

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,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Matej Božič**

# **Kompatibilnost in sprijemna trdnost s polimeri modificiranega betona in podlage**

**Diplomska naloga št.: 3068**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 18. 6. 2009

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **MATEJ BOŽIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom **KOMPATIBILNOST IN SPRIJEMNA TRDNOST S POLIMERI MODIFICIRANEGA BETONA IN PODLAGE**.

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

Ljubljana, 25.5.2009

---

(podpis)

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

- UDK:** 691.32(043.2)
- Avtor:** Matej Božič
- Mentor:** doc. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
- Naslov:** Kompatibilnost in sprijemna trdnost s polimeri modificiranega betona in podlage
- Obseg in oprema:** 66 str., 14 pregl., 32 slik, 14 en.
- Ključne besede:** beton, polimer, polimerna disperzija, konsistenca, tlačna trdnost, upogibna trdnost, cepilna trdnost, modul elastičnosti, sprijemna trdnost, vpijanje vode.

### **Izvleček**

V okviru diplomske naloge smo študirali vpliv dveh različnih polimernih disperzij na mehanske in fizikalne lastnosti betonov s polimerno-cementnim vezivom pri različnih polimerno-cementnih razmerjih (0,075 in 0,10). Betoni s polimerno-cementnim vezivom so bili izdelani z isto vrsto cementa in agregata. Predhodne preiskave so bile opravljene na maltah, mi pa smo jih opravili na betonu. Na svežih mešanicah smo določali konsistenco s posedom in razlezom s posedom, poroznost in prostorninsko maso, na strjenih betonih pa njihovo tlačno trdnost, upogibno in cepilno trdnost, vpijanje vode, statični in dinamični modul elastičnosti ter sprijemno trdnost med sanacijskim betonom in podlago.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 691.32(043.2)

**Author:** Matej Božič

**Supervisor:** Assist. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov

**Title:** Compatibility and bond strength between polymer modified concrete and base concrete

**Notes:** 66 p., 14 tab., 32 fig., 14 eq.

**Key words:** concrete, polymer, polymer latex, consistency, compressive strength, flexural strength, dividable strength, elasticity modul, bond strength, water apsorption.

### **Abstract**

The diploma work deals with the influence of two different polymer latexes on mechanical and physichal properties of concrete with polymer-cement binder at different polymer-cement ratios (0,075 and 0,10). Concretes with polymer-cement binder were made using the same cement and aggregate. Preliminary tests were made on mortars, we made them on concrete. On fresh concrete mixes slump and slump – flow value, air content and density were determined, on hardened concrete compressive strength, flexural and splitting strength, water apsorption, static and dynamic moduls of elasticity and bond strength between repair concrete and base concrete were tested.

## **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 in prijateljem, ki so mi vsa leta študija pomagali, me podpirali in vzpodbujali.

## KAZALO

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SANACIJE BETONSKIH OBJEKTOV</b>	<b>3</b>
2.1	Vzroki za propadanje betonskih konstrukcij	3
2.2	Sanacija propadlega betona na viaduktih in mostovih	5
2.2.1	Odstranitev poškodovanega betona	5
2.2.2	Vgradnja betona in nega vgrajenega sloja betona	8
<b>3</b>	<b>BETON</b>	<b>10</b>
3.1	Agregat	11
3.2	Cement	13
3.3	Voda	19
3.4	Dodatki za beton	20
<b>4</b>	<b>POLIMERI V BETONIH</b>	<b>23</b>
4.1	S polimeri modificiran portland cementni beton	25
4.1.1	Polimeri	25
4.1.1.1	Agregatno stanje polimerov	26
4.1.1.2	Polimeri, ki se uporabljajo za izdelavo s polimeri modificiranega betona	27
4.1.2	Oblikovanje polimernega filma	28
4.1.3	Projektiranje materialov s polimerno-cementnim vezivom	29
4.1.4	Pogoji nege med procesom strjevanja	29
4.1.5	Lastnosti sveže polimerno-cementne mešanice	30
4.1.6	Lastnosti strjenih polimerno-cementnih betonov	31
<b>5</b>	<b>PRESKUSI ZA OVREDNOTENJE LASTNOSTI BETONOV</b>	<b>34</b>
5.1	Preskusi na svežih mešanicah	34
5.1.1	Metoda s posedom	34
5.1.2	Vsebnost zraka v svežem betonu	36
5.1.3	Prostorninska masa betona	37
5.2	Preskusi na strjenih betonih	37

<b>5.2.1</b>	<b>Preiskava tlačne trdnosti</b>	<b>38</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Preiskava upogibne natezne trdnosti</b>	<b>38</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Preiskava cepilne natezne trdnosti</b>	<b>39</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Preiskava vpijanja vode</b>	<b>40</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Določanje statičnega modula elastičnosti</b>	<b>40</b>
<b>5.2.6</b>	<b>Določanje dinamičnega modula elastičnosti</b>	<b>42</b>
<b>5.2.7</b>	<b>Preiskava pull-off</b>	<b>43</b>
<b>5.3</b>	<b>Izbrani režimi izpostavljenosti/nege betona</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>LASTNE RAZISKAVE</b>	<b>48</b>
<b>6.1</b>	<b>Splošni opis</b>	<b>48</b>
<b>6.2</b>	<b>Projektiranje betonov</b>	<b>48</b>
<b>6.3</b>	<b>Uporabljeni materiali</b>	<b>51</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Cement</b>	<b>51</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Polimeri</b>	<b>52</b>
<b>6.3.3</b>	<b>Agregat</b>	<b>52</b>
<b>6.3.4</b>	<b>Voda</b>	<b>52</b>
<b>6.3.5</b>	<b>Superplastifikator</b>	<b>53</b>
<b>6.3.6</b>	<b>Vlakna</b>	<b>53</b>
<b>6.4</b>	<b>Preiskave na svežih betonskih mešanica</b>	<b>53</b>
<b>6.4.1</b>	<b>Mešanje betona</b>	<b>53</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Posed, razlez s posedom, vsebnost zraka in prostorninska masa</b>	<b>54</b>
<b>6.5</b>	<b>Preiskave na strjenih betonih</b>	<b>55</b>
<b>6.5.1</b>	<b>Preiskava tlačne trdnosti</b>	<b>55</b>
<b>6.5.2</b>	<b>Preiskava upogibne in cepilne natezne trdnosti</b>	<b>57</b>
<b>6.5.3</b>	<b>Preiskava vpijanja vode</b>	<b>58</b>
<b>6.5.4</b>	<b>Določitev statičnega modula elastičnosti</b>	<b>60</b>
<b>6.5.5</b>	<b>Določitev dinamičnega modula elastičnosti</b>	<b>61</b>
<b>6.5.6</b>	<b>Preiskava pull-off</b>	<b>63</b>
<b>6.6</b>	<b>Primerjava lastnosti s polimeri modificiranih betonov in primerjalnega betona</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>67</b>





## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1: Mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti [SIST EN 197-1].	18
Preglednica 3.2: 27 proizvodov iz družine običajnih cementov [SIST EN 197-1].	19
Preglednica 3.3: Mejne vrednosti kemijskih lastnosti vode za pripravo betonov.	20
Preglednica 5.1: Konsistenčne stopnje poseda.	36
Preglednica 6.1: Lastnosti polimerne disperzije A.	52
Preglednica 6.2: Lastnosti polimerne disperzije B.	52
Preglednica 6.3: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanica.	55
Preglednica 6.4: Rezultati preiskav tlačne trdnosti.	56
Preglednica 6.5: Rezultati preiskav upogibne in cepilne natezne trdnosti.	58
Preglednica 6.6: Koeficienti vpijanja vode po 24-ih urah.	60
Preglednica 6.7: Statični modul elastičnosti po 28-ih dneh.	61
Preglednica 6.8: Dinamični modul elastičnosti.	62
Preglednica 6.9: Rezultati pull-off preskusa na preskušancih starih 28 dni.	64
Preglednica 6.10: Rezultati pull-off preskusa na preskušancih, ki so bili izpostavljeni cikličnemu nevihtnemu obremenjevanju.	64
Preglednica 6.11: Primerjava lastnosti s polimeri modificiranih betonov in primerjalnega betona.	65

## 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.	7
Slika 2.4: Nega s sredstvom za nego betona.	9
Slika 3.1: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm po SIST 1026:2004.	13
Slika 3.2: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja [Žarnić, 2005].	15
Slika 3.3: Shematski prikaz proizvodnje cementa [Žarnić, 2005].	16
Slika 3.4: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1.	17
Slika 4.1: Vrste betonov, ki vsebujejo polimere [Bokan Bosiljkov, 1996].	23
Slika 4.2: Agregatna stanja linearnih amorfnih polimerov [Malavašič, 1992].	27
Slika 4.3: Faze strjevanje polimera [Žarnić, 2005].	29
Slika 4.4: Vpliv P/C razmerja na tlačno trdnost betona (z uporabo polimerne disperzija SBR in brez protipenila) [Ohama].	31
Slika 4.5: Diagrami $\sigma - \epsilon$ betona modificiranega z SBR lateksom (modul elastičnosti v GPa) [Ohama, 1984].	33
Slika 5.1: Kalup (votel prisekan stožec) za preskus s posedom (a in b) in lijak (c).	35
Slika 5.2: Primer pravilnega in nepravilnega poseda.	35
Slika 5.3: Porozimeter.	37
Slika 5.4: Preiskava upogibne natezne trdnosti.	39
Slika 5.5: Preiskava cepilne natezne trdnosti.	40
Slika 5.6: Skica določanja statičnega modula elastičnosti betona in $\sigma - \epsilon$ diagram betona.	41
Slika 5.7: Preskušanelec za določanje statičnega modula elastičnosti betona v stiskalnici po obremenjevanju.	42
Slika 5.8: Preskušanelec s prilepljenim čepom pripravljen za preiskavo pull-off.	44
Slika 5.9: Izgled grobo hrapave površine starega podložnega betona.	44
Slika 5.10: Podlaga za sanacijski beton nameščena v klaup.	44
Slika 5.11: Vrtanje s krono premera 150 mm v kompozitni preskušanelec.	45
Slika 5.12: Preskušanelec pripravljen za namestitev čepa.	45

Slika 5.13: Preskušanelec, vstavljen v stroj, po obremenitvi.	45
Slika 5.14: Kompozitni preskušanci, ki so popustili na različnih mestih.	45
Slika 6.1: Primerjava tlačne trdnosti.	57
Slika 6.2: Primerjava upogibne in cepilne natezne trdnosti.	58
Slika 6.3: Vpijanje vode betonov v intervalu 72 ur.	59
Slika 6.4: $\sigma$ - $\varepsilon$ diagram tlačno obremenjenih prizem.	61
Slika 6.5: Primerjava dinamičnega modula elastičnosti.	62

## 1 UVOD

Beton je najbolj razširjen gradbeni material. Lahko ga je pripraviti in enostavno vgrajevati, je pa tudi sorazmerno poceni. Možno ga je vgrajevati v najrazličnejše konstrukcije in oblike konstrukcij. Seveda ima beton še mnogo drugih pozitivnih lastnosti, po drugi strani pa ima tudi nekaj slabosti. Zelo pomembna lastnost betonu je njegova obstojnost. Beton je praviloma projektiran tako, da naj bi zdržal okoli 50 let. V idealnih pogojih bi bilo to mogoče, vendar obstaja mnogo dejavnikov, ki lahko povzročijo propadanje betona že mnogo prej. Do propadanja pride bodisi zaradi izpostavljenosti različnim vplivom okolja, napak pri projektiranju, napak pri izvedbi ali pa kar zaradi kombinacije vseh treh. K prehitrim poškodbam vodijo prevelika količina vode, neprimerna izbira vrste in/ali količine cementa in/ali agregata, nepravilna vgradnja in nega svežega betona. Do propadanja betona pride tudi zaradi mehanskih vplivov, kot so preobremenitev, vibracije, udarci, kemijskih vplivov, med katere štejemo alkalno agregatno reakcijo ter reakcije med škodljivimi snovmi iz okolja in produkti hidratacije cementa, bioloških vplivov in fizikalnih vplivov, kot so zmrzovanje/tajanje, erozija, temperaturna nihanja in krčenje.

Poškodovanih konstrukcij seveda ne porušimo, ampak jih poskušamo najprej sanirati. Sanacija mora biti izvedena tako, da ne pride do ponovnih poškodb. Velikokrat jo poskušamo izvesti s pomočjo novih tehnologij in materialov. Ti materiali morajo imeti pozitivne lastnosti bistveno boljše kot material, ki je propadel in ga želimo sanirati. Med te materiale sodijo tudi s polimeri modificirani betoni, o katerih bo govor v nadaljevanju. V okviru diplomske naloge smo ugotavljali, s katero betonsko mešanico z dodatkom polimera dosežemo najboljše trdnostne karakteristike in ostale lastnosti.

V okviru lastnih eksperimentalnih raziskav smo pripravili 3 različne recepture. Spreminjali smo vrsto polimerne disperzije (dve vrsti polimerne disperzije) in polimerno-cementno razmerje (0,075 in 0,10). Pri vseh treh mešanicah smo uporabili isti cement in agregat. Svežim betonskim mešanicam smo izmerili posed in razlez s posedom, vsebnost zraka in prostorninsko maso. Na strjenem betonu pa smo opravili preiskave tlačne, upogibne natezne in cepilne natezne trdnosti, vpijanja vode, določili statični in dinamični modul elastičnosti ter opravili preiskavo 'pull-off'. Ugotavljali smo tudi notranjo odpornost betona proti cikličnemu

zmrzovanju/tajanju, sprijemno trdnost sanacijskega betona s podlago ter vpliv suhih ciklov ogrevanje/ohlajanje na tlačno trdnost betona.

V prvem delu diplomske naloge so opisani vzroki poškodb in načini sanacij le teh. V nadaljevanju sledi opis lastnosti osnovnih komponent s polimeri modificiranih betonov. V četrtem poglavju je govora o polimerih v betonih, potem pa o raziskavah, ki potekajo na betonih. Sledi poglavje, ki obravnava lastne raziskave s polimeri modificiranih betonov, ki smo jih opravili v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Na koncu so prikazani rezultati preiskav in njihova analiza.

## 2 SANACIJE BETONSKIH OBJEKTOV

Beton je v mnogih pogledih izjemen material. Zaradi relativno nizke cene in mnogih možnosti, ki jih ponuja, je v svetu najširše in najbolj intenzivno uporabljan material. Že pred desetletji si je beton s preprostim vgrajevanjem in odpornostjo proti mehanskim obremenitvam pridobil status večnega materiala. Vendar pa postaja okolje, v katerem živimo, čedalje bolj agresivno. Med uporabo konstrukcije je beton izpostavljen podnebnim in tudi drugim agresivnim vplivom iz okolja ter vplivom zaradi uporabe. Vse to lahko vpliva na propadanje betona. Propadanje betona se lahko pojavi na površini ali v notranjosti konstrukcijskega elementa. 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 s sredstvi za tajanje ali brez njih (z oznako stopenj XF1 do XF4),
- kemično delovanje (z oznako stopenj XA1 do XA3) in
- obraba površine betona (z oznako stopenj XM1 do XM3).

### 2.1 Vzroki za propadanje betonskih konstrukcij

Obstojnost betona pomeni sposobnost materiala, da se med uporabo upira spremembam lastnosti in razpadanju zaradi agresivnih vplivov [Grum, 2004]. Obstojnost betona je odvisna od:

- uporabljenih materialov ter sestave in strukture betona,
- homogenosti,
- poroznosti,
- stičnega območja med cementnim kamnom in zrni agregata
- trdnosti (predvsem natezne),
- toplotne kompatibilnosti,
- krčenja, lezenja, raztezanja,

- razpok,
- kemijskih in mineraloških karakteristik,
- prepustnosti za tekočine, absorpcije, difuzivnosti,
- debeline zaščitnega sloja in oblike elementa in
- vrste in intenzivnosti zunanjih vplivov na konstrukcijo.

Ponavadi se analizira vsak proces propadanja oziroma vsak element delovanja posebej in šele nato njihva interakcija. Zato lahko agresije razdelimo v štiri skupine:

- kemijski vplivi,
- fizikalni vplivi,
- biološki vplivi in
- ostali dejavniki.

Med kemijske vplive na propadanje betona največkrat štejemo korozijo betona. Ta nastane kot posledica kemijske agresije snovi iz okolice na sestavine cementnega kamna. Glavni vzrok za pojav korozije betona je prisotnost vlage ali vode, lahko pa je vzrok tudi kontaminiran zrak, posebej v industrijskem okolju. Korozijo betona lahko spremlja tudi korozija armature.

Fizikalne vplive, ki na beton delujejo rušilno, lahko razvrstimo v štiri skupine:

- mehansko delovanje iz okolice (obrus betona na prometno obremenjenih betonskih površinah, erozija betona zaradi abrazije in kavitacije, utrujanje betona),
- preobremenitev (nastane zaradi udarcev, cikličnega obremenjevanja, pomikov temeljev),
- volumenske spremembe (nastanejo zaradi temperaturnih in vlažnostnih gradientov, kristalizacijskih pritiskov soli v porah cementnega kamna, korozije armature, termične nekompatibilnosti agregata in cementnega kamna) in
- temperaturni vplivi (so posledica zmrzovanja vode v večjih kapilarah pri 0°C, prehoda vode v led, ki poteka od površine proti notranjosti).

Posledice so lahko površinsko slabljenje materiala, razpoke, lomljenje, luščenje, degradacija strukture in drobljenje.

Beton je lahko dobra podlaga za vegetacijo, nekatere mikroorganizme, pa tudi za večje organizme, kot so na primer školjke [Grum, 2004]. Vsi ti mikroorganizmi prodirajo globoko (tudi do 50 cm) v beton ter s tem v strukturo in lahko popolnoma uničijo zaščitni sloj. Vegetacija in mikroorganizmi s svojim delovanjem in izločanjem organskih snovi rušilno delujejo na strukturo betona in s tem zmanjšujejo njegovo trdnost.

V nadaljevanju se bomo posvetili predvsem sanaciji cestnih premostitvenih objektov. Na teh pride do poškodb, poleg zgoraj omenjenih vplivov, tudi zaradi pomankljivosti pri projektiranju, gradnji in vzdrževanju. Resen problem pa je tudi zelo majhna natezna trdnost betona, zaradi katere je potrebno betonu dodati armaturo. Armaturo je potrebno zaščititi pred zunanjimi vplivi. Zaradi površinskih razpok na betonu pride do korozije jekla, ki jo povzročajo kloridi iz posipne soli v času izvajanja zimske službe, kar je najpogostejši vzrok za propadanje mostov in viaduktov.

## **2.2 Sanacija propadlega betona na viaduktih in mostovih**

Pri sanaciji objektov je potrebno najprej odstraniti vse nesprijete dele betonov, jeklene dele pa očistiti in jih zaščititi pred nadaljno korozijo ali jih v celoti nadomestiti z novimi. Po odstranitvi obrabnih in zaščitnih asfaltnih plasti sledi odstranjevanje betona, čiščenje odpadkov, pranje in popravilo voziščnih plošč z nanosom nove plasti betona.

### **2.2.1 Odstranitev poškodovanega betona**

Izbor posamezne tehnike odstranjevanja betona je odvisen od vsaj treh dejavnikov, in sicer globine, površine in mesta poškodbe [Lutman, 2007]. Tako pri nas ločimo tri postopke odstranjevanja betona:

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

Izbrana metoda odstranjevanja betona mora biti učinkovita, varna, ekonomična, prijazna do okolja in mora minimizirati poškodovanost preostalega betona. Ista metoda ni nujno primerna za vse dele konstrukcije, ki se sanira. Zato je lahko v posameznih primerih kombinacija



različnih metod najbolj primerna, da pospeši odstranjevanje in omeji poškodbe na zdravem betonu.

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

Uporablja se za odstranjevanje betona in čiščenje armature, ki se lahko ponovno uporabi. Beton, ki ostane na mestu, je minimalno poškodovan. Metoda temelji na strojnem odstranjevanju betona z robotom s potujočo vodno šobo, ki razbije beton v delce velikosti agregatnih zrn, ki jih je lahko odstraniti. Deluje na poškodovanem in zdravem betonu in za sabo pusti grobo površino. Metoda zahteva veliko količino vode, ki jo potrebuje visokotlačni curek, da doseže pritisk do 240 MPa. S tem pritiskom lahko zdrobi beton debeline od 3 do 150 mm. Prečna širina odstranjevanja z enim pohodom je 150 cm. Zahtevi te metode sta zadržanje in poznejša odstranitev vode.



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

### **Metoda s peskanjem**

Peskanje je najbolj pogosta metoda, ki se uporablja za čiščenje betona in jeklene armature v gradbeništvu. Proces se lahko izvede z eno od naslednjih treh metod:

- suho peskanje,
- mokro peskanje in
- peskanje z jeklenimi kroglicami.

Pri suhem peskanju se pesek izstreljuje na beton ali armaturo v toku zraka pod visokim pritiskom (od 860 kPa naprej). Velikost zrn peska se prilagaja zahtevam glede grobosti površine betona. Metoda je ekonomična le, če odstranjujemo beton do globine 6 mm.

Pri mokrem peskanju se pesek izstreljuje na površino betona ali armature v curku vode pri pritisku od 10 do 20 MPa. Ta metoda se uporablja le za čiščenje betonskih površin.

Peskanje z jeklenimi kroglicami čisti ali odstranjuje beton z izstreljevanjem jeklenih kroglic na betonsko površino z veliko hitrostjo. S to metodo lahko odstranimo propadli ali zdravi beton. Kroglice se skupaj s fino zdrobljenim betonom odbijajo od površine in naprava jih s pomočjo vakuuma vsesa v telo stroja. Tam se delci betona ločijo in pristanejo v posebnem kontejnerju, kroglice pa se ponovno uporabijo za erodiranje površine betona. Zahteve glede kvalitete obdelane površine določajo velikost in hitrost kroglic. Peskanje z jeklenimi kroglicami je učinkovita in ekonomična metoda za odstranitev sloja betona do debeline 20 mm.



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

### **Metoda z rezkanjem betona**

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. Za odstranjevanje betona se danes ne uporablja predvsem zaradi tega, ker se pojavijo mikro razpoke na stiku med cementnim kamnom in agregatom. Sicer se globina odstranjenega betona lahko giblje med 3 mm in 100 mm.



*Slika 2.3: Primer opreme za rezkanje betona.*

### 2.2.2 Vgradnja betona in nega vgrajenega sloja betona

Ko je korodiran beton odstranjen, se lahko dobetonira nova plast s sanacijskimi materiali. Ti materiali imajo seveda boljše lastnosti kot material, ki je bil odstranjen. Včasih jih zaradi tega imenujemo tudi visokovredni, visoko zmogljivi ali specialni materiali. V zadnjem času se, tudi v Sloveniji, za sanacijo mostov in viaduktov uporabljajo s polimeri modificirani betoni, o katerih bo veliko govora tudi v nadaljevanju.

Površine, kjer se bo betoniralo, morajo biti očiščene vsaj dva dni pred betoniranjem in navlažene vsaj dve uri pred pričetkom del. S polimerom modificiran beton js potrebno nanašati brez prekinitev v korakih ne večjih od 10 m. Za doseganje ustrezne ravnosti površine in njenega naklona se uporablja samonosilna vibracijska letev po celem prerezu voziščne plošče. Ta metoda je primerna za širino voziščnih plošč do 25 m. Za debeline preplastitve večje od 75 mm je potrebno zgoščati betone tudi s paličnimi vibratorji. Na koncu se z manjšimi popravki površine doseže tudi končna ravnost.

Zelo pomembna je tudi nega vgrajenega betona, posebej v prvih nekaj dneh po vgraditvi. S primerno nego svež beton zavarujemo predvsem pred predčasno izsušitvijo (veter, sonce, suh mraz), ekstremnimi temperaturami (mraz, vročina) in škodljivimi hitrimi teperturnimi spremembami ter dežjem in tresenjem. V ta namen 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 horizontalih 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 in
- 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 [Golob, 2007].

Če teh ukrepov oziroma vsaj enega od njih ne izvajamo na svežem betonu po vgradnji, beton izgubi določeno količino vode, kar privede do:

- zmanjšanja površinske trdnosti,
- večje prepustnosti za vodo,
- pojavijo se zgodnje razpoke zaradi krčenja betona in
- poveča se nevarnost kasnejših razpok.



*Slika 2.4: Nega s sredstvom za nego betona.*

### 3 BETON

Beton je eden glavnih materialov v gradbeništvu. Danes je beton najpomembnejše gradivo, ki se uporablja pri gradnji vseh vrst objektov, od nizkih do visokih zgradb, za najrazličnejše namene uporabe. Beton je mešanica veziva (cement), grobega in finega agregata (pesek, prod, gramoz) in vode. Poleg teh osnovnih sestavin lahko vsebuje tudi kemijske in/ali mineralne dodatke. V sodobni tehnologiji se v sestavo betona dodajajo tudi drugi materiali, kot so polimeri in vlakna, ki lahko bistveno spremenijo osnovne lastnosti betona (krhkost, krčenje, trdnost). Seveda pa ne smemo zanemariti zračnih por, saj z neupoštevanjem le-teh dobimo neustrezne karakteristike betona. V mešanici betona naj bi bile sestavine porazdeljene približno v naslednjem razmerju:

- agregat – 75% volumenske mase betona,
- cementni kamen – 25% volumenske mase betona (sestavljen iz mešanice cementa in vode, absorbirane in kapilarne vode ter zrn nehidratiziranega cementa). Cementni kamen vedno vsebuje manjšo količino zajetega zraka, ki pa v dobro sestavljenem betonu ne sme presegati 2-5% volumna betona.

Ostali dodatki betonu se dodajajo v zanemarljivih količinah glede na volumen betonske mase, kljub temu pa bistveno vplivajo na lastnosti svežega in strjenega betona. Glede na gostoto delimo betone na:

- lahke z gostoto do  $1900 \text{ kg/m}^3$ ,
- običajne z gostoto od  $1900$  do  $2500 \text{ kg/m}^3$  in
- težke z gostoto nad  $2500 \text{ kg/m}^3$ .

Dobre lastnosti strjenega betona so izrednega pomena za zagotavljanje dolge življenjske dobe konstrukcij, seveda ob upoštevanju predpostavk, da je konstrukcija v normalnih klimatskih pogojih, da je obremenjena in uporabljana, kot je določeno s projektom, in da je redno vzdrževana, v skladu s projektom vzdrževanja. Beton razvije svoje trdnostne lastnosti s hidratacijo cementa. V strjenem betonu ima cementni kamen dve nalogi:

- med seboj poveže zrna mineralnega agregata in daje betonu njegovo trdnost,
- zapolni prostor med zrni agregata in tako tvori neprepustno maso.

Lastnosti betona se s staranjem betona praviloma izboljšujejo. Dosežene končne lastnosti strjenega betona so odvisne od:

- kakovosti betonske mešanice,
- nege betona,
- sušenja betona.

### 3.1 Agregat

V običajnih betonih agregat tvori okoli 75% njihove prostornine, pri betonih nizke trdnosti pa tudi do 85 % prostornine, zato je njegov izbor ključnega pomena za kakovost in lastnosti betona. Na splošno lahko agregat definiramo kot čist, trd in inerten material, ki ga vgrajujemo v betonske mešanice [Žarnić, 2005]. Gostota agregatov je odvisna od njihovega izvora in varira od  $500 \text{ kg/m}^3$  do  $7000 \text{ kg/m}^3$ , običajni agregati pa imajo gostoto od  $2200 \text{ kg/m}^3$  do  $2800 \text{ kg/m}^3$ . Agregate razvrščamo po načinu pridobivanja na gramozne aluvialnega izvora in drobljence oz. lomljence.

Naravni agregat oz. prod pridobivamo iz rečnih strug. Zaradi tega ga je potrebno očistiti organskih primesi (humus, olja), ki se lahko nahajajo na dnu struge. Prod je bil včasih cenejši od drobljenega agregata, zaradi lažjega pridobivanja. Danes je praviloma cenejši. Zrna prod imajo gladko površino in so zaobljena, zato ima boljšo vgradljivost in obdelava mokre betonske mešanice je lažja. Po drugi strani pa je zaradi zaobljenosti zrn oprijem s cementno pasto slabši. Prod je sestavljen iz zrn z različno mineraloško sestavo, ki se spreminja od nahajališča do nahajališča ter glede na položaj in mesto izkopa.

Drobljenec pridobivamo v kamnolomih z drobljenjem večjih kosov kamna v zrna premera do 32 mm. Zrna drobljenca imajo ostre robove in so lahko manj trdna, zaradi notranjih razpok. Ostri robovi povzročajo slabšo vgradljivost, vendar tudi omogočajo, da se zrna lahko zaklinijo med seboj, kar rezultira v povečanju mehanskih karakteristik. Sama površina zrn pa je bolj hrapava kot pri produ, zato imajo drobljenci boljšo sprejemljivost. Drobljenec je bolj homogen od naravnega agregata, kar pomeni, da imamo manjše koncentracije napetosti v strjenem betonu pod obremenitvijo in pri temperaturnih spremembah. Mineraloška sestava kamna, iz katerega se proizvaja agregat, je večinoma enaka, ker se v enem kamnolomu izkorišča običajno ista vrsta kamnine. Uporaba drobljenca se povečuje, saj z novimi tehnologijami

vgradnje betona in novimi kemijskimi dodatki (predvsem superplastifikatorji) dobivamo boljše rezultate kot s prodrom.

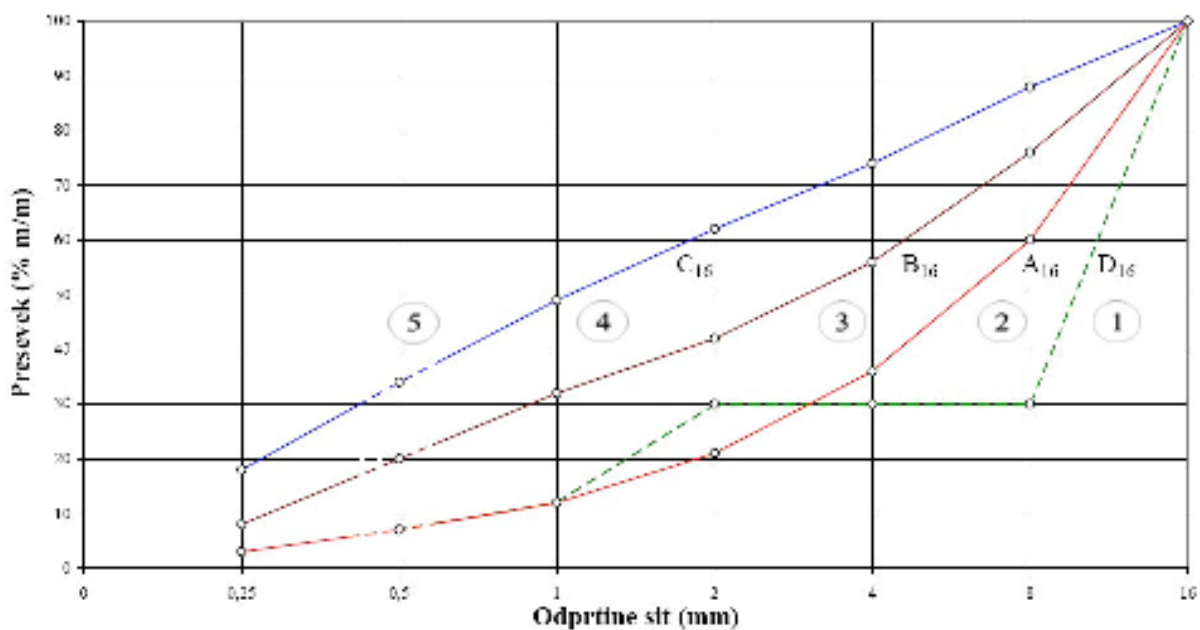
Vloga agregata v betonu je sledeča:

- znižuje ceno betona, saj je zaradi postopka pridobivanja razmeroma poceni,
- ustrezno sestavljen po frakcijah ustvarja koheziven beton, ki ga je lahko obdelovati v svežem stanju,
- znižuje hidrationsko temperaturo betona, ker je kemično inerten in deluje kot odvajalec toplote, ki nastane s hidrationsjo cementa,
- zmanjšuje krčenje betona, ker voda nanj ne deluje in zato lahko omejuje krčenje cementne paste med hidrationsjo,
- uravnava površinsko trdoto, ker je večinoma bolj odporen na obrus kot cementni kamen, ki povezuje agregat,
- ustvarja barvitost betonske površine ali njeno sposobnost, da odbija svetlobo,
- kontrolira gostoto,
- zvišuje požarno odpornost betona.

Kakovosten agregat mora biti čist in vsebovati mora čim manjši delež praškastih delcev. Ne sme vsebovati organskih primesi, ker zmanjšujejo alkalnost cementne paste, ki je nujna za proces hidrationsje. Zaradi armature v betonu ne sme vsebovati soli, ki povzročajo korozijo armature. Nezaželeni so ploščati in podolgovata zrna, zaželeni pa hrapava, zaradi boljše sprejemnosti agregata s cementno pasto.

Zrnovostno sestavo določamo s sejalno analizo, kjer suh agregat presejemo skozi standardna sita z različnimi odprtini, ki so postavljena eno nad drugim. S sejalno analizo dobimo zrnovostno krivuljo, ki nam podaja razmerje med velikostjo zrn. Osnovni komplet sit vsebuje sita z odprtini 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. Rezultate prikažemo z grafom, ki ga vrtimo v koordinatni sistem, kjer že obstajajo mejne zrnovostne krivulje, znotraj katerih naj bi se nahajala zrnovostna sestava agregata. Krivulje predstavljajo razmerja med odprtino sita (na abscisni osi) in količino preseveka skozi določeno sito izraženo v % od celotne količine agregata (na ordinatni osi). Presevek je tista količina agregata, ki pade skozi sito z določeno dimenzijo kvadratnih

odprtin. Ostanek na situ je količina agregata, ki ostane na situ z določeno dimenzijo kvadratnih odprtin. Frakcija je količina agregata, ki pade skozi sito z določeno dimenzijo kvadratnih odprtin in ostane na situ z določeno dimenzijo kvadratnih odprtin [Žarnić, 2005]. Označimo jo z  $d/D$ , pri čemer je  $d$  velikost odprtine manjšega sita,  $D$  pa velikost odprtine večjega. Če agregat vsebuje npr. samo grobo frakcijo 8/16, ni primeren za izdelavo betona. Med zrnji ostane nezapolnjen prostor, katerega namesto manjših frakcij zapolni cementna pasta. To pa je neekonomično, hkrati pa pride tudi do večjega krčenja betona. Na sliki 3.1 so prikazane mejne zrnastostne krivulje. Če se s sejalno analizo agregata ugotovi, da granulometrijska krivulja poteka v območju 1 ali 5, taka sestava ni ustrezna in jo je treba popraviti z dodajanjem določenih frakcij agregata. Če krivulja poteka v območju 3, je agregat primeren za uporabo. Če krivulja poteka skozi območja 2, 3 in 4 so potrebne dodatne preiskave. Krivulja D predstavlja agregat za posebne betone, npr. drenažne betone.



Slika 3.1: Priporočene mejne krivulje zrnastosti za mešanico agregata 0/16 mm po SIST 1026:2004.

### 3.2 Cement

Cement je mineralno hidravlično vezivo, ki je kljub številnim novim gradbenim materialom še vedno najpogosteje uporabljano vezivo v gradbeništvu. Je fino zmlet neorganski material, ki zmešan z vodo tvori pasto. Ta na podlagi reakcij in procesov hidratacije veže in strjuje ter



po strditvi ohrani trdnost in stabilnost tudi v vodi. Cement je v osnovi fini prah sive barve s premerom delcev od 0,001 do 0,1 mm, njegova gostota pa je okrog  $3000 \text{ kg/m}^3$ .

Osnovna surovina za pridobivanje cementa so minerali, ki jih vsebujejo naravni lapor, apnenec in glina, ki prispevajo okside kot so  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Te surovine se najprej zmeljejo po mokrem ali suhem postopku, da dobimo surovinsko moko, nato pa segrevajo in žgejo v rotacijski peči, ki je postavljena pod rahlim nagibom. Žganje se odvija v treh intervalih, in sicer prvem do  $1300^\circ\text{C}$ , drugem med  $1300^\circ\text{C}$  in  $1500^\circ\text{C}$  ter tretjem, ko se produkt žganja ohlajuje. Dobljena zmes je cementni klinker, ki se hladi na sobno temperaturo in v krogelnih mlinih melje v fini prah. Poleg portland cementnega klinkerja je v cementu prisotna tudi manjša količina sadre (do 5%), s katero se regulira čas vezanja cementa [Muravljov, 1991]. Pogosto dodajamo tudi žlindro, naravne ali umetne pucolane, apnenec in elektrofiltrski pepel.

Cementni klinker je po sestavi poli-mineralni material. Osnovne spojine, ki tvorijo komponente klinkerja so:

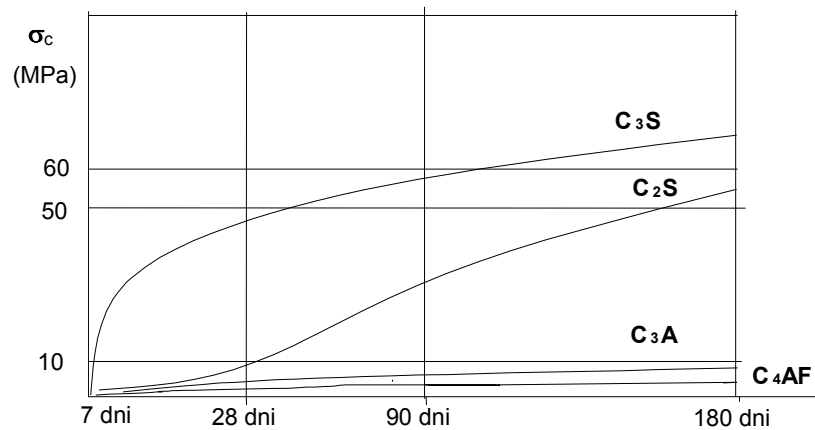
- $\text{CaO}$  – komponenta C (60-67%),
- $\text{SiO}_2$  – komponenta S (17-25%),
- $(\text{Al}_2\text{O}_3)$  – komponenta A (3-8%),
- $(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  – komponenta F (0,5-6%),
- alkalije ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) (0,2-1,3%) in
- primesi (nevezan  $\text{CaO}$  do 2% in  $\text{MgO}$  do 4%).

Minerali cementnega klinkerja, ki so sestavljeni iz zgornjih komponent, so:

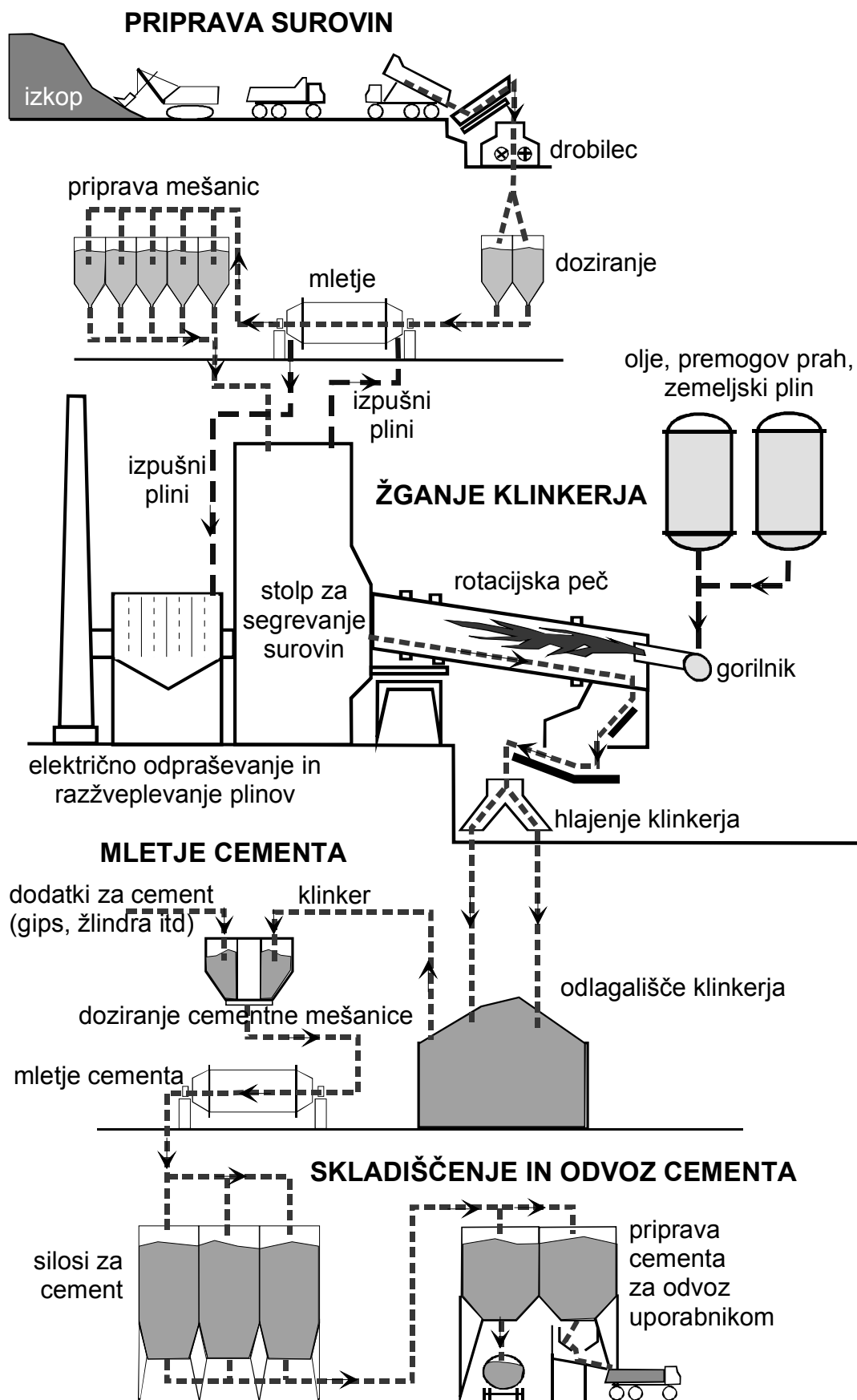
- |                                |   |           |
|--------------------------------|---|-----------|
| • trikalcijev silikat (alit)   | $\text{C}_3\text{S}$ ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )                                       | 40 do 70% |
| • dikalcijev silikat (belit)   | $\text{C}_2\text{S}$ ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )                                       | 5 do 30%  |
| • trikalcijev aluminat         | $\text{C}_3\text{A}$ ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )                              | 7 do 15%  |
| • tetrakalcijev aluminat ferit | $\text{C}_4\text{AF}$ ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) |           |

$\text{C}_3\text{S}$  je najpomembnejši mineral običajnih portlandcementnih klinkerjev in ima tudi največji delež v klinkerju. Močno reagira, hitro strjuje in pri strjevanju prispeva k visokim trdnostim v najkrajšem času. Že po dveh do treh dneh doseže več kot polovico trdnost, ki je doseže po 28-ih dneh. Razvije tudi največ hidratacijske toplote, za razliko od minerala  $\text{C}_2\text{S}$ , ki strjuje

počasi, dalj časa pridobiva na trdnosti in pri tem sprošča bistveno manj hidratacijske toplote. C<sub>3</sub>A na začetku hidratacije reagira hitro, sprošča veliko toplote in je občutljiv na sulfatno korozijo. C<sub>4</sub>AF strjuje počasi in je bolj odporen na sulfatno korozijo kot C<sub>3</sub>A. K trdnosti najmanj prispevata C<sub>3</sub>A in C<sub>4</sub>AF.

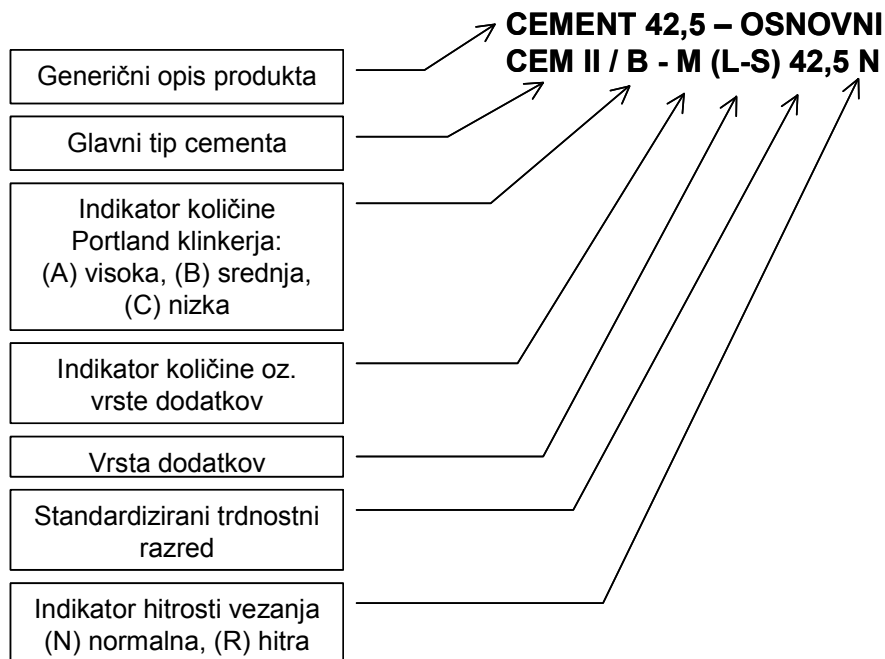


Slika 3.2: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja [Žarnić, 2005].



Slika 3.3: Shematski prikaz proizvodnje cementa [Žarnić, 2005].

Cement označujemo glede na vrsto cementa, njegovo sestavo in trdnost. Način označevanja in pomen oznak obravnava slovenski standard SIST EN 197-1.



Slika 3.4: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1.

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

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

Standard 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.

Standardna trdnost cementa je tlačna trdnost po 28 dneh, zgodnja trdnost cementa pa je tlačna trdnost po 2 ali 7 dneh. Zahteve so prikazane v preglednici 3.1.

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

Trdnostni razred	Tlačna trdnost MPa				Čas začetka vezanja min	Prostorninska obstojnost (ekspanzija) mm
	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost			
	2 dneva	7 dni	28 dni			
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	$\geq 75$	$\leq 10$
32,5 R	$\geq 10,0$	-				
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	$\geq 60$	
42,5 R	$\geq 20,0$	-				
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-	$\geq 45$	
52,5 R	$\geq 30,0$	-				

27 proizvodov v družini običajnih cementov, ki so vključeni v SIST EN 197-1 in njihovo označevanje je navedeno v preglednici 3.2.

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

Glavne vrste	Oznaka 27 proizvodov = (vrste običajnih cementov)		SESTAVA (utežni deleži v cementu v %)											
			GLAVNE SESTAVINE										Ostali dodatki	
			Klinker	Žindra	Mikrosilika	Naravni pucolan	Naravni kalcinirani pucolan	Silicijski EF pepel	Kalcijski EF pepel	Žgani skrilavec	Apnenec			
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 žindro	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland cement z mikrosiliko	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 apnencem	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	
	Mešani portland cement	CEM II/A-M	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5
CEM III	Žlindrin cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	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	Mešani 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 presegati 0,2%.  
<sup>3</sup> Skupna količina organskega karbona ne sme presegati 0,5%.

### 3.3 Voda

Tretja nepogršljiva komponenta betnske mešanice je voda. Voda omogoča proces hidracije cementa, poleg tega pa omogoča tudi vgradnjo in obdelavnost betonske mešanice. Za izdelavo betona se lahko brez dodatnih preiskav uporabi pitna voda. Če pa uporabimo vodo iz rek ali drugih zajetij, je potrebno kakovost vode vedno preveriti. Voda ne sme vsebovati snovi, ki lahko vplivajo na proces hidracije, povzročijo korozijo armature ali vplivajo na mehanske lastnosti betona.

Parameter, ki najbolj vpliva na lastnosti betona, je vodocementno razmerje (razmerje med količino vode in cementa za pripravo cementne paste) [Žarnić, 2005]. Idealno vodocementno razmerje je  $V/C = 0,38$ . Zmanjšanje količine vode vpliva na sledeče lastnosti betona:

- zvišanje mehanskih lastnosti,
- zvišanje vodoneprepustnosti in znižanje absorptivnosti betona,
- zvišanje odpornosti na vremenske vplive in na agresivnost okolja,
- boljšo sprijemnost med plastmi betona in med betonom in armaturo,
- zmanjšanje prostorninskih sprememb pri sušenju in namakanju in
- znižanje števila in velikosti razpok zaradi krčenja [Žarnić, 2005].

Zahteve glede kvalitete vode podaja standard SIST EN 1008:2003. Zahteve glede kemijske sestave so prikazane v spodnji preglednici.

*Preglednica 3.3: Mejne vrednosti kemijskih lastnosti vode za pripravo betonov.*

LASTNOSTI VODE	ZAHTEVANE VREDNOSTI	
	armiran beton	prednapet beton
pH vrednost	4,5 – 9,5	4,5 – 9,5
vsebnost kloridov ( $Cl^-$ )	$\leq 300$ mg/l	$\leq 100$ mg/l
vsebnost sulfatov ( $SO_4^{2-}$ )	$\leq 2700$ mg/l	$\leq 1000$ mg/l
vsebnost sulfidov ( $S^{2-}$ )	-	$\leq 100$ mg/l
vsebnost nitratov ( $NO_3^-$ )	$\leq 500$ mg/l	$\leq 500$ mg/l
vsebnost fosfatov ( $P_2O_5$ )	$\leq 100$ mg/l	$\leq 100$ mg/l

### 3.4 Dodatki za beton

Betonski mešanici se pogosto dodajajo kemijski ali mineralni dodatki. Ti s svojim fizičnim, kemijskim ali kombiniranim delovanjem vplivajo na določene lastnosti betonske mešanice ali strjenega betona. Dodatke se dodaja pred ali med mešanjem. 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.

Kemijske dodatke betonskim mešanici delimo na:

- plastifikatorje,
- aerante,
- antifrizne,
- pospeševalce vezanja,
- zaviralce vezanja in
- polimere.

Osnovni učinek, ki ga dosegamo z dodajanjem **plastifikatorja** je izboljšana plastičnost svežega betona oz. možnost znižanja razmerja V/C za 5 do 10% ali količine cementa v betonu. Na podlagi tega v praksi dosežemo: vgrajevanje z manj energije ali lažje vgrajevanje v armiranobetonske elemente z gosto armaturo, izboljšano sprijemnost med betonom in armaturo, hitrejše naraščanje trdnosti ali doseganje višjih trdnosti pri enaki količini cementa, povečano odpornost ter trajnost strjenega betona in ekonomičnejši beton. Plastifikatorji, ki so danes na trgu, se ločijo po svoji učinkovitosti. Najbolj učinkoviti so t.i. superplastifikatorji.

**Aeranti** so kemijski dodatki, ki pri mešanju sveže betonske mešanice ustvarjajo majhne zračne mehurčke s premerom 0,01 do 0,3 mm. Osnovni namen aeriranja betonov je doseganje večje odpornosti strjenega betona proti zmrzovanju. Če voda v kapilarnih porah zmrzne, delujejo zračni mehurčki kot trajni varnostni rezervoar, ki varuje beton pred uničujočim učinkom zmrzovanja in tajanja. Aeranti omogočajo tudi lažjo vgradljivost, povečajo vodotesnost in zmanjšajo možnost nastajanja razpok.

**Antifrizi** so dodatki, ki se uporabljajo za betoniranje pri nizkih temperaturah (tudi manjših od 0°C). Delujejo tako, da znižujejo tališče vode. V nearmiranih konstrukcijah je lahko masa dodanega antifrizna tudi do 10% mase cementa. V armiranih in prednapetih konstrukcijah pa je nezaželen, ker lahko povzroči korozijo armature.

**Pospeševalci** so dodatki, ki pospešujejo hidratacijo cementa in se s pridom uporabljajo zlasti v hladnih letnih obdobjih. Omogočajo pospešitev postopkov pri vgrajevanju in kar je še najpomembneje, skrajšajo potreben čas negovanja ter zaščitne in pospešujejo razvoj trdnosti, kar omogoča hitrejše razopaževanje in delo z betonom. Zlasti pri nizkih temperaturah so to najpomembnejši dodatki za pripravo svežih betonov.



**Zaviralci** so dodatki, ki upočasnjujejo hidratacijo cementa in s tem povečujejo čas, ki je na razpolago za vgrajevanje betona. Dodajajo se v majhnih količinah, reda velikosti do 0,1%. Uporabljajo se za betoniranje pri visokih temperaturah in pri transportnih betonih, saj lahko včasih obdržijo zmožnost vgrajevanja in obdelovanja betona tudi 24 do 48 ur.

**Polimeri** se uporabljajo kot dodatki predvsem pri sanacijskih betonih, saj preprečujejo nastajanje razpok in povečujejo natezno trdnost betona. O teh 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:

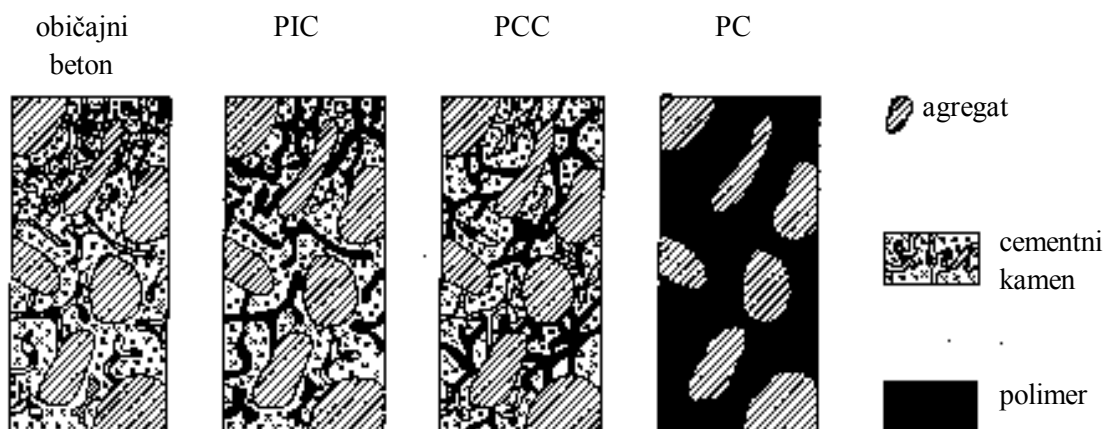
- tip I; to so mineralna polnila kot sta apnenčeva in dolomitna kamena moka. V to kategorijo spadajo tudi pigmenti na bazi železovega oksida. Ti dodatki so nepucolanski in
- tip II; sem spadajo pucolanski dodatki kot so elektrofilitrski pepel, mikrosilika in granulirana plavžna žindra.

## 4 POLIMERI V BETONIH

Betoni izdelani iz portland cementa so najbolj razširjeni konstrukcijski materiali po celem svetu. Ti materiali imajo veliko dobrih lastnosti, a vendar tudi nekaj slabih. Slabe lastnosti so predvsem nizka natezna trdnost, oblikovanje razpok pri sušenju in slaba kemijska odpornost. Na tem področju se je v preteklosti in se še danes veliko časa posveča preiskavam, kako te slabosti čimbolj omejiti. Ena izmed rešitev je modificiranje betona s polimeri. Polimeri se lahko kombinirajo z betoni na različne načine, njihov namen pa je izboljšanje lastnosti betona. Predvsem se s polimeri zvišujejo mehanske lastnosti betona, zmanjšuje se prepustnost in s tem povečuje trajnost. S polimeri modificirani betoni so okarakterizirani z lastnostmi, ki ležijo med betonom izdelanim iz polimera in betonom izdelanim iz portland cementa [Korla, 2007].

Betone, ki vsebujejo polimere, lahko razdelimo v tri skupine:

- s polimeri impregniran beton (PIC),
- s polimeri modificiran portland cementni beton (PCC) in
- 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 na 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 sprijemnosti med agregatnimi zrnji in vezivom. Kljub izrednim karakteristikam materiala se polimerni betoni, zaradi visoke cene polimernega veziva, uporabljajo le v posebnih primerih [Bokan Bosiljkov, 1996].

S polimeri modificirani betoni glede na izdelavo in lastnosti zavzemajo široko skupino med polimernimi betoni in betoni iz portland cementa. V bistvu lahko skoraj vse betone, ki imajo kemijske dodatke, uvrstimo v skupino s polimeri modificiranih betonov. Zato bo v nadaljevanju več govora prav o teh betonih, saj smo jih uporabili tudi pri preiskavah.

## 4.1 S polimeri modificiran portland cementni beton

S polimeri modificirani betoni so betoni, kjer je del cementa zamenjan s polimerom. Kot že rečeno, največ betonov s kemijskimi dodatki spada prav v to skupino. 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 (količina polimera glede na količino cementa v betonski mešanici) vsaj 0,05.

Lastnosti s polimeri modificiranih betonov (okrajšava PCC za “polymer – cement concrete”) najlažje opišemo, če jih primerjamo z navadnim portland cementnim betonom. Lastnosti sveže mešanice PCC v primerjavi z običajnim betonom:

- povečuje vezljivost in zmanjšuje možnost segregacije,
- zmanjšuje površinske razpoke, posebej v kombinaciji s polipropilenskimi vlakni in
- izboljšuje razvrstitev polipropilenskih vlaken v betonu.

Lastnosti strjenega PCC v primerjavi z običajnim portland cementnim betonom:

- z večanjem polimera se zmanjšuje tlačna trdnost (pri enakem V/C),
- z večanjem polimera se povečuje upogibna trdnost,
- modul elastičnosti se z dodajanjem polimera v splošnem zmanjšuje,
- vodoneprepustnost in zmrzljinska odpornost se povečujeta z dodajanjem polimera,
- povečuje se odpornost na kemijske vplive in
- povečuje se odpornost na oblikovanje razpok do optimalne količine polimera, z nadaljnim dodajanjem polimera pa se odpornost na oblikovanje razpok zmanjšuje.

### 4.1.1 Polimeri

Beseda polimer izhaja iz grške besede *poly*, ki pomeni mnogo in *meros*, ki pomeni del. Polimeri so torej makromolekularne organske spojine, ki so zgrajene iz sto do več tisoč monomer. Monomere pa so lahko sestavljene iz dveh pa do približno 30 ogljikovih atomov in so povezane preko valenčnih vezi [Žarnić, 2005]. Molekule polimerov so sestavljene iz zelo dolgih verig ogljikovih atomov, ki so lahko prekinjene z drugimi elementi (dušik, kisik,

žveplo,...). Lahko so linearne, razvejane ali mrežasto prepletene. Primarna povezava v verigi je močna, sekundarna pa šibka. Povezave med verigami so lahko fizikalne s prepletanjem verig ali kemijske s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi. Polimere glede na svojo sestavo delimo na:

- termoplaste (plastomere) in
- duroplaste (duromere).

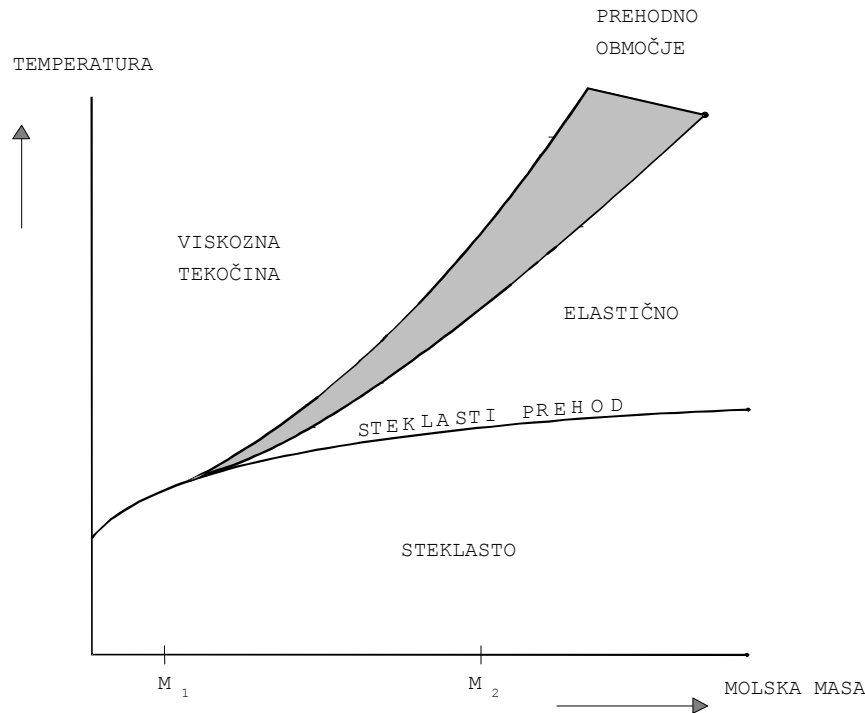
Termoplasti so po različnosti, količini in številu večja skupina od duroplastov. So snovi iz nitastih molekul, ki so znotraj povezane z močnimi kovalentnimi vezmi. Niti so med seboj povezane ali s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi ali šibko elektrostatično povezavo med vodikovimi atomi in drugimi elementi. Zaradi šibkih vezi po segrevanju nad temperaturo zmehčišča (med 100 in 250°C) ali obremenitvijo postanejo plastični in se zato dajo oblikovati. Po ohladitvi obdržijo obliko in so gibki.

Duroplasti so snovi z mrežasto strukturo povezano z močnimi kovalentnimi vezmi. Zato so trdi, togi, krhki in netaljivi oz. odporni na organska topila. Po oblikovanju ohranijo svojo obliko tudi pri večjih temperaturah in se termično ne dajo več preoblikovati. Posebna podskupina duroplastov 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 elastoplast doseže temperaturo steklastega prehoda ( $T_g$ ), se verige lahko po razbremenitvi povrnejo v prvotno obliko [Žarnić, 2005].

#### 4.1.1.1 Agregatno stanje polimerov

Agregatno stanje polimerov je pri normalnem tlaku odvisno od temperature in molske mase.  $T_g$  je temperatura steklastega prehoda in pomeni prehod iz trdega v elastično trdno stanje. Ta temperatura tališča je pri polimerih z nizko molsko maso precej ostra in polimer je pod njo v trdem stanju. Nad to temperaturo pa imajo molekule dovolje enrgije, da se gibljejo neodvisno ena od druge. Takrat je polimer v elastičnem stanju. Pri velikih molskih masah pa jasno definirana točka tališča ne obstaja več in velikokrat opazimo tudi vmesno elastično območje in imamo opravka z dvema prehodnima temperaturama.  $T_g$  je torej prehod iz trdega v elastično trdno stanje,  $T_f$  pa je slabo definiran prehod iz elastičnega v viskozno 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.



Slika 4.2: Agregatna stanja linearnih amorfnih polimerov [Malavašič, 1992].

#### 4.1.1.2 Polimeri, ki se uporabljajo za izdelavo s polimeri modificiranega betona

Polimerni delci v disperziji so sintetizirani iz enakih monomerov (homopolimeri) ali iz različnih monomerov (kopolimeri). Kombinacija različnih monomerov omogoča prilagoditev lastnosti polimernih veziv zahtevam za določeno uporabo. Še posebno se uporabljajo naslednji monomeri:

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

- butadien,

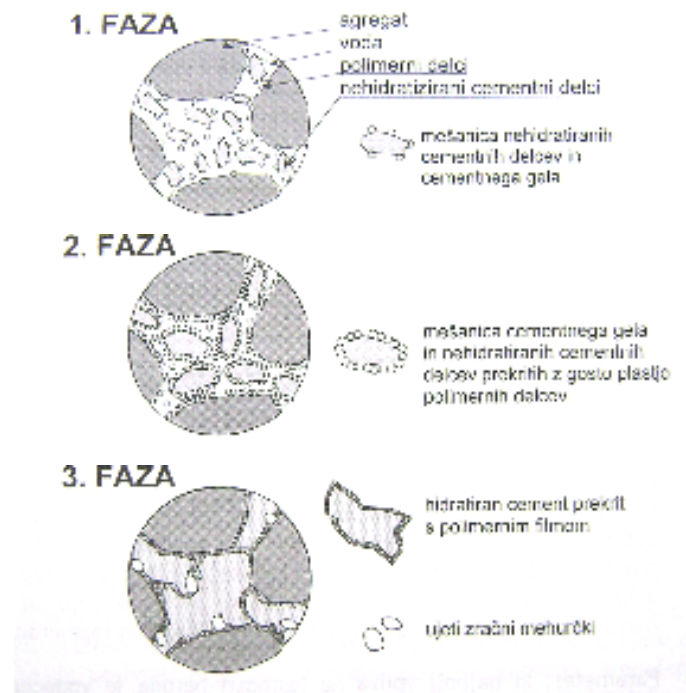
iz katerih dobimo s polimerizacijo med ostalimi tudi:

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

Običajno uporabimo kombinacijo monomerov, ki dajejo trdoto, trdnost in elastičnost [Bokan Bosiljkov, 1996].

#### **4.1.2 Oblikovanje polimernega filma**

Oblikovanje polimernega filma iz polimerne disperzije po odvzemu disperzijskega medija je ključnega pomena v večini praktičnih primerov. Polimerni film v času hidratacije cementa ustvari monolitno matrico mrežaste strukture. Proces ojačitve strukture je funkcija temperature in vlage okolja. Celoten proces oblikovanja polimernega filma poteka v treh fazah. Po mešanju betona so delci polimerov enakomerno razporejeni v mešanici. Nato pa se razdalja med njimi med odvzemanjem disperzijskega medija krajša. Delci polimerov se postopoma odlagajo na površino cementnega gela, na površino še nehidratiziranih cementnih delcev in na površino zrn agregata (1. faza). Odbojni potencial, ki je posledica disperzijskega sistema, postaja vse manjši in končno izgubi svojo učinkovitost, ko se polimerni delci dotikajo. Zaradi hidratacije cementa izgineva voda in v votlinah med polimernimi delci narašča kapilani pritisk. Zato polimerni delci postajajo medsebojno stisnjeni in se sprijemajo v zvezno in na gosto zbito plast ter se kasneje zlijejo v homogen film. Te plasti prekrivajo cementni gel in agregat ter zapolnjujejo pore (2. faza). Pri izteku procesa hidratacije cementa iz por skoraj povsem izgine voda. Iz gosto zbitih delcev polimera nastane nepretrgan film, ki tvori monolitno polimerno mrežo. Delci se sploščijo in zlijejo v homogen film, če je temperatura okolja višja od minimalne temperature oblikovanja filma (3. faza). Ta mreža prepreča hidratiziran cementni gel, zapolnjuje večje pore ter povezuje agregat in cementni kamen.



Slika 4.3: Faze strjevanje polimera [Žarnić, 2005].

#### 4.1.3 Projektiranje materialov s polimerno-cementnim vezivom

Projektiranje s polimeri modificiranih betonov poteka enako kot projektiranje običajnega cementnega betona, le da je malo bolj komplicirano zaradi dodatne komponente – polimera. Zagotoviti je potrebno optimalne vrednosti tistih lastnosti, ki so izboljšane v primerjavi z običajnim betonom, in sicer natezno in upogibno natezno trdnost, deformabilnost, sprijemnost s podlago in trajnost. Pri običajnem betonu ima na te lastnosti največji vpliv vodocementno razmerje, pri polimerno-cementnih betonih pa polimerno-cementno razmerje (P/C). P/C predstavlja utežno razmerje med polimerom (brez vode pri polimerni disperziji) in cementom. Pri s polimeri modificiranih betonih se P/C giblje med 5 in 15%, V/C pa med 30 in 50%. Pri izračunu polimerne disperzije je potrebno upoštevati samo maso suhe snovi, vodo pa upoštevamo posebej. To vodo potem kar odštejemo od potrebne vode za polimerno-cementno mešanico.

#### 4.1.4 Pogoji nege med procesom strjevanja

Nega je zelo pomemben parameter, ki vpliva na trdnostne in obstojnostne lastnosti betonov. Izhajamo iz tega, da so toplotni pogoji okolja ugodni za oblikovanje polimernega filma.



Potem je strjevanje polimernega veziva izključno posledica odvzemanja disperzijskega medija (voda) in izhlapevanja le tega v okolico. Torej se polimerni film oblikuje le v okolju z nizko relativno vlago. Ravno obratno pa je s cementnim vezivom. Ta najboljše trdnosti doseže v vlažnih pogojih, kot sta potopitev v vodi in visoka relativna vlažnost okolja. Torej so idealni pogoji nege za polimerno vezivo suho okolje, za cementno vezivo pa vlažno. To pomeni, da bi s polimeri modificiranimi betoni razvili optimalne lastnosti, če bi bilo ves čas dovolj vode za hidratacijo cementa, hkrati pa bi bilo omogočeno izsuševanje betona. Seveda obeh zahtev hkrati ni mogoče izpolniti, zato dosežemo realno najugodnejše lastnosti s polimeri modificiranih betonov z ustrezno kombinacijo vlažne in suhe nege. Že večkrat je bilo raziskovano, katera kombinacija bi bila najboljša. Mnogi raziskovalci so prišli do spoznanja, da je najboljše nekaj dni s polimeri modificirane betone negovati v vlažnem ali mokrem okolju, ostale dni pa v zraku.

#### **4.1.5 Lastnosti sveže polimerno-cementne mešanice**

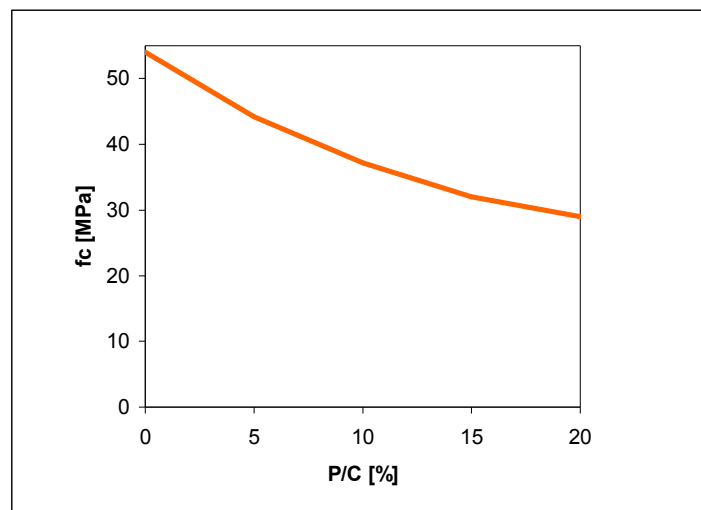
Lastnosti s polimeri modificiranih betonskih mešanic se razlikujejo od običajnih betonskih mešanic zaradi dodanega polimera. Kolikšne in kakšne so razlike je predvsem odvisno od vrste in količine polimera ter od V/C in P/C razmerja. Glavna razlika je v konsistenci mešanice. Obdelavnost s polimeri modificiranih betonskih mešanic je boljša kot obdelavnost običajnih mešanic, saj 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. Zaradi emulgatorjev in stabilizatorjev je zaznati tudi povečano število zračnih por. Povečanje zračnih por poveča vgradljivost betona. Čim pa je ta količina povečanja prevelika, pa povzroči zmanjšanje tlačne trdnosti. Zato proizvajalci polimernih disperzij že dodajajo protipenilce za kontrolo dodatno vnesenih zračnih por.

Polimerno-cementne mešanice imajo tudi večjo sposobnost zadrževanja vode zaradi hidrofilnih delcev in zapolnitve ali prevlečenja por z neprepustnim polimernim filmom, kar ovira izhlapevanje vode. Strjevanje je nekoliko počasnejše kot pri običajnem betonu, imajo pa veliko odpornost na izcejanje vode in segregacijo. S povečanjem V/C in P/C razmerja se povečata tudi posed in razlez.

#### 4.1.6 Lastnosti strjenih s polimeri modificiranih betonov

Če gledamo mikrostrukturo betona, je beton zelo heterogen material. Zaradi različnih mehanskih lastnosti posameznih faz in strukturnih napak, kot so zračne pore in učinki zgostitve materiala pri vgrajevanju betona, se pri homogeni zunanji obremenitvi vzpostavi v notranjosti betonskega elementa heterogen in kompleksen potek napetosti [Bokan Bosiljkov, 1996].

Pri s polimerom modificiranem betonu sta natezna in upogibna natezna trdnost višji kot pri običajnem betonu. To je posledica večje natezne trdnosti polimernega filma od cementne matrice. Ravno obratno pa je s tlačno trdnostjo. Do zmanjšanja tlačne trdnosti pride zaradi povečanja poroznosti betona in zaradi nižje tlačne trdnosti polimernega veziva v primerjavi s cementnim vezivom. Zmanjšanje tlačne trdnosti je sorazmerno z večanjem P/C razmerja. Problem zmanjšanja trdnosti zaradi povečane poroznosti lahko rešimo z uporabo protipenila. Pomanjkljivost je tudi slabša odpornost na vodo, saj s polimeri modificirani betoni ob izpostavitvi visoki relativni vlagi ali vodi izgubijo na trdnosti. Zaradi dodanega polimera je pri s polimeri modificiranih betonih sprijemna trdnost med vezivom in agregatnimi zrnji večja kot pri običajnih betonih.



Slika 4.4: Vpliv P/C razmerja na tlačno trdnost betona (z uporabo polimerne disperzija SBR in brez protipenila) [Ohama].

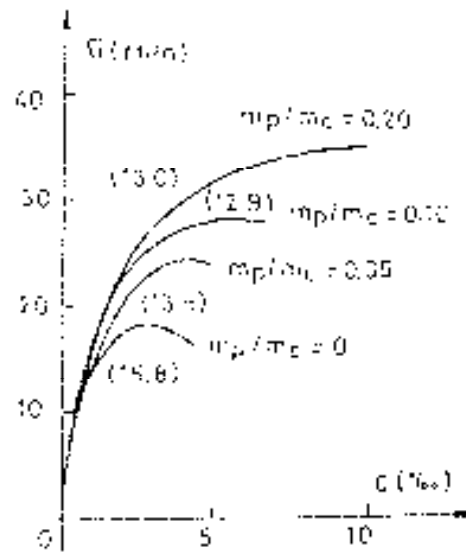
V splošnem je trdnost s polimeri modificiranih betonov precej odvisna tudi od temperature okolja. V steklastem stanju (temperature so za 10 – 20°C nižje od temperature steklastega

prehoda polimernega filma) imajo s polimeri modificirani betoni, zaradi vključenega polimera, večjo natezno trdnost, duktilnost pa ni izboljšana. Z naraščanjem temperature pa se duktilnost povečuje, medtem ko trdnost pada. Večina s polimeri modificiranih betonov izgubi več kot 50% trdnosti pri temperaturi večji od 50°C. Upadanje trdnosti pa je še posebej izrazito nad temperaturo steklastega prehoda polimera in pri večjem P/C razmerju.

Pomemben razlog za vključitev polimerov v betonsko mešanico je bilo krčenje, ki spremlja sušenje cementnega kamna. Krčenje zaradi sušenja je lahko večje ali manjše kot pri običajnih betonih in običajno upada z naraščanjem P/C razmerja. V praksi se uporabljajo polimeri, ki zmanjšajo krčenje. Lezenje s polimeri modificiranih betonov pa je ponavadi manjše kot pri običajnih betonih.

Pri s polimeri modificiranih betonih so večje pore zapolnjene s polimerom ali pa so zaprte s polimernim filmom. Večje kot je P/C razmerje, večji je zapolnilni oz. preplastitveni učinek. Zaradi tega imajo s polimeri modificirani betoni manjšo absorpcijo vode ter manjšo vodo- in paroprepustnost. To pa je poleg nižjega V/C razmerja tudi razlog za večjo zmrzlinško odpornost kot pri običajnem betonu. Večja je tudi odpornost na udarno obremenitev in obrabo. To pa zato, ker imajo že sami polimeri odlično odpornost na udar. Odpornost na obrabo je odvisna od vrste polimera, P/C razmerja in načina obrabe. V splošnem se odpornost na obrabo pomembno izboljšuje z naraščanjem P/C razmerja. S polimeri modificirani betoni s P/C razmerjem 0,20 imajo odpornost na udarce okoli 10-krat večjo od običajnih betonov, odpornost na obrabo pa kar 20 do 50-krat večjo [Ohama, 1984].

S polimeri modificirani betoni imajo večjo sposobnost deformiranja od običajnih betonov, saj imajo nižji elastični modul. Polimeri, ki jih uporabljamo za modifikacijo betonov imajo elastični modul od 0,001 GPa pa do 10 GPa in je dosti manjši od modula elastičnosti cementa, ki znaša od 10 GPa do 30 GPa. Zaradi tega pride do razlik v sposobnosti deformiranja in duktilnosti med običajnimi in s polimeri modificiranimi betoni. Slednji v glavnem dosežejo večjo deformacijo in imajo večjo duktilnost in elastičnost od običajnih. Seveda pa so te lastnosti odvisne tudi od vrste in deleža polimera v betonu. Na sliki 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 4.5: Diagrami  $\sigma - \epsilon$  betona modificiranega z SBR lateksom (modul elastičnosti v GPa)  
[Ohama, 1984].

## 5 PRESKUSI ZA OVREDNOTENJE LASTNOSTI BETONOV

### 5.1 Preskusi na svežih mešanicah

Za doseganje dobrih trdnosti strjenega betona je zelo pomembna dobra priprava sveže betonske mešanice, njeno vgrajevanje in nega. Konsistenca je skupek lastnosti svežega betona in ustrezna konsistenca nam omogoča dobro vgrajevanje. V/C razmerje sveže betonske mešanice se lahko posredno kontrolira s preskušanjem konsistence na mestu vgrajevanja. Če je konsistenca preveč tekoča, imamo preveliko V/C razmerje ali pa smo po nepotrebem uporabili plastifikator ali preveč plastifikatorja. Konsistenco določamo na štiri načine:

- z aparatom Vebe,
- s postopkom poseda,
- s postopkom razleza in
- s postopkom zgoščevanja pri vibriranju.

Mi smo konsistenco določali s postopkom poseda, ki je primernejša metoda za določanje konsistence za bolj plastične mešanice. Ker so bile mešanice zelo plastične, smo poleg poseda izmerili tudi razlez. Na koncu smo preverili še vsebnost zraka v svežem betonu in določili prostorninsko maso sveže betonske mešanice.

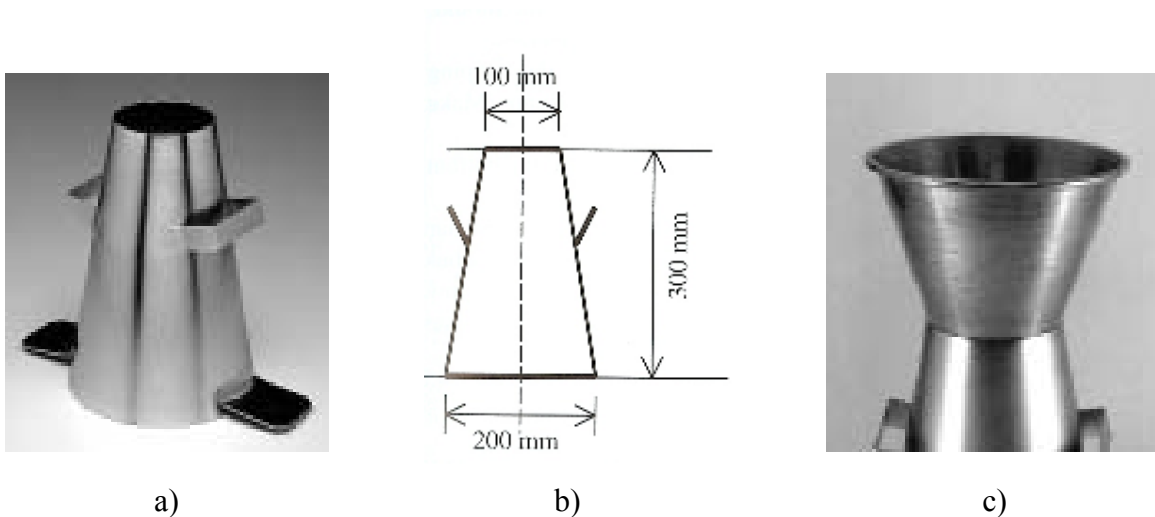
Količina vzorca, ki ga odvzamemo za preiskave, mora biti vsaj 1,5 krat večja od količine potrebne za izvedbo preiskave in ne manjša od  $0,02 \text{ m}^3$ . Vzorec je potrebno vzeti na čim več možnih mestih glede na globino in površino betonske mešanice. Pred preiskavo ga je potrebno hraniti na čisti površini in ga pred preiskovanjem dobro premešati. Čas med odvzemom in preiskovanjem mora biti čim krajši. Med transportom ga je potrebno zaščititi pred izgubo vode, vplivom povišane temperature in segregacijo.

#### 5.1.1 Metoda s posedom

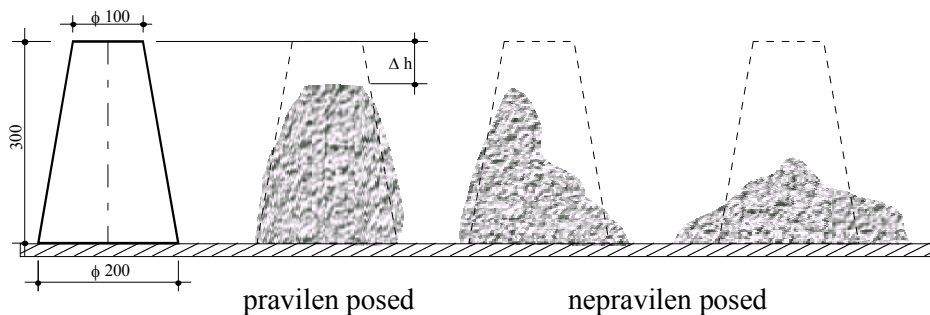
Je najbolj preprosta metoda, ki se pogosto uporablja tudi na gradbiščih. S preskusom merimo razliko v višini vzorca svežega betona v kalupu in vzorca svežega betona po odstranitvi kalupa. Ta metoda je primerna za določanje konsistence sveže betonske mešanice takrat, ko se

posed giblje med 10 in 210 mm. Izven teh skrajnih vrednosti se za določanje konsistence uporabijo druge metode.

Potrebujemo opremo, ki ne reagira s cementno pasto. Najprej kalup napolnimo (pomagamo si z lijakom) do 1/3 njegove višine in ga nato z zgoščevalno palico zgostimo s 25 udarci. Nato kalup napolnimo do 2/3 in postopek ponovimo. Na koncu kalup napolnimo preko vrha in mešanico spet zgostimo s 25 udarci. Lijak odstranimo, zgladimo površino na vrhu kalupa in odstranimo kalup po 5 s do 10 s, pri čemer kalupa ne smemo premikati v horizontalni smeri in ga sukati. Na koncu pogledamo kakšne oblike je vzorec. Če je pravilne, ob njega postavimo kalup in na njega v horizontalni smeri položimo palico za zgoščevanje tako, da sega čez preskušanelec. Z merilom določimo razdaljo med prvotno višino preskušanca in najvišjo točko posedenga preskušanca. Posed zaokrožimo na najbližjih 10 mm.



Slika 5.1: Kalup (votel prisekan stožec) za preskus s posedom (a in b) in lijak (c).



Slika 5.2: Primer pravičnega in nepravilnega posedu.

*Preglednica 5.1: Konsistenčne stopnje poseda.*

Stopnja	Posed [mm]
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220

Ta metoda je primerna za posede med 10 in 210 mm. Ker je bil posed v nekaj primerih večji od 220 mm, smo izmerili tudi razlez. Razlez smo izmerili v dveh pravokotnih smereh in nato izračunali povprečje.

### 5.1.2 Vsebnost zraka v svežem betonu

Metoda deluje na ta način, da se znana prostornina zraka v tesno zaprti posodi pri znanem pritisku združi z neznano prostornino zraka v vzorcu betona. Merilna skala je kalibrirana na odstotek zraka pri rezultirajočem pritisku. Naprava s katero merimo vsebnost zraka se imenuje porozimeter. Sestavljen je iz osnovne posode s pokrovom in črpalko in merilnika z manometrom, potrebujemo pa še sredstvo za zgoščevanje betona in zidarsko žlico.

Osnovno posodo napolnimo s svežim betonom, in sicer v treh slojih. Vsak sloj posebej zgostimo z vibracijsko iglo. Po zadnjem vibriranju odstranimo višek betona na pokrovu in očistimo nalegajoče površine osnovne posode in pokrova. Na osnovno posodo pritrdimo pokrov. Skozi odprtini 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 v predkomoro (pokrov), da kazalec na manometru pokaže ničlo. Nekaj sekund po izravnavanju tlaka odpremo ventil in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks, ki je hkrati tudi delež zraka v % glede na celotno prostornino svežega betona v posodi.



Slika 5.3: Porozimeter.

### 5.1.3 Prostorninska masa betona

Prostorninsko maso sveže betonske mešanice smo določali ob vgraditvi betona v kalupe (kocke, prizme). Kalup najprej napolnimo do polovice in beton zgostimo s paličnim vibratorjem, nato ga napolnimo do vrha in še enkrat zgostimo. Presežek betona odstranimo z zidarsko žlico, očistimo zunanost kalupa in kalup stehamo. Mase praznih kalupov poznamo že od prej, torej lahko izračunamo prostorninsko maso  $D$ :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (5.1)$$

kjer so:

- $m_1$  masa kalupa [kg],
- $m_2$  masa kalupa z vzorcem [kg] in
- $V$  prostornina kalupa [ $m^3$ ].

Izračunano prostorninsko maso zaokrožimo na  $10 \text{ kg}/m^3$ .

## 5.2 Preskusi na strjenih betonih

Mehanske lastnosti srtjenega betona določajo njegovo kakovost in s tem tudi njegovo uporabnost v različnih konstrukcijah. Osnovne lastnosti strjenega betona, ki jih preskušamo po standardiziranih porušnih metodah so:



- tlačna trdnost,
- upogibna natezna trdnost in
- cepilna natezna trdnost.

Zaradi lažje in boljše primerjave med različnimi recepturami betona smo poleg zgoraj navedenih naredili še nekaj preiskav na strjenem betonu, in sicer:

- preiskavo vpijanja vode,
- določili smo statični modul elastičnosti,
- določili smo dinamični modul elastičnosti in
- izvedli preiskavo pull-off.

### 5.2.1 Preiskava tlačne trdnosti

Preskušance obremenjujemo do porušitve v stiskalnici in največjo tlačno silo, ki jo preskušanec prenese zabeležimo in izračunamo tlačno trdnost betona. Uporabili smo preskušance v obliki kocke s stranico 15 cm.

Preden vstavimo preskušanec v stiskalnico ga je potrebno očistiti na obeh površinah, ki bosta v stiku s stiskalnico. Smer uvajanja sile mora biti pravokotna na smer vgrajevanja. Nato izberemo konstantno hitrost obremenjevanja, ki se nahaja v območju od 0,2 do 1,0 MPa/s in začnemo obremenjevati. Zabeležimo največjo izmerjeno silo in iz nje izračunamo tlačno trdnost  $f_c$  po formuli:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (5.2)$$

kjer sta:

- $F$  tlačna sila ob porušitvi [kN] in
- $A_c$  površina vodoravnega prereza preskušanca [cm<sup>2</sup>].

### 5.2.2 Preiskava upogibne natezne trdnosti

Podobno kot pri določanju tlačne trdnosti tudi tu preskušance damo v posebno stiskalnico. Preskušanci so v tem primeru prizme dimenzij 10 cm × 10 cm × 40 cm. Prizme postavimo na dva valja, tretjega damo pa na sredino na vrh prizme in obremenjujemo kot prikazuje slika

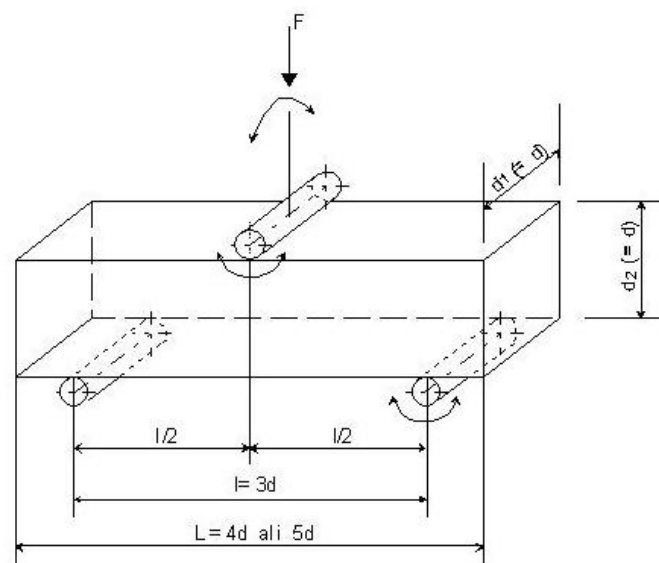
5.4. Hitrost obremenjevanja je tudi v tem primeru predpisana, in sicer od 0,04 do 0,06 MPa/s.

Ko dobimo porušno silo  $F$ , lahko izračunamo upogibno trdnost  $f_{cf}$ :

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}, \quad (5.3)$$

kjer, so:

- $l$  razmik med podporama [cm],
- $d_1$  in  $d_2$  dimenziji prečnega prereza prizme [cm] in
- $F$  sila ob poružitvi [kN].



Slika 5.4: Preiskava upogibne natezne trdnosti.

### 5.2.3 Preiskava cepilne natezne trdnosti

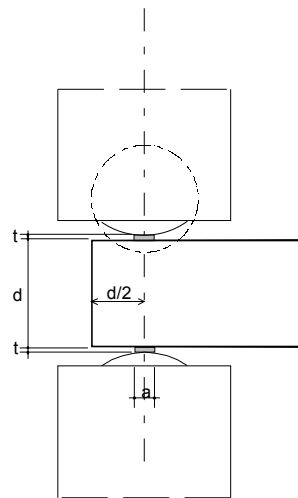
Za preiskavo cepilne natezne trdnosti smo uporabili kar iste preskušance kot pri preiskavi upogibne natezne trdnosti. Pri preiskavi upogibne trdnosti so se prizme pri poružitvi prepolovile, tako da smo imeli za vsako mešanico v bistvu 6 preskušancev. Preskušance smo v stiskalnici obremenjevali vzdolž dveh linij do poružitve kot prikazuje slika 5.5. Zabeležili smo največjo silo, ki jo preskušanec prenese. Ko imamo cepilno silo  $F$ , lahko izračunamo cepilno trdnost  $f_{ct}$ :

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d}, \quad (5.4)$$

kjer so:

- $F$  cepilna sila [kN],

- $l$  dolžina raznosa sile [cm] in
- $d$  merodajna dimenzija preskušanca [cm].



Slika 5.5: Preiskava cepilne natezne trdnosti.

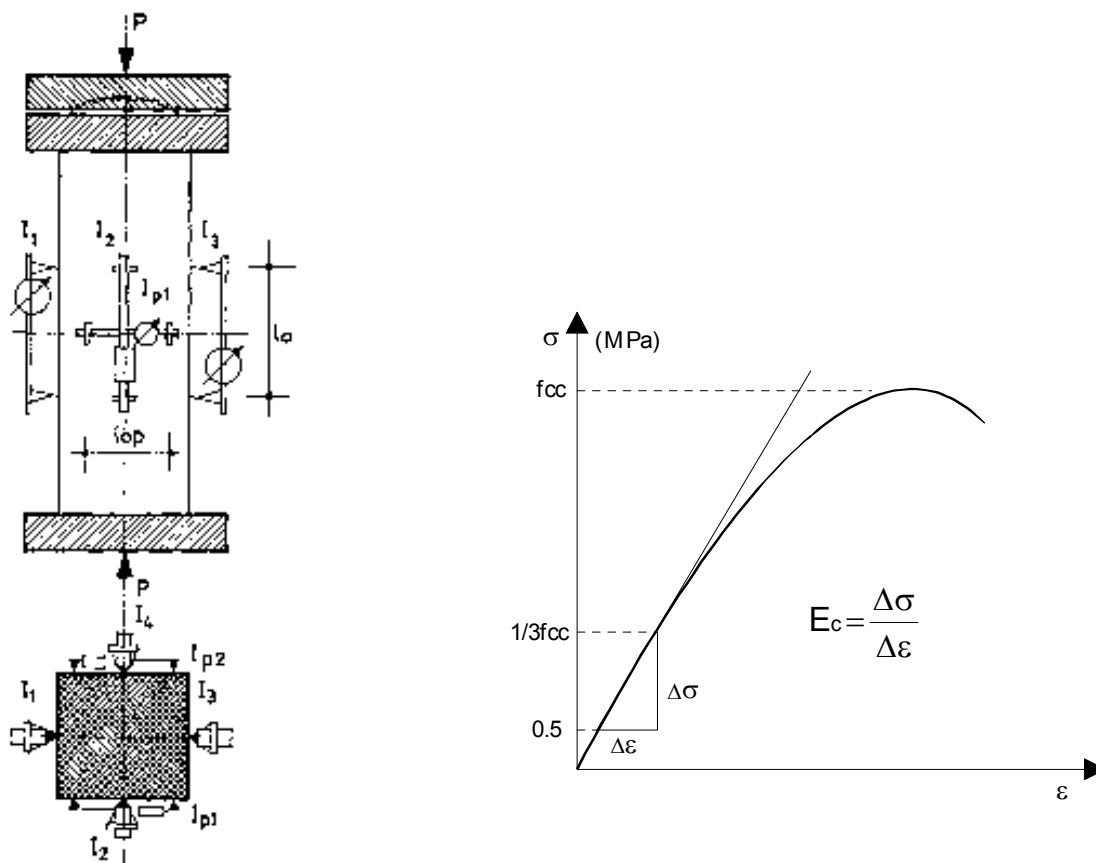
#### 5.2.4 Preiskava vpijanja vode

Preiskavo vpijanja vode smo opravili na kockah s stranico 15 cm, ki smo jih najprej posušili do konstantne mase. Stranico kocke, ki je pri betoniranju predstavljala eno od stranskih ploskev kocke, smo najprej očistili. Nato smo nanjo s posebnim materialom podobnim plastelinu, ki ne prepušča vode, pritrdili t.i. Karstenovo cevko. Vanjo smo nalili vodo v višini 110 mm in jo pustili, da samostojno prodira v kocko. V predpisanih časovnih intervalih smo merili količino vode, ki jo je kocka vpila, t.j. izmerili smo koliko cm vode je če v cevki. To smo merili po 10 (M1), 60 (M2) in 180 minutah (M3) ter 24 (M4), 48 (M5) in 72 urah (M6). Metoda je sicer zelo preprosta in primerna tudi za uporabo na terenu.

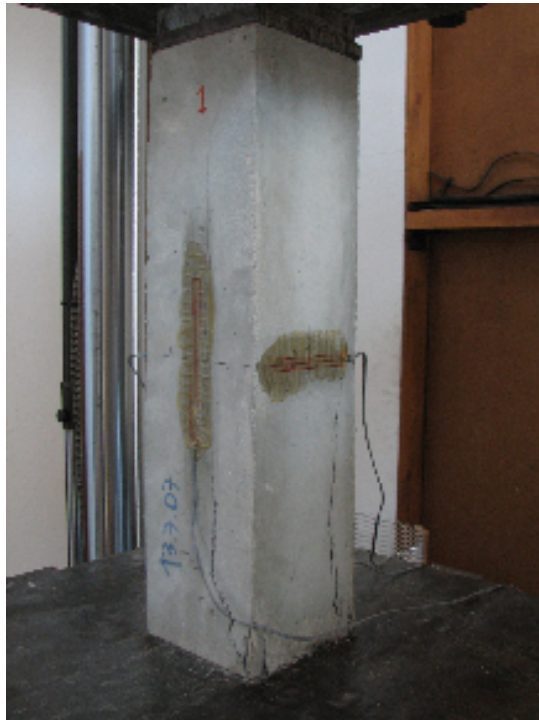
#### 5.2.5 Določanje statičnega modula elastičnosti

Statični modul elastičnosti se določa s pomočjo tlačnega preskusa prizme. Preskušanec je torej prizma dimenzij 10 cm × 10 cm × 40 cm. Predhodno se na vse štiri večje stranice prizme prilepijo podolgovati merilni lističi dolžine vsaj 2/3 dolžine krajše stranice prizme, ki pri preiskavi merijo deformacije. Ti lističi se prilepijo točno na sredino stranice preskušanca kot je razvidno iz slike 5.6. Prizmo se pokončno vstavi v stiskalnico in se jo začne s konstantno hitrostjo tlačno obremenjevati, pri tem pa merilni lističi merijo deformacije. Na začetku

prizmo obremenimo do začetne napetosti 0,5 MPa. Obremenjevanje se nato povečuje s konstantno hitrostjo  $0,6 \pm 0,4$  MPa na sekundo, dokler se ne doseže obremenitev, ki je enaka približno tretjini tlačne trdnosti  $f_c/3$  tega istega betona. Nato počakamo 60 s in sprostimo napetost z razbremenjevalno hitrostjo  $0,5 \pm 0,2$  MPa na sekundo na začetnih 0,5 MPa in vse to ponovimo še štirikrat, torej preskušance skupaj obremenimo petkrat. Tako določa standard JUS U.M1.025. Nemški standard določa skupno tri ponovitve obremenjevanja, a smo se odločili da naredimo pet ponovitev, da dobimo čim bolj točne rezultate. Računalnik vseskozi beleži deformacije in obremenitve na preskušancu. Iz deformacij in obremenitev določimo  $\sigma - \varepsilon$  diagram betona. Statični modul elastičnosti betona določimo kot sekantni modul iz izraza  $E_c = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$ . Spodnja meja sekante je pri trdnosti 0,5 Mpa, zgornja pa pri 1/3 ugotovljene tlačne trdnosti prizme.



Slika 5.6: Skica določanja statičnega modula elastičnosti betona in  $\sigma - \varepsilon$  diagram betona.



*Slika 5.7: Preskušavec za določanje statičnega modula elastičnosti betona v stiskalnici po obremenjevanju.*

### **5.2.6 Določanje dinamičnega modula elastičnosti**

Dinamični modul elastičnosti se določa s pomočjo ultrazvočnih valov. Naprava za preskušanje s pomočjo ultrazvoka je sestavljena iz merilnega inštrumenta, dveh sond, od katerih je ena oddajnik druga pa sprejemnik ultrazvočnih impulzov, kablov, ki spajajo merilni instrument s sondami in kalibratorja, ki služi za preverjanje pravilnosti delovanja aparature. Pri preverjanju aparature med sondi postavimo kalibrator in odčitek na merilnem instrumentu mora biti enak vrednosti, ki je označena na kalibratorju.

Vzorec, na katerem merimo hitrost ultrazvoka, je prizma dimenzij 10 cm × 10 cm × 40 cm. Prizmo postavimo med sondi tako, da sondi nalegata na manjši ploskvi prizme in merimo čas, ki ga ultrazvok potrebuje za prehod dolžine prizme. Ti ploskvi je potrebno predhodno očistiti in na njiju nanesti vazelin, tekoče milo ali silikonsko pasto, da zagotovimo popolni kontakt s površino. Obvezno je potrebno odstraniti zrak na stiku med sondo in materialom. Hitrost ultrazvoka izračunamo s pomočjo izraza:

$$v = \frac{s}{t} \cdot 10^6, \quad (5.5)$$

kjer sta:

- $s$  pot [m] in
- $t$  čas [ $\mu$ s].

Iz hitrosti lahko izračunamo dinamični modul elastičnosti  $E_D$ :

$$E_D = \frac{v^2 \cdot \gamma}{f(\mu_D)}, \quad (5.6)$$

$$\text{kjer je: } \bar{f}(\mu_D) = \frac{1 - \mu_D}{(1 + \mu_D) \cdot (1 - 2\mu_D)}, \quad (5.7)$$

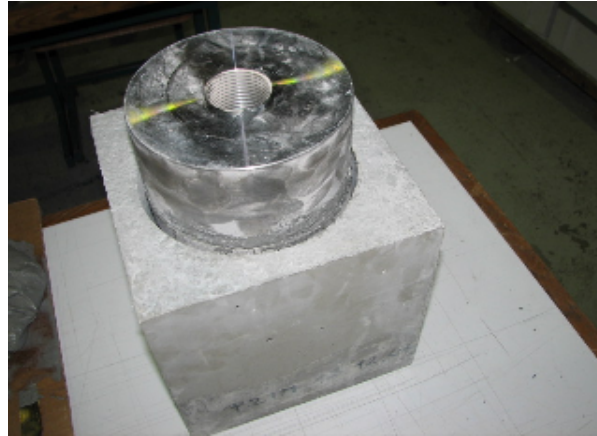
in so:

- $\mu_D$  dinamični Poissonov koeficient,
- $\gamma$  gostota materiala [ $\text{kg/m}^3$ ] in
- $v$  hitrost gibanja ultrazvočnih valov [m/s].

Vrednost dinamičnega Poissonovega koeficienta varira med 0,15 in 0,25. V računu smo vzeli kar predpostavljeno vrednost  $\mu_D = 0,20$ .

### 5.2.7 Preiskava pull-off

Preiskava trdnosti stika med podlago in sanacijskim betonom oz. preiskava pull-off je v svetu pogosto izvajan preskus. Standard SIST EN 1542:1999 in še nekateri drugi standardi zahtevajo uporabo čepov premera 50 mm in debeline 20 mm, največje zrno agregata pa naj ne bi preseglo 8 mm, kar pomeni, da je ta standard bolj primeren za preskušanje stika pri sanacijskih maltah in malo manj pri betonih. Zato smo mi v okviru raziskav uporabili čepa premera 150 mm in debeline 75 mm, največje zrno agregata pa je bilo veliko 16 mm. Vse ostalo je bilo pri tej preiskavi izvedeno v skladu s standardom, torej lahko rečemo, da smo le nekoliko modificirali standard.



*Slika 5.8: Preskušavec s prilepljenim čepom pripravljen za preiskavo pull-off.*

Najprej je bilo potrebno pripraviti podlago za sanacijski beton. Mešanica za podložni beton je imela P/C razmerje enako 0,0, torej beton ni vseboval polimera. Podložni beton smo pripravili tako, da smo naredili kocke s stranico 20 cm, in jih nato razklali na dve polovici, torej je bila višina podložnega betona približno 10 cm. Podlago smo napravili iz betona izdelanega z drobljenim agregatom. Najprej smo 28 dni podložni beton negovali v vodi, nato pa je približno 2 meseca odležaval v laboratorijskih pogojih. V tem času se je večji del krčenja podložnega betona zaključil. Površino podložnega betona smo očistili z vodnim curkom pod pritiskom in nato počakali, da je odvečna voda, ki je beton ni vpil, odtekla. Polovičke kock (podložni beton) smo vstavili nazaj v kalupe in na tako pripravljene podlage vgradili s polimeri modoficirane betonske mešanice, ki smo jih zgostili s pomočjo vibracijske igle.



*Slika 5.9: Izgled grobo hrapave površine starega podložnega betona.*



*Slika 5.10: Podlaga za sanacijski beton nameščena v kalup.*

Nato smo z vrtno krono premera 15 cm zavrtali v kompozitni preskušavec 15 cm globoko, torej smo prevrtali celoten sanacijski material in še približno 5 cm podložnega betona. Na valjast del smo prilepili čep premera 150 mm in počakali da je lepilo doseglo končne

trdnostne karakteristike (da je zvezalo in doseglo natezno trdnost večjo od betona) ter nato izvedli pull-off preskus s pomočjo stroja s kapaciteto 1000 kN. Hitrost obremenjevanja je znašala  $35 \pm 15$  kPa na sekundo.



*Slika 5.11: Vrtanje s krono premera 150 mm v kompozitni preskušavec.*



*Slika 5.12: Preskušavec pripravljen za namestitev čepa.*

Obremenjevali smo, dokler beton ni popustil. Računalnik je sproti beležil napetosti v betonu in končno trdnost, pri kateri je beton popustil. Na koncu je potrebno preveriti, kje je beton popustil, da ugotovimo kje je bil najšibkejši. Obstajajo 3 variante, in sicer ali popusti podložni beton ali stik med podložnim in sanacijskim betonom ali pa sanacijski beton. Zgodilo se je tudi, da je popustilo lepilo, s katerim smo pritrdili čep na sanacijski beton, vendar smo kmalu spoznali da je 24 ur strjevanja lepila premalo, da bi le-to doseglo optimalno trdnost, kakor so velevala navodila za uporabo. Da do tega ni prihajalo pri naslednjih preskušancih, smo pustili lepilo 48 ur, da se je strdilo in doseglo trdnost večjo od betona.



*Slika 5.13: Preskušavec, vstavljen v stroj, po obremenitvi.*



*Slika 5.14: Kompozitni preskušanci, ki so popustili na različnih mestih.*



### 5.3 Izbrani režimi izpostavljenosti/nege betona

V naravi so beton oz. betonske konstrukcije izpostavljeni različnim vplivom okolja. Podnebje je spremenljivo in s tem tudi vremenski pogoji. Zato smo v ta namen beton pred nekaterimi preiskavami izpostavili tudi različnim pogojem, katerim naj bi bil beton izpostavljen tudi v naravi. Torej smo nekatere preskušance predhodno izpostavili različnim režimom izpostavljenosti oz. nege. Na teh preskušancih smo nato določevali notranjo odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju s pomočjo dinamičnega modula elastičnosti betona, tlačno odpornost betona in izvedli pull-off preiskave.

**Notranja odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju** se ugotavlja z relativnim dinamičnim modulom elastičnosti betona. Preskušance, ki so v tem primeru prizme, pri starosti 28 dni najprej potopimo za najmanj 4 dni v vodo s temperaturo  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , ki mora segati najmanj 2 cm nad zgornjo površino preskušanca. Nato jih stehamo, izmerimo dimenzije in izračunamo navidezno gostoto betona. Posamezni cikel preskusa sestoji iz:

- zmrzovanja v trajanju 4 ure pri temperaturi  $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  in
- tajanja v vodi v trajanju 4 ure, pri čemer ima voda temperaturo  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

V našem primeru so bili ti cikli nekoliko daljši, vendar smo skrbeli, da so bili približno enako dolgi za vse preskušance. Meritve smo izvajali po 28 dneh (M1), 4 dneh v vodi (M2) in nato še po 40 (M3) in 77 ciklih (M4).

Pred preskusom tlačne trdnosti smo preskušance izpostavili **suhim ciklom segrevanja in ohlajevanja**, in sicer po dva od vsake mešanice. Tako smo ugotavljali vpliv suhih ciklov zmrzovanje/tajanje in povečana/običajna temperatura na tlačno trdnost. Po starosti 28 dni smo preskušance izpostavili ohlajanju na  $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  oz. segrevanju na  $55 \pm 2^{\circ}\text{C}$  za 4 ure, nato pa še za 4 ure temperaturi  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , kar pomeni, da je cikel trajal 8 ur. Ponoči je lahko trajal tudi malo dlje. Pred preskusom tlačne trdnosti smo naredili 30 takih ciklov. Na teh istih preskušancih smo naredili tudi preskus vodovpojnosti.

Pred pull-off preskusom smo polovico kock izpostavili **cikličnemu nevihtnemu obremenjevanju**. Po zabetoniranju smo 3 dni preskušance negovali v vlažnem okolju, in sicer tako, da smo jih pokrili s folijo in zraven njih namestili posode z vodo. Nato so

odležavali v laboratorijskih pogojih. Polovica preskušancev je bila izpostavljena laboratorijskim pogojem, polovica pa je bila pri starosti 28 dni izpostavljena razmeram, ki jim lahko pravimo tudi ciklično nevihtno obremenjevanje s toplotnimi in zmrzlinškimi šoki. Standard SIST EN 13687-3:2002 podaja cikel, ki traja 24 ur, in sicer:

- 2 uri v vodi s temperaturo  $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ,
- 4 ure na zraku s temperaturo  $-15 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ,
- 2 uri v vodi s temperaturo  $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$  in
- 16 ur na zraku s temperaturo  $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

V vodo se potopi samo sanacijski sloj, in sicer vsaj 10 mm (kapilarni srk). Mi smo nekoliko modificirali standard, tako da smo preskušance najprej dali v sušilnico na  $55^{\circ}\text{C}$  za vsaj 6 ur, nato smo jih s sanacijskim slojem postavili v posodo z vodo s temperaturo  $20^{\circ}\text{C}$  za 2 uri, zatem za vsaj 6 ur v zmrzovalno omaro s temperaturo  $-20^{\circ}\text{C}$ , na koncu pa smo jih izpostavili še suhemu okolju za 2 uri pri temperaturi  $20^{\circ}\text{C}$ . Cikel je bil dolg 24 ur, torej so bili preskušanci v sušilnici ali zmrzovalni omari nekoliko dlje kot 6 ur, vendar smo skrbeli, da so bili vsi preskušanci izpostavljeni približno enakim ciklom. Preskušanci so bili izpostavljeni 20 takim ciklom.

## 6 LASTNE RAZISKAVE

### 6.1 Splošni opis

Danes je poznanih že precej različnih polimernih disperzij. Odločili smo se, da v okviru te diplomske naloge izberemo dve različni in raziščemo njun vpliv na obnašanje betona kot sanacijskega materiala. Uporabili smo ju v dveh različnih P/C razmerjih (0,075 in 0,1) v kombinaciji z enim agregatom in cementom.

Na sveži mešanici smo merili posed, razlez s posedom in poroznost. Po 28 dneh smo izmerili tlačno, upogibno natezno in cepilno natezno trdnost. Nato smo ugotavljali še vpliv suhih ciklov segrevanja in ohlajevanja na tlačno trdnost in vodovpojnost. Z dinamičnim modulom elastičnosti smo ugotavljali notranjo odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju, določali pa smo tudi statični modul elastičnosti. Na koncu smo preverili še trdnost stika med podlago in sanacijskim betonom in vpliv cikličnega nevihtnega obremenjevanja nanjo.

### 6.2 Projektiranje betonov

Pred začetkom projektiranja je bilo potrebno vnaprej določiti nekatere količine. Tako smo na podlagi predhodnih raziskav na maltah in zaradi obstojnosti betona določili vodocementno razmerje  $V/C=0,40$ , količino cementa za  $1 \text{ m}^3$  390 kg in predpostavili, da je delež por v betonu 2%. Količino superplastifikatorja smo tudi predpostavili, in sicer 0,2% glede na maso cementa. Po potrebi smo njegovo količino spreminjali. Količina polipropilenskih vlaken je bila  $1 \text{ kg/m}^3$  betona. V nadaljevanju je prikazan primer projektiranja s polimerom modificiranega betona s polimernocementnim razmerjem  $P/C = 0,10$ . Najprej smo izračunali potrebne količine za  $1 \text{ m}^3$  betona, nato pa še za  $40 \text{ dm}^3$ , kolikor smo ga lahko zamešali naenkrat z mešalcem.

Primer:

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

$$m_{\text{cementa}} = 390 \text{ kg}$$

$$P / C = 0,10 \Rightarrow$$

$$m_{polimera} = 0,10 \cdot 390kg \quad (6.2)$$

$$m_{polimera} = 39kg$$

$$V / C = 0,40 \Rightarrow$$

$$m_{vode}^{zacetne} = 0,40 \cdot 390kg \quad (6.3)$$

$$m_{vode}^{zacetne} = 156kg$$

Med tehničnimi podatki za polimerno disperzijo najdemo gostoto, ki znaša  $1 \text{ kg/dm}^3$  in vsebnost suhe snovi v disperziji 29,5%. Torej lahko izračunamo maso disperzije in maso vode v disperziji:

$$m_{disperzije} = \frac{m_{polimera}}{29,5\%} = \frac{39kg}{0,295} = 132,20kg \quad (6.4)$$

$$m_{vode}^{disperzija} = m_{disperzije} - m_{polimera} \quad (6.5)$$

$$m_{vode}^{disperzija} = 132,20kg - 39kg = 93,20kg$$

Končna količina vode, ki jo potrebujemo, je torej:

$$m_{vode} = m_{vode}^{zacetne} - m_{vode}^{disperzija} \quad (6.6)$$

$$m_{vode} = 156kg - 93,20kg = 62,80kg$$

Gostota cementa CEM I je  $3080 \text{ kg/m}^3$ , gostota agregata pa  $2650 \text{ kg/m}^3$ . Sedaj lahko izračunamo maso agregata:

$$1m^3 = \frac{m_{cementa}}{\rho_{cementa}} + \frac{m_{polimera}}{\rho_{polimera}} + \frac{m_{agregata}}{\rho_{agregata}} + V_{vode} + V_{zraka} \quad (6.7)$$

$$1m^3 = \frac{390kg}{3080kg/m^3} + \frac{39kg}{1000kg/m^3} + \frac{m_{agregata}}{2650kg/m^3} + 0,156m^3 + 0,020m^3 \Rightarrow$$

$$m_{agregata} = 1745kg$$

Sedaj, ko smo izračunali vse potrebne količine za 1 m<sup>3</sup> betona, lahko s pomočjo količnika izračunamo tudi količino vseh sestavin za 40 dm<sup>3</sup>:

$$kolicnik = \frac{1000dm^3}{40dm^3} = 25 \quad (6.8)$$

Dobimo količine za 40 dm<sup>3</sup> betona:

$$m_{cementa} = 15,600kg$$

$$m_{agregata} = 69,800kg$$

$$m_{disperzije} = 5,288kg$$

$$m'_{vode} = 2,512kg$$

Določili smo tudi v kakšnem razmerju moramo zmešati frakcije agregata, da dobimo največjo prostorninsko maso agregata v zbitem stanju. Izkazalo se je, da dobimo največjo prostorninsko maso agregata v zbitem stanju, če uporabimo 50% frakcije 0/4, 10% 4/8 in 40% 8/16. Iz tega sledi, da rabimo:

$$m'_{0/4} = 0,50 \cdot m_{agregata} \quad (6.9)$$
$$m'_{0/4} = 0,50 \cdot 69,800kg = 34,900kg$$

$$m_{4/8} = 0,10 \cdot m_{agregata} \quad (6.10)$$
$$m_{4/8} = 0,10 \cdot 69,800kg = 6,980kg$$

$$m_{8/16} = 0,40 \cdot m_{agregata} \quad (6.11)$$
$$m_{8/16} = 0,40 \cdot 69,800kg = 27,920kg$$

Frakcija 0/4 je bila nekoliko vlažna, zato je bilo potrebno še odšteti vodo. Vzorec te frakcije smo posušili do konstantne mase v mikrovalovni pečici z močjo 1 kW. Primerjali smo maso vzorca pred sušenjem in maso vzorca po sušenju. V tem primeru je bil delež vode v frakciji 0/4 1,2%. Torej je količina vode v frakciji 0/4:

$$\begin{aligned}m_{vode}^{0/4} &= 0,012 \cdot m'_{0/4} \\m_{vode}^{0/4} &= 0,012 \cdot 34,900 = 0,419kg\end{aligned}\tag{6.12}$$

Končna količina vode in agregata frakcije 0/4 tako znaša:

$$\begin{aligned}m_{vode} &= m'_{vode} - m_{vode}^{0/4} \\m_{vode} &= 2,512kg - 0,419kg = 2,093kg\end{aligned}\tag{6.13}$$

$$\begin{aligned}m_{0/4} &= m'_{0/4} + m_{vode}^{0/4} \\m_{0/4} &= 34,900kg + 0,419kg = 35,319kg\end{aligned}\tag{6.14}$$

Dejanske količine cementa, polimerne disperzije, agregata, vode, superplastifikatorja in vlaken za 40 dm<sup>3</sup> betona so:

- **m<sub>cementa</sub> = 15,600 kg,**
- **m<sub>disperzije</sub> = 5,288 kg,**
- **m<sub>0/4</sub> = 35,319 kg,**
- **m<sub>4/8</sub> = 6,980 kg,**
- **m<sub>8/16</sub> = 27,920 kg,**
- **m<sub>vode</sub> = 2,093 kg,**
- **m<sub>superplastifikatorja</sub> = 31,2 g,**
- **m<sub>vlaken</sub> = 40 g.**

## 6.3 Uporabljeni materiali

### 6.3.1 Cement

Za izdelavo polimerno cementnih betonov smo uporabili eno vrsto cementa, in sicer:

- CEM I 42,5R (v nadaljevanju cement I).

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

### 6.3.2 Polimeri

Uporabili smo polimere v obliki polimerne disperzije. Uporabili smo dve različni polimerni disperziji istega proizvajalca. Uporabljajo se za izboljšavo mehanskih lastnosti, za boljšo neprepustnost, odpornost, boljšo sprijemnost s podlago in obdelavnost betonov. Razlikujejo se po vrsti in količini polimera.

*Preglednica 6.1: Lastnosti polimerne disperzije A.*

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 6.2: Lastnosti polimerne disperzije B.*

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

### 6.3.3 Agregat

Uporabili smo pomurski prod relativno slabe kvalitete, torej prodnat agregat iz naravnega peska in gramoza. Na razpolago smo imeli 3 različne frakcije, in sicer 0/4, 4/8 in 8/16. Najprej smo izbrali 3 možne kombinacije, da smo lahko določili katera da največjo prostorninsko maso agregata v zbitem stanju, in sicer:

- 50% 0/4 + 10% 4/8 + 40% 8/16,
- 40% 0/4 + 20% 4/8 + 40% 8/16 in
- 50% 0/4 + 15% 4/8 + 35% 8/16.

Vse 3 kombinacije ustrezajo zahtevam standarda SIST EN 1026:2008, izbrali pa smo prvo kombinacijo, saj le-ta da največjo prostorninsko maso agregata v zbitem stanju.

### 6.3.4 Voda

Uporabili smo vodo iz vodovoda.

### **6.3.5 Superplastifikator**

Za doseganje ustrezne konsistence smo uporabili tudi superplastifikator nove generacije.

### **6.3.6 Vlakna**

Uporabili smo tudi polipropilenska vlakna. Na podlagi pregleda literature, v kateri so predstavljeni rezultati obsežnih preiskav vpliva polipropilenskih vlaken na plastično krčenje betona, smo se odločili, da v mešanice vključimo delež vlaken enak  $1 \text{ kg/m}^3$  betona. Izbrali smo polipropilenska vlakna s tržnim imenom Krenit, ki so se pokazala kot najbolj učinkovita, zaradi posebej pripravljene površine s hidrofilnimi lastnostmi in relativno visoke natezne trdnosti. Vlakna so dolga 12 mm, s prečnim prerezom  $35 \times 250$  do  $600 \mu\text{m}$ , njihova natezna trdnost je  $340 - 500 \text{ MPa}$ , modul elastičnosti  $8,5 - 12,5 \text{ GPa}$ , deformacija ob pretrgu pa  $8 - 10 \%$ .

## **6.4 Preiskave na svežih betonskih mešanicah**

### **6.4.1 Mešanje betona**

Za pripravo betonov smo uporabili mešalec s prostornino  $50 \text{ dm}^3$ . Pred pričetkom mešanja smo navlažili posodo mešalca in vse ostale pripomočke, ki so kasneje prišli v stik z betonom. Najprej smo v posodo za mešanje stresli agregat frakcije 8/16, nato cement in na koncu še agregat frakcij 4/8 in 0/4. Nato smo začeli z mešanjem in postopoma dodajali ostale sestavine skozi odprtino na vrhu mešalca. Najprej smo počasi dodajali vlakna tako, da so se raztrosila po celem mešalcu. Nato smo začeli počasi dolivati disperzijo med mešanjem tako, da se je čim bolj porazdelila po celem mešalcu, za njo smo dodali superplastifikator in na koncu še vodo, ki smo jo uporabili tudi za to, da smo pomili posodo, v kateri se je nahajala disperzija. Vse skupaj smo mešali približno 5 minut.

Naredili smo 3 različne mešanice. Vsako mešanico smo naredili dvakrat po  $40 \text{ dm}^3$ , kar je zadostovalo za vse raziskave. Kalupe, v katere smo beton vgrajevali, smo najprej očistili in namazali s sredstvom za lažje odstranjevanje že strjenega betona, nato smo jih napolnili do



polovice in beton zgostili s paličnim vibratorjem, potem smo jih prenapolnili in še enkrat zgostili ter odstranili odvečni beton.

Na svežih betonskih mešanicah smo preverjali naslednje lastnosti:

- posed in razlez s posedom,
- vsebnost zraka v svežem betonu in
- prostorninsko maso.

#### **6.4.2 Posed, razlez s posedom, vsebnost zraka in prostorninska masa**

Prvo mešanico smo izdelali s polimerno disperzijo A in  $P/C = 0,075$ . Uporabili smo 0,25% superplastifikatorja. Najprej smo preverili posed. Ker je bil ta samo 13,8 cm (zahtevali smo med 16 cm in 21 cm), smo dodali še 0,25% superplastifikatorja. Tokrat je posed znašal 21,6 cm, kar je bilo na meji dovoljenega. Odločili smo se, da pri drugi mešanici z disperzijo A in  $P/C$  razmerjem 0,075 dodamo 0,40% superplastifikatorja in posed je bil v predpisanih mejah. Izmerili smo tudi razlez, ki je bil približno v razmerju s posedom. Pri večjem posedu smo dobili tudi večji razlez.

Drugo mešanico smo izdelali ponovno iz polimerne disperzije A, tokrat s  $P/C$  razmerjem 0,10. Pričakovali smo dodaten plastifikacijski učinek zaradi povečanja razmerja  $P/C$ , zato smo se na podlagi predhodnih preiskav na maltah odločili dodati samo 0,20% superplastifikatorja. Posed je bil pri obeh mešanicah nekoliko, a zanemarljivo večji kot pri  $P/C$  razmerju 0,075, torej je učinek 0,30% plastifikatorja tokrat nadomestil polimer. Razlez je bil podoben kot pri  $P/C$  razmerju 0,075.

Za tretjo mešanico smo uporabili polimerno disperzijo B s  $P/C$  razmerjem 0,075. Kot pri disperziji A pri istem  $P/C$  razmerju, smo tudi tukaj na začetku dodali 0,25% superplastifikatorja. Izmerili smo posed, ki je bil približno enak kot pri disperziji A pri istem  $P/C$  razmerju, ko smo dodali 0,50% superplastifikatorja. Torej, pri pol manjši količini superplastifikatorja smo dosegli enak plastifikacijski učinek. Lahko rečemo, da ima disperzija A precej manjši plastifikacijski učinek kot disperzija B.

Kot je razvidno iz preglednice 6.3 imajo betoni s polimerno disperzijo A večjo prostorninsko maso kot betoni s polimerno disperzijo B, in sicer približno za  $40 \text{ kg/m}^3$ . Vsebnost zraka je

obratno sorazmerna s prostorninsko maso betona, zato je opaziti večjo poroznost pri betonu s polimerno disperzijo B. Kot vidimo, se z večanjem količine polimera zmanjšuje prostorninska masa betona in zvišuje poroznost. To je posledica same teže, saj je polimer dosti lažji od cementa.

*Preglednica 6.3: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanica.*

	Mešanica	Posed [cm]		Razlez [cm]		Vsebnost zraka [%]		Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	
		1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Disperzija A P/C=0,075	1.	21,6	20,6	37,5	34,3	2,3	2,50	2390	2398
	2.	19,6		31,0		2,7		2407	
Disperzija A P/C=0,10	1.	22,0	21,3	36,0	34,4	3,4	3,25	2363	2378
	2.	20,5		32,8		3,1		2393	
Disperzija B P/C=0,075	1.	22,0	21,5	38,0	36,3	4,0	4,05	2351	2357
	2.	21,0		34,5		4,1		2362	

## 6.5 Preiskave na strjenih betonih

Na strjenih betonih smo opravili naslednje preiskave:

- preiskava tlačne trdnosti,
- preiskava upogibne natezne trdnosti,
- preiskava cepilne natezne trdnosti,
- preiskava vpijanja vode,
- določitev statičnega modula elastičnosti,
- določitev dinamičnega modula elastičnosti in
- preiskava pull-off.

### 6.5.1 Preiskava tlačne trdnosti

Preskus tlačne trdnosti smo izvajali v skladu z zahtevami standarda SIST EN 12390-3:2008 na preskušancih, ki so stali 28 dni v laboratorijskih pogojih (3 vzorci), na preiskuščancih, ki so bili izpostavljeni 30 ciklom ohlajevanja (2 vzorca) in tistih, ki so bili izpostavljeni 30 ciklom segrevanja (2 vzorca). V preglednici in na grafu so prikazane povprečne vrednosti. Polimer, ki ima nižjo tlačno trdnost kot cement, naj bi tudi znižal tlačno trdnost betona. To je razvidno iz preglednice 6.4 pri betonu s polimerom A. Pri negovanju v laboratorijskih pogojih se s

povečanjem P/C razmerja za 2,5% tlačna trdnost zmanjša za skoraj 7%. Opazimo tudi, da pri betonu s polimerom B dobimo pri istem P/C razmerju 13% manjšo tlačno trdnost kot pri betonu s polimerom A, torej lahko rečemo, da ima polimer A višjo tlačno trdnost.

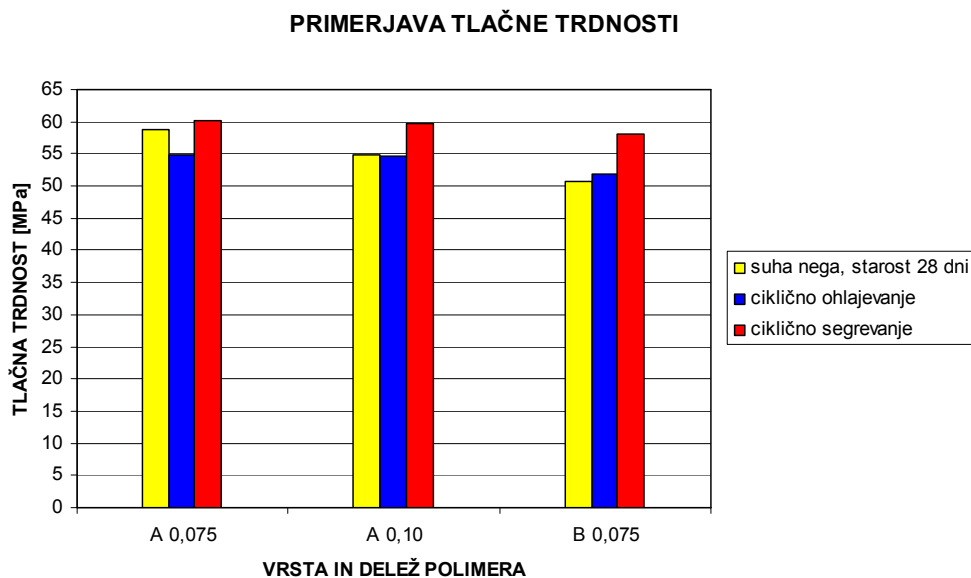
*Preglednica 6.4: Rezultati preiskav tlačne trdnosti.*

Mešanica	Nega	Tlačna trdnost $f_c$ [MPa]	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]
Disperzija A P/C=0,075	suha nega, starost 28 dni	58,74	2352
	ohlajevanje -20°C/+20°C	54,93	2354
	segrevanje +55°C/+20°C	60,11	2323
Disperzija A P/C=0,10	suha nega, starost 28 dni	54,85	2313
	ohlajevanje -20°C/+20°C	54,72	2325
	segrevanje +55°C/+20°C	59,80	2304
Disperzija B P/C=0,075	suha nega, starost 28 dni	50,62	2297
	ohlajevanje -20°C/+20°C	51,95	2293
	segrevanje +55°C/+20°C	58,07	2271

Pri betonu s polimerom A pri P/C razmerju 0,075 opazimo, da ciklično ohlajevanje ima vpliv na tlačno trdnost, in sicer jo zmanjša za 6%, medtem ko pri P/C razmerju 0,10 tlačna trdnost po cikličnem ohlajevanju ostane približno enaka. Zanimivo je, da se pri cikličnem segrevanju tlačna trdnost celo poveča, posebej je to občutno pri P/C razmerju 0,10, kjer se zviša za 9%.

Kot smo že na začetku ugotovili, je tlačna trdnost polimera B manjša kot tlačna trdnost polimera A. Zanimivo pa je, da se pri betonu s polimerom B pri P/C razmerju 0,075 tlačna trdnost po cikličnem ohlajevanju poveča za 2,5%, pri cikličnem segrevanju pa kar za 15%.

Zaključimo lahko, da imajo betoni s polimerom A večjo tlačno trdnost od betonov s polimerom B. Z dodajanjem polimera A se znižuje tlačna trdnost v normalnem okolju, vendar se po drugi strani tlačna trdnost z dodajanjem polimera A pri izpostavljenosti ekstremnejšim razmeram povečuje. Opazimo lahko tudi, da ima beton s polimerom B precej visoko tlačno trdnost v ekstremnih razmerah, kljub temu, da je približno 2,5% lažji od betona s polimerom A.



*Slika 6.1: Primerjava tlačne trdnosti.*

### 6.5.2 Preiskava upogibne in cepilne natezne trdnosti

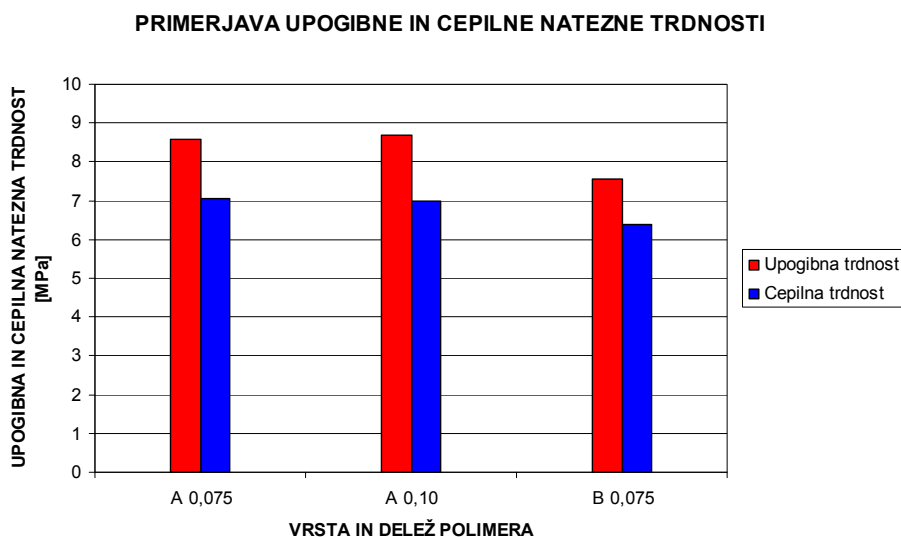
Preiskave upogibne trdnosti smo izvajali v skladu z zahtevami standarda SIST EN 12390-5:2008 na prizmah, ki so 28 dni odležavale v laboratorijskih pogojih. Iz rezultatov lahko vidimo, da količina polimera niti nima posebnega vpliva na upogibno trdnost betona, zato ga pa ima vrsta polimera. V našem primeru vidimo, da sta upogibni trdnosti pri betonu s polimerom A pri P/C razmerjih 0,075 in 0,10 skoraj enaki. Upogibna trdnost betona s polimerom B je pri istem P/C razmerju nižja od upogibne trdnosti betona s polimerom A za 12%, torej je beton s polimerom A odpornejši na upogibne obremenitve.

Cepilno trdnost smo preiskovali kar na polovičkih prizem, ki so ostale od preiskav upogibne trdnosti. Podobno kot pri upogibni trdnosti lahko tudi tukaj opazimo, da količina polimera nima vpliva na cepilno trdnost, ima pa ga vrsta polimera. Cepilna trdnost pri betonu s polimerom A pri obeh P/C razmerjih je zopet približno enaka, medtem ko je pri betonu s polimerom B pri P/C razmerju 0,075 manjša za 9% od cepilne trdnosti pri betonu s polimerom A pri istem P/C razmerju.

Ugotovili smo, da količina polimera v betonu nima bistvenega vpliva na upogibno in cepilno trdnost betona, zato ga pa ima vrsta polimera. Torej beton s polimerom A ima višjo upogibno in cepilno natezno trdnost.

Preglednica 6.5: Rezultati preiskav upogibne in cepilne natezne trdnosti.

Mešanica	Upogibna trdnost $f_{cf}$ [MPa]	Cepilna trdnost $f_{ct}$ [MPa]	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]
Disperzija A P/C=0,075	8,57	7,05	2333
Disperzija A P/C=0,10	8,69	6,99	2336
Disperzija B P/C=0,075	7,55	6,40	2298



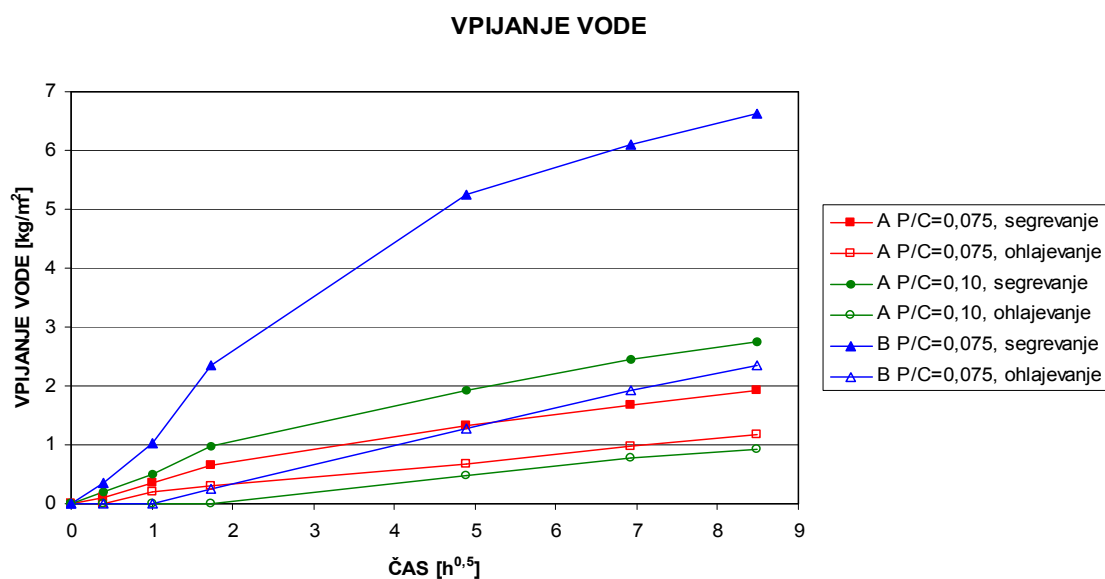
Slika 6.2: Primerjava upogibne in cepilne natezne trdnosti.

### 6.5.3 Preiskava vpijanja vode

Preiskavo vpijanja vode smo opravili na kockah s stranico 15 cm, ki smo jih kasneje uporabili za preskus tlačne trdnosti. Preiskavo smo izvajali na 2 preskušancih, ki sta bila izpostavljena 30 ciklom segrevanja in 2 preizkušancih, ki sta bila izpostavljena 30 ciklom ohlajevanja. Primerjali smo vpijanje vode v obeh primerih. Na grafu in v tabeli je prikazano povprečje obeh preskušancev.

Če pogledamo spodnji graf (Slika 6.3) in primerjamo obe P/C razmerji pri betonu s polimerom A vidimo, da se pri povečanju P/C razmerja poveča tudi razlika pri vpianju vode. Vpianje vode je manjše pri preskušancih, ki so bili izpostavljeni suhim ciklom ohlajevanja. Že pri P/C razmerju 0,075 so preskušanci, ki so bili izpostavljeni ciklom segrevanja, po 24 urah vpili 2-krat več vode od tistih, ki so bili izpostavljeni ciklom ohlajevanja. Pri P/C razmerju 0,10 je ta razlika še izrazitejša, in sicer so preskušanci predhodno izpostavljeni

ciklom segrevanja vpili kar 4-krat več vode kot preskušanci predhodno izpostavljeni ciklom ohlajevanja.



Slika 6.3: Vpijanjanje vode betonov v intervalu 72 ur.

Pri betonu s polimerom B dobimo precej slabše rezultate kot pri betonu s polimerom A. Vpijanjanje vode je pri betonu s polimerom B, ki je bil izpostavljen ciklom segrevanja, večje od vpijanjanja pri betonu s polimerom A kar 4-krat, pri betonu, ki je bil izpostavljen ciklom ohlajevanja pa 2-krat. Opazimo tudi, da beton predhodno izpostavljen ciklom ohlajevanja, začne vpijati vodo šele po 60 minutah, edino beton s polimerom A in P/C razmerjem 0,075 po 10 minutah.

Rezultati za koeficient vpijanjanja vode po 24-ih urah prikazani v preglednici 6.6 kažejo, da je koeficient vpijanjanja vode v večini primerov manjši od  $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ , kar je priporočena mejna vrednost za kapilarni koeficient vpijanjanja vode. Edina izjema je beton s polimerom B, ki je bil izpostavljen suhim ciklom segrevanja, kjer je koeficient vpijanjanja vode večji od  $1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ .

Preglednica 6.6: Koeficienti vpijanja vode po 24-ih urah.

Mešanica	Nega	Koeficient vpijanja vode [kg/(m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup> )]
Disperzija A P/C=0,075	+55°C/+20°C	0,27
	-20°C/+20°C	0,14
Disperzija A P/C=0,10	+55°C/+20°C	0,39
	-20°C/+20°C	0,10
Disperzija B P/C=0,075	+55°C/+20°C	1,07
	-20°C/+20°C	0,26

Zaključimo lahko, da je beton s polimerom A precej bolj odporen na vpijanje vode kot beton s polimerom B in je zato primernejši za armiranobetonske konstrukcije, saj lahko učinkoviteje varuje armaturo pred korozijo. Opazili smo tudi, da količina polimera nima večjega vpliva na vpijanje vode pri betonih, ki so izpostavljeni ciklom ohlajevanja. Ima pa vpliv na vpijanje vode pri betonih, ki so izpostavljeni segrevanju, in sicer večji ko je delež polimera, večje je vpijanje vode.

#### 6.5.4 Določitev statičnega modula elastičnosti

Statični modul elastičnosti smo ugotavljali s pomočjo prizem, ki smo jih po 28-ih dneh tlačno obremenjevali. Modul elastičnosti betona je pomemben pri sanacijskih betonih, saj nam določa togost sanacijskega sloja.

Kot lahko vidimo iz preglednice 6.7, znaša modul elastičnosti pri disperziji A pri P/C razmerju 0,075 skoraj 33 GPa. Če v mešanici povečamo količino polimera, se naj bi modul elastičnosti zmanjšal. Do tega pride zato, ker ima polimer manjšo togost kot agregat. Ker sta bila količina cementa in V/C razmerje pri vseh mešanicah enaka, se količina agregata pri dodajanju polimera zmanjša in zato se tudi togost betona zmanjša. Vidimo, da se pri P/C razmerju 0,10 modul elastičnosti pričakovano zmanjša, in sicer za približno 6%. Pri tem razmerju v računu nismo upoštevali prve prizme, ker je pri obremenjevanju verjetno prišlo do uklona le-te (posledica nepravilnosti kalupa) in zato ni merodajna za določitev modula elastičnosti.

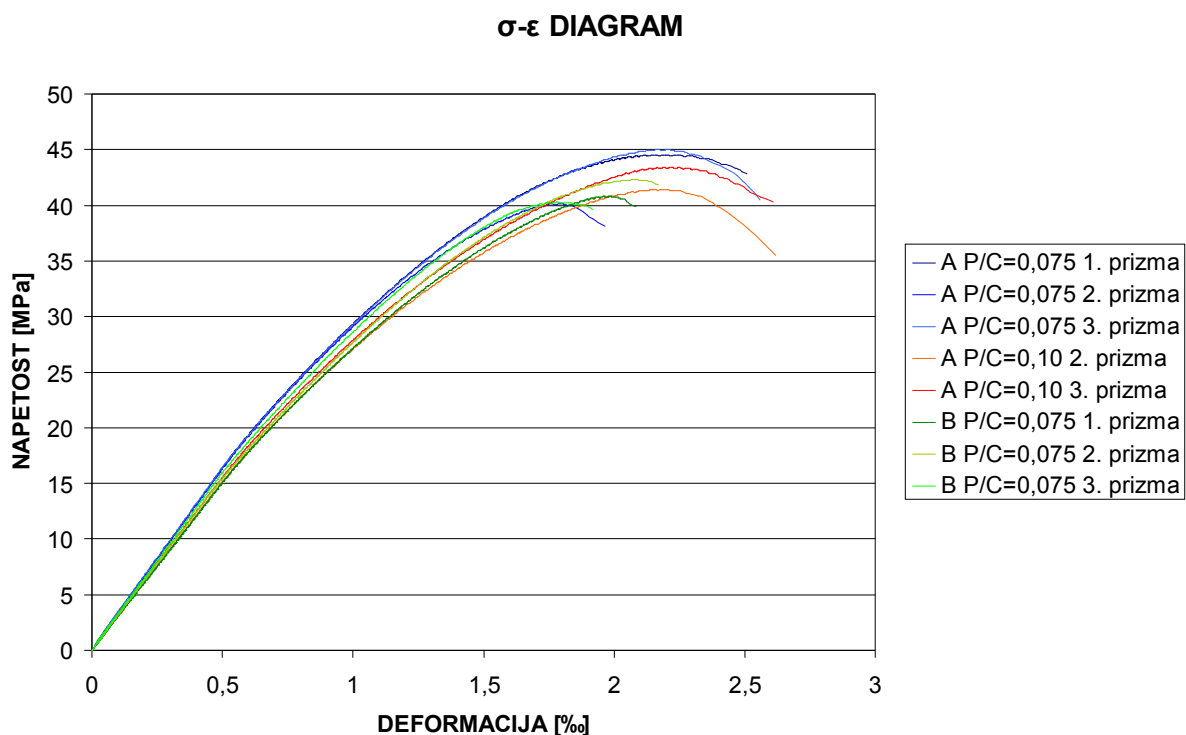
Pri disperziji B pri P/C razmerju 0,075 dobimo približno 5% nižji modul elastičnosti kot pri disperziji A. To je bilo pričakovano, saj je bila tlačna trdnost preskušancev s polimerom B

manjša od tistih s polimerom A. Tako je sta tudi togost in modul elastičnosti pričakovano manjša.

Če primerjamo obe disperziji, vidimo da z disperzijo B modul elastičnosti bolj zmanjšamo kot z disperzijo A. Rezultati so bili pričakovani, z dodajanjem polimera je modul elastičnosti padal in pa modul elastičnosti je bil pri betonu s polimerom B nižji kot pri betonu s polimerom A.

Preglednica 6.7: Statični modul elastičnosti po 28-ih dneh.

Mešanica	Statični modul elastičnosti [GPa]			
	1. prizma	2. prizma	3. prizma	Povprečje
Disperzija A P/C=0,075	32,81	32,67	32,89	32,79
Disperzija A P/C=0,10	(36,34)	30,31	31,10	30,71
Disperzija B P/C=0,075	30,15	31,06	32,01	31,07



### 6.5.5 Določitev dinamičnega modula elastičnosti

Dinamični modul elastičnosti smo določali na prizmah po postopku opisanem v poglavju 5.2.6, prizme pa smo negovali kot je zapisano v poglavju 5.3. Dinamični modul elastičnosti iz

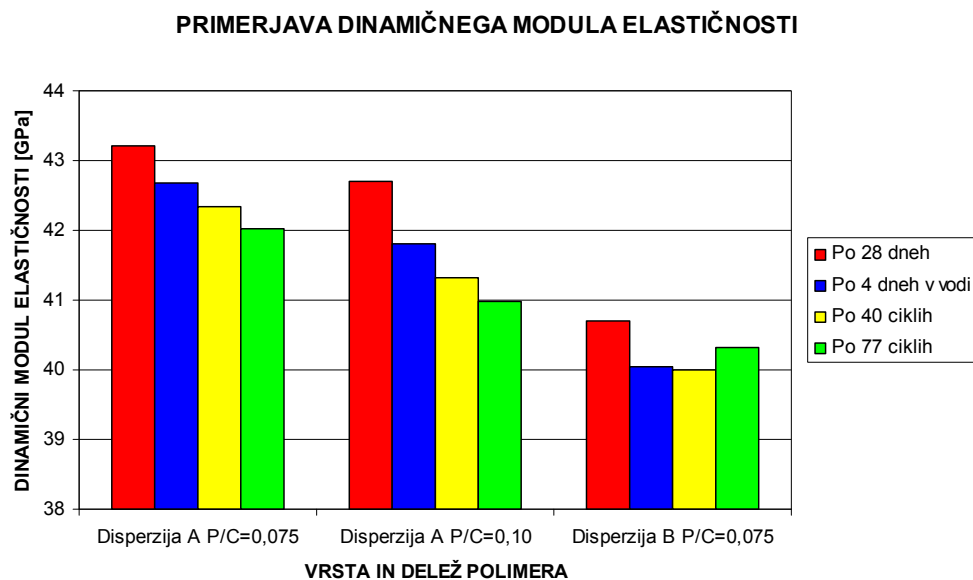


gradbeniškega vidika ni tako pomemben kot statični modul elastičnosti. Obstaja povezava med dinamičnim modulom elastičnosti in hitrostjo potovanja ultrazvoka skozi beton. S pomočjo njega se lahko oceni poškodovanost prizem po ciklih zmrzovanje/tajanje, zato so bile te meritve izvedene za nadaljne raziskave.

Kot vidimo v preglednici 6.8 je dinamični modul elastičnosti večji od statičnega za približno 30%. Opazimo lahko, da dinamični modul elastičnosti pada s starostjo betona in ciklanjem. Podobno kot pri statičnem modulu elastičnosti tudi pri dinamičnem z dodajanjem polimera modul pada. Prav tako tudi v tem primeru s polimerom B bolj zmanjšamo dinamični modul elastičnosti betona kot s polimerom A.

Preglednica 6.8: Dinamični modul elastičnosti.

Mešanica	Dinamični modul elastičnosti [GPa]			
	Po 28 dneh	Po 4 dneh v vodi	Po 40 ciklih	Po 77 ciklih
Disperzija A P/C=0,075	43,2	42,7	42,3	42,0
Disperzija A P/C=0,10	42,7	41,8	41,3	41,0
Disperzija B P/C=0,075	40,7	40,0	40,0	40,3



Slika 6.5: Primerjava dinamičnega modula elastičnosti.

### 6.5.6 Preiskava pull-off

Pull-off preiskave smo izvajali na kockah s stranico 20 cm po postopku opisanem v poglavju 5.2.7. Za vsako mešanico smo opravili preskus na 3 kockah po starosti 28 dni in 3 kockah, ki so bile izpostavljene cikličnemu nevihtnemu obremenjevanju, kot je opisano v poglavju 5.3. Nemške smernice zahtevajo povprečno natezno trdnost preskušancev večjo od 2 MPa.

V našem primeru ne da je bilo samo povprečje nateznih trdnosti preskušancev večje od 2 MPa, ampak je tudi vsak posamezen preskušanec presegel to mejo. Pri vseh preskušancih je prišlo do porušitve v podložnem betonu, kot smo pričakovali, le v treh primerih je bilo drugače. Pri tretjem preskušancu s polimerom A pri P/C razmerju 0,075 je prišlo do porušitve na stiku med lepilom na čepu in sanacijskim slojem. Do tega je prišlo verjetno zato, ker se lepilo še ni popolnoma strdilo in vezalo, a je bila vseeno dosežena visoka natezna trdnost, kar pomeni, da je tudi natezna trdnost samega stika bila dokaj visoka.

Pri prvem preskušancu s polimerom A pri P/C razmerju 0,10 in tretjem preskušancu pri istem P/C razmerju, ki je bil izpostavljen cikličnemu nevihtnemu obrmenjevanju, je prišlo do porušitve na stiku med podložnim betonom in sanacijskim slojem. Do tega je prišlo najverjetneje zaradi neustreznega zgoščevanja sanacijskega betona (dotikanje podložnega betona z vibracijsko iglo pri vibriranju). Pri preskušancu, ki je bil izpostavljen cikličnemu nevihtnemu obremenjevanju, pa je bil stik očitno zelo oslabljen, ali zaradi nevihtnega obremenjevanja ali pa je bil že v osnovi oslabljen.

Pričakovali smo, da se bo z višanjem P/C razmerja natezna trdnost povečevala, vendar se to ni zgodilo. To je najbrž povezano z relativno visokim raztrosom rezultatov pri natezni obremenitvi.

*Preglednica 6.9: Rezultati pull-off preskusa na preskušancih starih 28 dni.*

Mešanica	Starost kock 28 dni		
	Mesto porušitve	Napetost ob porušitvi [MPa]	Povprečje [MPa]
Disperzija A P/C=0,075	podložni beton	2,71	2,73
	podložni beton	2,74	
	stik z lepilom	3,13	
Disperzija A P/C=0,10	stik beton - sanacijski beton	1,73	2,24
	podložni beton	2,30	
	podložni beton	2,18	
Disperzija B P/C=0,075	podložni beton	2,62	2,77
	podložni beton	3,13	
	podložni beton	2,55	

Pričakovali smo tudi, da bo natezna trdnost pri preskušancih, ki so bili izpostavljeni cikličnemu nevihtnemu obremenjevanju, manjša kot pri tistih, ki niso bili, a tudi tukaj ni bilo tako. To se je zgodilo samo pri betonih s polimerom A pri P/C razmerju 0,075. Do porušitve je pri večini preskušancev prišlo v podložnem betonu, kar pomeni, da je bil stik med podložnim betonom in sanacijskim slojem izveden v redu in je prenesel večje natezne obremenitve kot sam podložni beton.

*Preglednica 6.10: Rezultati pull-off preskusa na preskušancih, ki so bili izpostavljeni cikličnemu nevihtnemu obremenjevanju.*

Mešanica	Kocke, izpostavljene cikličnemu nevihtnemu obremenjevanju		
	Mesto porušitve	Napetost ob porušitvi [MPa]	Povprečje [MPa]
Disperzija A P/C=0,075	podložni beton	2,60	2,55
	podložni beton	2,89	
	podložni beton	2,15	
Disperzija A P/C=0,10	podložni beton	2,68	2,64
	podložni beton	2,59	
	stik beton - sanacijski beton	0,35	
Disperzija B P/C=0,075	podložni beton	2,72	2,82
	podložni beton	2,65	
	podložni beton	3,09	

## 6.6 Primerjava lastnosti s polimeri modificiranih betonov in primerjalnega betona

Predhodno je bil izdelan primerjalni beton. Kocke, ki smo jih uporabili za podložni beton za preiskavo pull-off, so bile izdelane po isti recepturi kot primerjalni beton. Izdelan je bil iz drobljenega agregata, kot optimalna zrnovostna sestava pa je bila dobljena kombinacija 25% frakcije 0/2, 25% frakcije 0/4, 15% frakcije 4/8 in 35% frakcije 8/16. Uporabljen je bil portland cement z dodatkom žindre z oznako CEM II/A-S 42,5R, in sicer 390 kg/m<sup>3</sup>. Vodocementno razmerje je bilo 0,4. Njegov posed je bil 50 mm, delež zraka pa 1%. Starost preskušancev ob preskusih je bila 28 dni.

*Preglednica 6.11: Primerjava lastnosti s polimeri modificiranih betonov in primerjalnega betona.*

Mešanica	Tlačna trdnost [MPa]	Upogibna trdnost [MPa]	Statični modul elastičnosti [GPa]	Vsebnost zraka [%]
Primerjalni beton	68,0	7,0	46,3	1,0
Disperzija A P/C=0,075	58,7	8,6	32,8	2,5
Disperzija A P/C=0,10	54,9	8,7	30,7	3,3
Disperzija B P/C=0,075	50,6	7,6	31,1	4,1

Pričakovano se tlačna trdnost z dodajanjem polimera zmanjša, in sicer za 13 do 26%, odvisno od vrste in deleža polimera. Do tega pride zaradi povečanja poroznosti pri s polimeri modificiranih betonih, drug razlog pa je tudi manjša tlačna trdnost polimernega veziva v primerjavi s cementnim vezivom. Z dodajanjem polimera se povečuje poroznost in s tem posledično zmanjšuje tlačna trdnost.

Ravno obratno pa je z upogibno trdnostjo. Pri s polimeri modificiranih betonih je upogibna trdnost višja kot pri običajnih betonih. To je posledica večje natezne trdnosti polimernega filma od cementne matrice. Vidimo lahko, da se natezna trdnost z dodajanjem polimera poveča za 9 do 23 %, zopet odvisno od vrste in količine polimera.

Statični modul elastičnosti je pri s polimeri modificiranih betonih za približno 30 % nižji kot pri primerjalnem podložnem betonu. Opazimo tudi, da se statični modul elastičnosti z večanjem deleža polimera zmanjšuje. Polimeri, ki jih uporabljamo za modifikacijo betonov imajo dosti manjši modul elastičnosti od cementa. Zaradi tega pride do razlik v sposobnosti deformiranja in duktilnosti med običajnimi in s polimeri modificiranimi betoni. Slednji v

glavnem dosežejo večjo deformacijo in imajo večjo duktilnost in elastičnost od običajnih. V konkretnem primeru pa odpade del zmanjšanja modula elastičnosti pri s polimeri modificiranih betonih tudi na zamenjavo drobljenega apnenčevega agregata, ki gradi skelet primerjalnega betona, z zrnim prodnatim agregatom. Beton izdelan s prodnatim agregatom ima, pri drugače enaki sestavi in lastnostih betonske mešanice, nižji modul elastičnosti kot beton z drobljenim apnenčastim agregatom.

## 7 ZAKLJUČEK

Že pred nami so nekateri raziskovalci dobili podobne rezultate preiskav kot mi. Naše preiskave so bile nadaljevanje preiskav na s polimeri modificiranih maltah. Na maltah so se preiskave izvajale zato, da se je dobila približna slika katere mešanice in katere polimerne disperzije naj bi bile optimalne. Bilo bi preveč zamudno, če bi že na začetku vse preiskave izvajali na betonih, zaradi težje izvedbe in prevelikega števila spremenljivk. Na podlagi predhodnih rezultatov preiskav na s polimeri modificiranih maltah smo se odločili za tri mešanice, ki so bile predstavljene v tej diplomski nalogi.

Znano je, da imajo polimerne disperzije plastifikacijski učinek. Ugotovili smo, da povečanje količine polimerne disperzije s  $P/C = 0,075$  na  $P/C = 0,10$  ne poveča upobigne in natezne trdnosti betona, zmanjša pa njegovo tlačno trdnost. Opazili smo, da ciklično segrevanje poviša tlačno trdnost, medtem, ko ciklično ohlajevanje nima bisvenega vpliva na tlačno trdnost. Ciklično nevihtno obremenjevanje naj bi sprijemno trdnost med sanacijskim betonom in podlago zmanjšalo. To se iz rezultatov naših preiskav ne vidi, ker je bila porušitev praviloma po podlagi. Ugotovili smo tudi, da modul elastičnosti in s tem tudi togost betona z večanjem količine polimera v betonu padata.

Rezultati so se med seboj dovolj razlikovali, da smo lahko določili optimalno polimerno disperzijo. To je polimerna disperzija A (vinil acetat etilen vinil klorid terpolimer). Opazili smo tudi, da polimerom bolj ustreza suha nega.

V literaturi se praviloma zahteva, da sta tlačna in upogibna trdnost s polimeri modificiranih betonov za sanacijske sloje večjih debelin čim bolj enaki tlačni in upogibni trdnosti stare betonske podlage, pri čemer pa naj se prilagojenost karakteristik s polimeri modificiranih betonov karakteristikam podlage preverja pri starostih večjih od 28 dni (starost naj bo vsaj 90 dni, če pa je možno pa 1 leto). Tudi modul elastičnosti s polimeri modificiranih betonov naj bi bil prilagojen modulu elastičnosti podlage, vendar je za to karakteristiko bolje, da je nekoliko nižja kot pri podlagi, vendar ne več kot 30% nižja [Bokan Bosiljkov, 2009]. V našem primeru so bile dosežene tlačne trdnosti pri s polimeri modificiranih betonih po 28 dneh nekoliko manjše kot pri primerjalnem betonu. Če bi tlačno trdnost določali pri večjih starostih, bi bila razlika manjša, saj je znano, da vključen polimer ovira hidratacijo cementa, ki zato poteka dalj

časa. Upogibna trdnost s polimeri modificiranih betonov je nekoliko večja od upogibne trdnosti primerjalnega betona, kar je prav gotovo ugodno z vidika odpornosti na oblikovanje razpok v strjenem betonu. Razlika v modulu elastičnosti med slojem sanacijskega materiala in primerjalne podlage pa praviloma ni bila večja od 30%, kot to priporočajo strokovnjaki v literaturi [Bokan Bosiljkov, 2009].

Seveda pa je potrebno omeniti, da so bile raziskave opravljene v laboratoriju, kjer so pogoji skoraj idealni. Na terenu so razmere spremenljive in je zato še toliko bolj pomembno, da se zagotovijo optimalni pogoji. Veter, vlažnost zraka in temperatura zraka lahko precej spremenijo učinkovitost polimera. Seveda pa je zelo pomembna ustrezna vgradnja betona.

## VIRI

ACI and ICRI. 2003. Concrete Repair Manual, Second Edition. Michigan. ACI International.  
2 zv. (loč. pag.).

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.

Bokan Bosiljkov V., Kavčič L. 2009. Optimizacija načina sanacije voziščnih plošč viaduktov na avtocestah – zahteve glede sanacijskega materiala. Zbornik referatov: Konferenca "Dosežki betonske stroke". Ljubljana. ZBS, Združenje za beton Slovenije. 117-127 str.

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

Golob, D. 2007. Vpliv polimerne disperzije na mehanske in fizikalne lastnosti sanacijskih malt in betonov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Komunalna smer: 71 str.

Grum, B. 2004. Sanacije betonskih objektov. Ljubljana, I2 družba za založništvo, izobraževanje in raziskovanje: 271 str.

Jadran, K. 1996. Polymer modified precast concrete – Applications in Slovenia. Quark: 86-89 str.

Lutman, M. 2007. Obnove voziščnih plošč na viaduktih in mostovih. Gradbenik junij: str. 18, 19.

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

Muravljov, M. 2007. Građevinski materijali, VI izdanje. Zrenjanin, G.P. "Budućnost": 587 str.



Muravljov, M. 1991. 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., Kawakami M., Fukuzawa K. 1997. Polymers in Concrete. Koriyama, Nihon University, College of Engineering: 535 str.

Petan, S. 2002. Uporaba kamene moke kot dodatnega praškastega materiala za izdelavo samozgoščevalnih betonov iz drobljenega kamenega agregata. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 109 str.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

Žarnić R., Bosiljkov V., Bokan Bosiljkov V. et al. 2007. Gradiva vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 140 str.

SIST EN 206-1:2003. Beton – 1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost: 65 str.

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

SIST EN 12350-2:2001. Preskušanje svežega betona – 2. del: Preskus s posedom: 8 str.

SIST EN 1542:1999. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Measurement of bond strength by pull-off: 9 str.

SIST EN 13687-3:2002. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Določevanje toplotne združljivosti – 3. del: Ciklično zamrzovanje in tajanje brez vpliva soli: 9 str.

SIST EN 13412:2006. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Ugotavljanje modula elastičnosti pri tlačni obremenitvi: 9 str.

SIST EN 13578:2004. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Združljivost z mokrim betonom: 7 str.

SIST EN 12390-3:2008. Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens: 8 str.

SIST EN 12390-5:2008. Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens: 10 str.