.

### 6.3.5 Polimeri

Uporabili smo polimere v obliki polimerne disperzije. Za izdelavo s polimeri modificirane malte smo uporabili tri različne polimerne disperzije dveh različnih proizvajalcev. Vse se prodajajo pod komercialnimi imeni za izboljšavo mehanskih lastnosti, za boljšo odpornost, neprepustnost, boljšo sprijemljivost in obdelavnost malt ter betonov. Med seboj se razlikujejo po vrsti in količini polimera v disperziji.

Lastnosti polimernih disperzij so predstavljene v tabelah.

*Preglednica 6.1: Lastnosti polimerne disperzije A.*

Ime polimera:	Stiren butadien
Barva:	Bela
Gostota:	1,03 kg/ dm <sup>3</sup>
pH vrednost:	Pribl. 10
Količina suhe snovi:	Pribl. 47%

*Preglednica 6.2: Lastnosti polimerne disperzije B.*

Ime polimera:	Vinil acetat etilen vinil klorid terpolimer
Barva:	Bela
Gostota:	Pribl. 1 kg/dm <sup>3</sup>
pH vrednost:	Pribl. 5,5
Količina suhe snovi:	(29,5±1,4)%

*Preglednica 6.3: Lastnosti polimerne disperzije C.*

Ime polimera:	Stiren butadien
Barva:	Bela
Gostota:	1,0 kg/ dm <sup>3</sup>
pH vrednost:	9 ± 1
Količina suhe snovi:	(46 ± 1)%

## 6.4 Preiskave na svežih maltah

### 6.4.1 Mešanje malte

Za pripravo malt smo uporabili specialni mešalec RILEM-CEN. Mešalec RILEM-CEN se obrača okoli svoje vzdolžne osi in istočasno se planetarno obrača okoli pogonske osi. Možni sta dve hitrosti mešanja. Pri hitrosti ena mešalec naredi  $140 \pm 5$  obratov okoli lastne osi in  $62 \pm 5$  obratov v minuti okoli pogonske osi. Pri drugi hitrosti naredi  $285 \pm 10$  obratov v minuti okoli lastne osi in  $125 \pm 10$  obratov v minuti okoli pogonske osi [Gradiva-vaje, 2006].



*Slika 6.3: Mešalec.*

Pred začetkom mešanja smo najprej navlažili posodo mešalca in lopatico za mešanje. Nato smo v posodo za mešanje naprej nalili vodo, polimerno disperzijo in po potrebi še superplastifikator. Dodali smo še cement in začeli z mešanjem pri hitrosti ena. Po 30 sekundah smo med mešanjem dodali še agregat in še 30 sekund mešali pri nespremenjeni hitrosti. Potem smo prestavili na drugo hitrost s katero smo mešali še 150 sekund.

Ta postopek smo uporabili pri vseh maltah razen pri maltah s cementom I in polimerno disperzijo B. Pri teh maltah smo najprej zmešali skoraj vso vodo, superplastifikator in cement. Po 10 sekundah mešanja smo dodali še polimerno disperzijo in ostalo vodo (to vodo smo potrebovali za pomitje posode v kateri se je nahajala polimerna disperzija). Nato smo po 30 sekundah od začetka mešanja dodali še pesek in nadaljevali postopek mešanja kot pri ostalih maltah. Ta postopek smo uporabili, da smo dosegli boljši učinek superplastifikatorja.

Vsega skupaj smo zmešali 24 različnih mešanic. Vsake mešanice smo naredili 2 dm<sup>3</sup>, kar je zadostovalo za raziskave na sveži malti in vlitje mešanice v dva trodelna kalupa. Tako smo dobili šest prizmic dimenzij 4x4x16 cm. Vsak kalup, namazan s sredstvom za lažje odstranjevanje že strjene malte, smo najprej napolnili do polovice potem pa malto v vsakem prekatu kalupa zbili s po petimi udarci lesenega nabijala. Nato smo prenapolnili kalup, ponovili postopek z nabijalom in odstranili odvečno malto.

Na svežih maltah smo preverjali naslednje lastnosti:

- razlez,
- prostorninsko maso in
- vsebnost zraka v sveži malti.

#### **6.4.2 Razlez, prostorninska masa in vsebnost zraka**

##### **Cement II**

Prvo mešanico malte smo izdelali z drobljencem, cementom II in polimerom C. Polimerno-cementno razmerje je bilo 0,05. Po mešanju smo najprej preverili razlez. Ker je bil ta premajhen (zahtevali smo razlez 180 mm), smo dodali superplastifikator in sicer smo ga dodali k vodi in polimerni disperziji. Ta postopek je veljal za vse mešanice, kjer je bil potreben superplastifikator, razen za malte s cementom I in polimerno disperzijo B. Za ustrezen razlez smo potrebovali 0,1% superplastifikatorja. Ko smo P/C razmerje povečali na 0,075 in 0,1, superplastifikatorja nismo več potrebovali, zaradi dovolj velikega plastifikacijskega učinka polimera. Z naraščanjem P/C razmerja se je manjšala prostorninska

masa malte, ker je polimer lažji od cementa. Poroznost je ostajala konstantna (20% večja od primerjalne malte).

Naslednje tri mešanice so bile izdelane s polimerno disperzijo A. Tu smo opazili izredni plastifikacijski učinek polimera. Že pri  $P/C=0,05$  smo brez superplastifikatorja dobili razlez 270 mm, kar je za 42% več od primerjalne malte s 0,2% plastifikatorja. Pri  $P/C=0,10$  je razlez že tolikšen, da ga nismo mogli več izmeriti saj je malta segala že čez rob plošče (razlez večji od 300mm). Zato smo določili razlez s posedom. Zanimivo je, da pri tem polimeru, v nasprotju z ostalima dvema, prostorninska masa z večanjem  $P/C$  razmerja narašča. To se je zgodilo zaradi padanja poroznosti. Je pa bila poroznost pri  $P/C$  razmerju 0,05 kar 9% (114% večja kot pri primerjalni malti), potem pa je z večanjem  $P/C$  razmerja upadala. Pri  $P/C$  razmerju 0,075 in 0,10 smo opazili rahlo segregacijo.

Malte s polimerno disperzijo B imajo izredno visoko prostorninsko maso (skoraj enaka kot pri primerjalni malti). Ta tako kot pri disperziji C pada z večanjem  $P/C$  razmerja. Poroznost je ves čas konstantna in je najmanjša od vseh mešanic (za 10% manjša od primerjalne mate). Opazili pa smo, da ima disperzija B v primerjavi z ostalima najmanjši plastifikacijski učinek. Tako je bilo tudi pri  $P/C$  razmerju 0,075 še potrebno dodati 0,05% superplastifikatorja za ustrezno konsistenco.

Pri primerjalni malti s cementom II smo uporabili največ superplastifikatorja. To pa zato, ker ni vsebovala polimera, ki bi hkrati deloval tudi kot plastifikator. Poroznost je bila rahlo večja kot pri maltah z disperzijo B in dosti manjša kot pri ostalih dveh polimerno-cementnih maltah. Prostorninska masa je visoka in primerljiva s prostorninsko maso malte z disperzijo B.

### **Cement I**

Vse skupaj smo še enkrat ponovili z zamenjavo cementa. Namesto cementa II smo uporabili cement I. Že pri prvi mešanici smo opazili ogromno razliko. Za doseganje iste obdelavnosti smo potrebovali dosti več superplastifikatorja. Potrebovali smo kar precej ponovitev, da smo dosegli ustrezno konsistenco. Pri polimerni disperziji C se je s povečevanjem  $P/C$  razmerja potreba po superplastifikatorju manjšala zaradi plastifikacijskega učinka. Hkrati je padala prostorninska masa, ker je polimer lažji od cementa. Poroznost je z večanjem  $P/C$  razmerja

naraščala. V primerjavi s cementom II smo dobili malenkost večjo prostorninsko maso malt (za 1%) ter večjo poroznost (za 10%).

Tudi s cementom I ima disperzija A izreden plastifikacijski učinek, vendar manjši kot pri cementu II. Pri P/C razmerju 0,05 smo sicer še potrebovali 0,7% superplastifikatorja, potem pa ne več. Prostorninska masa je tudi tukaj, kot pri cementu I, z večanjem P/C razmerja naraščala zaradi upadanja poroznosti.

Pri disperziji B smo za dosego ustrezne konsistence uporabili celo drug način mešanja. Najprej smo zmešali skoraj vso vodo + polimerno disperzijo + cement. Po 10 sekundah mešanja smo dodali še superplastifikator in ostalo vodo (to vodo smo potrebovali za razredčenje superplastifikatorja, ker smo ga dodajali v zelo majhnih količinah). Nato smo po 30 sekundah od začetka mešanja dodali še pesek in nadaljevali postopek mešanja kot pri ostalih maltah. Tako smo za P/C razmerje 0,05 potrebovali kar 1% superplastifikatorja. Z večanjem P/C razmerja je ta potreba po superplastifikatorju seveda padala. Padala je tudi prostorninska masa, ki je v tem primeru tukaj izredno velika (za 1% manjša od primerjalne malte), poroznost pa je naraščala.

Primerjalna malta s cementom I je imela skoraj identično prostorninsko maso in poroznost kot s cementom II. Je pa bilo pri cementu I potrebno več superplastifikatorja za enako konsistenco.

### **Prod**

Napravili smo tudi recepturo s prodnatim peskom frakcije 0/4, cementom II in polimerno disperzijo C. V primerjavi z malto iz drobljenega agregata je imela malta iz proda dosti boljše vgradljivost (za 15%). Tudi njena prostorninska masa je bila večja in je naraščala s P/C razmerja. To pa zato, ker je poroznost padala z večanjem P/C razmerja in je bila pri P/C razmerju 0,10 najmanjša od vseh in sicer le 2,6% (za 50% manjše od primerjalne malte).

### **Povzetek:**

Ko primerjamo mešanice med seboj, je najbolj očitna razlika med cementoma. Malte izdelane s cementom I so pri istem V/C razmerju dosti slabše vgradljive od tistih s cementom II. Zato moramo pri pripravi malte s cementom I dodati več superplastifikatorja, kar pa malto podraži. Druga zelo opazna lastnost je, da imajo malte s polimerno disperzijo B dosti večjo prostorninsko maso od ostalih malt. Po vsej verjetnosti zaradi najmanjšega deleža por od vseh malt. To velja za oba cementa. Ima pa polimer B najmanjši plastifikacijski učinek. Največji plastifikacijski učinek pa ima polimer A. Pri polimeru A je tudi zanimivo, da prostorninska masa z večanjem P/C razmerja narašča, ker poroznost pada. To je ravno obratno kot pri ostalih dveh polimerih. Imajo pa malte s polimerom A zelo veliko poroznost, tudi do 9%.

Velike razlike v lastnostih maltnih mešanic smo dobili tudi pri zamenjavi agregata. Malte iz prodnatega agregata so bile bolj vgradljive kot tiste iz drobljenega agregata. Tudi njihova prostorninska masa je bila večja. Zanimivo pa je, da je tukaj z naraščanjem P/C razmerja poroznost padala in je bila pri P/C razmerju 0,1 le še 2,6%. Učinek naraščanja P/C razmerja je bil torej ravno obraten kot pri drobljenem agregatu.

## **6.5 Raziskave na strjenih maltah**

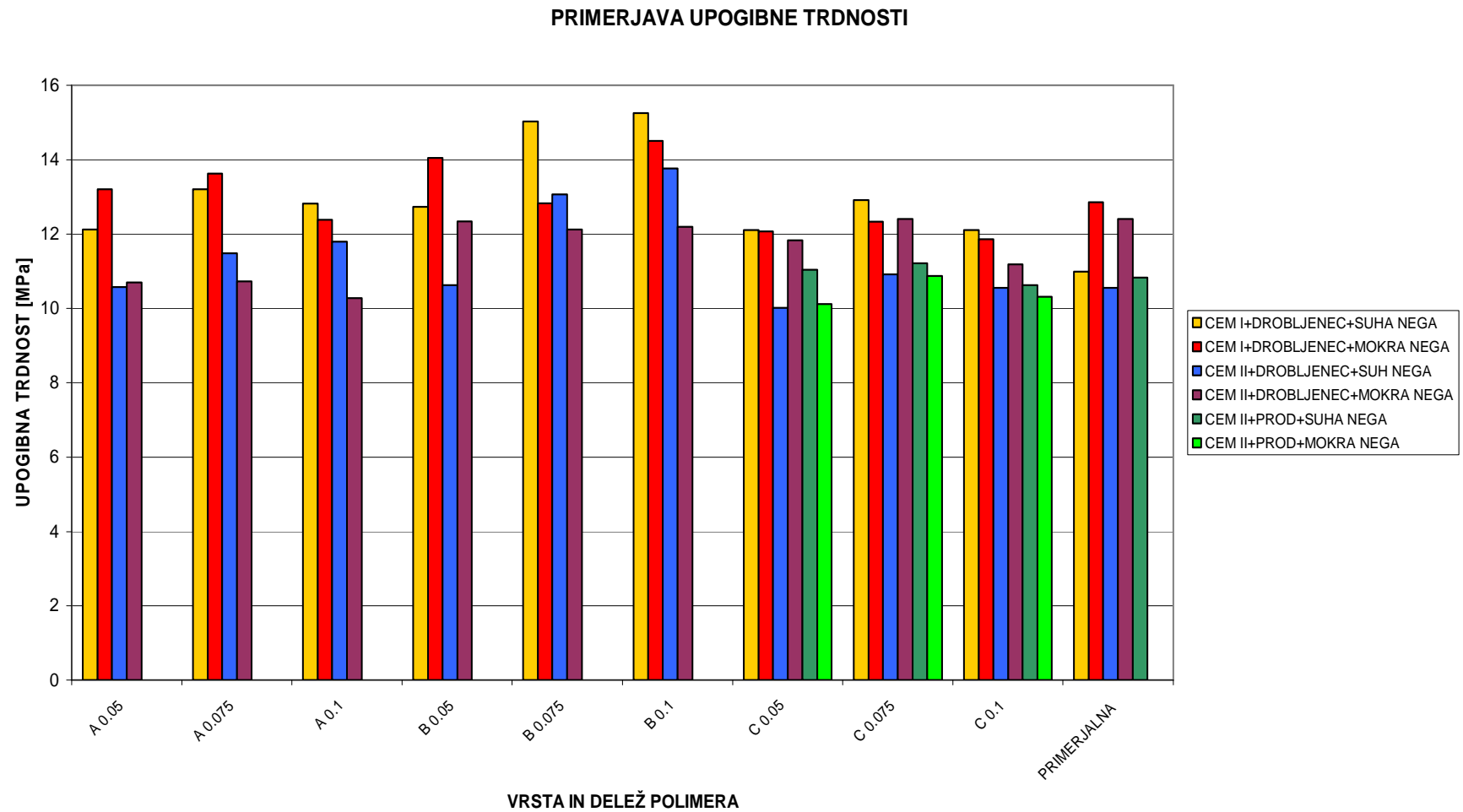
Na strjenih maltah smo opravili:

- preiskavo upogibne trdnosti,
- preiskavo tlačne trdnosti,
- preiskavo krčenja,
- preiskavo vpliva zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost in
- preiskavo vpijanja vode.

### **6.5.1 Preiskava upogibne trdnosti**

Preiskavo upogibne trdnosti smo opravili v skladu z zahtevami standarda SIST EN 196-1. Prizmice so bile na dan preiskave stare 28 dni. Polovica prizmic je bila ves čas negovana v vodi, polovica pa po razkalupljenju 2 dni v vodi in 25 dni v komori s temperaturo 20°C in





Slika 6.4: Primerjava upogibne trdnosti.

relativno vlago 50%. Dobili smo precej različne rezultate, ki pa so posledica nege, različnih polimernih disperzij, P/C razmerij, agregatov in cementov.

Če na hitro pogledamo graf na sliki 6.4, najbolj izstopa izredno visoka upogibna trdnost polimera B pri P/C razmerju 0,1 in suhi negi. Ta je za 27% višja od upogibne trdnosti primerjalne malte v mokri negi oz. za kar 48% višja od primerjalne malte v enaki, torej suhi negi. Ravno nega ima pomemben vpliv na trdnost. Kot smo predvidevali, modificirane malte dosegajo višje vrednosti v suhi negi, nemodificirane pa v mokri negi (izjema je le polimer C v kombinaciji s cementom II in drobljenim agregatom). Ta vpliv je še posebej izrazit pri višjih P/C razmerjih. Pri P/C razmerju 0,05 je delež polimera še tako majhen, da maltam bolj ustreza nega v mokrem, pri višjih razmerjih pa jim bolj ustreza nega na suhem.

Če primerjamo upogibne trdnosti s polimeri modificiranih malt med seboj vidimo, da najvišje trdnosti dosega malta s polimerom B, ne glede na vrsto cementa ali nego. Najslabše se je odrezala malta s polimerom C, saj pri tej malti upogibna trdnost z naraščanjem P/C razmerja celo pada, namesto da bi naraščala. Razlika v trdnosti med maltami s polimeroma B in C je tudi do 40%. Pri P/C razmerjih 0,05 in 0,075 polimer C pri določenih sestavah sploh nima nobenega vpliva na upogibno trdnost.

V vseh primerih se je cement I izkazal za boljšega od cementa II (v povprečju za 15% višja upogibna trdnost). Najmanjša razlika je pri primerjalnih maltah, polimer pa razliko poveča. To kaže na to, da je učinek polimera odvisen od vrste uporabljenega cementa.

Na koncu pogledajmo še vpliv agregata. Pri primerjalni malti je razlika v upogibnih trdnostih med malto z drobljenim agregatom in prodom zelo majhna (2%). Ko pa dodamo polimer, pa dobimo zanimive rezultate. Pri drobljencu smo dobili boljše rezultate v mokri negi, pri produ pa boljše v suhi negi in to že pri P/C 0,05. Pri tem razmerju in suhi negi je prod boljši od drobljenca, potem pa z večanjem P/C razmerja ta razlika izgine. Pri mokri negi pa je razlika pri vseh P/C razmerjih precejšnja in v korist drobljencu.

Če na koncu povzamemo lahko rečemo, da dobimo najboljše rezultate za upogibno trdnost s cementom I, polimerno disperzijo B in drobljencem v suhi negi.

## 6.5.2 Preiskava tlačne trdnosti

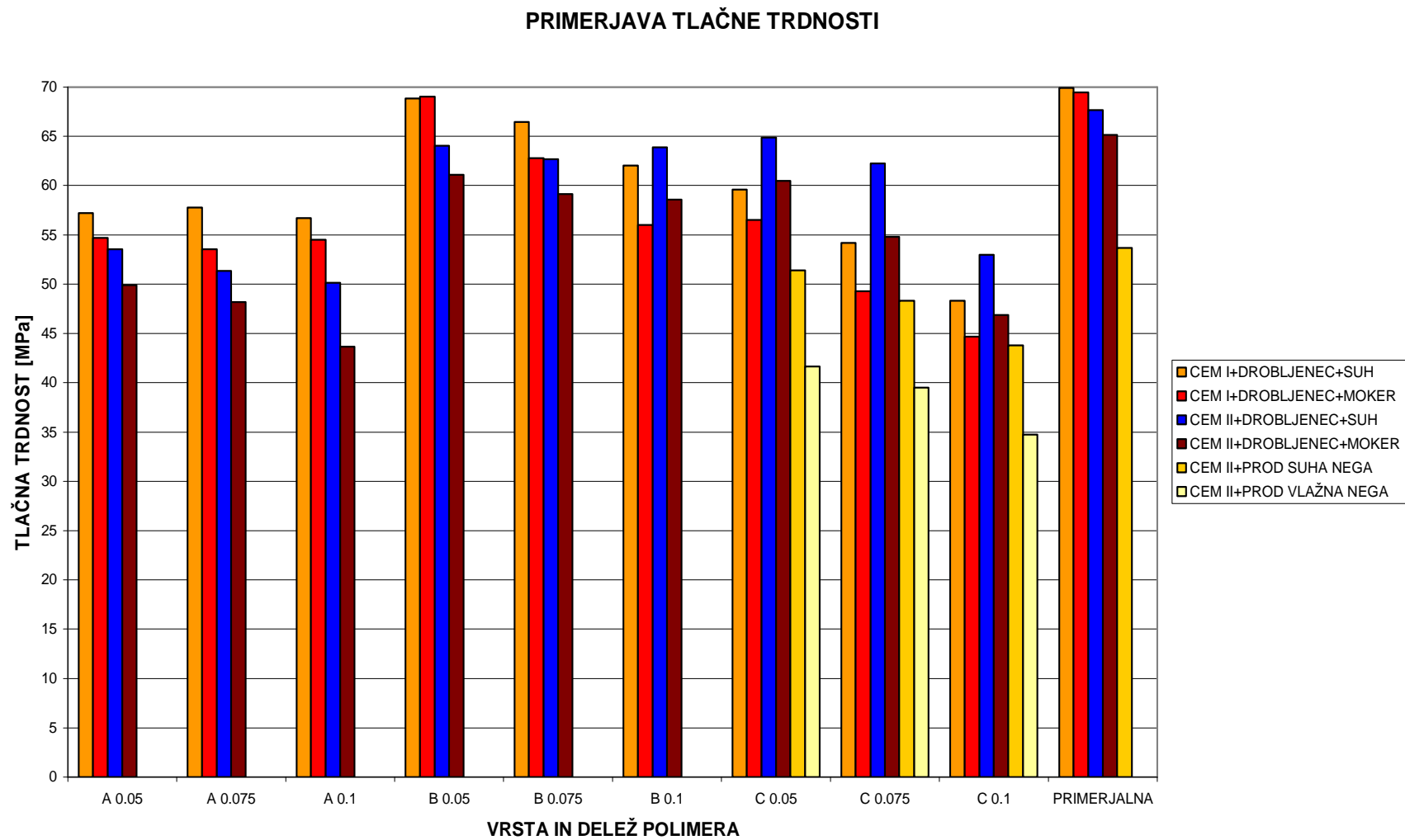
Polovičke, ki smo jih dobili pri preiskavi upogibne trdnosti, smo uporabili za preiskavo tlačne trdnosti v skladu z zahtevami standarda SIST EN 196-1. Rezultati so prikazani na sliki 6.5.

Polimer, ki ima manjšo tlačno trdnost kot cementni beton, praviloma zniža tlačno trdnost maltam. To so pokazali tudi rezultati naših raziskav, saj so vse vrednosti manjše kot pri nemodificiranih maltah. Take rezultate smo tudi pričakovali, saj so to odkrili tudi ostali raziskovalci. Največji padec trdnosti smo dobili pri polimeru C in P/C razmerju 0,1. Trdnost je kar za 36% manjša od primerjalne trdnosti pri istih pogojih nege. Najboljše rezultate smo dobili s polimerom B. Trdnosti so le malo manjše od primerjalnih (pri P/C=0,05 je razlika 2%, pri P/C=0,075 5% in pri P/C=0,1 12%).

Zanimivo je delovanje polimera A v kombinaciji s cementom I, saj P/C razmerje skoraj nič ne vpliva na tlačno trdnost. Podobne rezultate smo dobili tudi pri polimeru B v kombinaciji s cementom II. Pri ostalih kombinacijah polimera in cementa smo dobili pričakovan upad tlačne trdnosti z večanjem P/C razmerja. Upadanje tlačne trdnosti z večanjem P/C razmerja je največje pri polimeru C (pri P/C=0,05 je upad 14%, pri P/C=0,075 21% in pri P/C=0,1 30%).

Ko primerjamo vpliv obeh vrst cementov je težko reči, kateri je boljši. S polimerom A dobimo boljše rezultate s cementom I, s polimerom C pa s cementom II. Pri polimeru B daje pri P/C razmerju 0,05 boljše rezultate cement I, pri P/C razmerju 0,1 pa cement II. Pri nemodificirani malti smo višje tlačne trdnosti dosegli s cementom I, vendar zmanjšanje tlačne trdnosti malt s cementom II ni bistveno (3%).

Vpliv vrste agregata je pri tlačni trdnosti zelo pomemben. Že pri primerjalni malti smo dobili s prodrom bistveno nižjo trdnost kot pri drobljencu (21%), prisotnost polimera pa je trdnost še dodatno zmanjšala. Pri vseh s polimeri modificiranih maltah, razen pri malti s polimerom B in P/C razmerjem 0,05, so tlačne trdnosti malte negovane na zraku večje, kot pri maltah negovanih v vodi. To velja celo za nemodificirane malte.



Slika 6.5: Primerjava tlačne trdnosti.

### 6.5.3 Vpijanje vode

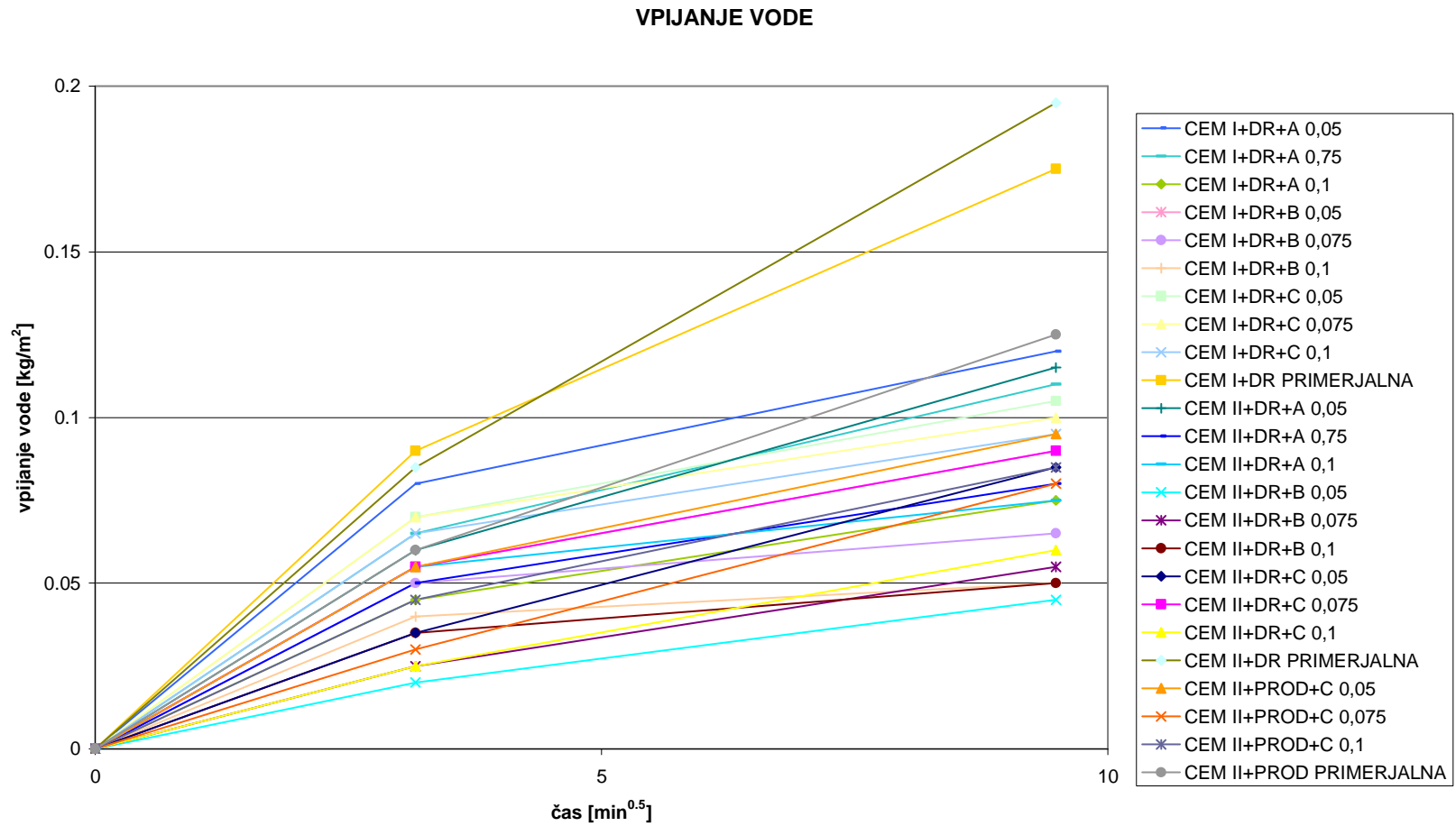
Na polovičkah prizmic, ki smo jih dobili s preiskavo upogibne trdnosti, smo izvedli preiskavo vpijanja vode. Na grafih so prikazane povprečne vrednosti dobljene na treh vzorcih. Zaradi večje preglednosti smo rezultate prikazali na dveh grafih. V legendi je najprej napisan cement, potem vrsta peska (drobljenec ali prod), nazadnje pa še vrsta in delež polimera.

Na sliki 6.6 je prikazano vpijanje vode malt po 10-ih in 90-ih minutah. Kot lahko vidimo iz prikazanih rezultatov, je že pri 10-ih minutah opazen vpliv polimera. Pri vseh modificiranih vzorcih se je vpijanje vode po pričakovanjih zmanjšalo. Največji vpliv na zmanjšanje vpijanja vode je imel polimer B. Pri maltah s cementom I se vpijanje vode manjša z večanjem P/C razmerja. Pri cementu II to ne velja. Pri kombinaciji cementa II in polimera B je na primer vpijanje vode v prvih 10-ih minutah najmanjše pri P/C razmerju 0,05, največje pa pri P/C razmerju 0,10. Je pa vpijanje vode malt izdelanih s cementom II manjše od malt izdelanih s cementom I. Pri zamenjavi drobljenega agregata s prodnatim je vpijanje vode primerjalne malte s prodnatim agregatom najmanjše v primerjavi z ostalima dvema primerjalnima maltama. Z dodatkom polimera se vpijanje vode malt s prodnatim agregatom zmanjša, vendar se ne giblje po nobenih zakonitostih.

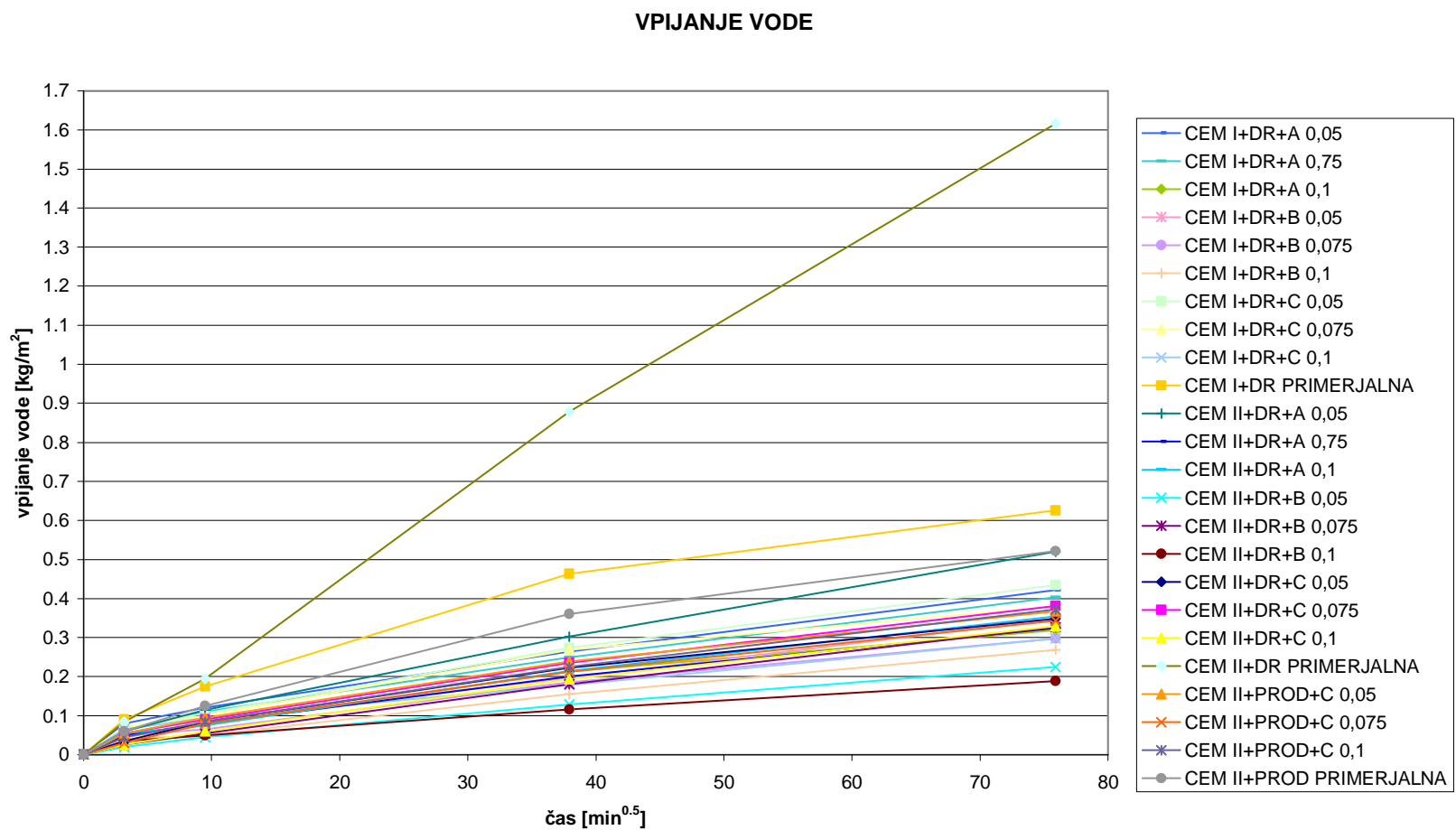
Po 90-ih minutah se količina vode v prizmicah poveča, razmerja pa ostanejo podobna kot pri 10-ih minutah. Zmanjša se le razlika med cementoma I in II, pri primerjalni malti pa je vpijanje vode pri malti s cementom II celo večje. Počasi je tudi pri cementu II opaziti, da se vpijanje vode s povečevanjem P/C razmerja zmanjšuje.

Na sliki 6.7 so prikazani rezultati vpijanja vode za celoten časovni interval 4-ih dni. Tu se lahko že opazijo večje razlike med maltami. Daleč največje vpijanje vode je pri nemodificirani malti iz cementa II in drobljenca. Tudi ostali dve primerjalni (nemodificirani) malti imata večje vpijanje vode od modificiranih malt.

Najboljše rezultate (najmanjše vpijanje vode) dobimo s polimerom B in to skupaj s cementom II in drobljencem! Ravno pri tej kombinaciji, vendar brez polimera, je bilo vpijanje vode po



Slika 6.6: Vpijanje vode po 10-ih in 90-ih minutah.



Slika 6.7: Vpijanje vode malt v intervalu 4-ih dni.

4-ih dneh kar za 850% večje. Tudi pri cementu I je polimer B najbolj znižal vpijanje vode. Najslabše rezultate med modificiranimi maltami smo dobili pri majhnih deležih polimerov A in C. Tudi pri teh dveh polimerih velja pravilo, da dobimo z večanjem P/C razmerja boljše rezultate, to je manjše vpijanje vode.

#### **6.5.4 Krčenje**

Negativna lastnost betona je, da se med sušenjem krči. Zato smo preiskali še vpliv vrste in deleža polimera na krčenje. Če pogledamo graf na sliki 6.8 lahko opazimo, da so razlike med vzorci kar precejšne, tudi do več kot 100%! Najmanjše krčenje smo izmerili pri vzorcu narejenem s polimerom B, cementom II in drobljencem. V primerjavi s primerjalno nemodificirano malto je krčenje bistveno manjše (za 25%). Žal pa ne moremo to reči za vse polimere. Polimer A s cementom II in drobljencem, torej z enakimi surovinami s katerimi smo izmerili najmanjše krčenje, če smo uporabili polimer B, ima v prvem dnevu celo največje krčenje od vseh malt. Pri P/C razmerju 0,05 in istem polimeru smo izmerili tudi drugo največje končno krčenje in največje krčenje med maltami, ki so vsebovale drobljen agregat. Tudi polimer C je v kombinaciji s cementom II in prodrom pri P/C razmerju 0,05 rezultiral v večjem krčenju v primerjavi s primerjalno nemodificirano malto. V ostalih mešanica pa je polimer C krčenje malt zmanjševal.

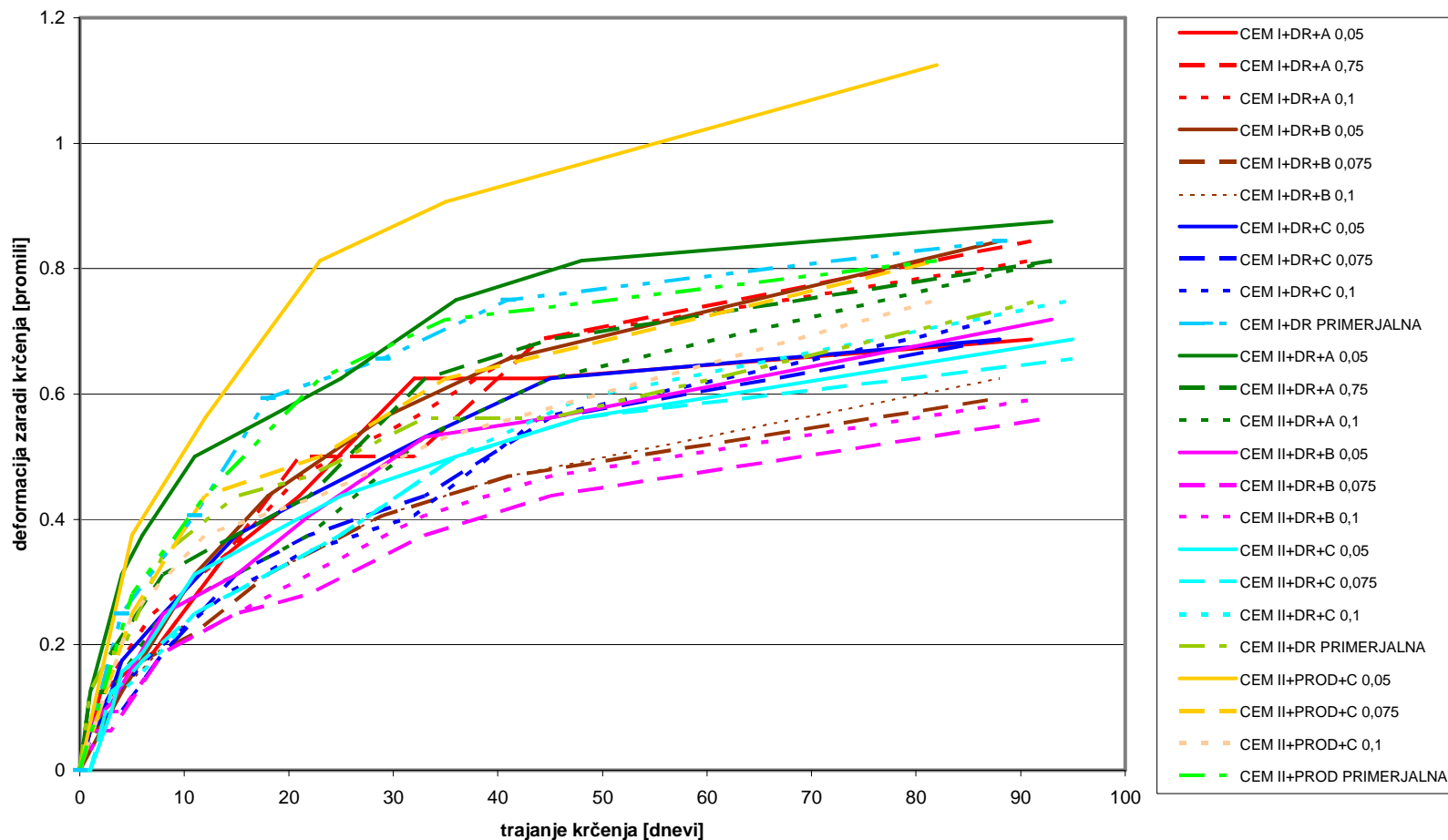
Rečemo lahko torej, da polimeri praviloma zmanjšujejo krčenje, vendar je zmanjšanje krčenja bistveno odvisno od vrste polimernega lateksa in predvsem P/C razmerja.

#### **6.5.5 Vpliv zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost modificiranih malt**

##### **Vpliv na upogibno trdnost**

Nazadnje smo opravili še preiskavo vpliva zmrzovanja/tajanja na upogibno in tlačno trdnost s polimeri modificiranih malt. Rezultati za upogibno trdnost so prikazani na sliki 6.9. S sivo barvo so prikazani rezultati za malte, ki niso bile izpostavljene zmrzovanju/tajanju ter služijo





Slika 6.8: Krčenje malt.

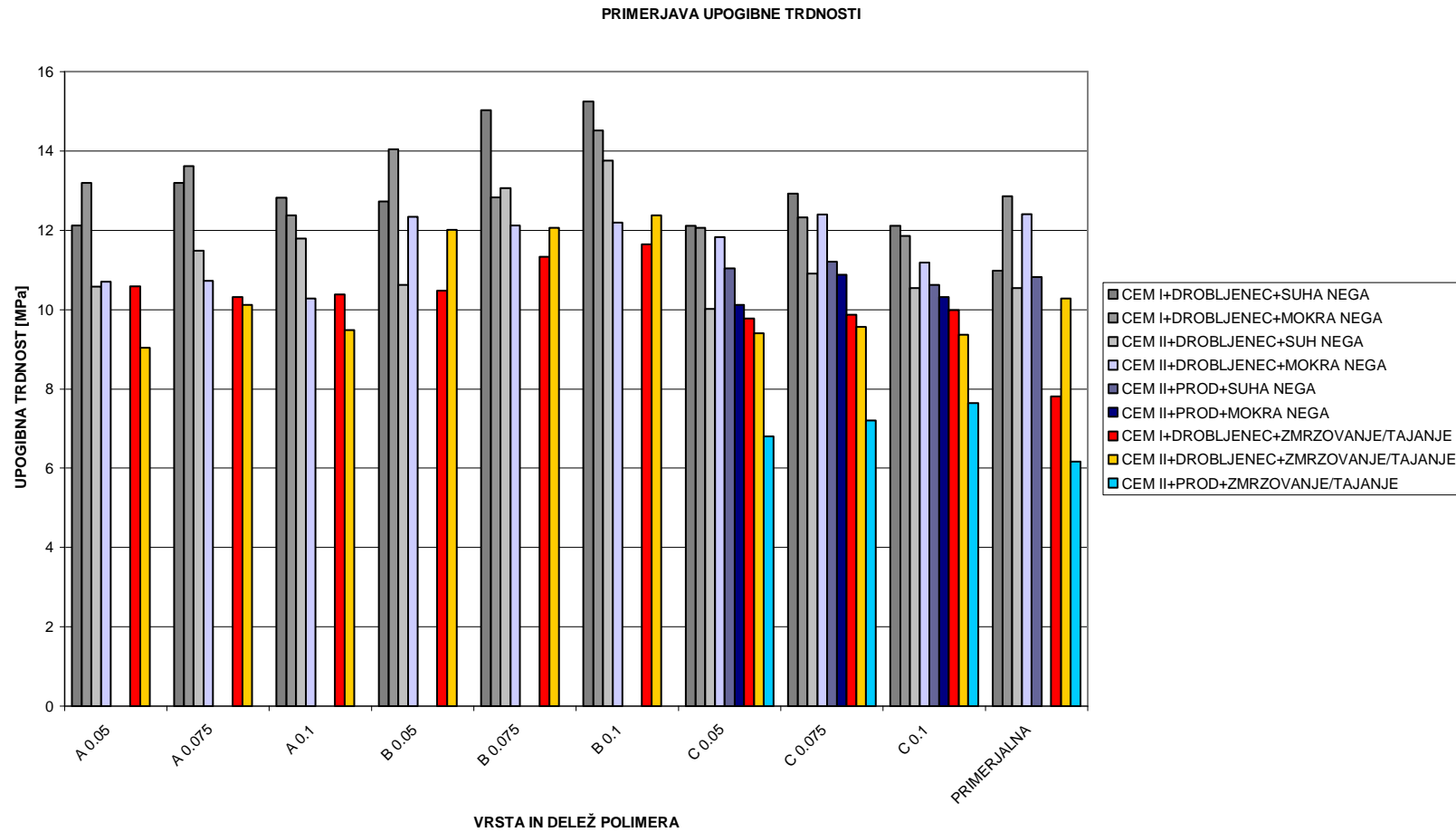
za primerjavo. Za začetek si pogledjmo rezultate za nemodificirane (primerjalne) malte. Opazimo lahko veliko znižanje upogibne trdnosti pri cementu I z drobljenim agregatom (24%) in pri cementu II s prodnatim agregatom (40%). Pri malti s cementom II in drobljenim agregatom pa smo dobili celo višjo upogibno trdnost kot pri malti pri suhi negi, ki ni bila izpostavljena ciklom zmrzovanja/tajanja (za 4%). Da ugotovimo, če to velja tudi za s polimeri modificirane malte, si oglejmo še rezultate na teh maltah.

Pri maltah modificiranih s polimerom A opazimo upad upogibne trdnosti pri vseh vzorcih. Boljše rezultate smo dobili s cementom I, podobno kot pri vzorcih, ki niso bili izpostavljeni zmrzovanju/tajanju. S cementom II smo dobili celo slabše rezultate kot z nemodificirano malto! Pri cementu I pa je v primerjavi z nemodificirano malto, polimer povečal upogibno trdnost kar za 33%. S večanjem P/C razmerja je prišlo pri cementu I do rahlega upada upogibne trdnosti (2%), pri cementu II pa do dviga pri P/C razmerju 0,075 (12%), potem pa do padca (6%) pri P/C razmerju 0,1 glede na P/C razmerje 0,075.

Pri polimeru B so rezultati najboljši. Pri obeh cementih so rezultati boljši kot pri nemodificirani malti (do 50%). Večje upogibne trdnosti smo dobili s cementom II, kar je ravno obratno, kot pri maltah, ki niso bile izpostavljene zmrzovanju/tajanju. S povečevanjem P/C razmerja upogibna trdnost raste, vendar porast ni tako očiten kot pri maltah, ki niso bile izpostavljene zmrzovanju/tajanju.

S polimerom C smo dobili nekoliko slabše rezultate kot s polimerom A in sicer predvsem pri P/C razmerju 0,05 in 0,075. Boljše rezultate smo dobili s cementom I, vendar je razlika med obema cementoma zelo majhna (do 6%). Z večanjem P/C razmerja trdnost zanemarljivo naraste pri cementu I, pri cementu II pa ostaja enaka. Malte s cementom II in polimerom C imajo ponovno nižjo trdnost kot nemodificirana primerjalna malta (za 10%).

Omenimo lahko še opazno večji upad upogibne trdnosti pri cementu I kot pri cementu II, zaradi izpostavitve malt zmrzovanju/tajanju.



Slika 6.9: Primerjava upogibnih trdnosti po ciklih zmrzovanja/tajanja.

Pri prodnatem agregatu je upad upogibne trdnosti zaradi ciklov zmrzovanje/tajanje največji (do 38%) kljub temu, da je malta izdelana s cementom II. Polimer C v tem primeru zvišuje upogibno trdnost. Ta narašča z večanjem P/C razmerja. So pa trdnosti še vedno veliko manjše kot pri ostalih s polimeri modificiranih maltah.

### **Vpliv na tlačno trdnost**

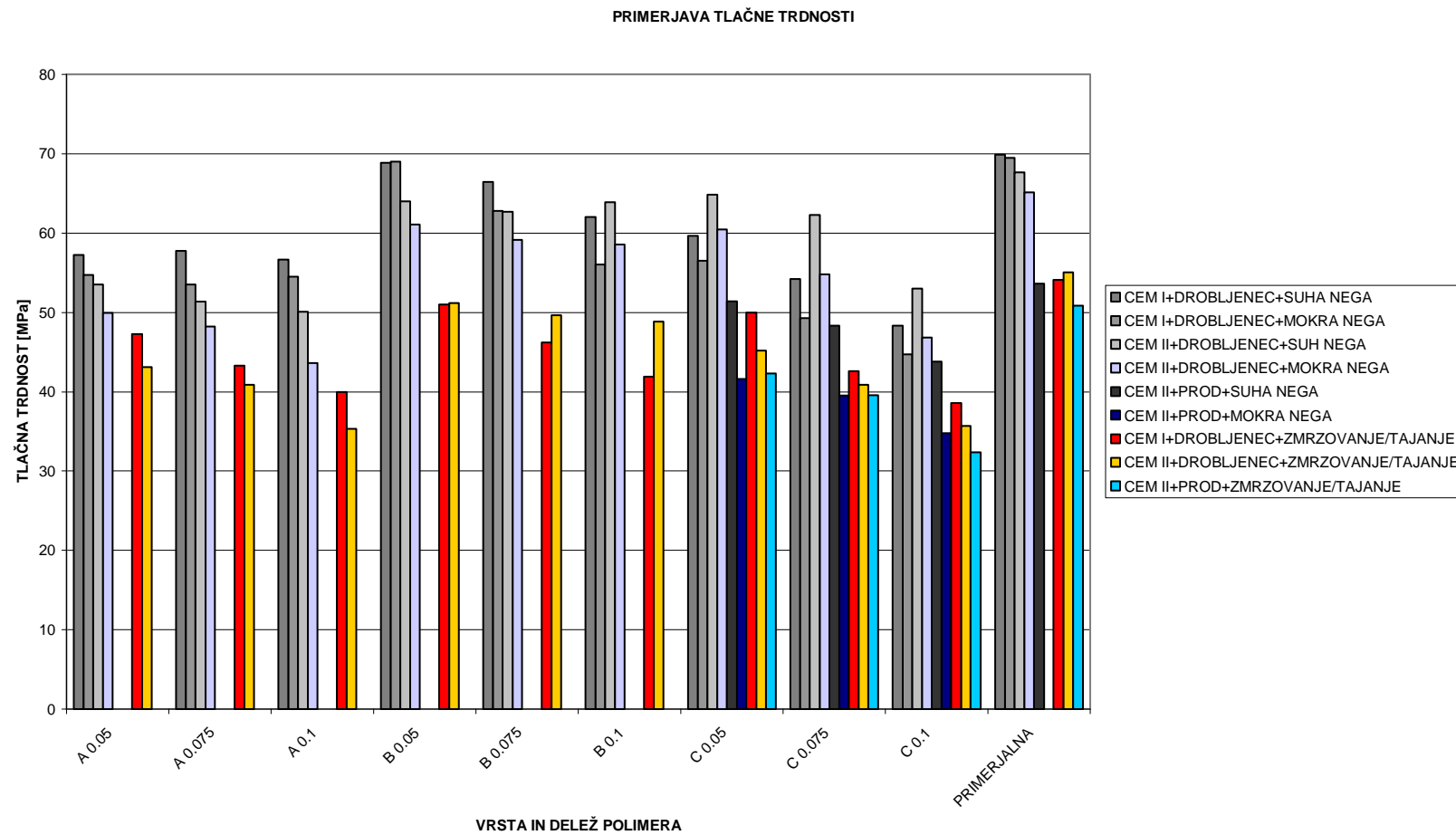
Tudi tlačna trdnost se po ciklih zmrzovanje/tajanje zmanjša. Rezultati so prikazani v obliki grafa na sliki 6.10. Na nemodificirani malti lahko vidimo, da se trdnost najbolj zmanjša pri cementu I in to za 22%, najmanj pa pri malti iz prodnatega agregata (zgolj 5%). Pri upogibni trdnosti je malta iz prodnatega agregata izgubila ogromno (kar 38%).

Pri maltah modificiranih s polimerom A prav tako opazimo zmanjšanje tlačne trdnosti. Z večanjem P/C razmerja tlačna trdnost pada in to padanje je še večje kot pri malti neizpostavljeni zmrzovanju/tajanju. Če primerjamo vpliv obeh cementov ugotovimo, da dobimo večje tlačne trdnosti s cementom I.

Polimer B se je ponovno izkazal kot najboljši. Sicer je tudi pri tem polimeru padec tlačne trdnosti večji kot pri primerjalni malti, vendar so vrednosti tlačnih trdnosti najvišje od vseh polimerov. Z večanjem P/C razmerja pri cementu I trdnost precej pada (po 10%), pri cementu II pa je padanje trdnosti minimalno (po 3%). Tako kot pri upogibni trdnosti dobimo tudi pri tlačni trdnosti boljše rezultate s cementom II (do 16%).

S polimerom C dobimo tudi pri tlačni trdnosti podobne rezultate kot pri polimeru A. Tlačne trdnosti so višje pri cementu I, kar je ravno obratno kot pri malti neizpostavljeni zmrzovanju/tajanju. Tako kot pri ostalih maltah tudi v tem primeru tlačna trdnost z večanjem P/C razmerja pada.

S prodnatim agregatom in polimerom C je padec tlačne trdnosti v primerjavi z nemodificirano malto manjši kot pri maltah z drobljenim agregatom. Kljub temu pa dobimo pri tej malti najnižje vrednosti za tlačno trdnost.



Slika 6.10: Primerjava tlačnih trdnosti po ciklih zmrzovanje/tajanje.

### **Povzetek**

Ugotovili smo, da je bil tako pri upogibni kot pri tlačni trdnosti največji padec trdnosti po zmrzovanju/tajanju na maltah iz proda. Pri maltah iz drobljenca pa je potrebna pravilna izbira polimera in cementa. Za najboljša sta se izkazala polimer B in cement II.

## 7 ZAKLJUČEK

Na podlagi rezultatov preiskav smo prišli do nekaterih podobnih ugotovitev kot raziskovalci pred nami, obenem pa smo opazili tudi razlike med samimi polimernimi disperzijami. Polimerne disperzije imajo plastifikacijski učinek, povečajo upogibno in zmanjšajo tlačno trdnost malt, zmanjšujejo krčenje in vpijanje vode malt. Po ciklih zmrzovanje/tajanje tako upogibna kot tlačna trdnost padeta v primerjavi z maltami, ki niso bile izpostavljene ciklom zmrzovanje/tajanje. Ta padec je praviloma manjši, kot pri primerjalnih nemodificiranih maltah.

Dobljeni rezultati so se med seboj dovolj razlikovali, da smo lahko določili najbolj optimalno polimerno disperzijo. To je polimerna disperzija B. Raziskali smo tudi vpliv različnih cementov in agregatov ter vpliv nege. Polimerom bolj ustreza suha nega. Boljše rezultate dobimo z drobljenim agregatom in cementom I.

Poudariti moramo, da so bile raziskave opravljene v laboratoriju, kjer so razmere idealne. Na terenu je potrebno paziti, da se zagotovi dovolj optimalne pogoje. Veter, vlažnost zraka in pa temperatura zraka lahko precej spremenijo učinkovitost polimera. Prav tako je potrebno beton ustrezno vgraditi za doseganje željenih lastnosti.

Na koncu še povejmo, da raziskava še ni končana. Zaradi velikega števila spremenljivk smo, zaradi lažje izvedbe, raziskave začeli z maltami. Na podlagi rezultatov na maltah se lahko določene spremenljivke izključi in raziskave opravi še na betonu na manjšem številu mešanic. Obenem bo betonom dodana še mikroarmatura za doseganje boljše odpornosti na plastično krčenje.

## **VIRI**

Bokan-Bosiljkov, V. 1996. Modificirani betoni pri visokih temperaturah. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Chandra, S., Ohama, Y. 1994. Polymers in Concrete. Tokyo, CRC Press: 204 str.

Černilogar, L. 2006. Vpliv kemijskih dodatkov za beton in proizvodov za zaščito in sanacijo betona na trajnost betona v konstrukcijah. Konferenca Vzdrževanje, zaščita in popravila betonskih konstrukcij. Lipica, 2006. Zbornik referatov. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije, 2006: str. 58-66

Drobnikar, V. 2004. Tehnologija izvedbe mostov iz betonov visokih zmogljivosti brez klasičnih hidroizolacij. 11. slovenski kolokvij o betonih: Gradnja z betoni visokih zmogljivosti: 28-31 str.

Gerbec, B. 2006. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij.. Konferenca Vzdrževanje, zaščita in popravila betonskih konstrukcij. Lipica, 2006. Zbornik referatov. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije, 2006: str. 122-129

Kavčič, L. 2006. Uporaba polimer modificiranih betonov pri sanaciji premostitvenih objektov. Konferenca Vzdrževanje, zaščita in popravila betonskih konstrukcij: str. 191-198

Lutman, M. 2007. Obnova armiranobetonskih konstrukcij. Gradbenik junij: 26-29

Malavašič, T. 1992. Polimerni materiali. Ljubljana, Akademija za likovno umetnost in oblikovanje: 65 str.

Muravljov, M., Jevtić, D. 2003. Građevinski materiali. Beograd, Akademska misao: 209 str.



Muravljov, M. 2000. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, DIP "Građevinska knjiga":  
451 str.

Ohama, Y. 1984. Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology.  
Noyes Publications, Park Ridge: 337-429 str.

Ohama, Y. 2004. Recent Progress in Research and Development Activities of Polymer-  
Modified Mortar and Concrete in Japan. 11. slovenski kolokvij o betonih: Gradnja z betoni  
visokih zmogljivosti: str. 11-15

Somayaji, S. 2001. Civil engineering materials, second edition. New Jersey, Prentice Hall:  
477 str.

Žarnič R., Bosiljkov V., Bokan Bosiljkov V. 1997. Gradiva vaje. Ljubljana, Univerza v  
Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 100 strani

Žarnič, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo  
in geodezijo: 350 str.

SIST EN 206-1:2003. Beton - 1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost: 72 str.

SIST EN 197-1:2002. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne  
cemente (istoveten z EN 197-1:2000): 24 str.

SIST EN 1015-18:2004. Metode preskušanja zidarske malte-18. del: Določevanje koeficienta  
kapilarnega vpijanja vode strjene malte (istoveten z EN 1015-18:2002): 8 str.