

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*



Visokošolski program Gradbeništvo,  
Smer operativno gradbeništvo

Kandidat:

**Mitja Žnidaršič**

**Vpliv konsistence, aeriranja in trajanja mokre  
nege na odpornost betona z večjim deležem  
kamene moke proti zmrzovanju/tajanju v  
prisotnosti soli**

Diplomska naloga št.: 289

**Mentor:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Somentor:**

asist. dr. David Duh

Ljubljana, 25. 9. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **MITJA ŽNIDARŠIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»VPLIV KONSISTENCE, AERIRANJA IN TRAJANJA MOKRE NEGE NA  
ODPORNOST BETONA Z VEČJIM DELEŽEM KAMENE MOKE PROTI  
ZMRZOVANJU/TAJANJU V PRISOTNOSTI SOLI«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana 26.06.07

---

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

**UDK:** 691.32(043.2)

**Avtor:** Mitja Žnidaršič

**Mentor:** izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov

**Naslov:** Vpliv konsistence, aeriranja in trajanja mokre nege na odpornost betona z večjim deležem kamene moka proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli.

**Obseg in oprema:** 90 str., 29 pregl., 35 sl.

**Ključne besede:** OSMO odpornost, samozgoščevalni beton, kamena moka

### **Izveček:**

Namen raziskav opravljenih v okviru diplomske naloge je bil preiskati odpornost površine samozgoščevalnih in primerjalnih vibriranih betonov proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Samozgoščevalni betoni so kot dodatni praškasti material vsebovali apnenčevo moko. Najobsežnejši sklop preiskav smo opravili na aeriranem samozgoščevalnem betonu (delež zraka 8%). Primerjalne mešanice so bile neaeriran samozgoščevalni beton, aerirana vibrirana betona, brez in z vključeno apnenčevo moko, ter neaerirana vibrirana betona, prav tako brez in z vključeno apnenčevo moko. Študirali smo vpliv hladne mokre nege (1, 3, 7 ali 28 dni, temperatura vode 15 °C) na odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Lastnosti samozgoščevalnega betona v svežem stanju smo ocenili s preiskavami poseda z razlezom in iztekanja iz V-lijaka, lastnosti vibriranega betona v svežem stanju pa z preiskavami poseda in razleza. V otrdelem stanju smo na betonskih preizkušancih opravili preiskave tlačne trdnosti in čas potovanja ultrazvočnih valov skozi preizkušanec.

---

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 691.32(043.2)

**Athor:** Mitja Žnidaršič

**Supervisor:** Assoc. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov

**Title:** Influence of consistency, air entraining agent and moist curing period on salt-frost scaling resistance of concrete with higher content of limestone filler

**Notes:** 90 p., 29 tab., 35 fig.

**Key words:** OSMO resistance, self-compacting concrete, limestone powder

### **Abstract:**

The aim of the diploma work was to examine resistance of self-compacting and control vibrated concrete to the salt frost scaling. Self-compacting concrete (SCC) contained limestone powder as additional fine material. The highest number of experimental tests was made on aerated SCC mixtures with air content of 8%. Control concrete mixtures were non-aerated SCC, aerated vibrated concretes, with and without additional limestone powder, as well as non-aerated vibrated concretes, also with and without additional limestone powder. In the diploma work influence of cold wet curing (1, 3, 7, or 28 days, temperature of water 15 °C) on the salt frost scaling of concrete mixtures under consideration was studied. Properties of fresh SCC mixes were estimated by using slump-flow and V-funnel test, and properties of fresh vibrated concrete mixes by using slump and flow tests. On hardened concrete mixes compressive test and measurement of the travel time of a pulse of longitudinal ultrasonic waves passing through the standard concrete cubes were carried out, beside the salt-frost scaling test.

---

## **KAZALO:**

<b>1.</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>RAZLOGI ZA RAZVOJ SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Izboljšana homogenost</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Izboljšana produktivnost</b>	<b>4</b>
<b>2.3</b>	<b>Izboljšano delovno okolje</b>	<b>4</b>
<b>2.4</b>	<b>Zahteve glede opažev in vgrajevanja betona</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>BETON ODPOREN PROTI ZMRZOVANJU/TAJANJU</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Vrsta, velikost in uvajanje zračnih por</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>Čas mešanja</b>	<b>6</b>
<b>3.3</b>	<b>Potrebna količina zračnih por</b>	<b>7</b>
<b>3.4</b>	<b>Parametri, ki vplivajo na uvajanje zračnih por</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>OSNOVNI MATERIALI</b>	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b>Agregat</b>	<b>8</b>
<b>4.2</b>	<b>Cement</b>	<b>15</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Dodatki cementu</b>	<b>19</b>
<b>4.3</b>	<b>Voda</b>	<b>20</b>
<b>4.4</b>	<b>Kemijski dodatki</b>	<b>21</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Plastifikatorji</b>	<b>21</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Superplastifikatorji novih generacij</b>	<b>21</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Dodatki za pospeševanje strjevanja</b>	<b>24</b>
<b>4.4.4.</b>	<b>Sredstva za zgoščevanje</b>	<b>24</b>
<b>4.4.5</b>	<b>Dodatki za hitro vezanje</b>	<b>25</b>
<b>4.4.6</b>	<b>Dodatki za zmanjšanje krčenja betona</b>	<b>25</b>
<b>4.4.7</b>	<b>Aeranti</b>	<b>26</b>
<b>5.</b>	<b>REOLOŠKE LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA</b>	<b>27</b>
<b>5.1</b>	<b>Splošno</b>	<b>27</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Reologija samozgoščevalnega betona</b>	<b>29</b>

---

<b>5.2</b>	<b>Preiskave betona v svežem stanju</b>	<b>31</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Preiskave samozgoščevalnih betonov</b>	<b>31</b>
<b>5.2.1.1</b>	<b>Razlez z posedom</b>	<b>31</b>
<b>5.2.1.2</b>	<b>Preiskava z V-lijakom</b>	<b>33</b>
<b>5.2.1.3</b>	<b>Preiskava z L-zabojem</b>	<b>34</b>
<b>5.2.1.4</b>	<b>Preiskava z Kajima škatlo</b>	<b>36</b>
<b>5.2.1.5</b>	<b>Določanje vsebnosti zraka v betonu</b>	<b>37</b>
<b>5.2.1.6</b>	<b>Preiskava odpornosti na segragacijo</b>	<b>38</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Preiskave vibriranih betonov</b>	<b>39</b>
<b>5.2.2.1</b>	<b>Razlez (SIST EN 12350-5)</b>	<b>39</b>
<b>5.2.2.2</b>	<b>Posed stožca</b>	<b>41</b>
<b>5.2.2.3</b>	<b>Preskus stopnje zgoščenosti (SIST EN 12350-4)</b>	<b>43</b>
<b>5.2.2.4</b>	<b>Vebe metoda</b>	<b>43</b>
<b>5.3</b>	<b>Preiskave betona v strjenem stanju</b>	<b>44</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Tlačna trdnost</b>	<b>44</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Odpornost proti prodoru vode</b>	<b>46</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Notranja odpornost proti zmrzovanju/tajanju (NOZT)</b>	<b>47</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju (OPZT)</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>PROJEKTIRANJE MEŠANICE BETONA</b>	<b>50</b>
<b>6.1</b>	<b>Splošno</b>	<b>50</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Sestava cementnih betonov</b>	<b>50</b>
<b>6.2</b>	<b>Projektiranje mešanice samozgoščevalnega betona</b>	<b>50</b>
<b>6.3</b>	<b>Splošna metoda</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>NEGA BETONA</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>LASTNE PRISKAVE</b>	<b>57</b>
<b>8.1</b>	<b>Uvod</b>	<b>57</b>
<b>8.2</b>	<b>Materiali</b>	<b>57</b>
<b>8.2.1</b>	<b>Agregat</b>	<b>57</b>
<b>8.2.2</b>	<b>Cement</b>	<b>58</b>

---

<b>8.2.3</b>	<b>Dodatni praškasti material</b>	<b>60</b>
<b>8.2.4</b>	<b>Voda</b>	<b>60</b>
<b>8.2.5</b>	<b>Kemijski dodatki</b>	<b>61</b>
<b>8.2.5.1</b>	<b>Superplastifikator nove generacije</b>	<b>61</b>
<b>8.2.5.2</b>	<b>Aerant</b>	<b>62</b>
<b>8.3</b>	<b>Preiskave samozgoščevalnih betonov</b>	<b>62</b>
<b>8.3.1</b>	<b>Aerirani betoni (LA)</b>	<b>64</b>
<b>8.3.1.1</b>	<b>Preiskave v svežem stanju</b>	<b>65</b>
<b>8.3.1.2</b>	<b>Preiskave strjenega betona</b>	<b>66</b>
<b>8.3.2</b>	<b>Neaerirani betoni (LN)</b>	<b>70</b>
<b>8.3.2.1</b>	<b>Preiskave v svežem stanju</b>	<b>71</b>
<b>8.3.2.2</b>	<b>Preiskave strjenega betona</b>	<b>71</b>
<b>8.4</b>	<b>Preiskave vibriranih betonov</b>	<b>73</b>
<b>8.4.1</b>	<b>Preiskave vibriranih betonov brez dodatka moke</b>	<b>74</b>
<b>8.4.1.1</b>	<b>Aerirani (LVA)</b>	<b>74</b>
<b>8.4.1.2</b>	<b>Neaerirani (LVN)</b>	<b>77</b>
<b>8.4.2</b>	<b>Preiskave vibriranih betonov z dodatkom moke</b>	<b>80</b>
<b>8.4.2.1</b>	<b>Aerirani (LVMA)</b>	<b>80</b>
<b>8.4.2.2</b>	<b>Neaerirani (LVMN)</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>PRIMERJAVA DOBLJENIH REZULTATOV</b>	<b>86</b>
<b>9.1</b>	<b>Zmrzljinska odpornost betona z različno dolgo nego</b>	<b>86</b>
<b>9.2</b>	<b>Zmrzljinska odpornost betona z nego pri različnih temperaturah</b>	<b>87</b>
<b>9.3</b>	<b>Zmrzljinska odpornost vseh vzorcev betona</b>	<b>88</b>

---

## KAZALO PREGLEDNIC

- Preglednica 4.1.a: Največja priporočena količina finih delcev po SIST 1026 16
- Preglednica 4.1.e: Prostorninske mase zrn različnih agregatov 13
- Preglednica 4.2.a: 27 proizvodov iz družine običajnih cementov (SIST EN 197-1) 17
- Preglednica 4.2.c: Delež posameznih spojin v cementu 19
- Preglednica 5.2.2.1.b: Razredi betonov glede na razlez 41
- Preglednica 5.2.2.2.c: Razredi betonov glede na posed 43
- Preglednica 5.3.2: Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po EN 12390-8 47
- Preglednica 5.3.3: Stopnje izpostavljenosti XF 47
- Preglednica 5.3.4.a: Merila za ocenjevanje odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju s soljo: količina odlučenega materiala v mg/mm<sup>2</sup> 48
- Preglednica 6.2.a: Količina posameznih frakcij agregata glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Handbook) 52
- Preglednica 6.2.b: Količina finih delcev glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Handbook) 52
- Preglednica 6.2.c: Količina veziva glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Handbook) 52
- Preglednica 8.2.2.a: Kemijska sestava in fizikalne lastnosti cementa CEM II/A-S 42,5R 59
- Preglednica 8.2.2.b: Lastnosti cementa CEM II/A-S 42,5R, v skladu z zahtevami SIST EN 197-1 59
- Preglednica 8.2.3: Največja priporočena količina finih delcev 60
- Preglednica 8.3.1.1.a: Lastnosti zamešanih LA mašanic 66
- Preglednica 8.3.1.2.a: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LA 67
- Preglednica 8.3.2.1.a: Lastnosti sveže mešanice LN 71
- Preglednica 8.3.2.2.a: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LN 72
- Preglednica 8.4.1.1.a: Lastnosti sveže mešanice LVA 74
- Preglednica 8.4.1.1.b: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LVA 75
- Preglednica 8.4.1.2.a: Lastnosti sveže mešanice LVN 77
- Preglednica 8.4.1.2.b: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LVN 78
- Preglednica 8.4.2.1.a: Lastnosti sveže mešanice LVMA 80
- Preglednica 8.4.2.1.b: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LVMA 81
- Preglednica 8.4.2.2.a: Lastnosti sveže mešanice LVMN 83
-



Preglednica 8.4.2.2.b: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LVMN 84

Preglednica 9.1.b: Meritve temperature in vlage v laboratorijski vodi in v komori 87

Preglednica 9.2.b: Primerjava lastnosti betona v otrdelem stanju vseh preskušanih  
vzorcev 89

---

## KAZALO SLIK

Slika 4.1.b:	Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov 11
Slika 4.1.c:	Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm po SIST 1026 12
Slika 4.1.d:	Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/32 mm po SIST 1026 12
Slika 4.2.b:	Shematski prikaz proizvodnje cementa 18
Slika 4.2.2:	Prikaz kemične sestave in delovanja polikarboksilata 23
Slika 5.1.1:	Reološke lastnosti Newtonovih tekočin in Binghamovih teles 30
Slika 5.2.1.1.a	Podlaga in napolnjen stožec za preiskavo 32
Slika 5.2.1.1.b:	Primer razleza s posedom 33
Slika 5.2.1.2.a:	V-lijak za preiskavo viskoznosti na FGG 34
Slika 5.2.1.3.a:	L-zaboj z označenimi dimenzijami 35
Slika 5.2.1.3.b:	L-zaboj na FGG in tečenje betona med preiskavo 36
Slika 5.2.1.4:	Kajima škatla 37
Slika 4.2.1.5:	Porozimeter 38
Slika 5.2.2.1.a:	Oprema za preiskavo razleza 40
Slika 5.2.2.2.a:	Meritev poseda betona 42
Slika 5.2.2.2.b:	Pravilen in nepravilen posed stožca 42
Slika 5.2.2.4:	Oprema za VEBE metodo 44
Slika 5.3.1.a:	Tlačno porušena preiskovana kocka in valj 45
Sliki 5.3.1.:	b)Trdnost glede na starost in hrambo v vodi; c)Trdnost glede na v/c faktor 46
Slika 5.3.4.b:	Tipičen cikel zmrzovanja /tajanja pri laboratorijskem preizkušanju 49
Slika 7.a:	Izparevanje vode v odvisnosti od temperature zraka, relativne vlažnosti, temperature betona in hitrosti vetra 54
Slika 7.b:	Nega z sredstvom za nego betona
Slika 8.2.1:	Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm 57
Slika 8.3.1.2.b:	Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (1 dan hladne nege) 68
Slika 8.3.1.2.c:	Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (3 dni hladne nege) 68

---

- Slika 8.3.1.2.d: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (7 dni hladne nege) 69
- Slika 8.3.1.2.e: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (28 dni hladne nege) 70
- Slika 8.3.2.2.b: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LN (28 dni hladne mokre nege) 73
- Slika 8.4.1.1.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LVA (28 dni hladne nege) 76
- Slika 8.4.1.2.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LVN (28 dni hladne nege) 79
- Slika 8.4.2.1.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LVMA (28 dni hladne nege) 82
- Slika 8.4.2.2.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LVMN (28 dni hladne nege) 84
- Slika 9.1.a: Primerjava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (8%) 86
- Slika 9.2: Primerjava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (8%) 87
- Slika 9.3.a: Primerjava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju vseh preskušanih vzorcev.
-

## 1 UVOD

O običajnih, vibriranih betonih je bilo v preteklosti prelitega ogromno črnila, zato se bom v tem uvodu osredotočil na samozgoščevalne betone (SCC – Self-Compacting Concrete), ki so novejša tehnologija betonov.

Beton je keramični kompozitni material, pri katerem je mineralni agregat polnilo v matrici iz cementnega kamna. Cementni kamen strjenega betona nastane v procesu hidratacije in strjevanja cementne paste. Beton sestavljajo cement, voda, agregat ter kemijski in mineralni dodatki, ki se pri mešanju spremenijo v betonsko mešanico z visokoplastično konsistenco.

Samozgoščevalni beton so razvili na Japonskem že leta 1988. To je beton, ki samo zaradi delovanja lastne teže in sposobnosti tečenja zapolni opaž poljubne oblike, se razlije tesno okrog armature, se odzrača in znivelira brez nastanka segregacije. Za izdelavo samozgoščevalnega betona je potrebna povečana količina finih praškastih delcev in dodatek superplastifikatorjev nove generacije z dovolj dolgim časom delovanja. Recepture, ki so jih razvili drugje po svetu nam ne dajo enakih lastnosti, saj so betoni narejeni iz drugih osnovnih materialov kot jih imamo pri nas. Pri samozgoščevalnih betonih igrajo posamezne karakteristike osnovnih materialov še pomembnejšo vlogo kot pri vibriranih betonih. Naj naštejemo le nekaj teh karakteristik: zrnastostna sestava cementa in dodatnega praškastega materiala, vlažnost agregata, kompatibilnost kemijskih dodatkov s cementom,...

Preverjanje lastnosti svežega samozgoščevalnega betona takoj po zamešanju oziroma tik pred vgradnjo v opaž omogočajo razne nestandardne metode preiskav, ki so jih razvile raziskovalne skupine ali izvajalska podjetja v različnih državah sveta. Ustrezna kvaliteta strjenega samozgoščevalnega betona je dosežena le, če ima sveža mešanica pri vgrajevanju v opaž optimalno obdelavnost. Le tako lahko dosežemo, da so mehanske in obstojnostne karakteristike samozgoščevalnega betona enake ali celo boljše od tistih pri običajnem betonu z enakim vodo-cementnim razmerjem.

---

V okviru diplomske naloge smo se osredotočili na preiskave odpornosti površine samozgoščevalnih in primerjalnih vibriranih betonov proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti talilnih soli. Samozgoščevalni betoni so kot dodatni praškasti material vsebovali apnenčevo moko. Najobsežnejši sklop preiskav smo opravili na aeriranem samozgoščevalnem betonu (delež zraka 8%), kjer smo študirali vpliv trajanja hladne mokre nege (1, 3, 7, ali 28 dni; temperatura vode 15 °C) na odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Primerjalne mešanice, ki so bile negovane 28 dni pri temperaturi 15 °C so bile neaeriran samozgoščevalni beton, aerirana vibrirana betona, brez in z vključeno apnenčevo moko. Ter neaerirana vibrirana betona, prav tako brez in z vključeno apnenčevo moko. Preiskave odpornosti površine betonov na zmrzovanje/tajanje v prisotnosti soli so potekale v skladu z dodatkom 3 slovenskega standarda SIST 1026:2004 in so trajale 50 ciklov zmrzovanje/tajanje. Poleg teh preiskav smo določali tudi tlačno trdnost obravnavanih betonskih mešanic pri starosti 28 dni. Pred preskusom tlačne trdnosti pa smo na vsaki posamezni standardni kocki izmerili še čas potovanja ultrazvočnih valov skozi preizkušanece.

## **2 RAZLOGI ZA RAZVOJ SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA**

Leta 1983 so se pričeli na Japonskem intenzivno ukvarjati s problemom upadanja trajnosti AB konstrukcij zaradi slabe kvaliteta izvedenih del. Pomankljiva komunikacija med projektanti in izvajalci del (ki nemalokrat vodi k neustrezni zasnovi konstrukcij z vidika kvalitetne izvedbe), povečan delež potrebne armature, in pomankanje kvalificirane delovne sile so bili razlogi za neučinkovito zgostitev betonskih mešanic z vibriranjem. Posledica tega je bila neustrezna homogenost in s tem znižana trajnost AB elementov. Prav tako se je pojavil problem onesnaženja okolja z hrupom in vibracijami, ki ga povzroča vibriranje betona, kar je v gosto naseljenih japonskih mestih še prav posebni velik problem.

Japonci so rešitev videli v razvoju samozgoščevalnega betona, ki je sposoben zapolniti opaž in oblitati armaturo le zaradi delovanja lastne teže ter istočasno zagotoviti homogenost vgrajenega materiala. Samozgoščevalni beton se lahko uporablja za betoniranje na gradbiščih ali za izdelavo prefabriciranih elementov.

### **2.1 IZBOLJŠANA HOMOGENOST**

Glavna cilja pri načrtovanju in razvoju samozgoščevalnega betona sta bila zmanjšanje obsega dela na gradbišču in doseganje visoko kvalitetnih betonov. Eden glavnih razlogov za probleme pri zgoščevanju betona v opažu predstavlja povečan delež potrebne armature v konstrukcijskih elementih. Omejevanje nastajanja in širjenja razpok zahteva večje število armarurnih palic manjšega prereza. Zato velikokrat znotraj armarurnih košev ali med armaturo in opažem ni dovolj prostora za učinkovito namestitev vibratorjev.

Zagotavljanje boljše kakovosti izvedenih del z doseganjem večje homogenosti vgrajenega betona je pomemben vidik pri razvoju samozgoščevalnega betona, ki lahko zaradi svojih posebnih lastnosti zagotovi učinkovito zgostitev tudi v konstrukcijah z močno armiranimi prerezi. Z uporaba samozgoščevalnega betona dobimo bolj gladko in enotno površino in s tem

---

boljši končni izgled detajlov in robov elementov. Zaradi bolj zaprte strukture betona se nam zmanjša vodoprepustnost, poveča odpornost proti kloridom in karbonatizaciji in s tem poveča življenska doba.

## **2.2 IZBOLJŠANA PRODUKTIVNOST**

Popolna izločitev zgoščevanja betona z vibriranjem poveča hitrost betoniranja, zmanjša ceno in s tem poveča produktivnost. Povečana hitrost ni pomembna le v smislu zmanjševanja stroškov v času gradnje, ampak omogoča tudi skrajšanje od začetka izdelave konstrukcije pa do njene predaje v uporabo. To pomeni, da lahko igra uporaba samozgoščevalnega betona veliko vlogo pri povečanju konkurenčnosti betonskih konstrukcij z zmanjševanjem stroškov in izboljšanjem karakteristik za uporabnike.

Produktivnost se lahko izboljša tudi z primernejšim vgrajevanjem svežega betona. Odlična sposobnost tečenja samozgoščevalnega betona je omogočila razvoj novih metod črpanja in polnjenja opažev. Omenjene lastnosti samozgoščevalnega betona pomenijo tudi manj zaključnih del in popravil po razopaženju.

## **2.3 IZBOLJŠANO DELOVNO OKOLJE**

Obremenitev delovnega okolja je pri gradnji betonskih konstrukcij velika. Eno največjih obremenitev predstavljajo vibracije pervibratorjev, ki povzročajo motnje krvnega obtoka, znane kot »beli prsti« (»white fingers«). Obremenjujoč je tudi hrup zaradi delovanja vibratorjev. Izključitev vibriranja zato predstavlja pomembno izboljšanje delovnega okolja, zmanjšano potrebo po zvočni zaščiti in boljšo komunikacijo tako na gradbišču kot tudi v obratih za izdelavo prefabrikatov.

Izboljšanje delovnih pogojev poveča dobro počutje delavcev, podjetjem omogoča, da zadržijo izkušene delavce dlje časa, istočasno pa se zmanjšajo stroški podjetja za zdravstveno varstvo

---

delavcev. Boljše delavno okolje lahko poveča atraktivnost gradbene stroke na področju betonskih konstrukcij, kar pomeni boljše možnosti za pridobitev kvalificiranih delavcev.

Nevarnost negativnega učinka na okolje zaradi uporabe kemijskih dodatkov je pri samozgoščevalnem betonu prav tako nizka kot pri običajnem betonu, saj se največkrat uporabljajo enaki dodatki. Nova generacija dodatkov, ki so bili razviti prvenstveno za uporabo v samozgoščevalnem betonu pa ima pogosto še nižji potencialni vpliv na okolje in zdravje delavcev.

## **2.4 ZAHTEVE GLEDE OPAŽEV IN VGRAJEVANJA BETONA**

Opaži za samozgoščevalni beton morajo biti čisti in neprepustni. Pritiski na opaž so večji kot pri normalnem vibriranem betonu, ker je pritisk na opaž odvisen od viskoznosti betona. Pri izračunu opaža se mora zato upoštevati hidrostatičen pritisk. Samozgoščevalni beton se vgrajuje v opaž na enak način kot vibriran beton, vendar se ga ne sme prosto spuščati z velike višine. Optimalno pretočnost in izgled površine dosežemo z vgrajevanjem v opaž od spodaj.

---



### **3 BETON ODPOREN PROTI ZMRZOVANJU/TAJANJU**

Beton odporen proti zmrzovanju/tajanju se mora uporabiti vedno, ko je betonska površina izpostavljena vremenskim vplivom (dežju) in temperatura lahko pade pod ledišče: fasade, mostovi, tunelski portali, prometna infrastruktura. Odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju dosežemo z ustrežno sestavo betonske mešanice in/ali z uporabo kemijskega dodatka tipa aerant.

Z dodajanjem aeranta v beton uvajamo okrogle mikro pore. Pore se uvajajo v zelo fino malto. Cilj dodajanja aeranta je doseči, da bo strjen beton zmrzlinško obstojen (ko voda prehaja v led se širi in z uvajanjem por dosežemo, da ima voda prostor za tako širjenje).

#### **3.1 VRSTA, VELIKOST IN UVAJANJE ZRAČNIH POR**

Zračne pore v normalnem neaeriranem betonu so običajno prevelike ( $> 0,3$  mm), da bi zagotovile zmrzlinško odpornost. Učinkovite zračne pore dobimo z uvajanjem aeranta, ki ga dodajamo med mešanjem. Za doseganje ustrezne zmrzlinške obstojnosti učinkovite zračne pore ne smejo biti preveč oddaljene. Njihovo oddaljenost ocenimo z faktorjem oddaljenosti  $L$ , ki ga določimo v skladu s standardom SIST EN 480-11:2005.

#### **3.2 ČAS MEŠANJA**

Za doseganje visoko zmrzlinško odpornega betona mora biti čas »mokrega« mešanja večji kot pri normalnih betonih. Po dodatku aeranta se mešanje nadaljuje. S povečanjem časa mešanja s 60 na 90 sekund se količina por poveča do 100%.

---

### 3.3 POTREBNA KOLIČINA ZRAČNIH POR

Za doseganje visoko zmrzlinško odpornega betona mora cementna matrica vsebovati okrog 15% zračnih por. Dolgoletne izkušnje z betoni izpostavljenimi zmrzovanju/tajanju kažejo, da je beton zmrzlinško obstojen če je delež por med 3 in 5 % pri največjemu zrnu agregata v betonu 32 mm ter med 4 in 6 % pri največjemu zrnu agregata v betonu 16 mm.

### 3.4 PARAMETRI, KI VPLIVAJO NA UVAJANJE ZRAČNIH POR

**Zrnavostna sestava agregata.** Zračne pore se večinoma oblikujejo okrog zrn peska s premerom 0,25 – 0,5 mm. Večje frakcije nimajo vpliva na uvajanje zračnih por. Zelo fine frakcije peska ali cementa lahko ovirajo uvajanje zračnih por.

**Konsistenca.** Optimalno uvajanje zračnih por dosežemo v plastični ali mehko plastični konsistenci. Sposobnost zadrževanja zračnih por v betonski masi je praviloma slabša, če ustrezno plastičnost betona dosežemo z dodajanjem vode in boljša, če jo dosežemo na drug način, na primer z dodatkom plastifikatorja ali superplastifikatorja.

**Temperatura.** Zmožnost uvajanja zračnih por se z višanjem temperature veča in obratno.

---

## **4 OSNOVNI MATERIALI ZA IZDELAVO BETONA**

### **4.1 AGREGAT**

Največji delež prostornine v betonu, okoli 75 %, zavzema agregat in tako vpliva na tehnološke in tehnične lastnosti betona ter na trajnost in ceno betona. Agregat lahko definiramo kot čist, trd in inerten material, ki ga vgrajujemo v betonske mešanice. Sestavljen je iz delcev mineralov, ki so različne zrnivosti in so lahko naravno, na primer pri rečnem nanosu (prod), ali umetno oblikovani, na primer v kamnolomu (drobljenec). Od tehnoloških lastnosti betonske mešanice agregat vpliva na kohezijo in konsistenco, pri čemer pride do izraza predvsem zrnavostna sestava agregata, v manjši meri pa oblika in tekstura agregata. Slab agregat lahko negativno vpliva na trdnost betona, deformacijske lastnosti in odpornost proti raznim oblikam agresivnega delovanja.

Prod je običajno sestavljen iz zrn z različno mineraloško sestavo, ki se spreminja od nahajališča do nahajališča ter, glede na položaj in mesto izkopa, kar vse vpliva na kakovost izkopanega proda. Pri drobljencu je mineraloška sestava kamna, iz katerega proizvajajo agregat, večinoma enaka, ker se v enem kamnolomu izkorišča običajno ista vrsta kamnine, tako da se njena kakovost spreminja kvečjemu s položajem miniranja. Prod ima prednost pred drobljencem zaradi zaobljene oblike agregata, kar pripomore k boljši vgradljivosti. Drobljenec ima po drugi strani to prednost, da ima petrografsko in fizikalno-mehansko homogenost, ki se odraža na redukciji notranjih napetosti, v boljši sprijemnosti cementnega kamna s površino zrn in v manjšem diferencialnem krčenju betona. Zrna drobljenca so običajno nepravilnih oblik in se pri vgrajevanju medsebojno klinijo, kar dodatno poveča nosilnost betona pri tlačnih obremenitvah.

V splošnem velja, da stremimo k maksimalnemu možnemu deležu najbolj grobe frakcije agregata, ob upoštevanju drugih zahtev glede karakteristik svežega in strjenega betona. Z velikim deležem grobih zrn namreč zmanjšamo količino potrebnega veziva, istočasno pa poslabšamo vgradljivost in obdelavnost sveže mešanice in povečamo nevarnost segregacije. Vključitev ustreznega deleža drobnozrnatega agregata primerne zrnivosti predstavlja rešitev tovrstnih problemov. Zelo pomembno vlogo glede zagotavljanja določenih karakteristik sveže

---

in strjene betonske mešanice imajo zrna drobnozrnatega agregata velikosti okrog 0,25 mm. Ta zrna zadržujejo vodo in tako preprečujejo njeno izcejanje ter povečajo odpornost na segregacijo. Njihova vloga je zato še posebej pomembna pri betonih z manjšo količino cementa. Ustrezen delež drobnozrnatega agregata je zelo pomemben tudi pri agregatih z neugodno obliko zrn (drobljenec), da zagotovimo ustrezno vgradljivost betonske mešanice.

Če se zahteva beton večjih trdnosti, če uporabimo agregat z zaobljenimi zrnji (prod) in če imamo na razpolago učinkovita sredstva za vgrajevanje in zgoščevanje betona, lahko zmanjšamo delež drobnozrnatih frakcij v mešanici, kar pomeni, da naj se zrnava krivulja čimbolj približa standardni mejni krivulji A.

Če oblika zrn ni ugodna (drobljenec) in če nimamo na razpolago dovolj učinkovitih sredstev za vgrajevanje in zgoščevanje betona, moramo za doseg večjih trdnosti vključiti v betonsko mešanico večji delež drobnozrnatega agregata, kar pomeni, da naj se zrnava krivulja čimbolj približa standardni mejni krivulji B ali C.

V agregatu imamo vedno prisotne tudi praškaste in glinene delce. Njihova količina ne sme biti prevelika, ker lahko to vpliva na kvaliteto betona – zmanjšanje trdnosti in zmrzlinke odpornosti, povečanje vpijanja vode, povečanje krčenja in lezenja betona. Običajno govorimo o grobem (zrna premera nad 4 mm) in drobnem agregatu (zrna premera pod 4 mm). Velikost največjega zrna agregata v najbolj grobi frakciji naj bo manjša od ene četrtine najmanjše dimenzije prereza betonskega elementa in za 5 mm manjša od svetle razdalje med vzporednimi ali navpičnimi palicami armature v elementu. Razlog omejevanja velikosti največjega zrna predstavlja nevarnost blokiranja agregata na ovirah, ki jih predstavljajo armaturene palice ali ozki predeli v opažih. Nevarnost blokiranja grobnatega agregata narašča z večanjem  $D_{max}$ .

Beton naj za doseganje ustrezne obdelavnosti v svežem stanju in goste strukture strjenega betona vsebuje določeno količino finih delcev, ki jih prispevajo cement, morebitni mineralni dodatki in delci agregata  $< 0,125$  mm. Zadostna količina finih delcev je zlasti pomembna pri dolgih transportnih poteh v cevovodih, pri tankostenskih in gosto armiranih konstruktivnih elementih in za neprepusten beton. Količina finih delcev v betonih trdnostnih razredov do

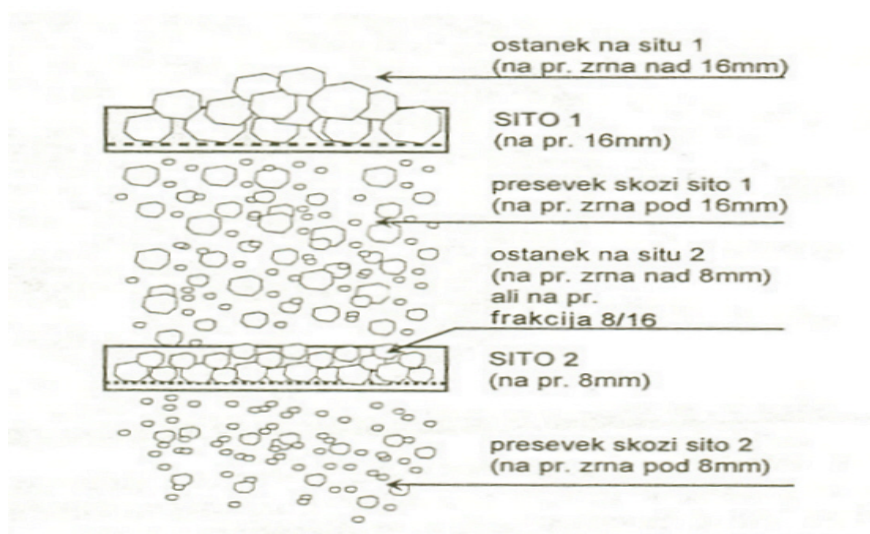
---

vključno C50/60, z največjim zrnom agregata med 16 mm in 63 mm, ki morajo biti odporni na zmrzovanje oziroma tajanje (stopnja izpostavljenosti XF) ali obrabo površine (stopnja izpostavljenosti XM), naj bo v mejah iz preglednice 4.1.a. Med navedenimi vrednostmi za količino cementa je treba pripadajoče količine finih delcev linearno interpolirati. Za agregat z največjim zrnom 8 mm se smejo v teh preglednicah navedene vrednosti povečati za  $50 \text{ kg/m}^3$ . Če se uporabi pucolanski mineralni dodatek tipa II, se sme priporočena količina finih delcev povečati za količino vsebovanega mineralnega dodatka, vendar največ za  $50 \text{ kg/m}^3$ .

Količina cementa (kg/m <sup>3</sup> )	Največja priporočena količina finih delcev (kg/m <sup>3</sup> )
≤ 300	400
350	450
≥ 350	450 + ( C - 350 )

**Preglednica 4.1.a:** Največja priporočena količina finih delcev po SIST 1026.

Zrnovostno sestavo agregata se določa s sejhalno analizo po standardu SIST EN 933-1, kjer skozi standardna sita različnih velikosti odprtih presejemo agregat, ki je običajno razdeljen na frakcije, zato da pri transportu ne pride od nezaželenega razdvajanja drobnih in grobih zrn agregata. Pri sejhalni analizi mora biti vzorec agregata suh, da se izognemo kepicam drobnih zrn, ki bi se ovrednotile kot grobo zrno, poleg tega pa preprečimo zamazanje sit najmanjših odprtih. Dobljen rezultat predstavlja kumulativni odstotek presevka skozi sita v odvisnosti od velikosti sit. To postane preglednejše v grafični obliki, ki jo imenujemo zrnovostna krivulja, iz katere lahko na prvi pogled določimo, ali agregat odgovarja zahtevam oziroma ali je agregat predroben, pregrob ali pa mu manjkajo določene sestavine.

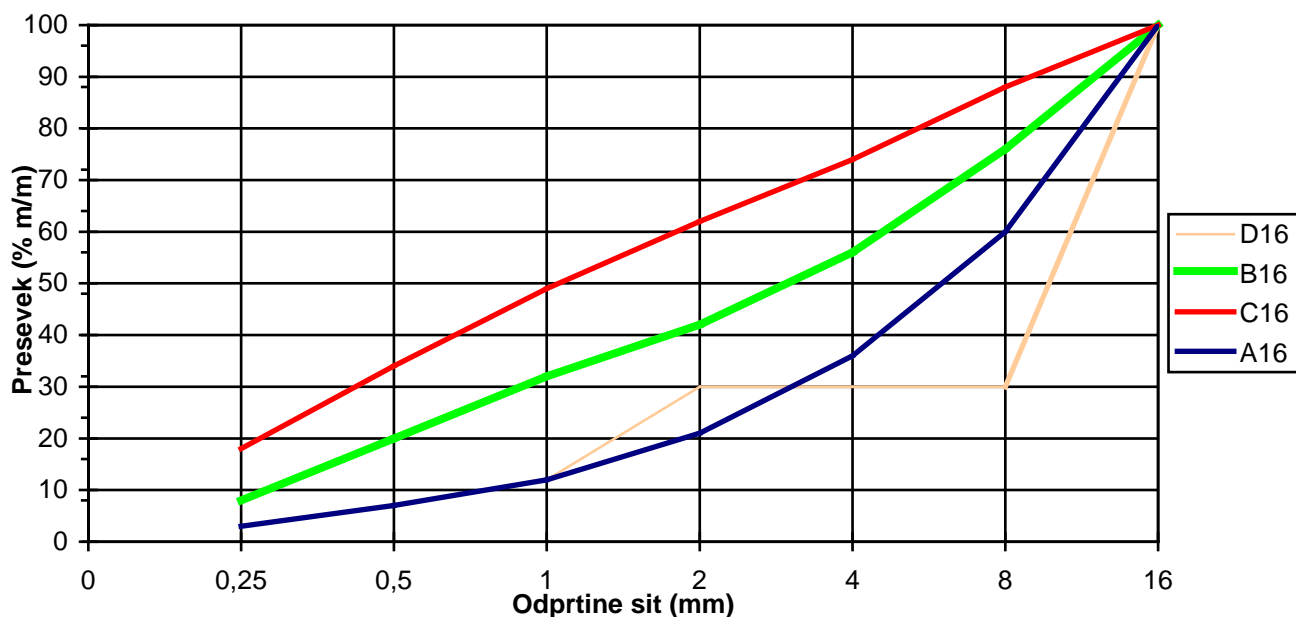


**Slika 4.1.b:** Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov

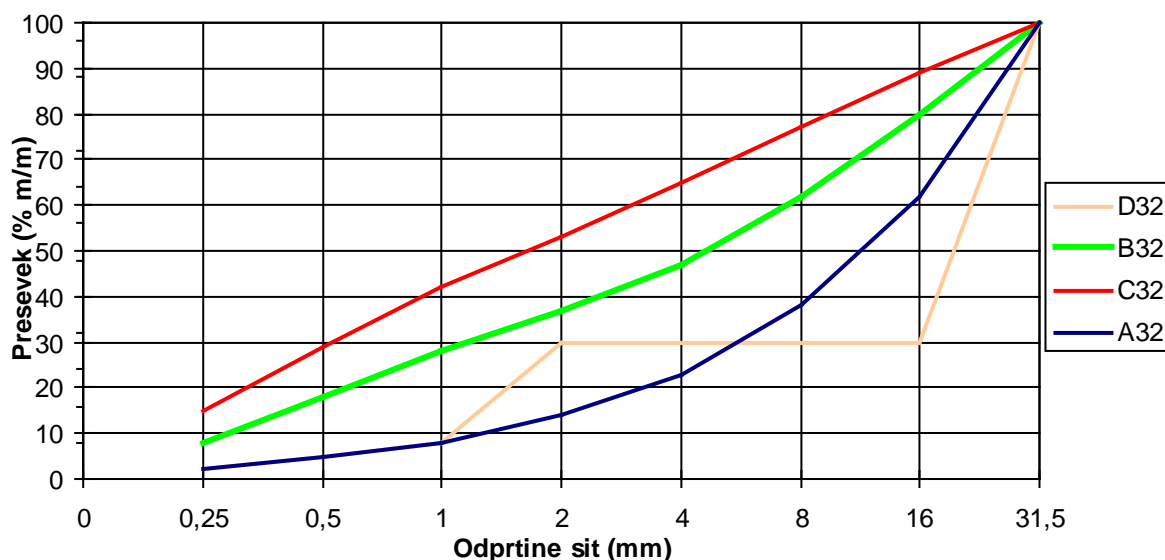
Dobljena krivulja se mora nahajati v območju priporočenih mejnih krivulj zrnivosti določenih s standardom SIST 1026 (sliki 4.1.c in 4.1.d). Če krivulja obravnavanega agregata poteka nad mejno krivuljo C in pod mejno krivuljo A pomeni, da izbran agregat ni primeren za izdelavo betona in ga je potrebno popraviti z dodajanjem določenih frakcij. Če zrnavostna krivulja obravnavanega agregata poteka med mejnima krivuljama C in A so potrebne preiskave, s katerimi dokažemo ustrezno kakovost betona. Kot optimalno zrnavostno sestavo za samozgoščevalne betone predstavlja standardna mejna zrnavostna krivulja B.

Pri določitvi zrnavostne sestave agregata moramo upoštevati naslednje dejavnike:

- a) površino agregata od katere zavisi količina vode, ki je potrebna da omoči vse trdne delce,
- b) relativno prostornino, ki jo agregat zavzema,
- c) odpornost betonske mešanice proti segregaciji,
- d) količino drobnih zrn v mešanici.



Slika 4.1.c: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/16 mm po SIST 1026



Slika 4.1.d: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/32 mm po SIST 1026

Specifična površina agregata se povečuje s količino drobnega agregata in z manjšanjem največjega zrna v agregatu. Ta določa količino cementne paste, s katero ovijemo in združimo vsa zrna in tisto količino vode, s katero omočimo čvrsta zrna agregata, ki pa ne predstavljajo

vse specifične površine. Relativna prostornina agregata naj bi bila čim večja, ker je agregat cenejši od cementne paste. Če bi bil edini kriterij za določitev zrnastostne sestave agregata minimalna prostornina votlin med agregatnimi zrnji, potem bi imeli zelo težko vgradljiv beton. Vgradljivost betona je dobra, če obstaja višek paste, ki zapolnjuje votline v pesku oziroma med grobimi zrnji.

Čim lažje se nalagajo zrna različnih velikosti, pri čemer manjša zrna enostavneje zapolnijo votline med večjimi zrnji, toliko večja je verjetnost, da bodo majhna zrna izločena iz teh votlin, z drugimi besedami, da bo beton segregiral. Zato moramo paziti, da bo votlin v agregatu čim manj. To pa dosežemo z določitvijo take zrnastostne sestave, ki bo omogočila maksimalno zbit agregat.

Prostornina, ki jo zavzema zgoščena betonska mešanica, je nekoliko večja od same prostornine zbitega agregata, ki ga vsebuje ta beton. Razlika teh dveh prostornin nam pove, v kolikšni meri so zrna agregata v stiku in znaša običajno okoli 3 %, nikoli pa ni večja od 10 %.

#### ***Standardni in specialni agregati***

	<b>Prostorninska masa zrn</b>	
<b>Standardni agregati</b>	2,2 - 3 kg/m <sup>3</sup>	Iz naravnih nahajališč kot so rečni, ledeniški agregat, itd.
<b>Težki agregat</b>	> 3,0 kg/m <sup>3</sup>	Barit, železova ruda. Npr. za proizvodnjo betona za zaščito pred radiacijo.
<b>Lahki agregat</b>	< 2,0 kg/m <sup>3</sup>	Ekspandirana glina, lehnjak, polistiren. Uporaba npr. za izolacijske betone.
<b>Agregat z visoko trdoto</b>	> 2,0 kg/m <sup>3</sup>	Kvarc, karborund. Za izdelavo trdih tlakovanih površin.
<b>Recikliran agregat</b>	pribl. 2,4 kg/m <sup>3</sup>	Iz zmletega starega betona.

***Preglednica 4.1.e: Prostorninske mase zrn različnih agregatov.***

---



### **Standard SIST EN 12620 – Agregati za beton**

V Evropi so zahteve za agregat za beton podane v standardu EN 12620. Ta standard je zelo obsežen in daje več informacij kot v opisu spodaj.

#### ***Pomembni izrazi iz standarda.***

**Naravni agregat.** Prihaja iz naravnih nahajališč. Obdelava je le mehanska z možnim pranjem.

**Mešan agregat.** Agregat, ki vsebuje mešanico grobega in drobnega agregata (pesek). Agregatna mešanica je lahko proizvedena brez separacije na grob in droben agregat ali s kombinacijo grobega in drobnega agregata.

**Recikliran agregat.** Agregat mehansko proizveden iz anorganskih materialov predhodno vgrajenih v konstrukcijo.

**Polnilo (kamena moka).** Agregat, katerega večina delcev gre čez sito z odprtino 0,063 mm in je dodan za doseganje določenih lastnosti.

**Droben agregat (pesek).** Oznaka za manjše frakcije z premerom zrna manjšim od 4 mm. Droben agregat je lahko proizveden z naravnimi procesi lomljenja in drobljenja kamna ali gramoza in/ali z umetnim drobljenjem kamna ali gramoza.

**Grob agregat.** Oznaka za večje frakcije z večjim premerom (D) ne manjšim kot 4 mm in manjšim premerom (d) ne manjšim kot 2 mm.

**Zrnavost.** Razdelitev agregatnih zrn po velikosti, izražena kot odstotni masni deleži, ki preidejo skozi določen nastavek sit.

#### **Vrste sit**

Velikost odprtine < 4 mm ..... sito iz kovinskih žic

Velikost odprtine > 4 mm ..... sito iz preluknjane kovinske plošče

Velikosti odprtin posameznih sit so navedene v standardu ISO 3310-1&2.

Za boljšo konsistenco betona so bolj primerna okrogla zrna agregata kot oglata. Beton iz drobljenega agregata ima nekoliko večjo zahtevo po vodi zaradi večje specifične površine, vendar dosegajo ti betoni večjo tlačno trdnost, ker se zrna med seboj zaklinijo (tvorjenje skeleta).

---

## 4.2 CEMENT

Cement je neorgansko, drobno zmleto hidravlično vezivo. Izraz "hidravlično" pomeni, da vezivo v stiku z vodo tvori pasto, ta pa na podlagi reakcij in procesov hidratacije veže in strjuje ter po strditvi ohrani trdnost in stabilnost tudi v vodi. Za iznajditelja cementa velja Josef Aspdin iz Anglije (prvi patent leta 1824). Portland cement se imenuje po barvi kamna z otoka Portland, ki je bila enaka rdečkasto rumeni barvi strjenega cementa. Pozneje je Charles Johnson ugotovil pravo mešalno razmerje osnovnih surovin, apnenca in gline, ter optimiral njihovo žganje (sintranje) ob primerni temperaturi. Tak portlandski cement po več kot 170 letih uporabljamo še danes.

Portlandski cement ima določeno kemično sestavo, ki temelji na specialnih sestavinah. Glavne sestavine so apnenec, lapor in glina, ki jih zmeljemo in zmešamo v ustreznem razmerju. Tako nastali surovinski material žgemo pri 1450°C, da dobimo klinker. Ko zmeljemo klinker dobi cement svojo znano drobnost, ki jo je mogoče izraziti z »specifično površino po Blainu«

Običajna lastnost **portlandcementnega betona**, ki je gradbeniki ne marajo, je, da se pri daljšem izsuševanju na zraku z normalno relativno vlago krči. Če napetosti, ki nastanejo zaradi krčenja, po jakosti presežejo natezno trdnost betona, se pojavijo razpoke. Te so precej izrazite in hkrati moteče v oblogah – tankoslojnih tlakih iz drobnozrnatega betona oziroma cementne malte. Tehnološko krčenje tankoslojnih betonskih tlakov zaradi izsuševanja namreč spremljajo tudi močne deformacije v vertikalni smeri, ki so ob razpoki najbolj vidne. To imenujemo vihanje.

- normalni cement PC (PC)	specifična površina	ca. 3000 cm <sup>2</sup> /g
- visoko kakovostni PC (HPC)	specifična površina	ca. 3500 cm <sup>2</sup> /g

Sestavo, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente podaja standard SIST EN 197-1.

---

### **Mehanske zahteve**

Poleg razmerja različnih sestavin v cementu podaja standard SIST EN 197-1 tudi določene zahteve glede kemijske sestave cementa ter fizikalno-mehanske lastnosti. Cement mora biti označen z oznako trdnostnega razreda (marka cementa). Standard določa glede na tlačno trdnost po 28 dneh tri trdnostne razrede: 32,5, 42,5 in 52,5. Poleg tega so cementi z visokimi začetnimi trdnostmi označeni z veliko črko R (rapid), cementi z normalno začetno trdnostjo pa s črko N (normal).

### **Nadzor nad kakovostjo cementov**

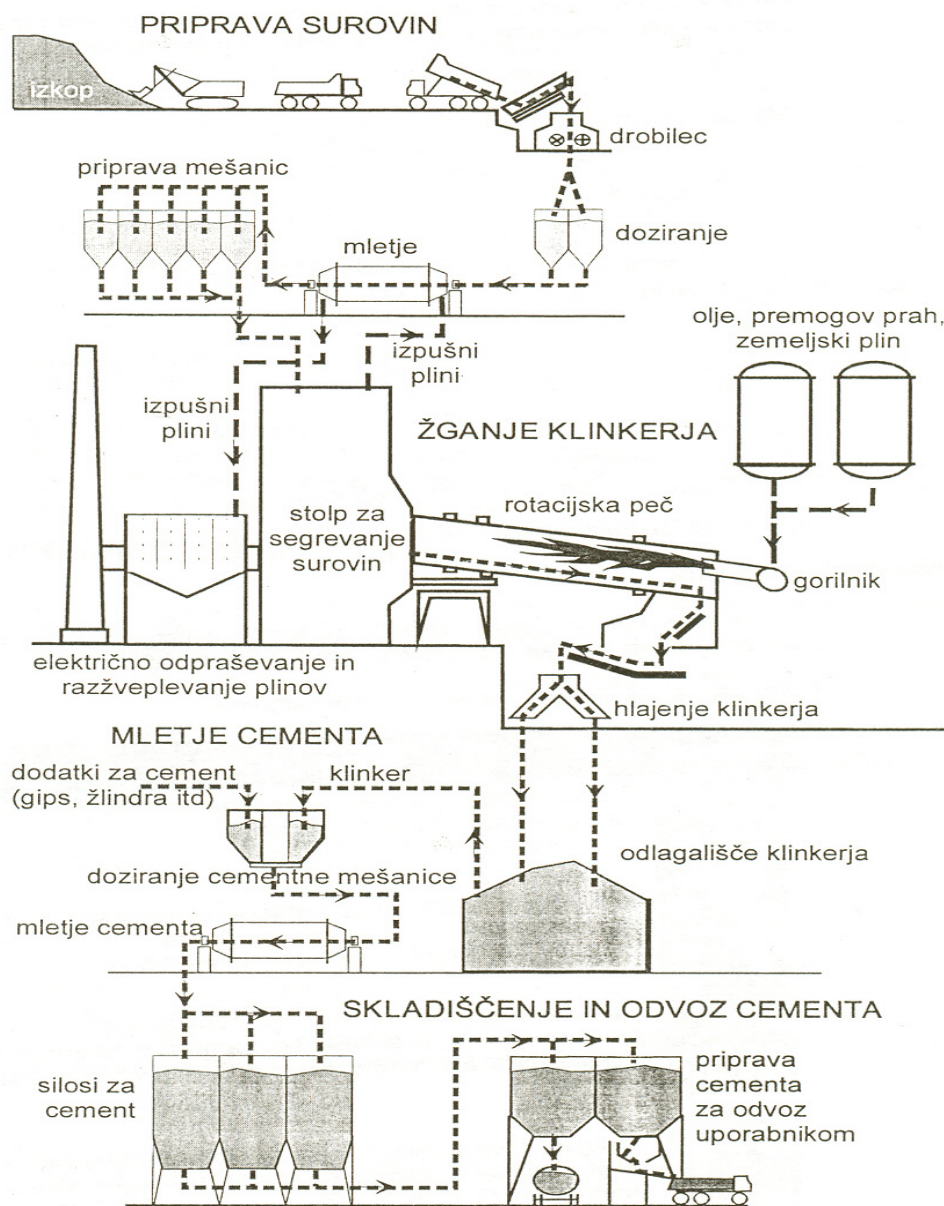
Običajni cementi, ki se uporabljajo za pripravo betona, malte, injekcijske mase in drugih mešanic za gradnjo in proizvodnjo gradbenih proizvodov spadajo v regulirano področje in najstrožji sistem certificiranja, kar pomeni, da sta tako proizvod kot tudi proizvajalec nadzorovana s strani neodvisne pooblašene institucije. V skladu z evropsko direktivo CPD 89/106/E48 (zakon o gradbenih proizvodih) se za cement zahteva sistem certificiranja 1 plus, ki obsega notranjo kontrolo s strani proizvajalca, s strani zunanje institucije pa nadzor nad proizvodnjo, kontrolo in rezultati kontrole pri proizvajalcu ter v zadnji fazi tudi zunanji nadzor nad odvzetimi vzorci cementa. V bistvu so zahteve standarda SIST EN 197-2 katerega uporabo predvideva tudi standard SIST-EN 197-1, v celoti zahteve standarda ISO 9001 za vpeljan sistem kakovosti. Na osnovi potrjene skladnosti z zahtevami standarda SIST EN 197-1 pooblašena institucija izda CE certifikat. Le ta dovoljuje proizvajalcu uporabo CE znaka, ki omogoča nemoten pretok blaga prek meja držav članic EU. V Sloveniji je s strani CEN-a pooblašena institucija za certificiranje cementa ZAG Zavod za gradbeništvo Ljubljana.

**Vrste cementov:**

Tip cementa	Oznaka 27 proizvodov = (vrste običajnih cementov)		SESTAVA (utežni deleži v cementu v %)										
			GLAVNE SESTAVINE										Ostali dodatki
			Klinker	Žlindra	Mikrosilika	Naravni pucolan	Naravni kalcinirani pucolan	Silicijski EF pepel	Kalcijski EF pepel	Žgani skrilavec	Apnencem		
Ime	Tip	K	S	D <sup>1</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>2</sup>	LL <sup>3</sup>		
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland cement z žlindro	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland cement z mikrosilikom	CEM II/A-D	90-94	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland cement z pucolani	CEM II/A-P	80-94	-	-	43983	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland cement z EF pepelom	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland cement z skrilavcem	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland cement z 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
	Kompozitni portland cement	CEM II/A-M	80-94	6-20								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	21-35								0-5	
CEM III	Cement z žlindro	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pucolanski cement	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5
CEM V	Kompozitni cement	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50			-	-	-	-	0-5
<sup>1</sup> Količina mikrosilike je omejena na 10%. <sup>2</sup> Skupna količina organskega karbona ne sme presegati 0,2%. <sup>3</sup> Skupna količina organskega karbona ne sme presegati 0,5%.													

**Preglednica 4.2.a:** 27 proizvodov iz družine običajnih cementov (SIST EN 197-1).

## Proizvodnja cementa



Slika 5 - 4: Shematski prikaz proizvodnje cementa

Slika 4.2.b: Shematski prikaz proizvodnje cementa.

Cementni klinker je po sestavi polimineralni material, ki ima sorazmerno konstantno kemijsko sestavo.

SPOJINA	DELEŽ
CaO (komponenta C)	62 ÷ 67 %
SiO <sub>2</sub> (komponenta S)	19 ÷ 25 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (komponenta A)	2 ÷ 8 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (komponenta F)	1 ÷ 5 %
SO <sub>3</sub> (komponenta S)	max. 3,5 ÷ 4,5 %
CaO (nevezan)	max. 2 %
MgO	max. 5 %
alkaliije (K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O)	0,5 ÷ 1,3 %

*Preglednica 4.2.c: Delež posameznih spojin v cementu.*

#### 4.2.1 MINERALNI DODATKI CEMENTU

Dodatki cementu so fini materiali, ki se dodajajo glede na maso cementa.

Uporabljajo se za doseganje ali ohranjanje določenih lastnosti svežega ali strjenega betona.

Standard SIST EN 206-1 loči dva tipa mineralnih dodatkov:

##### **Tip I**

Mineralni dodatki tipa I so mineralna polnila (kamena moka), ki izpolnjujejo zahteve standarda SIST EN 12620 in pigmenti, ki so skladni s SIST EN 12878.

**Pigmenti:** Pigmentirani železovi oksidi se uporabljajo za obarvanje betona. Dodajajo se od 0,5 do 5 % na maso cementa. Morajo biti barvno obstojni in stabilni v alkalnem okolju. Z nekaterimi vrstami dodatka se nam poveča potreba po vodi.

**Kamena moka:** Z dodajanjem kamene moka lahko izboljšamo mešanice z nizko vsebnostjo finih delcev. S temi materiali izboljšamo zrnastostno sestavo agregata. Poveča se nam potreba po vodi.

##### **Tip II**

Mineralna dodatka tipa II sta elektrofilterski pepel skladen z SIST EN 450 in mikrosilika, skladna z SIST EN 13263.

---

**Elektrofilterski pepel:** Fin prah iz termoelektrarn na uprašen premog in se ga uporablja kot dodatek za cement in kot dodatek za beton. Njegove lastnosti so odvisne od tipa premoga, njegovega izvora in pogojev gorenja.

**Mikrosilika:** nastaja v proizvodnji silicijevih in ferosilicijevih zlitin v elektropečeh pri redukciji zelo čistega kremena s premogom in sestoji iz zelo drobnih kroglastih delcev, ki vsebujejo najmanj 85% mase amorfne silicijevega dioksida.

### 4.3 VODA

Voda je osnova za pretvorbo cementa v vezivo. Brez preverjanja njene primernosti se lahko uporabi vsaka pitna voda. Vodi, ki je potrebna za hidratacijo cementa, je običajno potrebno dodati še določeno količino vode za zagotovitev primerne konsistence oziroma obdelavnosti svežega betona. S tem prilagodimo viskoznost svežega cementnega betona določene sestave pogojem uporabe. Vsako povečanje količine vode v mešanici svežega betona nad potrebno količino za hidratacijo (približno 40 % mase cementa) pomeni povečanje deleža kapilarnih por v strjenem cementnem kamnu, to pa praviloma škodljivo vpliva na vse lastnosti strjenega cementnega betona.

**Pitna voda** je primerna za proizvodnjo betona in je ni treba testirati.

**Podtalnica** je lahko primerna za proizvodnjo betona, vendar mora biti preverjena.

**Naravna površinska voda in voda uporabljena v industriji** je lahko primerna za proizvodnjo betona, vendar mora biti preverjena.

**Morska voda** je lahko uporabljena za nearmiran beton, ni pa primerna za armiran in prednapet beton.

**Odpadna voda** ni primerna za proizvodnjo betona.

Voda mora biti analizirana za sledmi olj, maščob, penil, zadrževalnih substanc in kislin ( $\text{pH} > 4$ ).

---

## **4.4 KEMIJSKI DODATKI**

Kemijski dodatki omogočajo izdelavo cementnih betonov z določenimi lastnostmi.

### **4.4.1. Plastifikatorji**

Glavna lastnost plastifikatorjev je, da povečajo konsistenco betonu pri enakem V/C razmerju ali povečajo trdnost z zmanjšanjem V/C razmerju. Plastifikator izboljša porazdelitev cementa v betonski mešanici, beton je bolj prožen, vendar brez izgube na kohezivnosti. Pri betonu z dodatkom plastifikatorja so opazne sledeče prednosti:

- lažja obdelava svežega betona zaradi mehkejše konsistence
- občutno zvišanje trdnosti betona
- manjša izguba obdelavnosti pri daljših časih transportiranja
- zmanjšanje nagnjenosti k razmešanju svežega betona
- znižanje razmerja v/c do 10 % že pri majhnih doziranjih
- visoki prihranki pri enaki obdelavnosti
- izboljša se vodotesnost in zmrzljinska obstojnost betona

Pri estrih z dodatkom plastifikatorja so opazne sledeče prednosti:

- hitrejše doseganje pohodnosti
- povečana zgodnja tlačna trdnost
- zmanjšana vsebnost vode in prihranek na cementu pri enaki obdelavnosti
- boljša tesnost in zato manjša možnost za nastanek razpok
- močno zmanjšano krčenje

prijazen do okolja, ker ne vsebuje formaldehida

### **4.4.2 Superplastifikatorji novih generacij**

Superplastifikatorji so dodatki za uravnavanje reoloških lastnosti svežega betona s tem, da omogočajo:

---



- zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti betona
- izboljšanje obdelavnosti betona ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode
- počasnejši padec obdelavnosti betona s časom

Zmanjšanje potrebne količine zamesne vode je v glavnem odvisno od uporabljenega superplastifikatorja, začetne konsistence betona in lastnosti cementnega veziva.

Glede na kemijsko sestavo so superplastifikatorji razvrščeni v štiri skupine:

- A.) sulfonirani melamin-formaldehidni kondenzati (SMF)
- B.) sulfonirani naftalen-formaldehidni kondenzati (SNF)
- C.) modificirani lignin-sulfonati (ML)
- D.) modificirani polikarboksilati (plastifikatorji 3. generacije - »hiperplastifikatorji«)

Izdelavo samozgoščevalnih betonov omogočajo hiperplastifikatorji, ki imajo veliko močnejši učinek kot običajni superplastifikatorji. Superplastifikatorji na bazi melamin-sulfonatov in naftalen-sulfonatov omogočajo svežemu betonu mnogo krajši čas obdelavnosti kot hiperplastifikatorji. Običajni superplastifikatorji omogočajo zmanjšanje zamesne vode do 25%, hiperplastifikatorji pa zmanjšajo količino zamesne vode do 40%. Čas vzdrževanja obdelavnosti betona je odvisen od vrste superplastifikatorja (za uravnavanje časa obdelavnosti lahko dodamo pospeševalec ali zadrževalec) in kompatibilnosti le-tega z vezivom.

Razlika v učinku superplastifikatorja in hiperplastifikatorja je v njuni kemijski sestavi. Hiperplastifikator je zgrajen iz ene glavne polimerne verige, iz krajših stranskih verig z negativnimi karboksilatnimi skupinami in iz dolgih stranskih verig iz polietilen oksidov. Zgradba superplastifikatorja se razlikuje v tem, da ima namesto dolgih stranskih verig iz polietilenoksidov kratke verige, ali pa jih sploh nima.

Hiperplastifikator je površinsko aktivna snov, ki se absorbira na površino cementnih zrn in povzroča disperzijo le teh z električnim in steričnim oziroma prostorskim odbojem. Cementna zrna s sprejetim negativnim električnim nabojem iz karboksilatnih skupin se medsebojno odbijajo in dispergirana struktura cementnih zrn se stabilizira. Posledica negativnega naboja je nastanek orientiranih molekul vode na površini cementnih zrn, ki delujejo kot mazivo oziroma povečujejo obdelavnost svežega betona. Nastanek steričnega odboja povzročijo dolge verige iz polietilen oksidov, ki prostorsko preprečujejo, da bi se cementni delci združevali. Prostorski odboj ima veliko večji in dalj časa trajajoč učinek kot električni naboj.

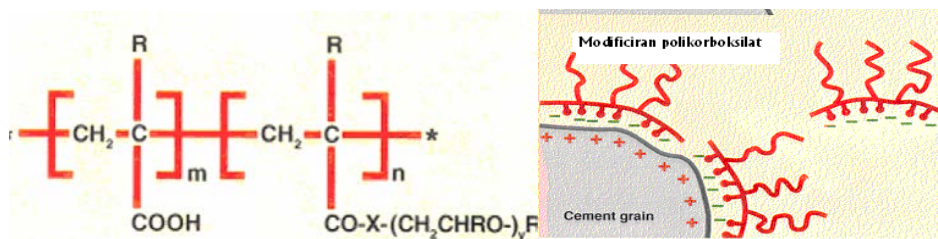
---

Delovanje superplastifikatorja je prikazano na sliki:

- A.) molekule superplastifikatorja se razporedijo po površini cementnih zrn v mešanici
- B.) cementna zrna se zaradi elektrostatičnega naboja medsebojno odbijajo in se enakomerno dispergirajo v mešanici, ki se posledično utekočini
- C.) zaradi procesa hidratacije začnejo na površini cementnih zrn rasti različni kristali – produkti hidratacije, ki se medsebojno prepletajo, istočasno pa onemogočajo nadaljnji učinek dodatka

Delovanje hiperplastifikatorja je prikazano na sliki 4.2.2:

- A.) v nasprotju z molekulo običajnega superplastifikatorja ima molekula hiperplastifikatorja dolge stranske verige, ki podaljšajo delovanje dodatka
- B.) delovanje hiperplastifikatorja je v začetni fazi enako prej opisanemu delovanju običajnega superplastifikatorja. S pojavom kristalov pa se preostale molekule hiperplastifikatorja v suspenziji razporedijo tudi okoli delno hidratiziranih cementnih zrn
- C.) dolge stranske verige molekul hiperplastifikatorja prostorsko preprečujejo združevanje delno hidratiziranih cementnih delcev in s tem podaljšajo obdelavnost betona



**Slika 4.2.2:** Prikaz kemične sestave in delovanja polikarboksilata

Učinek hiperplastifikatorja je odvisen od vrste in količine cementa, vodocementnega razmerja, sestave agregata in dozacije samega dodatka.

Način adsorbiranja hiperplastifikatorja na cementne delce je odvisen od posameznih komponent cementa. Adsorbcija hiperplastifikatorja na cementne delce na površino trikalcijevega aluminata ( $\text{C}_3\text{A}$ ) je zelo hitra in obsežna, zlasti če se dodatek dozira z vodo takoj na začetku mešanja. Na površino trikalcijevega silikata ( $\text{C}_3\text{S}$ ) pa se hiperplastifikator

veže veliko počasneje in sicer se v prvi uri adsorbira majhna količina dodatka, v nadaljnjih štirih urah adsorbcije skoraj ni, nato pa je adsorbcija konstantna.

Pri cementnih kompozitih z nizkim vodocementnim razmerjem pripomore boljše disperzija cementnih delcev, zaradi delovanja hiperplastifikatorja, k povečanju stopnje hidratacije cementa (to je vidno v povečani hidratacijski toploti). Posledica je večja gostota strjene betonske mešanice.

#### **4.4.3 Dodatek za pospeševanje strjevanja (dodatek za zimsko betoniranje)**

To je dodatek, ki se dodaja betonom za zimsko betoniranje. Omogoča izdelavo kvalitetnega betona pri pričakovanih srednje nizkih temperaturah, to je če poteka betoniranje pri manjši dnevni ali nočni zmrzali ali če so napovedane nizke temperature. Dodatek tudi izboljša obdelavnost svežega betona in zelo pospeši njegovo strjevanje, tako da doseže v kratkem času tlačno trdnost preko 5 N/mm<sup>2</sup>. Zato je lahko beton, brez škode, izpostavljen nizkim temperaturam.

Temperatura svežega betona mora pri vgrajevanju znašati vsaj +5°C, če je temperatura zraka nad -3°C in vsaj +10°C, če je temperatura zraka pod -3°C. Beton se ne sme vgrajevati na zamrznjeno armaturno jeklo in opaž.

#### **4.4.4 Sredstva za zgoščevanje**

Sredstva za zgoščevanje so gostilci za malte in betone. Vsebujejo sredstva, ki hidrofobirajo in zapirajo pore.

S takim dodatkom malta pridobi:

- v svežem stanju boljše obdelavnost,
  - v strjeni obliki zmanjšano vpojnost in visoko vodoneprepustnost.
-

#### 4.4.5 Dodatki za hitro vezanje

Dodatki za hitro vezanje cementne malte se uporabljajo za tesnjenje vdorov vode in pospeševanje vezanja cementne malte.

Uporabljajo se pri visokih in nizkih gradnjah za:

- površinsko tesnjenje vlažnih betonskih ali kamnitih površin,
- tesnjenje udorov vode na razpokah, stikih ali segregiranih mestih,
- zapiranje udorov vode v podzemni gradnji in predorih (zagotavljanje primerne podlage za - nadaljevanje del),
- izdelavo hitro vezoče malte za montažna dela (za sidranje vijakov, sider, vložkov, nosilcev,...),
- za izdelavo hitro vezoče malte za manjša popravila ob prisotni vlagi v jaških, itd.

Lastnosti:

- dodatki delujejo kot pospeševalci vezanja (hidratacije) cementa
- v odvisnosti od vrste cementa, temperature podlage, zraka in vode je možno uporabiti različne koncentracije izdelka. Na ta način se lahko uravnava čas vezanja cementa v intervalu od 15 do 50 sekund.

#### 4.4.6 Dodatki za zmanjševanje krčenja betona

Dodatki zmanjšujejo krčenje betona in malte med postopkom vezanja in sušenja.

Dodatki za zmanjševanje krčenja se uporabljajo za sledeče namene:

- za zmanjšanje krčenja betona visoke zmožljivosti, pri čemer se podaljša tudi življenska doba betona
  - za betone in malte z ostro omejeno dovoljeno širino razpok
  - za zmanjšanje števila delovnih stikov
  - za zmanjšanje razvoja toplote in nagnjenosti k nastajanju razpok zaradi krčenja pri velikih betonskih presekih (zmanjšanje plastičnega krčenja in upočasnitev razvoja hidratacijske toplote)
-

- za izdelavo malt na gradbišču: za fugiranje, zalivanje delovnih stikov na zidovih in estrihah (zmanjšanje števila delovnih stikov za cca. 30-40%).

#### **4.4.7 Aeranti**

Aeranti so koncentrirani proizvodi za tvorbo zračnih por. Aeranti služijo za izdelavo betonov, ki so odporni na zmrzovanje in talilne soli. V kombinaciji s plastifikatorji lahko izdelamo visoko kakovostne betone za mostove, galerije, podporne zidove, betonske ceste, notranje obloge predorov, pregradne zidove, letališke piste itd.

Pri betonu z dodatkom aeranta so opazne sledeče prednosti:

- obstojnost na zmrzovanje brez in ob prisotnosti talilnih soli
- povečana vodotesnost
- manjša možnost nastajanja razpok
- lažja obdelavnost svežega betona
- nadomesti manjkajoče fine frakcije mineralnega agregata

Doziranje aeranta je odvisno od:

- deleža finih zrn in oblike zrn mineralnega agregata
  - vrste cementa (finosti mletja in razreda trdnosti)
  - vsebnosti cementa
  - časa mešanja
  - temperature
  - kakovosti mletja cementa
  - mineralnih dodatkov (elektrofiltrski pepel)
  - ostalega
-

## 5 REOLOŠKE LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA

### 5.1 SPLOŠNO

Reologija je veda, ki proučuje deformiranje in tečenje snovi. Pri proučevanju betona se je s časom večal pomen vgradljivosti, sposobnost zgoščevanja, kohezivnosti in homogenosti betonske mešanice, ker se te lastnosti izrazijo v kakovosti strjenega betona.

Betonska mešanica je večkomponentna struktura, ki vsebuje cement, vodo in agregat ter v manjši meri zračne pore. Zaradi napetosti med delčkom trde faze in vode postaja ta sistem koheziven in se ga smatra kot fizikalno telo z določenimi fizikalnimi, mehanskimi in reološkimi lastnostmi. Za proučevanje teh lastnosti se v laboratorijih uporablja posebne viskozimetre, medtem ko se v praksi ali na gradbišču uporablja enostavnejše metode, s katerimi merimo stopnjo odpora proti deformiranju in odpora proti segregaciji (razslojevanje). Pozorni moramo biti tudi na spreminjanje lastnosti betonske mešanice od začetka mešanja pa do začetka strjevanja betonske mešanice. Najpomembnejša lastnost sveže betonske mešanice je konsistenca oziroma sposobnost dobrega zgoščevanja s pomočjo različnih sredstev (vibracijske igle,...), kjer moramo paziti na homogenost mešanice.

Glavna dejavnika pri reoloških lastnostih sta količina vode in količina cementne paste, ki predstavlja dispergirani sistem z zelo veliko kontaktno površino med tekočo in trdno fazo. S procesom hidratacije cementa (začetka strjevanja) se prične oblikovati vedno večja količina C-S-H gela, s čemer se povečuje vsebnost trdne faze in vezivna vloga cementne paste v betonski mešanici. Posledica procesa hidratacije cementa je postopno zmanjševanje sposobnosti deformiranja sveže betonske mešanice.

V betonski mešanici z večjo vsebnostjo grobega agregata pride do notranjega trenja: v drobnem agregatu prosta voda namreč zapolni votline, zato jo posledično začne primanjkovati med zrnji preostalega - grobega agregata, tako da ni potrebnega podmazovanja. To povečuje strukturno viskoznost. Strukturna viskoznost betonske mešanice in s tem povezana potrebna moč vibratorja je najmanjša pri določenem razmerju malte in grobega agregata. Ob

---

povečevanju v/c razmerja naglo padeta tako strukturna viskoznost kot koeficient tiksotropije. Po drugi strani s pretiranim zmanjšanjem količine vode oziroma v/c razmerja betonska mešanica izgublja kohezijo, razpada, zato se je ne more obravnavati kot homogene mešanice. Cementna pasta in betonska mešanica sta sposobni zadrževati kohezijo samo v določenem intervalu v/c razmerja. Pri visokem v/c razmerju se pojavi segregacija betonske mešanice (sedimentacija zrn agregata; tvorjenje votlin, zapoljenih z vodo, in iztekanje preobilne vode iz betonske mešanice, ker je ni sposobna zadrževati). Prav tako se zniža mehanska trdnost, vodonepropustnost, odpornost na vremenske vplive ter agresivnost okolja,...Na splošno velja, da je velikost v/c razmerja obratno sorazmerna kakovosti betona ob pogoju enake vgradljivosti.

Strukturno viskoznost betonske mešanice se lahko zmanjša z uporabo kemijskega dodatka tipa plastifikator ali superplastifikator, pri čemer se ne povečuje količina vode oziroma v/c razmerja. Od trenutka zamešanja do začetka vezanja cementa se poleg fizikalno-kemijskih procesov in reakcij spreminja tudi strukturna viskoznost. Dolžina časovnega intervala zavisi od časa vezanja cementa, količine vode in temperature. S porastom količine vode se podaljšuje interval, z rastjo temperature pa krajša. Na dolžino časovnega intervala lahko po potrebi vplivamo tudi s pomočjo dodatkov za beton. Tako s pospeševalci pospešimo vezanje do nekaj minut, v obratnem primeru pa z zavlačevalci vezanje zaviramo. Zavlačevalci nam koristijo predvsem v primerih dolgotrajnega transporta betonske mešanice ali betoniranja pri visokih temperaturah.

Potrebna vgradljivost je sposobnost betonske mešanice, da se enostavno vgradi, lepo zapolni kalup (opaž) in se dobro zgosti z razpoložljivimi sredstvi za zgoščevanje. Zaželeno je, da pri vsem tem betonska mešanica obdrži homogenost, kar je v veliki meri odvisno od vzpostavljenе kohezije. V nekaterih primerih se posebej zahteva taka obdelavnost betonske mešanice, da se poleg vgrajevanja in zgoščevanja lahko enostavno obdela tudi vidne površine. Potrebna vgradljivost se določi z merjenjem reoloških lastnosti s pomočjo poenostavljenih metod, s katerimi se določa reološke karakteristike betonskih mešanic: posed stožca, razlez na stresalni mizi, odpor proti penetraciji, zgoščevanje pri vibriranju; pri samozgoščevalnih betonih pa: razlez s posedom, L-škaf, V-lijak, U-cev in podobno. Tako se potrebna vgradljivost določa po številnih metodah (z določenimi odstopanji), pri čemer si zapisujemo

---

sestavo betonske mešanice, temperaturo betona, kohezijo in homogenost, kakor tudi sposobnost (dobrega) zgoščevanja v kalupe s pomočjo razpoložljivih sredstev za zgoščevanje (z minimalno porabo energije).

Glede na vgradljivost ločimo težko vgradljive, vgradljive, samovgradljive in samozgoščevalne betonske mešanice. V današnjem času stremimo k samovgradljivim oziroma samozgoščevalnim betonom, saj nam omogočajo enostavnejše in hitrejšo vgrajevanje betonskih mešanic. S tem se izognemo tudi slabim vplivom ročnega vibriranja.

### 5.1.1 REOLOGIJA SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA

Zmogljivost samozgoščevalnega betona ovrednotimo:

- s sposobnostjo tečenja (beton se horizontalno razprostira samo zaradi delovanja lastne teže; za mero sposobnosti tečenja se uporablja premer razleza pri ustrezni preiskavi),
- z viskoznostjo betona (imenovano tudi notranje trenje v tekočini je posledica medsebojnega delovanja sosednjih tekočinskih plasti, ki se med tečenjem različno hitro gibljejo).

Tekoči beton se obnaša podobno kot plastični fluidi, katerih reološko obnašanje opisuje Binghamova enačba:

$$\tau = \tau_0 + \beta p \cdot \gamma$$

kjer je:

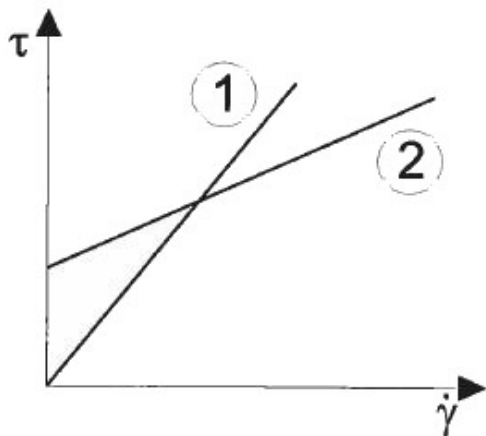
- $\gamma$  – strižna hitrost
- $\tau$  – strižna napetost
- $\tau_0$  – napetost na meji tečenja (Tekoči beton začne teči, ko dosežejo strižne napetosti v materialu kritično minimalno vrednost, imenovano napetost na meji tečenja. Za tem je zveza med strižno napetostjo in strižno hitrostjo približno linearna)
- $\beta p$  – plastična viskoznost

Za določitev reoloških parametrov (priporočene vrednosti: napetost na meji tečenja pod 12 Pa, plastična viskoznost med 150 in 250 Pa·s) se uporabljajo reometri ali viskozimetri, ki pa

---



so relativno dragi. Zato se kot mera viskoznosti betona velikokrat uporablja ustrezen čas iztekanja znane količine betona iz lijaka.



**Slika 5.1.1:** Reološke lastnosti Newtonovih tekočin in Binghamovih teles

#### 1 NEWTONOVE TEKOČINE

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \eta = \text{viskoznost}$$

#### 2 BINGHAMOVO TELO

$$\tau = \tau_0 + \beta p \cdot \dot{\gamma} \quad \beta p = \text{plastična viskoznost}$$

Iz Binghamovega reološkega modela je razvidno, da je sposobnost tečenja odvisna od velikosti napetosti na meji tečenja. Če pade med tečenjem betona strižna napetost v betonu pod napetost na meji tečenja, se tečenje ustavi in beton se umiri. Čim nižja je napetost na meji tečenja, tem večja je sposobnost tečenja betona. Torej, pri samozgoščevalnem betonu z ekstremno sposobnostjo tečenja težimo k zelo nizki napetosti na meji tečenja. To dosežemo z vključitvijo ustrezne količine hiperplastifikatorja v betonsko mešanico.

Nizka napetost na meji tečenja lahko povzroči segregacijo betonske mešanice, zato je potrebno povečati viskoznost paste v betonu. Viskoznost samozgoščevalnega betona povečamo:

- z zadostno količino praškastih delcev ustrezne zrnivosti,
  - s sredstvom za kontrolo viskoznosti
-

## 5.2 PREISKAVE BETONOV V SVEŽEM STANJU

### 5.2.1 PREISKAVE SAMOZGOŠČEVALNIH BETONOV

Za določanje reoloških lastnosti betonskih mešanic se uporablja naslednje metode:

#### 5.2.1.1 Razlez s posedom

Omenjena preiskava je preprosta, vendar zelo učinkovita metoda za določitev sposobnosti tečenja (zapolnjevanja) in stabilnosti sveže samozgoščevalne mešanice na podlagi opazovanja hitrosti in širine deformiranja preizkušanca izključno zaradi delovanja lastne teže.

Za preiskavo uporabimo standarden prisekan stožec (Abramsov stožec), ki je v skladu z zahtevami SIST EN 12350-2. Za podlago uporabimo togo ploščo dimenzij 800x800 mm, ki mora biti dovolj ravna in gladka. Na plošči imamo načrtan krog premera 500 mm za določitev časa  $T^{50}$ . To je čas, ki ga potrebuje vzorec, da doseže razlez 500 mm.

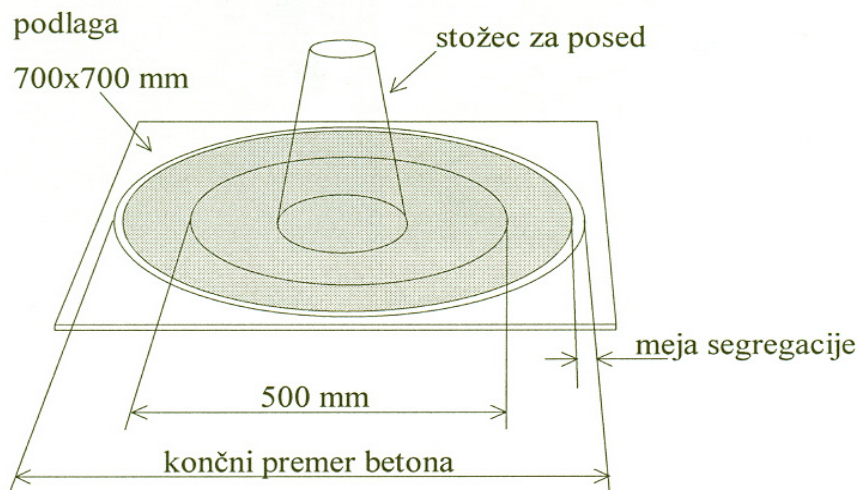
Pred preiskavo zagotovimo, da je plošča vlažna, vendar ne mokra. Stožec postavimo na sredino plošče tako, da je ožji del stožca na podlagi in ga napolnimo z betonom. Beton se zgosti izključno pod delovanjem svoje lastne teže, odpade vsako vibriranje oz. prebadaje z jekleno palico. Stožec dvignemo v vertikalni smeri. V trenutku ko stožec dvignemo začnemo meriti čas  $T^{50}$ . Ko se beton razleže in umiri, izmerimo s pomočjo merila in dveh vodil navidezno največji premer razlitega preizkušanca in premer pravokotno nanj. Po potrebi lahko določimo tudi mejo segregacije na obodu.

Mera razleza s posedom je povprečje dveh meritev in je ocena napetosti na meji tečenja. Čas  $T_{50}$  pa predstavlja oceno plastične viskoznosti betona. Čas  $T_{50}$ , ki predstavlja oceno plastične viskoznosti sveže betonske mešanice, ni neodvisen od sposobnosti deformiranja betonske mešanice. Na primer, pri enaki viskoznosti betonskih mešanic bomo pri mešanici z večjim razlezom izmerili krajši čas  $T_{50}$  kot pri mešanici z manjšim razlezom. To pomeni, da ta metoda preiskave ne omogoča ovrednotenje viskoznosti mešanice neodvisno od potencialne

---

spodobnosti deformiranja. Čas  $T_{50}$  torej predstavlja relativno oceno plastične viskoznosti le v primeru enake sposobnosti deformiranja betonskih mešanic, to je pri mešanicah z enakim razlezom.

Na čas  $T_{50}$  močno vpliva V/C razmerje. Mešanica, ki prehitro doseže razlez 500 mm ( $T_{50} < 2$  s) je premalo viskozna. Če pa je razlez prepočasen ( $T_{50} > 10$  s) je mešanica preveč viskozna. Večji razlez pomeni večjo sposobnost zapolnjevanja, hkrati pa tudi večjo možnost segregacije grobega agregata. Večji razlez pomeni tudi boljše kvaliteto površine betona. Viskoznost betona mora biti dovolj nizka, da zagotovimo kvalitetno vgrajevanje, hkrati pa dovolj visoka, da ne pride do segregacije.



**Slika 5.2.1.1.a** : Podlaga in napolnjen stožec za preiskavo



*Slika 5.2.1.1.b: Primer razleza s posedom.*

### **5.2.1.2 Preiskava z V-lijakom**

Preiskava nam omogoča ovrednotenje sposobnosti prehajanja skozi ozke predele. Viskoznost sveže betonske mešanice ocenjujemo na podlagi opazovanja hitrosti tečenja vzorca skozi posebno zasnovan lijak le zaradi lastne teže betona. Z opazovanjem tečenja vzorca lahko ovrednotimo tudi odpornost na segregacijo svežega samozgoščevalnega betona.

Za raziskavo smo uporabili lijak dimenzij: višina 575 mm, prerez zgornje odprtine 500x75 mm, prerez spodnje odprtine 75x75 mm in višina kvadratnega izpusta 150 mm. Podporna konstrukcija nam omogoča vertikalno postavitev jeklenega V-lijaka. Odprtina za iztekanje ima tesnilno zaporo z ročico za zapiranje in odpiranje, ki omogoča napolnitev V-lijaka s svežim betonom in se lahko v trenutku odpre.

Lijak postavimo na ravna tla, notranjost lijaka navlažimo z krpo in preverimo, če je odprtina za iztekanje zaprta z zaporo. Svež beton vlijemo v lijak tako, da se beton zniwelira z vrhom lijaka. V trenutku ko odstranimo zaporo začnemo meriti čas iztekanja  $T_i$  do trenutka ko zagledamo svetlobo na izpustu.

Za vrednotenje rezultatov obstaja več kriterijev. Nekateri za ustrezno viskoznost sveže betonske mešanice navajajo čas iztekanja  $T_i$  med 6 in 12 sekund, nekateri pa med 5 in 15 sekund. Če je čas iztekanja večji od 10 sekund pomeni, da je betonska mešanica ali preveč viskozna za ustrezno rokovanje in vgrajevanje ali pa tako nestabilna, da oblikujejo zrna agregata oviro in blokirajo tečenje. Čas iztekanja betona pod 2 oz. 4 sekundami pa kaže na nezadostno viskoznost betonske mešanice za ustrezno odpornost na segregacijo. JSCE pa dovoljuje bistveno večjo zgornjo mejo časa iztekanja, ki je do 20 sekund, medtem ko je spodnja meja 10 sekund za močno armirane elemente, za druge pa 7 sekund.



*Slika 5.2.1.2.a:* V-lijak za preiskavo viskoznosti na FGG

### **5.2.1.3 Preiskava z L-zabojem**

Z preiskavo z L-zabojem simuliramo realne pogoje vgrajevanja na gradbišču ali pri vgrajevanju prefabriciranih elementov v obratu. Omogoča nam oceno sposobnosti samoniveliranja, zapolnjevanja in prehajanja sveže mešanice samozgoščevalnega betona ter oceno odpornosti na segregacijo.

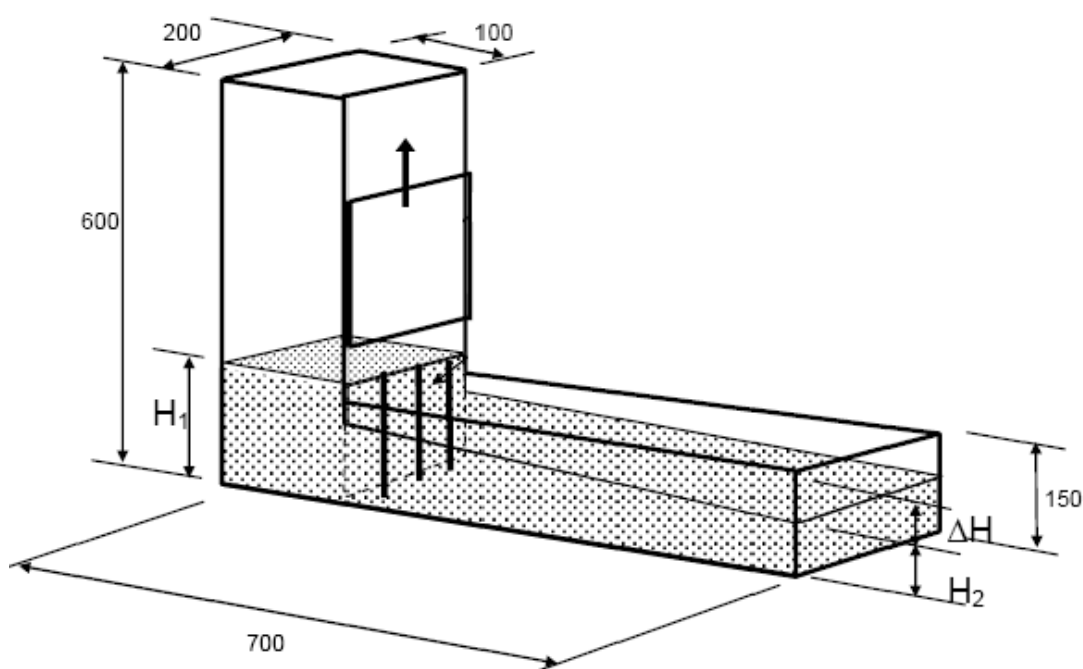
Pri preiskavi uporabimo L-zaboj z vertikalno oviro. L-zaboj je narejen iz 12 mm debele vezane plošče z gladko površino in ima vsaj eno stranico prosojno. Na prosojni stranici sta

---

označeni razdalji, ki sta 200 in 400 mm oddaljeni od drsne zapore. V L-zaboj je nameščena ovira tečenju iz treh rebastih armaturnih palic  $\varnothing 12$ , tako da je svetla razdalja med palicami 34 mm. Uhajanje betona iz vertikalnega dela L-zaboja v horizontalni preprečuje drsna zapora, ki se mora gladko odpirati.

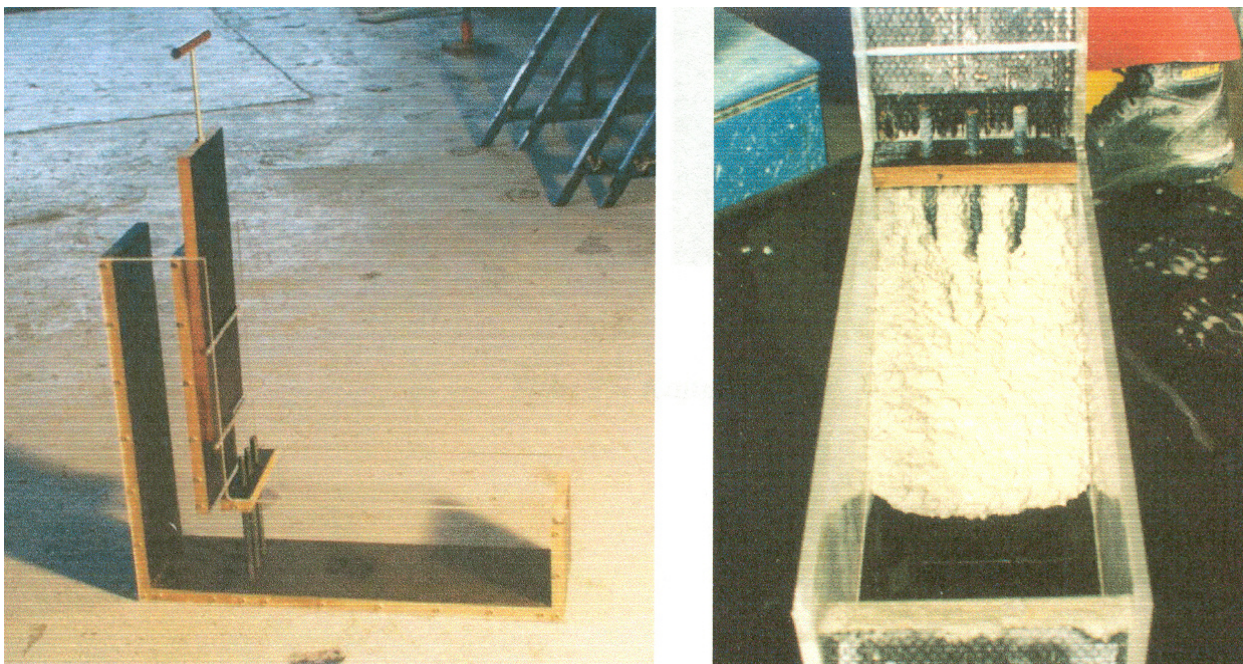
V vertikalni del L-zaboja vlijemo 12,7 litra betona. Ko se beton umiri, dvignemo drsno zaporo in beton steče iz vertikalnega dela L-zaboja v horizontalnega skozi oviro iz armaturnih palic.

Po dvigu drsne zapore merimo časa  $T_{20}$  in  $T_{40}$ ; to sta časa, ki ju čelo betona potrebuje, da doseže oznaki 200 in 400. Ko se beton v horizontalnem delu L-zaboja umiri, izmerimo višini  $H_1$  in  $H_2$ , ki nam dasta blokirno razmerje  $H_1/H_2$ . Najmanjša še sprejemljiva vrednost blokirnega razmerja je  $0,8 \div 0,85$ . Vizualno lahko ocenimo stabilnost betonske mešanice, saj če beton oblikuje plato za oviro armaturnih palic pomeni, da je prišlo do blokiranja ali pa do segregacije. Blokiranje je razvidno iz nakopičenega grobozrnatega agregata med armaturnimi palicami. Betonska mešanica je stabilna, če je grobozrnat agregat na površini betona razporejen vse do konca horizontalnega dela zaboja.



**Slika 5.2.1.3.a:** L-zaboj z označenimi dimenzijami

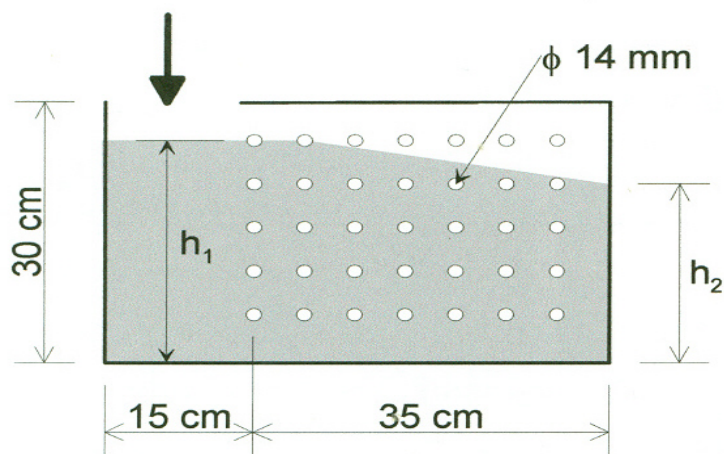




*Slika 5.2.1.3.b: L-zaboj na FGG in tečenje betona med preiskavo*

#### **5.2.1.4 Preiskava s Kajima škatlo (škatla za zapolnjevanje)**

S to preiskavo ovrednotimo sposobnost samozgoščevanja betonske mešanice na podlagi opazovanja tečenja in zapolnitvene višine vzorca v škatli za zapolnjevanje, samo zaradi delovanja lastne teže. To je vodotesna škatla z prozornimi stranicami dimenzije 50 x 30 cm, ki ima prečno nameščene armaturne palice, ki služijo kot ovira tečenju betona.



*Slika 5.2.1.4.: Kajima škatla*

Pred preiskavo moramo Kajima škatlo navlažiti z vodnim razpršilom oz. mokro krpo. Potem jo postavimo na ravno horizontalno podlago. Pripravljeno betonsko mešanico vlivamo skozi odprtino, dokler ne doseže beton najvišje armaturne palice. Izvrši se zgoščevanje vzorca, ki je posledica delovanja lastne teže betona. Počakamo, da se tečenje vzorca konča, nato izmerimo višini  $h_1$  in  $h_2$  v mm (glej sliko 3.2.9.1) in izračunamo zapolnitveno razmerje  $F$  v odstotkih.

$$F = (h_1 + h_2 / 2 \times h_1) \times 100 (\%)$$

#### 5.2.1.5 Določevanje vsebnosti zraka v svežem betonu

Metoda je modificirana (brez zgoščevanja) in skladna s standardom SIST EN 12350-7. Vsebnost zraka oz. plinaste komponente v svežem betonu določimo s porozimetrom. Osnovno posodo porozimetra (8 litrov) napolnimo z betonom. Posoda mora biti natančno napolnjena do roba, površina mora biti gladka. Nalegajoče površine posode in pokrova očistimo zaradi dobrega tesnenja. Na posodo namestimo pokrov z manomerom, tlačilko in ventili ter ga dobro zatesnimo. Skozi enega od ventilov vlijemo vodo s katero napolnimo prostor nad betonom. Nato ventile zapremo in s tlačilko ustvarimo nadtlak v predprostoru. Ko z ročico odpremo ventil med predprostorom in z vodo napolnjenim prostorom nad betonom, nam manometer prikaže padec tlaka kot delež por v odstotkih.

Delež por lahko ocenimo tudi z izračunom iz dejanske prostorninske mase svežega betona.

---





*Slika 4.2.1.5: Porozimeter.*

#### **5.2.1.6 Preiskave odpornosti na segregacijo**

Odpornost samozgoščevalne betonske mešanice na segregacijo lahko preverimo na več načinov. Nekateri so navedeni že v opisanih preizkusih – razlez s posedom, preiskava z V-lijakom in L-zabojem. V okviru preiskave z V-lijakom je možno opraviti še eno kontrolo, ki se izvede tako, da po končanem iztekanju V-lijak še enkrat napolnimo z betonom, ne da bi ga prej očistili. Počakamo 5 minut in odstranimo zaporo. Izmerimo čas  $T_{i,5min}$  od odstranitve zapore do trenutka ko na dnu izpusta zagledamo svetlobo. Čas  $T_{i,5min}$  se od predhodno izmerjenega  $T_i$  ne sme razlikovati za več kot 3 sekunde. V nasprotnem primeru lahko sklepamo na segregacijo, saj se v 5 minutah groba zrna posedejo na dno in tako blokirajo iztek.

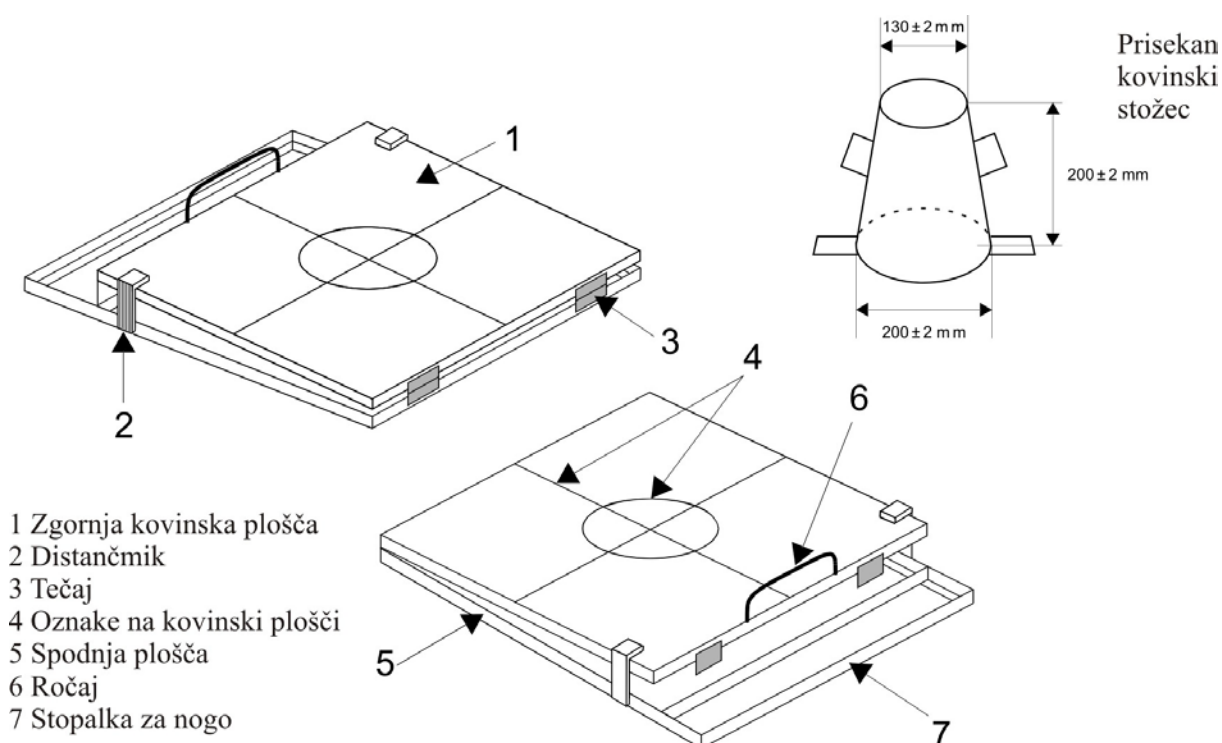
## 5.2.2 PREISKAVE VIBRIRANIH BETONOV

### 5.2.2.1 Razlez (SIST EN 12350-5)

Preskus z razlezom meri razlez vzorca svežega betona na ravni plošči, ki ga vgradimo v kalup v obliki votlega prisekanega stožca predpisanih dimenzij in se po odstranitvi kalupa posede zaradi delovanja lastne teže. Poseden beton nato podvržemo preoblikovanju, ki je posledica dviganja in spuščanja plošče. Beton se pri tem razleže in doseže končni razlez po predpisanemu številu dvigov in spuščanj plošče. Srednji premer razlezenega betona v milimetrih je mera za konsistenco.

Preskus z razlezom je primeren za določitev konsistence svežih betonov, pri katerih se razlez giblje med 340 mm in 620 mm. Izven teh skrajnih vrednosti je merjenje razleza lahko neprimerno, zato se za določitev konsistence uporabljajo druge metode. Metoda preskusa ni primerna za penobeton in za beton z največjim zrnem agregata nad 63 mm. Gibljiva razlezna miza je izdelana iz ravne plošče tlorisne velikosti  $(700\pm 2)\text{mm} \times (700\pm 2)\text{mm}$ , ki je postavljena na tog okvir. Višina padca zgornjega dela mize, merjena v sredini sprednje strani plošče, mora biti z distančnikom omejena na  $(40\pm 1)\text{mm}$ . Kalup v obliki prisekanega stožca je narejen iz gladke kovine z dimenzijami: premer osnove  $-(200\pm 2)\text{mm}$ , premer vrha  $-(130\pm 2)\text{mm}$  in višina  $-(200\pm 2)\text{mm}$ .

---



**Slika 5.2.2.1.a:** Oprema za preiskavo razleza

**Postopek:** Z lopatico napolnimo kalup v dveh enakih slojih in vsakega poravnamo z desetimi rahlimi udarci nabijala (iz trdnega materiala kvadratnega prereza s stranico  $(40 \pm 2)$  mm in dolžine približno 200 mm). Z nabijalom odstranimo odvečen beton, tako da je površina betona poravnana z vrhom kalupa ter očistimo odvečen beton s kovinske obloge vrhnje plošče mize, počakamo 30 s, nato pa z ročaji dvignemo kalup navpično (dvigovanje naj traja 3 do 6 sekund). Razlezno mizo stabiliziramo tako, da stopimo na stopalko na sprednji strani mize. Nato 15-krat počasi dvignemo zgornji del mize (do distančnika) in ga spustimo, da prosto pade na distančnik. Vsak dvig in padec mize lahko traja najmanj 2 s in največ 5 s. Z merilom izmerimo največji dimenziji  $d_1$  in  $d_2$  razlezenega betona v dveh smereh, vzporednih s stranicami mize, in obe meritvi zaokrožimo na najbližjih 10 mm in jih zabeležimo.

Potrebno je tudi vizualno pregledati razlezeni beton in tako preveriti, ali je razlezen beton segregiran. Cementna pasta se namreč lahko loči od grobega agregata in tvori nekaj mm širok obroč paste okoli grobega agregata.

RAZREDI RAZLEZA	
RAZRED	RAZLEZ (mm)
F1	≤ 340
F2	350 - 410
F3	420 - 480
F4	490 - 550
F5	560 - 620
F6	≥630

*Preglednica 5.2.2.1.b: Razredi betonov glede na razlez.*

### 5.2.2.2 Posed stožca

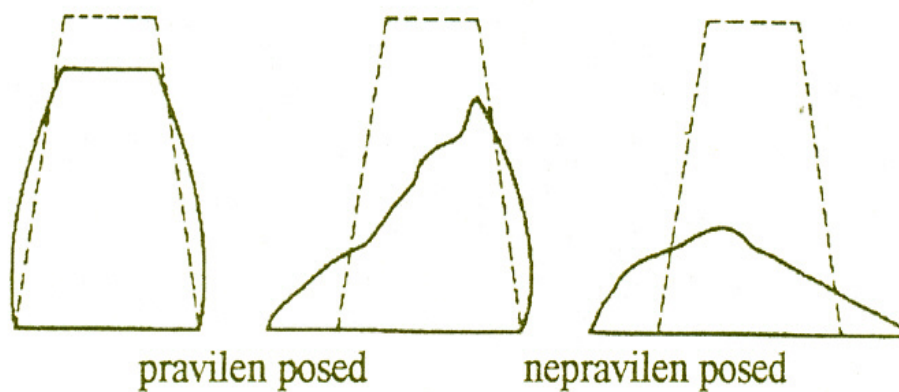
Metoda poseda je zasnovana na merjenju poseda zgoščenega betonskega konusa, ki se posede zaradi lastne teže. Mera za konsistenco je višina poseda vzorca svežega betona po odstranitvi kalupa. Preskus s posedom je primeren za določitev konsistence svežih betonov, pri katerih se posed giblje med 10 mm in 210 mm. Metoda poseda ni primerna za beton z največjim zrnem agregata nad 40 mm in v primeru, da se posed v prvi minuti po odstranitvi kalupa še dalje spreminja.

Prisekan kovinski kalup polnimo z zidarsko žlico v treh plasteh približno enake višine (1/3 višine stožca). Vsako plast prebodemo s standardno kovinsko palico (premer  $16 \pm 1$  mm) s 25 prebodi tako, da prvo plast prebadamo po celi višini, medtem ko mora pri nadaljnih dveh plasteh palica prodreti le do spodnje plasti. Po koncu prebadanja zadnje plasti presežek betona odstranimo in ga poravnamo z vrhom prisekanega kovinskega stožca. Trideset sekund po napolnitvi počasi dvignemo prisekan kovinski stožec in ga prestavimo ob betonski stožec, ki se je posedel. Standardno palico za prebadanje postavimo na vrh tako, da seže nad betonski stožec, in izmerimo razliko višin med posednim vzorcem betona in prisekanim kovinskim stožcem. Ta metoda je zanesljiva, reproduktivna in natančna za betonske mešanice, kjer je posed v območju  $5 \div 21$  cm. Tudi v praksi je največkrat uporabljena. Poleg tega nam omogoča dnevno (po potrebi vsako uro) oceno lastnosti uporabljenega materiala (npr. povečan posed nas opozori na vlažnost agregata ali na razliko v zrnovostni sestavi agregata, posebno pri finih frakcijah).

---



*Slika 5.2.2.2.a: Meritev poseda betona.*



*Slika 5.2.2.2.b: Pravilen in nepravilen posed stožca*

RAZREDI POSEDA	
RAZRED	POSED (mm)
<b>S1</b>	10 – 40
<b>S2</b>	50 – 90
<b>S3</b>	100 – 150
<b>S4</b>	160 – 210
<b>S5</b>	≥ 220

**Preglednica 5.2.2.2.c:** Razredi betonov glede na posed.

### 5.2.2.3 Preskus stopnje zgoščenosti (SIST EN 12350-4)

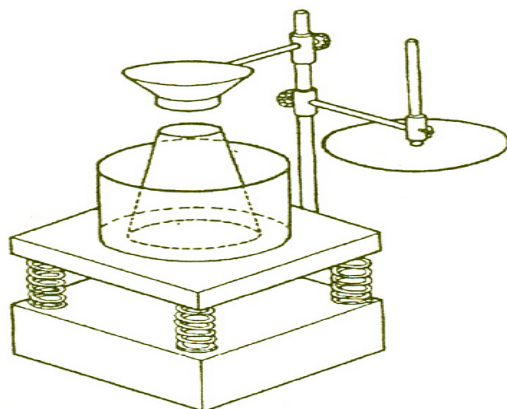
Ta metoda se uporablja za težko vgradljive betone, kjer določimo stopnjo zgoščenosti betonske mešanice z razmerjem višin pred in po vibriranju betona v kalupu standardnih dimenzij. Kalup napolnimo do vrha z betonom. Pri vgrajevanju mora beton padati v kalup z višine 10 cm preko ene od širših stranic zidarske žlice. Na koncu odstranimo presežek betona in poravnamo zgornjo višino. Betonsko mešanico vibriramo na vibrirni mizi ali pa s pervibratorjem. Po končanem vibriranju izmerimo višino od površine betona do vrha kalupa na sredini vsake stranice. Nato izračunamo razmerje med notranjo višino posode in višino zbite betonske mešanice. Betonska mešanica je težko vgradljiva, ko je stopnja zgostitve 1,25 in več. To metodo največkrat srečamo v obratih za prefabricirane izdelke, kjer se uporablja takoimenovani suhi beton.

### 5.2.2.4 VEBE metoda

Postopek priprave vzorca je enak kot pri posedu stožca. Po odstranitvi kalupa v obliki prisekanega stožca se zgoščenemu betonskemu konusu spreminja obliko na vibracijski mizi z določeno frekvenco vibriranja. Merimo čas, ko konus prevzame obliko cilindra, to je ko beton v celoti prekrije stekleno ploščo nad konusom. Kot merilo vgradljivosti betonske mešanice je vložena energija, ki se jo porabi za zbijanje. Izraža se v VEBE sekundah, to je čas ki je

---

potreben za preoblikovanje. Vebe je dober laboratorijski postopek, še posebno za »suhe« betone.



**Slika 5.2.2.4:** Oprema za VEBE metodo

## 5.3 PREISKAVE BETONOV V STRJENEM STANJU

### 5.3.1 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev. Določitev tlačne trdnosti obravnava SIST EN 12390-3. Vzorec betona mora biti odvzet z določili standarda SIST EN 12350-1.

Če je treba določiti tlačno trdnost, jo je treba izraziti kot  $f_{c, \text{cube}}$ , če se določi na preizkušancih v obliki kocke, in kot  $f_{c, \text{cyl}}$ , če se določi na preizkušancih v obliki valja.

Ali naj se tlačna trdnost ugotavlja s preskusi na kockah ali na valjih, mora pravočasno pred začetkom dobavljanja betona napovedati proizvajalec. Če naj se uporablja drugačen postopek, se morata o tem pred začetkom gradbenih del sporazumeti izdajatelj specifikacije in proizvajalec.

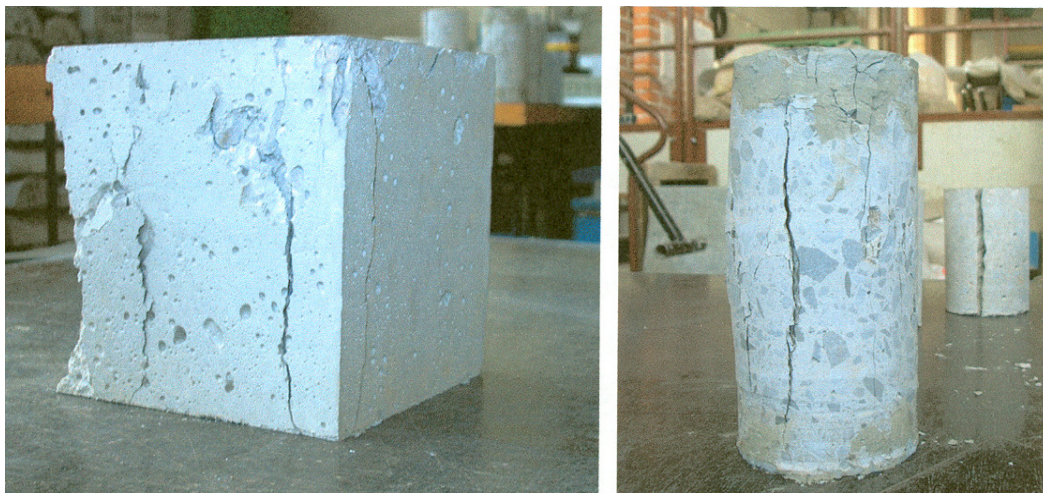
Če ni predpisano drugače, se tlačna trdnost določa na preizkušancih starih 28 dni. Za posebne namene je morda potrebno predpisati tlačno trdnost pri starosti, ki je manjša ali večja od 28 dni (npr. za masivne konstrukcijske elemente), ali po hranjenju v posebnih pogojih (npr. toplotna obdelava).

Tlačno trdnost preizkušanca izračunamo po naslednji enačbi:

$$f_{cc} = \frac{F}{A_c}$$

Kjer je:

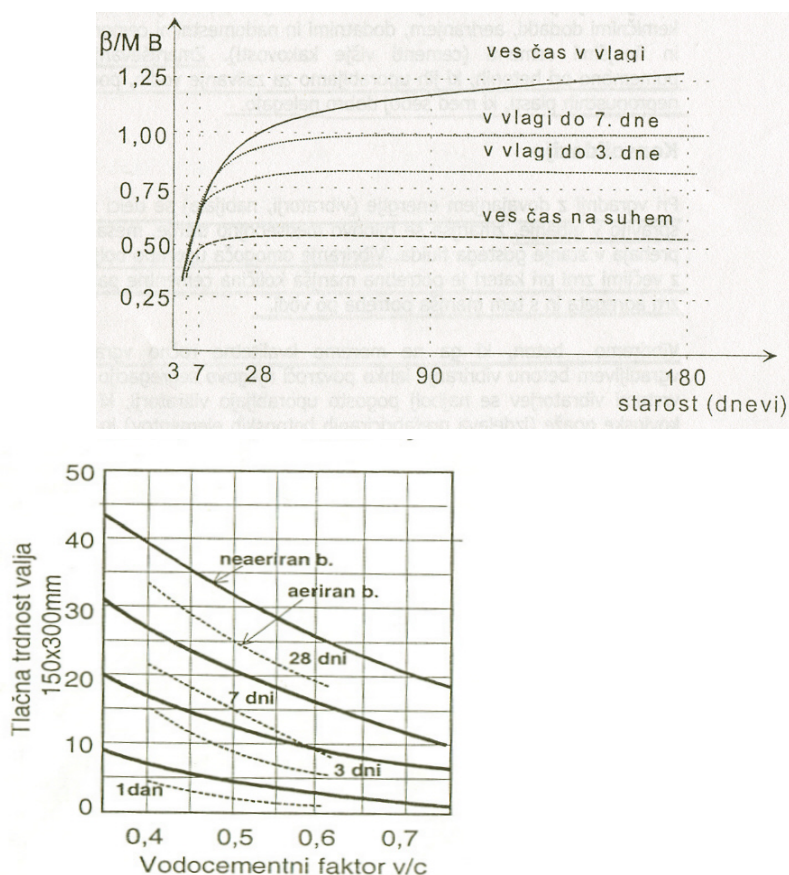
- F .....porušna tlačna sila
- $A_c$  .....površina vodoravnega prereza preizkušanca



**Slika 5.3.1.a:** Tlačno porušena preiskušena kocka in valj

Preiskušance moramo ves čas pred preiskavo hraniti v vodi ali v prostoru z najmanj 95 % relativno vlago pri temperaturi  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Na trdnost betona zelo vplivata v/c razmerje in stopnja dosežene hidratacije cementnega kamna, ki je v normalnih razmerah proporcionalna starosti betona. Z večanjem v/c trdnost pada, s starostjo pa raste (sliki 5.3.1.b in 5.3.1.c).





Sliki 5.3.1.: b) Trdnost glede na starost in hrambo v vodi; c) Trdnost glede na v/c faktor

### 5.3.2 Odpornost proti prodoru vode

Če se zahteva je treba odpornost betona proti prodoru vode preizkušati po SIST EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni in največ 35 dni na 3 preizkušancih, izdelanih iz različnih vzorcev svežega ali strjenega betona iste vrste in enake starosti. V preglednici 5.3.2 so določene stopnje odpornosti betona proti prodoru vode PV, pripadajoče največje dovoljene vrednosti prodora vode v posamezni preizkušanelec pri preskusu po SIST EN 12390-8 in največji dovoljeni odkloni posameznih rezultatov.

Stopnjo odpornosti proti prodoru vode je treba predpisati v projektu konstrukcije, kadar je potrebno zagotoviti:

- visoko kakovost zaščitne plasti betona nad armaturo
- vodotesnost betonske konstrukcije

Stopnja odpornosti proti prodoru vode	Največja dovoljena vrednost prodora vode (mm)	Največji dovoljeni odklon (mm)
PV-I	50	+15
PV-I	30	+10
PV-I	20	+5

**Preglednica 5.3.2:** Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po EN 12390-8

### 5.3.3 Notranja odpornost proti zmrzovanju/tajanju (NOZT)

Če se zahteva, je treba notranjo odpornost proti zmrzovanju in tajanju določevati po postopku, skladnemu s standardom SIST 1026, pri starosti betona najmanj 28 dni in največ 35 dni, če ni drugače predpisano. Ugotavlja se povprečni relativni dinamični modul  $P_n$  po predpisanem številu ciklov zmrzovanja - tajanja  $n$ . Notranjo odpornost proti zmrzovanju/tajanju je treba predpisati in preverjati pri betonih, za katere sta predvideni stopnji izpostavljenosti XF1 ( $n=100$ ) in XF 3 ( $n=150$ ). Beton šteje kot odporen proti zmrzovanju/tajanju, če pri predpisani starosti in po predpisanem številu ciklov zmrzovanja/tajanja znaša relativni modul elastičnosti  $P_n$  najmanj 75%.

<b>XF1</b>	Zmerna zasičenost z vodo brez talilnih soli	Vertikalne površine betona izpostavljene dežju in zmrzali
<b>XF2</b>	Zmerna zasičenost s vodo z prisotnostjo talilnih soli	Vertikalne površine betona izpostavljene zmrzali in talilnim solem
<b>XF3</b>	Visoka zasičenost z vodo brez talilnih soli	Horizontalne površine betona izpostavljene dežju in zmrzali
<b>XF4</b>	Visoka zasičenost z vodo s prisotnostjo talilnih soli	Horizontalne površine betona izpostavljene zmrzali in talilnim solem

**Preglednica 5.3.3:** Stopnje izpostavljenosti XF

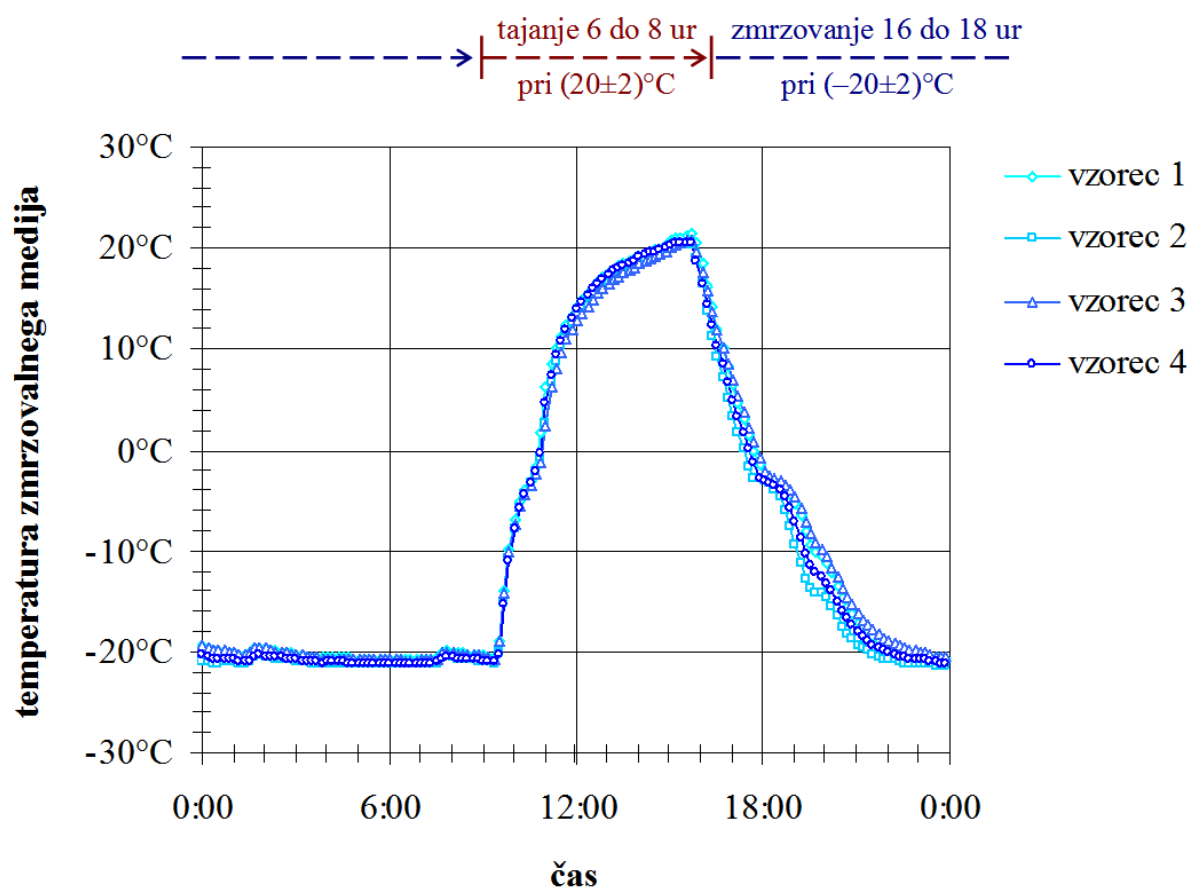
### 5.3.4 Odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju (OPZT)

Če se zahteva, je treba odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju določevati po postopku, skladnemu s standardom SIST 1026, pri starosti betona najmanj 28 dni in največ 35 dni, če ni drugače predpisano. Kot zmrzovalni medij je treba pri poskusu uporabiti 3%-no raztopino NaCl. Odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju je treba predpisovati in preverjati pri betonih za katere sta predvideni stopnji izpostavljenosti XF2 in XF4 in se ocenjuje z količino odluščenega materiala v  $\text{mg}/\text{mm}^2$ .

Šteje, da je površina betona odporna proti zmrzovanju/tajanju, če po 25 ciklih niso prekoračene osnovne mejne vrednosti odluščenega materiala iz preglednice 5.3.4.a. Če se preskus izvaja na opaženi površini in če so po 25 ciklih prekoračene osnovne mejne vrednosti odluščenega materiala, se sme s preskusom nadaljevati do 50 ciklov, pod pogojem, da po 25 ciklih niso bile prekoračene skrajne vrednosti iz preglednice 5.3.4. Šteje, da je opažena površina odporna proti zmrzovanju/tajanju, če po 50 ciklih niso bile prekoračene dovoljene mejne vrednosti iz preglednice 5.3.4.a.

Stopnja izpostavljenosti XF		Osnovne mejne vrednosti po 25 ciklih	Skrajne mejne vrednosti po 25 ciklih	Dovoljene mejne vrednosti po 50 ciklih
XF 2	Povprečje	0,30	0,50	0,60
	Posamezna vrednost	0,40	0,65	0,80
XF 4	Povprečje	0,20	0,35	0,40
	Posamezna vrednost	0,25	0,40	0,50

**Preglednica 5.3.4.a:** Merila za ocenjevanje odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju s soljo: količina odluščenega materiala v  $\text{mg}/\text{mm}^2$



Slika 5.3.4.b: Tipičen cikel zmrzovanja /tajanja pri laboratorijskem preizkušanju.

## **6.0 PROJEKTIRANJE MEŠANICE BETONA**

### **6.1 SPLOŠNO**

#### **6.1.1 SESTAVA CEMENTNIH BETONOV**

Beton je po sestavi razmeroma heterogen material. Zato je ustrezna sestava cementnobetonskih mešanic zelo zahtevna, enako pa tudi njihova proizvodnja. Z majhnimi spremembami sestave je lahko povzročena bistvena sprememba lastnosti strjenega cementnega kamna.

Sestava betona mora biti zasnovana za konkretno konstrukcijo oz konkretni konstrukcijski element. To pomeni, da moramo poznati celosten spekter parametrov, ki so vezani na projektno rešitev določenega objekta.

#### **6.2 PROJEKTIRANJE MEŠANICE SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA**

V različnih državah so razvili različne metode projektiranja samozgoščevalnega betona, ki temeljijo na različnih pristopih. Od metod projektiranja običajnega vibriranega betona pa se razlikujejo predvsem po sledečem:

V osnovi so usmerjene k zagotavljanju ustreznih karakteristik sveže betonske mešanice. Da dosežemo zahtevano obdelavnost le te, moramo zagotoviti ustrezno količino paste ter ustrezno razmerje med vodo in praškastimi delci. Zahtevane karakteristika strjenega betona dosežemo z uravnavanjem razmerij med različnimi praškastimi materiali, ki sestavljajo samozgoščevalni beton.

Pri projektiranju mešanice upoštevamo prostorninske deleže ključnih komponent, ki jih na koncu prevedemo v masne deleže.

---

V literaturi obstaja veliko priporočil glede zasnov mešanice samozgoščevalnega betona. Tukaj bomo najprej predstavili zasnov mešanice, ki je modifikacija tako imenovane splošne metode in je opisana v Specifikacijah in navodilih za samozgoščevalni beton, ki jih je leta 2002 izdelal EFNARC. V nadaljevanju pa še največkrat uporabljano splošno metodo in priporočene količine posameznih materialov v skladu s priporočili japonskega združenja gradbenih inženirjev.

Tipična območja razmerij in količin sestavin so podana v nadaljevanju.

- Volumsko razmerje med vodo in praškastimi delci med 0,80 in 1,10.
- Celotna količina praškastih delcev v kubičnem metru betona med 160 in 240 litri (400-600 kg).
- Grobozrnat agregat naj bi zavzemal od 28 do 35 odstotkov prostornine mešanice.
- Vodo-cementno razmerje se izbere glede na zahteve, ki jih poda EN 206. Navadno pa količina vode v m<sup>3</sup> betona na presega 200 litrov.
- Potrebno količino peska narekujejo že določene količine drugih sestavin mešanice.

Na splošno je priporočljivo, da smo pri projektiranju mešanice samozgoščevalnega betona nekoliko konzervativni, da bi kljub pričakovanim odstopanjem v kvaliteti osnovnih materialov še vedno dosegali zahtevane lastnosti sveže mešanice. Pričakovati moramo tudi, da lahko pride do precejšnjih nihanj v vlažnosti agregata, na kar je samozgoščevalni beton bolj občutljiv kot običajni vibrirani beton. S sredstvom za kontrolo viskoznosti, ki je pomemben dodatek samozgoščevalnim betonom lahko uspešno kompenziramo tako nihanja v vsebnosti vlage kot tudi variranje zrnastne sestava drobnozrnatega agregata. Vendar pa je kompenziranje s pomočjo dodatka za kontrolo viskoznosti težje dosegati v praksi v betonarni. Velik del preiskav samozgoščevalnih lastnosti lahko opravimo na maltah, saj so lastnosti malt za samozgoščevalne betone dovolj dobro definirane. Delo v laboratoriju z maltami je pripravnejše tudi zato, ker potrebujemo manjše količine materialov. Končne preiskave je seveda potrebno opraviti tudi na betonskih mešanicah in ko te izpolnjujejo vse zahtevane lastnosti, preverimo njihovo učinkovitost še z vgrajevanjem v betonarni ali na gradbišču.

V primeru, da nam v postopku zasnove mešanice ne uspe dobiti samozgoščevalnih lastnosti, moramo razmisliti o možnih ukrepih za preprojektiranje mešanice. Ti ukrepi so:

- Uporaba dodatnega mineralnega dodatka ali uporaba drugega dodatnega praškastega materiala.
-

- Sprememba količine drobnega ali grobega agregata.
- Prilagoditev količine superplastifikatorja.
- Uporaba sredstva za kontrolo viskoznosti.
- Uporaba superplastifikatorja drugega tipa ali proizvajalca.

<b>DOLOČEVANJE KOLIČINE AGREGATA</b>			
<b>VELIKOST FRAKCIJ</b>	<b>SCC 0/8 mm</b>	<b>SCC 0/16 mm</b>	<b>SCC 0/32 mm</b>
<b>0/4 mm</b>	60%	53%	45%
<b>4/8 mm</b>	40%	15%	15%
<b>8/16 mm</b>		32%	15%
<b>16/32 mm</b>			30%

*Preglednica 6.2.a: Količina posameznih frakcij agregata glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Handbook).*

<b>KOLIČINA FINIH DELCEV (<math>\leq 0,125</math> mm)</b>	
<b>SCC 0/4 mm</b>	$\geq 650$ kg/m <sup>3</sup>
<b>SCC 0/8 mm</b>	$\geq 550$ kg/m <sup>3</sup>
<b>SCC 0/16 mm</b>	$\geq 500$ kg/m <sup>3</sup>
<b>SCC 0/32 mm</b>	$\geq 475$ kg/m <sup>3</sup>

*Preglednica 6.2.b: Količina finih delcev glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Handbook)..*

<b>KOLIČINA VEZIVA</b>	
<b>SCC 0/4 mm</b>	550 - 600 kg/m <sup>3</sup>
<b>SCC 0/8 mm</b>	450 - 500 kg/m <sup>3</sup>
<b>SCC 0/16 mm</b>	400 - 450 kg/m <sup>3</sup>
<b>SCC 0/32 mm</b>	375 - 425 kg/m <sup>3</sup>

*Preglednica 6.2.c: Količina veziva glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Handbook).*

## 6.3 SPLOŠNA METODA

Na Tokijski univerzi so na podlagi obsežnih raziskav razvili relativno preprosto metodo »korak za korakom«, ki jo običajno poimenujemo kar splošna metoda.

Primerna je za določene japonske materiale in omogoča uporabo grobozrnatega agregata z zrnji med 5 in 20 mm, drobnozrnatega materiala z največjim zrnem 5 mm in visoko belitnega portland cementa z nizko toploto hidratacije. Projektirana mešanica ne vsebuje sredstva za kontrolo viskoznosti. Običajno je vključen aerant za zagotavljanje ustrezna zmrzlinke odpornosti, ki zmanjšuje potrebo po vodi in količini cementa.

Osnovni koraki metode so:

- Delež por v betonu je določen glede na stopnjo izpostavljenosti.
- Delež grobega agregata je določen kot 50% njegove prostorninske mase v zbitem stanju zmanjšan za delež zraka. Ta korak omogoča upoštevanje vpliva oblike zrn in zrnastostne sestave agregata.
- Delež drobnega materiala je določen kot 40% prostornine, ki jo v betonu zavzema malta. Med droben agregat se štejejo delci velikosti od 0,09 mm do 5 mm, medtem ko so delci manjši od 0,09 mm upoštevani kot praškasti delci.
- Razmerje med praškastimi delci in vodo se določi s preiskavama razleza s posedom in iztekanjem iz V-lijaka na maltah. Izmerjen razlez in čas iztekanja iz V-lijaka sta nato prevedena na relativno razlezno površino  $\Gamma_m$  in relativni čas iztekanja  $R_m$ , ki sta definirana kot:
  - $\Gamma_m = (\text{končna površina} - \text{začetna površina}) / (\text{začetna površina})$
  - $R_m = 10 / (\text{čas iztekanja})$ , čas iztekanja v sekundah
- Delež hiperplastifikatorja in razmerje med vodo in praškastimi delci spreminjamo tako dolgo, da dobimo  $\Gamma_m = 5$  in  $R_m$  med 0,9 in 1,1.

Preiskave na maltah se uporabljajo tudi za oceno spreminjanja lastnosti sveže mešanice s časom.

---

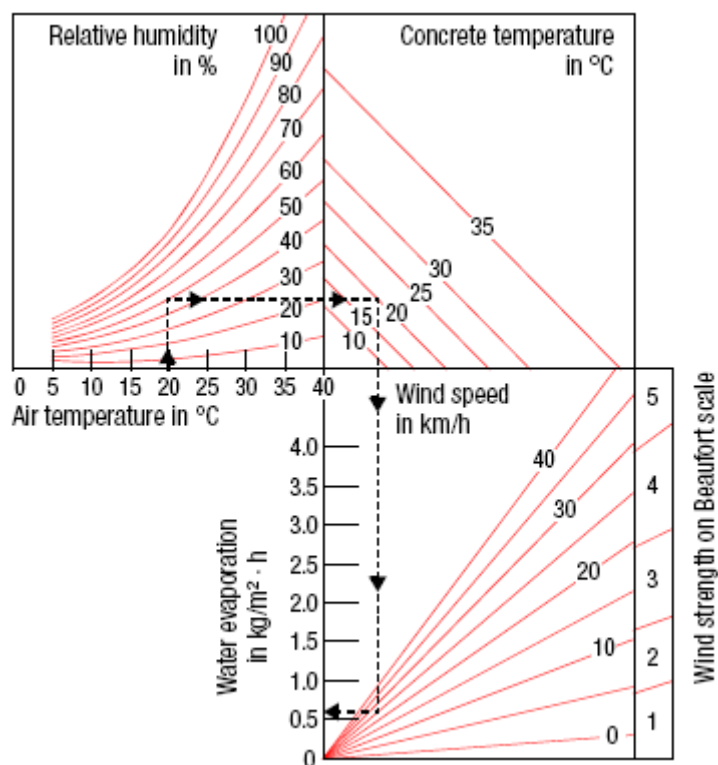


## 7 NEGA BETONA

Na lastnosti strjenega betona močno vpliva njihova nega. Za trajno sprijemnost mora biti beton ne samo trden ampak tudi gost, posebej v površinskem delu. Sveži beton moramo zavarovati predvsem pred:

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

Izparevanje vode iz betonske površine je odvisno predvsem od relativne vlage, temperature zraka in betona ter hitrosti vetra.



*Slika 7.a: Izparevanje vode v odvisnosti od temperature zraka, relativne vlažnosti, temperature betona in hitrosti vetra.*

Če take ukrepe prezremo ali ji začnemo prepozno izvajati se izgubi tisti del vode, ki je potreben za nadaljnjo hidratacijo cementa. Posledice so:

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

Ukrepi; možna je kombinacija več različnih ukrepov:

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

Pri nizkih temperaturah moramo paziti ne le na izgubo vode, ampak tudi na izgubo temperature. Kar najhitreje je treba beton prekriti s filcem.

Trajanje nege betona je treba podaljšati:

- pri betonu z zakasnelim vezanjem za čas zakasnelega vezanja
  - pri temperaturah, ko zmrzuje (pod 0°C) za čas zmrzovanja
  - pri elementih, kjer se zahteva posebna sposobnost, v dogovoru z inženirjem.
-



*Slika 7.b: Nega z sredstvom za nego betona*

## 8 LASTNE PREISKAVE

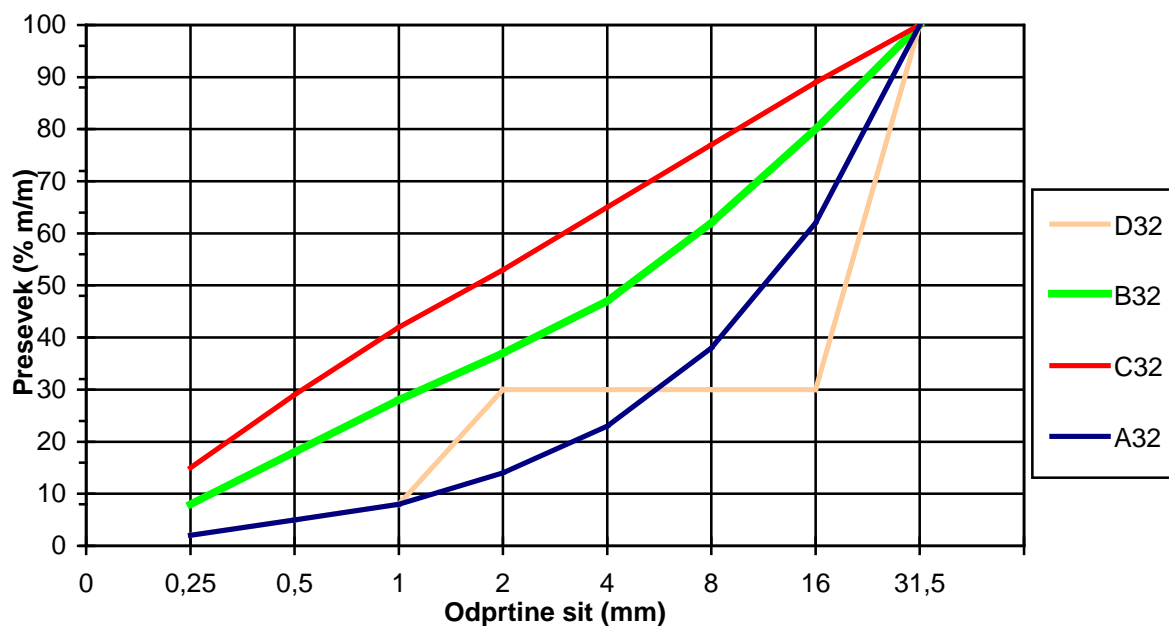
### 8.1 UVOD

V okviru eksperimentalnega dela naloge smo preverili odpornost površine različnih betonov proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Preiskovali smo samozgoščevalne in vibrirane betone z različnim deležem por. Pri vseh mešanicah smo preverili tudi tlačno trdnosti betona in hitrost prehoda ultrazvočnih valov skozi preizkušane.

### 8.2 MATERIALI

#### 8.2.1 AGREGAT

Za izdelavo samozgoščevalnih in vibriranih betonov smo uporabili drobljen agregat. Uporabili smo drobljen apnenčev agregat z razmeroma slabo zrnastno sestavo. Zrnastno sestavo frakcije 0/4 iz ekonomskega vidika nismo korigirali z dodajanjem mivke, saj bi bilo to predrago, temveč z dodatkom drobnega agregata frakcije 0/2.



Slika 8.2.1: Priporočene mejne krivulje zrnastosti za mešanico agregata 0/16 mm

Predhodne preiskave na mešanicah samozgoščevalnih betonov so pokazale, da standardna mejna zrnastostna krivulja B16 (preglednica 8.2.1) predstavlja ustrezno izhodišče za optimalno zrnastostno sestavo drobljenega agregata za samozgoščevalne betone ob istočasno nekoliko večjem deležu finih delcev. Zato smo za izdelavo samozgoščevalnega betona izbrali naslednjo kombinacijo frakcij: 55% 0/4, 18% 4/8 in 27% 8/16.

Razmerje med grobim in drobnim agregatom v samozgoščevalnem betonu je odvisno od izbranega postopka projektiranja sveže betonske mešanice. Izbrali smo postopek, ki ga podajata Okamura in Ozawa. Ker je pri tem postopku prostornina drobnega agregata enaka 40% prostornine malte in prostornina grobega agregata približno enaka 50% prostornine grobozrnatega agregata v zbitem stanju, je torej njuno medsebojno razmerje relativno natančno določeno že s samim postopkom projektiranja.

### **Agregat za vibriran beton**

Za mešanice vibriranega betona smo prav tako kot za samozgoščevalni beton uporabili drobljen agregat iz istega nahajališča. Kombinacije frakcij so bile enake kot pri samozgoščevalnem betonu: 55 % 0/4, 18% 4/8 in 27% 8/16.

### **8.2.2 CEMENT**

Kot glavno vezivo za samozgoščevalni beton smo uporabili portland cement CEM II/A-S 42R. To je portlandski cement z dodatkom žindre (S), trdnostnega razreda 42,5, z visoko zgodnjo trdnostjo (R). Njegove kemijske in fizikalne lastnosti so podane v preglednici 8.2.2.a, njegove lastnosti glede na standard SIST EN 197-1 pa v preglednici 8.2.2.b.

<b>KEMIJSKA SESTAVA:</b>	
SiO <sub>2</sub>	22,05 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,47 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,63 %
CaO	60,59 %
MgO	2,72 %
Prosti CaO	0,91 %
SO <sub>3</sub>	2,43 %
Netopni HCl	0,31 %
Cl <sup>-</sup>	0,02 %
<b>FIZIKALNE LASTNOSTI:</b>	
Prostorninska masa (g/cm <sup>3</sup> )	3,08
Specifična površina (cm <sup>2</sup> /g)	3550
Tlačna trdnost pri 28 dneh (Mpa)	51,8

**Preglednica 8.2.2.a:** *Kemijska sestava in fizikalne lastnosti cementa CEM II/A-S 42,5R*

	<b>Zahteve standarda SIST EN 197-1</b>	<b>Dosežene povprečne vrednosti</b>
<b>KEMIJSKE ZAHTEVE:</b>		
Vsebnost sulfata (SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0 %	3,0 %
Vsebnost klorida	≤ 0,1 %	0,03 %
<b>MEHANSKE IN FIZIKALNE ZAHTEVE:</b>		
Zgodnja trdnost, 2 dneva	≥ 20,0 MPa	25 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5 ÷ 62,5 MPa	50 MPa
Čas začetka vezanja	≥ 60 minut	125 minut
Prostorninska odpornost	≤ 10 mm	1 mm

**Preglednica 8.2.2.b:** *Lastnosti cementa CEM II/A-S 42,5R, v skladu z zahtevami SIST  
 EN 197-1*

Cement CEM II/A-S 42,5R se uporablja za najzahtevnejše gradnje, kjer se zahtevajo visoke začetne trdnosti, za zmrzlinško odporne aerirane betone, brizgane betone, armirane in nearmirane ter prednapete betone, prefabricirane betonske izdelke.

### 8.2.3 DODANI PRAŠKASTI MATERIAL

Pri mešanicah samozgoščevalnega betona smo kot dodatni praškasti material uporabili apnenčevo kameno moko pridobljeno z odpraševanjem apnenčevega drobljenega kamenega agregata. Njena prostorninska masa je  $2,75 \text{ g/cm}^3$ .

Pri doziranju smo se skušali približati SIST 1026, ki priporoča mejne količina finih delcev v betonih do vključno C50/60, z največjim zrnom agregata med 16 mm in 63 mm, za stopnje izpostavljenosti XF (odpornost na zmrzovanje/tajanje) in XM (odpornost na abrazijo).

KOLIČINA CEMENTA C ( $\text{kg/m}^3$ )	NAJVEČJA PRIPOROČENA KOLIČINA FINIH DELCEV ( $\text{KG/M}^3$ )
< 300 kg	400
350 kg	450
> 350 kg	$450 + (C - 350)$

**Preglednica 8.2.3:** Največja priporočena količina finih delcev

### 8.2.4 VODA

Uporabili smo pitno vodo iz vodovoda.

### 8.2.5 KEMIJSKI DODATKI

V okviru preiskav sta bila oba kemijska dodatka (superplastifikator in aerant) produkta istega slovenskega proizvajalca, ki nam je zagotovil, da sta medsebojno kompatibilna.

---

### 8.2.5.1 Superplastifikator nove generacije

V okviru preiskav smo uporabljali specialen visoko učinkovit superplastifikator nove generacije slovenskega proizvajalca.

Superplastifikator je primeren za izdelavo prefabriciranih, gradbiščnih in transportnih betonov. Njegova uporaba omogoča:

- močno zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti betona,
- močno izboljšanje obdelavnosti betona ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode,
- mnogo počasnejši padec obdelavnosti betona s časom kot pri uporabi običajnih superplastifikatorjev.

Superplastifikator je posebej primeren za izdelavo SCC (Self-Compacting Concrete) – samozgoščevalnih / samogradljivih betonov, ob upoštevanju osnovnih načel za pripravo SCC betonov. Učinek je seveda odvisen od: vrste cementa, količine cementa, v/c razmerja, sestave agregata in dozacije superplastifikatorja.

Superplastifikator se absorbira na cementne delce in zaradi svoje prostorske strukture polimerne molekule omrežijo cementne delce in preprečijo njihovo združevanje. Absorpcija poteka postopno in dalj čase, zato je učinkovitost večja oz. čas obdelavnosti betonov pripravljenih z uporabljenim superplastifikatorjem daljši kot pri običajnih superplastifikatorjih. Gostota je  $1,09 \text{ g/cm}^3$ .

Doziranje je 0,2 - 1,5 % na maso cementa: odvisno od v/c razmerja in želene obdelavnosti betona, vrste in količine cementa in vrste betona (navaden, SCC)

Okvirne dozacije:

- 0,2 - 0,6 % na maso cementa: za normalne transportne betone z DC od  $350\text{-}400 \text{ kg/m}^3$ .
- 0,4 - 0,8 % na maso cementa: za SCC betone z DC od  $350\text{-}400 \text{ kg/m}^3$ .
- Višje dozacije so primerne za izdelavo visokotrdnih betonov z visokimi DC in dodatki elektrofilterskega pepela ali mikrosilike.
- Superplastifikator lahko dodajamo mešanici razredčenega z zamesno vodo ali še bolje, koncentriranega na že pripravljeno svežo betonsko mešanico nižje obdelavnosti. Dodajamo previdno! Priporočljiv minimalen čas mešanja je 60 sekund.

Uporabljen superplastifikator je zaradi visoke učinkovitosti in nizkih dozacij občutljivejši na spremembe v sestavi betona ( količina cementa, sestava agregata, v/c razmerje ).

---



Pri relativno visokih v/c razmerjih pri SCC betonih so trdnosti betonov višje kot pri normalnih betonih z enakimi v/c razmerjem. Razlog za to je dobro zgoščena in homogena struktura SCC betonov.

### 8.2.5.2 Aerant

Pri aeriranih mešanica samozgoščevalnega betona smo za uvajanje zračnih mehurčkov v svež beton uporabili aerant. Gre za tekočino rumeno-rjave barve z gostoto  $1,01 \text{ kg/dm}^3$ . Priporočena dozacija znaša  $0,02 - 0,30$  na maso cementa. Mešanica malte in betona smo ga dodajali razredčenega z delom zamesne vode v točno določenem trenutku mešanja.

## 8.3 PREISKAVE SAMOZGOŠČEVALNIH BETONOV

Preiskav na pastah in maltah nismo izvajali. Za izhodišče smo vzeli paste in malte, ki so že bile preizkušene v prejšnjih diplomskih nalogah.

Optimizirali smo aerirano mešanico samozgoščevalnega betona z 8% zračnih mikropor in mešanico brez aeranta, ki smo jo obravnavali kot referenčno mešanico.

Za ovrednotenje posebnih lastnosti aeriranih in neaeriranih samozgoščevalnih betonov v svežem stanju smo izbrali tri metode z naslednjimi kriteriji:

- **razlez z posedom:** razlez vzorca med 650 in 800 mm; čas  $T_{50}$  med 2 in 5 sekund, homogena površina razlitega vzorca;
- **iztekanje iz V-lijaka:** čas iztekanja med 6 in 12 sekund;
- **preiskava z porozimetrom:** za aerirane betone poroznost 8 – 10%

Preiskave v strjenem stanju:

- **tlačna trdnost** (že opisana v poglavju 4.3.1)
  - **preiskava z ultrazvokom**
  - **preiskus odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju**
-

## PREISKUS ODPORNOSTI POVRŠINE BETONA PROTI ZMRZOVANJU/TAJANJU

- 1. Načelo:** Odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju se ocenjuje z količino odluščenega materiala, ki se odlušči s površine po  $n$  ciklih izmeničnega zmrzovanja/tajanja. Odvisno od predvidenega delovanja okolja na preiskovani beton se preizkus izvaja na površini preizkušanca, ki je nasičena s pitno vodo ali z vodo, ki vsebuje soli za tajanje. Preiskovana površina je lahko rezana (potrebnih 25 ciklov) ali opažena (potrebnih 50 ciklov).
- 2. Oprema:** temperirana komora, prostor za hrambo preizkušancev s temperaturo  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  in relativno vlažnostjo  $(65\pm 5)\%$ , sušilnik z temperaturo  $(110\pm 10)^{\circ}\text{C}$  in tehtnica s točnostjo 0,1 g.
- 3. Priprava preizkušancev:** Velikost preiskovane površine mora biti večja od  $5.000\text{ mm}^2$ , vendar manjša od  $25.000\text{ mm}^2$ . Debelina preizkušanca naj znaša vsaj 50 mm.
- 4. Postopek:** Priprava na preizkus se začne pri starosti preizkušancev najmanj 28 dni in ne več kot 35 dni. Preizkušanci se hranijo 7 dni pri temperaturi  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  in relativni vlažnosti zraka  $(65\pm 5)\%$ , nato pa se na preiskovano površino postavi okvir, visok najmanj 15 mm. Spoj okvirja in preiskovane površine betona mora biti vodotesen. V okvir se nalije zmrzovalni medij (pitno vodo ali 3% raztopino NaCl) višine 3 mm do 5 mm. Višina zmrzovalnega medija se ohranja do začetka preizkusa. Tako pripravljen preizkušanec se hrani 7 dni pri temperaturi  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  in relativni vlažnosti zraka  $(65\pm 5)\%$ . Za preprečevanje izhlapevanja se lahko preizkušanec med temi sedmimi dnevi prekrije z folijo. Preskus obsega 25 ali 50 ciklov zmrzovanja/tajanja v temperirni komori. Posamezni cikel preskusa sestoji iz zmrzovanja pri temperaturi  $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , ki traja 16 do 18 ur, ter trajanja pri temperaturi  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , ki traja 6 do 8 ur. Temperirna komora mora doseči zahtevano temperaturo v največ 2 urah. Zrak mora v tem času stalno krožiti. V času prekinitvev preizkusa, na primer med prazniki, vikendi ali ob okvarah, je treba preizkušance hraniti pri temperaturi  $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Na vsakih  $5\pm 1$  ciklov se po postopku iz točke 5 določi količina odluščenega materiala (izguba mase) ter zamenja zmrzovalni medij.
- 5. Določanje količine odluščenega materiala:** Material, ki se je po vsakih  $5\pm 1$  ciklov zmrzovanja/tajanja odluščil s preiskovane površine preizkušanca, se zbere in filtrira na filterškem papirju (skupaj z slano raztopino). V sušilniku se pri temperaturi  $(110\pm 10)^{\circ}\text{C}$

posuši do stalne mase, ki se meri na 100 mg točno. Šteje se, da je masa stalna po 5 dneh sušenja ali če znaša sprememba po 24 urah manj kot 100 mg. Količino odluščenega materiala za vsakih  $5 \pm 1$  ciklov je treba zabeležiti v mg s točnostjo 0,1 mg. Rezultat meritev na preizkušancu je skupna količina odluščenega materiala po 25 ali 50 ciklih zmrzovanja/tajanja na površino, ki je bila med preizkusom v stiku z zmrzovalnim medijem (v  $\text{mg}/\text{mm}^2$ ).

Za mešanje betona smo uporabili protitočni laboratorijski mešalec kapacitete 50 litrov. Najprej smo na suho zamešali agregat, cement in apnenčevo moko in potem dodali dve tretjini vode. Na koncu smo dodali še preostanek vode s superlastifikatorjem in aerantom. Po končanem doziranju vseh materialov smo betonsko mešanico mešali še štiri minute.

Po končanem mešanju betonske mešanice smo v 15-ih do 20-ih minutah na mešanici svežega betona opravili vse zgoraj navedene preiskave in na podlagi dobljenih rezultatov mešanico sprejeli kot samozgoščevalni beton ali jo zavrnilo.

Vsako mešanico samozgoščevalnega betona smo vgradili v standardne kocke s stranico 150 mm za določitev tlačne trdnosti betona in v standardne kocke s stranico 100 mm za določitev odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju.

### 8.3.1 AERIRANI BETONI (LA)

Na podlagi ugotovitev drugih raziskovalcev smo projektiranje aerirane mešanice malte iz drobljenega agregata preskočili in prešli kar na mešanice betona. Mešanico betona smo projektirali na 10% zračnih por.

#### Receptura:

LA	
MATERIAL	kg/m <sup>3</sup>
<b>Cement</b>	<b>410</b>
<b>Moka</b>	<b>245</b>
<b>Voda</b>	<b>160</b>
<i>kontrola (v/c)</i>	<i>0,390</i>
<b>Agregat</b>	<b>1450</b>
<b>poroznost [%]</b>	<b>8,0</b>

---

### 8.3.1.1 Preiskave v svežem stanju:

Kot sem že omenil v prejšnjih poglavjih smo preskočili preiskave past in malt, saj smo za izhodišče vzeli preiskave drugih raziskovalcev in tako prešli kar na mešanice betona. Za preiskave samozgoščevalnega betona v svežem stanju in za nadalnje preiskave strjenega betona smo zamešali vsakokrat po 35 l betona. Uporabili smo frakcije agregata 0/2, 0/4, 4/8, 8/16 mm in apnenčevo moko kot dodatni praškasti material. Na podlagi prejšnjih raziskav smo določili začetno količino superplastifikatorja (0,62% na maso cementa) in aeranta (0,17% na maso cementa). Omenjena količina nam je dala prevelik delež por (preveč aeranta) in premajhen razlez (premalo superplastifikatorja), zato smo mešanico zavrgli. Pri naslednji mešanici smo povečali količino superplastifikatorja in zmanjšali količino aeranta. Pri 2. mešanici smo se odločili, da bomo za račun deleža por uporabljali računsko metodo (na podlagi mase betona), saj pri preiskavi z porozimetrom izgubimo 8 litrov mešanice. Pri dozaciji superplastifikatorja moramo biti zelo previdni, saj lahko že malo preveč tega dodatka povzroči segregacijo betona (mešanica LA4 nam je rahlo segregirala). Na podlagi preiskav sklepamo tudi, da prevelika dozacija superplastifikatorja zmanjša delovanje aeranta, saj se betonska mešanica preveč odzrača. Pri posameznih mešanicah smo na podlagi preiskav razleza s posedom ali iztekanja iz V-lijaka dodajali superplastifikator, vendar je zaradi časovnega parametra težko oceniti dejanski vpliv dodatnega superplastifikatorja (od prvega zamešanja ja včasih minilo tudi 45 minut). Pri prvih poskusnih mešanicah smo dobivali prevelik delež por tako, da smo morali količino aeranta bistveno zmanjšati. Na delež por lahko poleg vrste aeranta vpliva več drugih dejavnikov, kot so vrsta mešalca, cementa, dodanih praškastih delcev.... Pri nekaterih mešanicah smo izpustili preiskave, ki jih nismo potrebovali npr. čas iztekanja, če je bilo že pri razlezu jasno, da beton ne bo segregiral. Za beton z dovolj velikim razlezom smo morali uporabiti dovolj veliko količino superplastifikatorja, vendar pri preveliki količini tega dodatka beton segregira, zato smo morali biti previdni pri dozaciji. Za nadalnje preiskave strjenih betonov smo uporabili mešanici LA3 in LA9.

Mešanica št. (LA)	HP (količina - %)	AE (količina - %)	razlez (d)	t <sub>50</sub>	t <sub>i</sub>	p
<u>LA1 (1)</u>	0,62	0,17	66,0	6,3	7,3	13,3
<u>LA1 (2)</u>	0,64	0,17	58,0	6,7		
<u>LA1 (3)</u>	0,66	0,17	62,0	4,8		17,5
<u>LA2 (1)</u>	0,64	0,15	68,0	5,2	6,9	13,8
<u>LA2 (2)</u>	0,66	0,15	66,5	5,0		15,3
<u>LA2 (3)</u>	0,68	0,15	67,5	4,1		15,1
<u>LA2 (4)</u>	0,70	0,15	67,0	4,6		14,2
<u>LA2 (5)</u>	0,72	0,15	68,0	4,3		13,5
<u>LA2 (6)</u>	0,74	0,15	69,5	4,0		14,1
<u>LA3</u>	0,70	0,11	75,0	4,2	>6,0	10,5
<u>LA4</u>	0,70	0,115	77,0	4,5	11,1	7,2
<u>LA5</u>	0,70	0,11	77,0	4,4	11,0	7,2
<u>LA6</u>	0,68	0,11	76,0	3,9	8,3	9,0
<u>LA7</u>	0,66	0,11	75,5	3,9	9,1	7,8
<u>LA8</u>	0,64	0,11	75,5	3,8	8,2	9,5
<u>LA9</u>	0,62	0,11	73,0	4,1		10,9

*Preglednica 8.3.1.1.a: Lastnosti zamešanih LA mašanic.*

### 8.3.1.2 Preiskave strjenega betona

Za ovrednotenje lastnosti strjenega betona smo uporabili tri preiskave:

- tlačna trdnost
- preiskava z ultrazvokom
- odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju

Ker smo študirali vpliv nege preiskušancev na odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju smo izbrali štiri različne režime. Po 24-ih urah v kalupih pri temperaturi  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$  smo betonske kocke izpostavili še 27, 6, 2 ali 0 dnevni negi v hladni vodi s temperaturo  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , potem pa so kocke do starosti 28 dni odležavale v okolju z relativno vlažnostjo  $(75\pm 5)\%$  in temperaturo  $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ . To pomeni, da je hladna mokra nega betonskih kock trajala 28, 7, 3 ali 1 dan. Preiskave tlačnih trdnosti smo opravili le na betonskih kockah, ki so odležavale v hladni vodi do starosti 28 dni. Poroznost smo izračunali na podlagi izmerjene mase vzorcev svežega betona.

### **Preiskava tlačne trdnosti in ultrazvok:**

V preglednici 8.3.1.2.a je podana povprečna tlačna trdnost (s pripadajočim koeficientom variacije), na preizkušancih v obliki kocke z stranico 15 cm, ki so bili negovani v hladni vodi ( $15\pm 2$ )°C do starosti 28 dni. Preden smo določili tlačno trdnost posamezne betonske kocke smo na njej opravili še meritev časa prehoda ultrazvočnih valov skozi preizkušanec. Povprečen čas prehoda ultrazvoka za beton LA, s pripadajočim koeficientom variacije, je podan v preglednici 8.3.1.2.a.

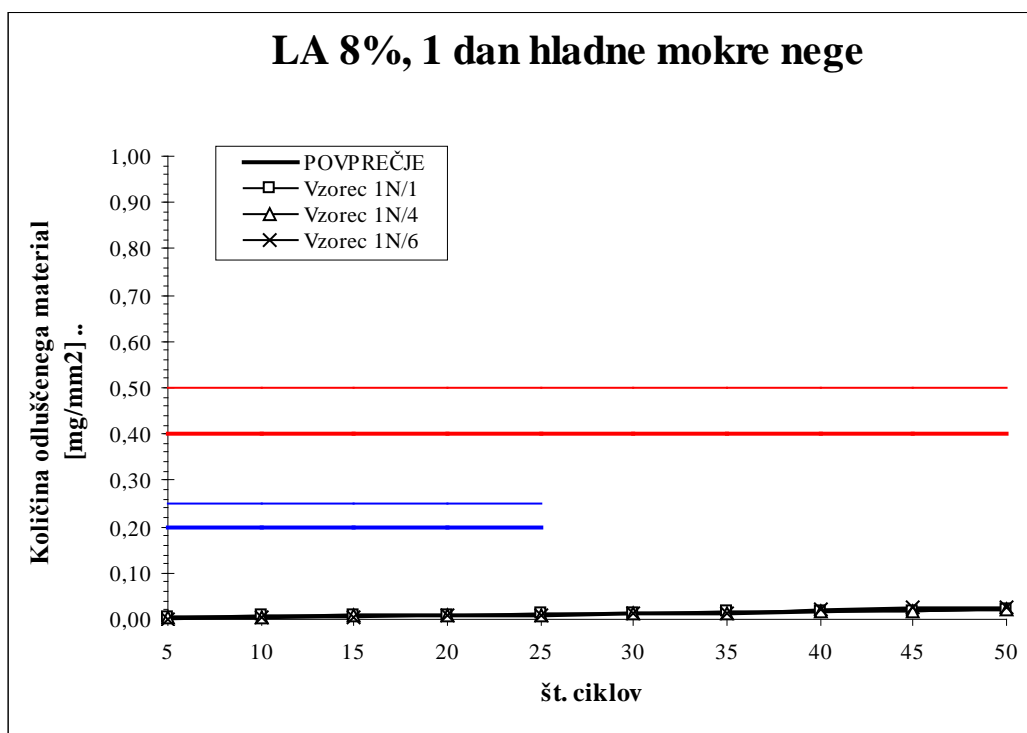
<b>Aeriran samozgoščevalni beton - LA</b>	
<b>LASTNOSTI STRJENEGA BETONA</b>	
tlačna trdnost	57,15
COV	1,90%
UZ ( $\mu$ s)	29,85
COV	1,00%

*Preglednica 8.3.1.2.a: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LA.*

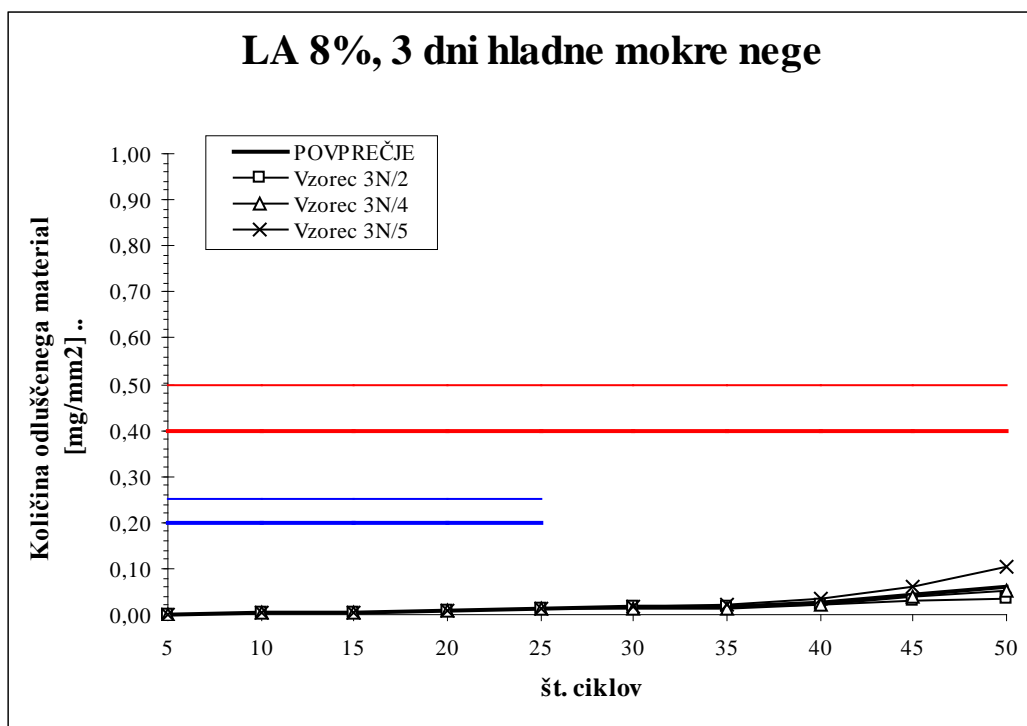
Odstopanje med posameznimi rezultati ni bilo veliko.

### **Preiskava zmrzilske odpornosti:**

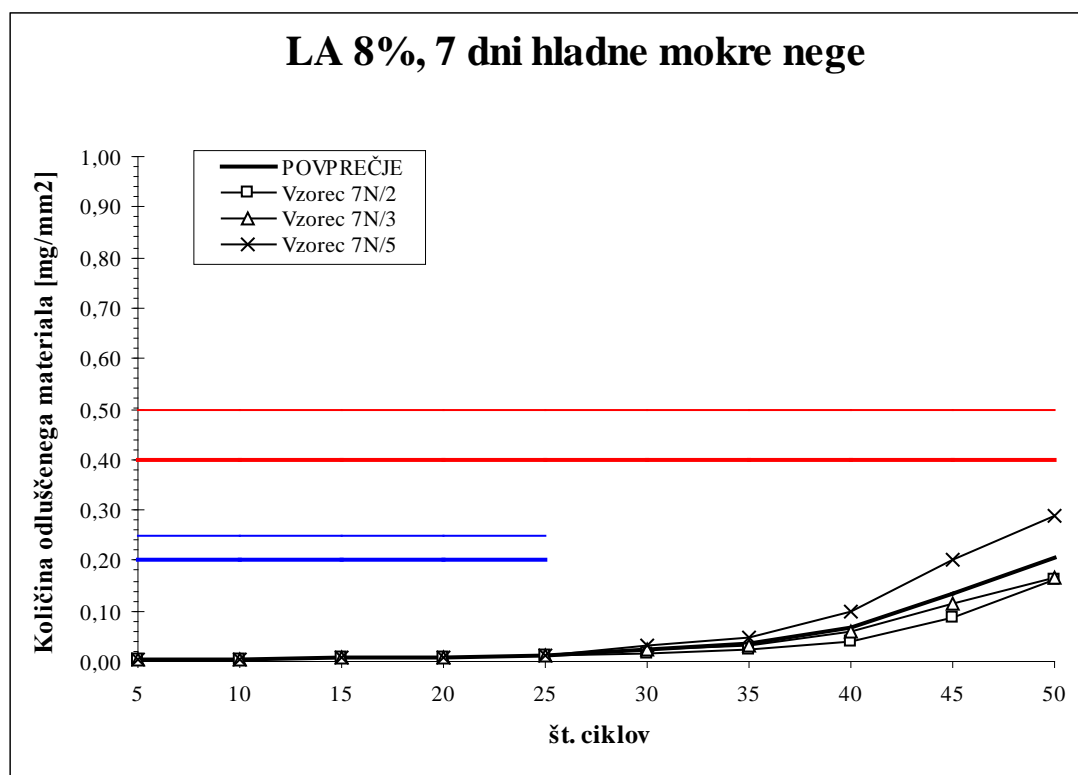
Za preiskavo odpornosti površine LA betona proti zmrzovanju/tajanju smo uporabili mešanici LA3 in LA9 (8% delež zračnih por). Rezultati preiskav so prikazani na slikah 8.3.1.2.b do 8.3.1.2.e.



Slika 8.3.1.2.b: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (1 dan hladne nege).

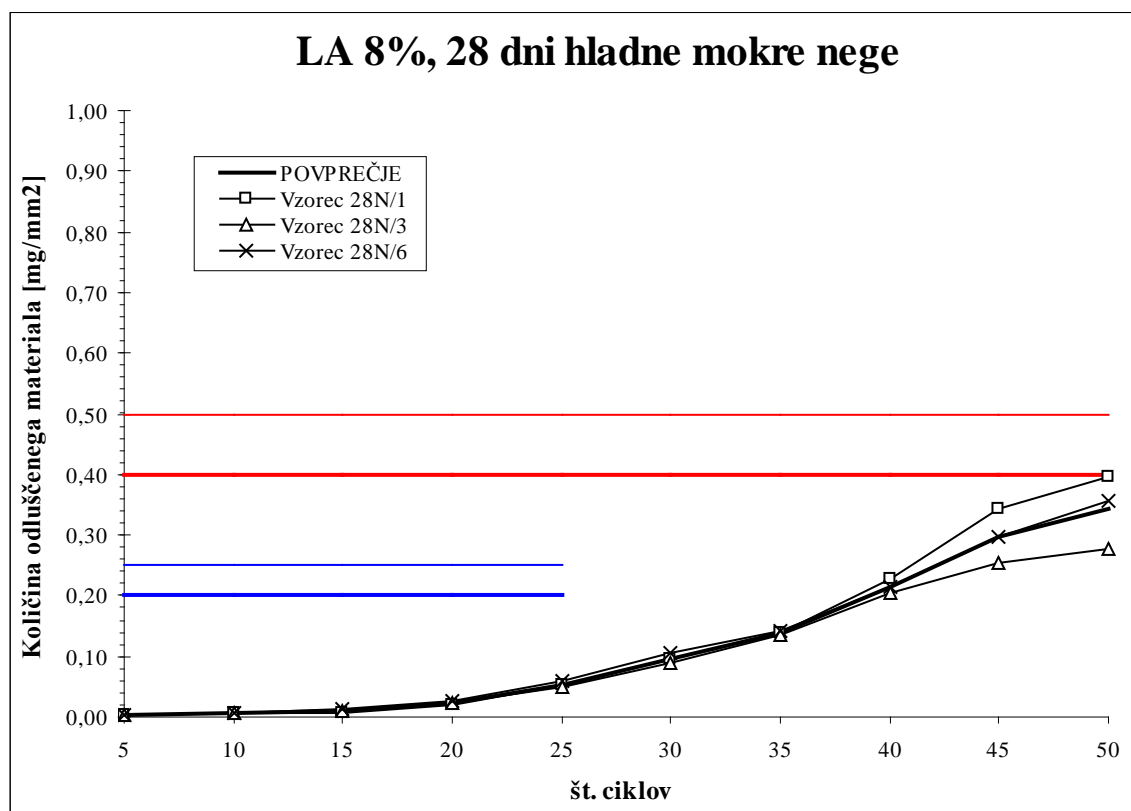


Slika 8.3.1.2.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (3 dni hladne nege).



*Slika 8.3.1.2.d: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (7 dni hladne nege).*





*Slika 8.3.1.2.e: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (28 dni hladne nege).*

Kot je razvidno iz rezultatov na slikah 8.3.1.2.a do 8.3.1.2.d smo dobili največje luščenje pri 28-dnevni mokri negi, nekoliko manjše (za 3%) pri 7-dnevni mokri negi, še manjše (za 3%) pri 3-dnevni mokri negi, pri 1-dnevni mokri negi pa je bilo luščenje površine betona skoraj zanemarljivo majhno. To pomeni, da so bili pogoji v okolju z relativno vlažnostjo ( $75\pm 5$ )% in temperaturi ( $20\pm 2$ )°C ugodnejši od pogojev mokre nege v vodi pri temperaturi ( $15\pm 2$ )°C, saj se je luščenje površine večalo z naraščanjem trajanja mokre nage v hladni vodi.

### 8.3.2 NEAERIRANI BETONI (LN)

Na podlagi ugotovitev drugih raziskovalcev smo projektiranje neaerirane mešanice malte iz drobljenega agregata preskočili in prešli kar na mešanice betona.

### Receptura:

LN	
MATERIAL	kg/m <sup>3</sup>
<b>cement</b>	<b>435</b>
<b>moka</b>	<b>265</b>
<b>voda</b>	<b>170</b>
<i>kontrola (v/c)</i>	<i>0,390</i>
<b>agregat</b>	<b>1550</b>
<i>p [%]</i>	<i>1,9</i>

#### 8.3.2.1 Preiskave v svežem stanju:

Neaerirano mešanico samozgoščevalnega betona smo zamešali, da jo uporabimo za izdelavo primerjalnih vzorcev aeriranemu betonu. Za prvo mešanico smo uporabili enako količino superplastifikatorja (0,62%) kot za končno (stabilno) mešanico aeriranega betona. Ker smo dobili rahlo premajhen razlez smo povečali količino superplastifikatorja za 0,02% in beton vgradili v kalupe.

Mešanica št. (LN)	SP (količina - %)	razlez (d)	t <sub>50</sub>	t <sub>i</sub>	p
LN2	0,64	71,0	5,8	15,2	

*Preglednica 8.3.2.1.a: Lastnosti sveže mešanice LN.*

#### 8.3.2.2 Preiskave strjenega betona

Za ovrednotenje lastnosti strjenega betona smo uporabili tri preiskave:

- tlačna trdnost
  - preiskava z ultrazvokom
  - zmrzljinska odpornost
-

### **Preiskava tlačne trdnosti in ultrazvoka:**

V preglednici 8.3.2.2.a je podana povprečna tlačna trdnost (s pripadajočim koeficientom variacije) na preizkušancih, ki so bili 28 dni izpostavljeni hladni mokri negi pri  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Tlačne trdnosti so bile izmerjene na kockah z robom 15 cm, pri starosti 28 dni. Tik preden smo določili tlačno trdnost posamezne betonske kocke, smo na njej izmerili tudi čas prehoda ultrazvočnih valov skozi praiskušanec. Povprečen čas prehoda ultrazvoka za beton LA, s pripadajočim koeficientom variacije, je podan v preglednici 8.3.2.2.a.

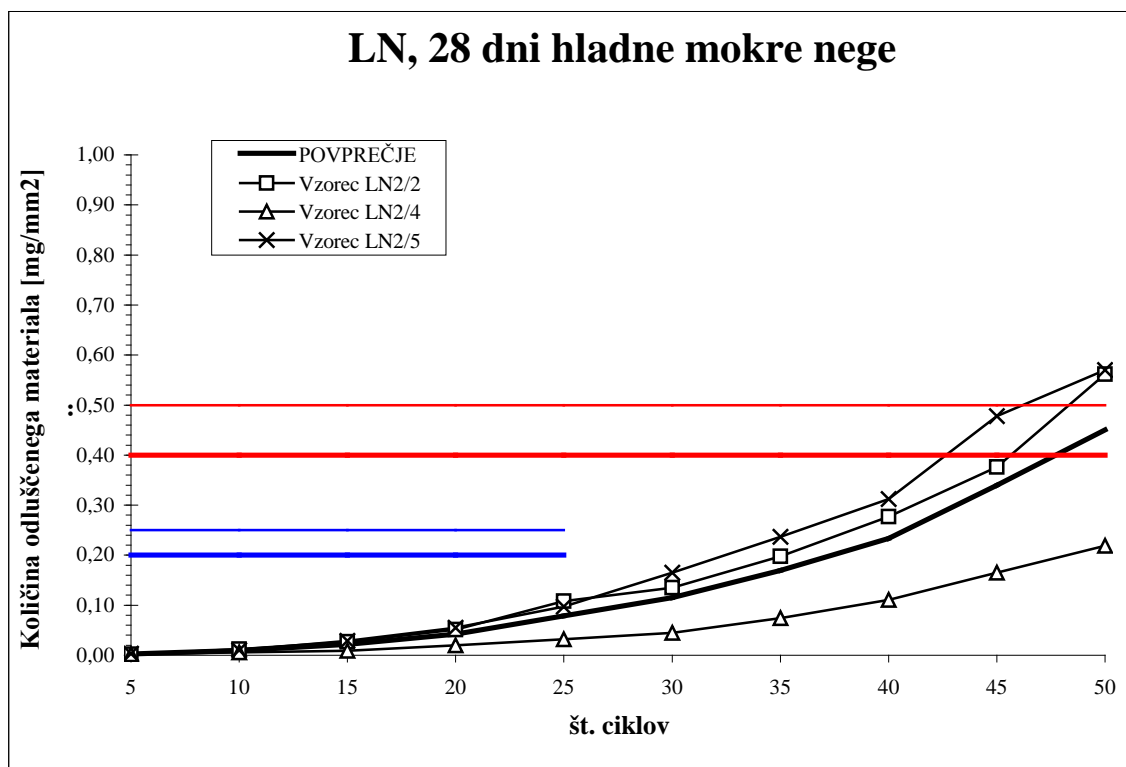
<b>Neeriran vibriran beton - LN</b>	
<b>LASTNOSTI OTRDELEGA BETONA</b>	
tlačna trdnost	63,0
COV	1,30%
UZ ( $\mu\text{s}$ )	28,8
COV	0,60%

*Preglednica 8.3.2.2.a: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LN.*

### **Preiskava zmrzlinke odpornosti:**

Tudi preizkušanci, na katerih smo določali odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju, so bili 28-dni izpostavljeni mokri negi pri temperaturi  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Kot smo pričakovali, nam je dala preiskava zmrzlinke odpornosti neaeriranega samozgoščevalnega betona (2% poroznost) slabše rezultate kot preiskava zmrzlinke odpornosti aeriranega samozgoščevalnega betona (slika 8.3.2.2.b). Funkcija zaprtih mikropor je, da prekinejo mrežo kapilar in ustvarijo mesto v strukturi betona, kjer se lahko hidravlični pritisk, ki nastaja pri prehodu vode v led, sprosti.

Povprečje preiskav treh vzorcev je bilo po 50 ciklih nad dovoljeno mejo kot jo podaja SIST 1026. Prav tako pa so bili rezultati preiskave dveh od treh vzorcev nad mejo za posamezno preiskavo.



*Slika 8.3.2.2.b: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LN (28 dni hladne mokre nege).*

## 8.4 PREISKAVE VIBRIRANIH BETONOV

Sestavo mešanic vibriranih betonov smo določili na podlagi zahteve po primerljivosti sestave s samozgoščevalnimi mešanicami (enaka količina cementa, enako v/c razmerje, enaka poroznost). Za ovrednotenje lastnosti črpnih betonov smo izbrali metode preiskav:

- posed stožca
- razlez
- poroznost

Pri vibriranih betonih smo preskušali varianto z in brez dodatka apnenčeve moke, v obeh primerih pa še z dodatkom aeranta ali brez dodatka aeranta.

## 8.4.1 PREISKAVE VIBRIRANIH BETONOV BREZ DODATKA MOKE

### 8.4.1.1 AERIRANI (LVA)

Pri projektiranju betonske mešanice LVA smo kot izhodišče vzeli mešanico LA, le da smo izključili apnenčevo moko in jo nadomestili z agregatom, istočasno pa smo zelo zmanjšali delež superplastifikatorja, saj smo želeli dobiti primerjalno mešanico, ki se vgrajuje z vibratorjem in ima tekočo konsistenco.

#### Receptura:

LVA	
MATERIAL	kg/m <sup>3</sup>
<b>cement</b>	<b>410</b>
<b>moka</b>	<b>0</b>
<b>voda</b>	<b>160</b>
<i>kontrola (v/c)</i>	<i>0,390</i>
<b>agregat</b>	<b>1700</b>
<i>p [%]</i>	<i>7,8</i>

#### PREISKAVE V SVEŽEM STANJU:

Mešanica št. (LV)	HP (količina - %)	AE (količina - %)	$\Delta h$	$d_1$	$d_2$	$p_{rač}$
LVA1 (1)	0,20	0,02	4,0	27,5	27,5	
LVA1 (2)	0,24	0,02	4,0	28,5	27,5	
LVA1 (3)	0,30	0,02	5,5	31,5	31,5	
LVA1 (4)	0,38	0,02	8,0	37,5	37,0	
LVA1 (5)	0,46	0,02	12,5	42,0	42,0	6,7
LVA2 (1)	0,46	0,02	23,0	55,0	52,0	6,4
LVA3	0,36	0,04	23,0	53,0	53,0	7,5
LVA4	0,28	0,05	16,5	45,0	45,5	

#### *Preglednica 8.4.1.1.a: Lastnosti sveže mešanice LVA.*

Pri mešanici vibriranega aeriranega betona brez dodatka moke smo na podlagi prejšnjih raziskav začeli z dokaj majhno dozajico superplastifikatorja (0,20% na maso cementa), vendar je bil posed občutno premajhen (4 cm), zato smo morali količino superplastifikatorja povečati

na končnih 0,28% (na maso cementa). Poroznost je bila na začetku premajhna, zato smo morali količino aeranta z začetnih 0,02 % (na maso cementa) povečati na končnih 0,05 % (na maso cementa).

### **PREISKAVE V STRJENEM STANJU:**

Za ovrednotenje lastnosti strjenega betona smo uporabili tri preiskave:

- tlačna trdnost
- preiskava z ultrazvokom
- zmrzljinska odpornost

### **Preiskave tlačne trdnosti in ultrazvoka:**

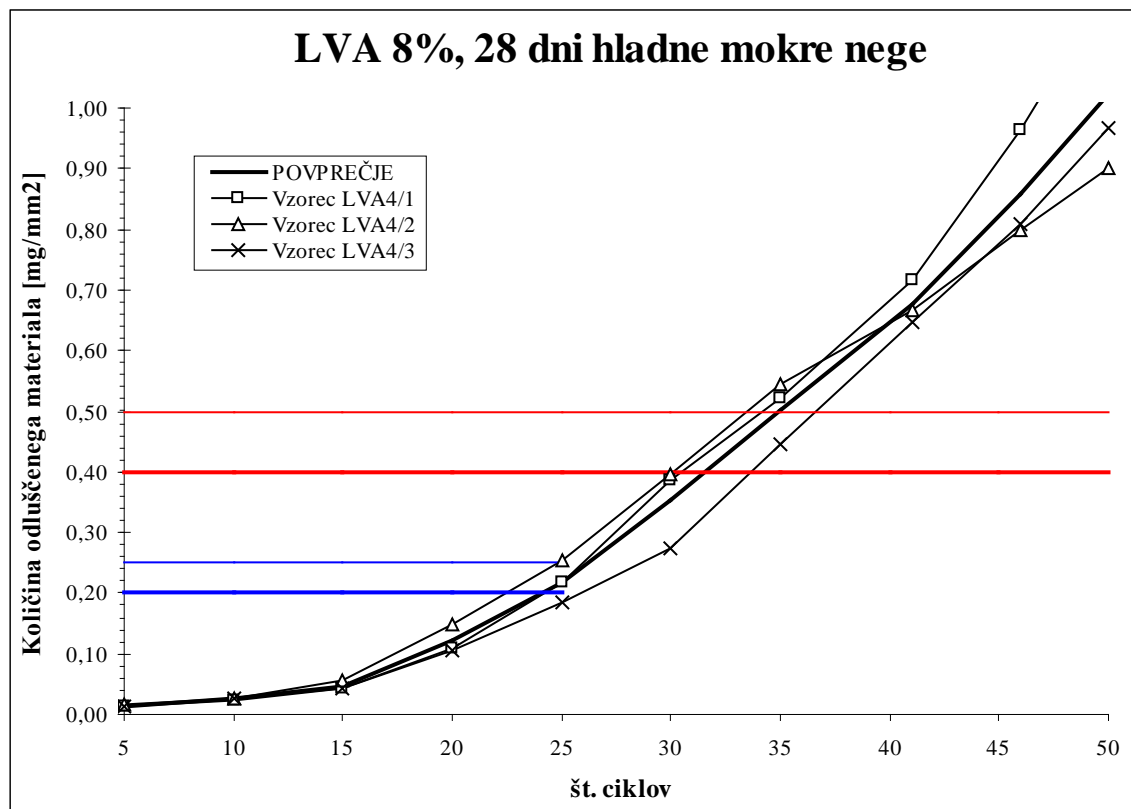
V preglednici 8.4.1.1.b je podana povprečna tlačna trdnost (s pripadajočim koeficientom variacije) na preizkušancih, ki so bili 28 dni izpostavljeni hladni negi pri temperaturi  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Tlačne trdnosti so bile izmerjene na kockah z robom 15 cm pri starosti 28 dni. Preden smo določili tlačno trdnost posamezne betonske kocke smo na njej opravili še meritev časa prehoda ultrazvočnih valov skozi preizkušanece. Povprečen čas prehoda ultrazvoka za beton LA, s pripadajočim koeficientom variacije, je podan v preglednici 8.4.1.1.b.

<b>Aeriran vibriran beton - LVA</b>	
<b>LASTNOSTI STRJENEGA BETONA</b>	
tlačna trdnost	47,9
COV	2,20%
UZ ( $\mu\text{s}$ )	30,6
COV	0,60%

*Preglednica 8.4.1.1.b: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LVA.*

---

### Preiskava zmrzilske odpornosti:



*Slika 8.4.1.1.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LVA (28 dni hladne nege).*

Kot je razvidno iz slike 8.4.1.1.c, ki prikazuje količino odlučenega materiala za beton LVA (8% poroznost), je dovoljena meja po SIST 1026 prekoračena že po 25-ih ciklih, po 50-ih ciklih pa so dobljeni rezultati skoraj za 100 % nad dovoljeno mejo.

*Opomba: Pri vzorcu LVA4/1 nam je pri preiskavi zmrzilske odpornosti voda pri 30 ciklih enostavno stekla skozi vzorec betona, tako da nismo mogli nadaljevati s preiskavo. Pri vzorcu LVA4/ smo tako po 30 ciklu predpostavili nadaljni razvoj zmrzilske odpornosti.*

#### 8.4.1.2 NEAERIRANI (LVN)

Pri projektiranju betonske mešanice LVN smo kot izhodišče vzeli mešanico LN, le da smo izključili apnenčevo moko in jo nadomestili z agregatom, istočasno pa smo zelo zmanjšali delež superplastifikatorja, saj smo želeli dobiti primerjalno mešanico, ki se vgrajuje z vibratorjem in ima tekočo konsistenco.

#### Receptura:

LVN	
MATERIAL	kg/m <sup>3</sup>
<b>cement</b>	<b>430</b>
<b>moka</b>	<b>0</b>
<b>voda</b>	<b>170</b>
<i>kontrola (v/c)</i>	<i>0,390</i>
<b>agregat</b>	<b>1785</b>
<i>p [%]</i>	<i>3,1</i>

#### PREISKAVE V SVEŽEM STANJU:

Mešanica št. (LVN)	HP (količina - %)	$\Delta h$	$d_1$	$d_2$	$p_{rač}$
LVN1 (1)	0,28	9,5	38,0	39,0	2,4
LVN1 (2)	0,32	8	37,0	37,0	2,5
LVN2	0,33	13,5	44,0	43,0	

#### *Preglednica 8.4.1.2.a: Lastnosti sveže mešanice LVN.*

Pri količini dodanega superplastifikatorja smo izhajali iz aerirane mešanice betona, vendar nam preiskava razleza in poseda ni dala zadovoljivih rezultatov (premajhen razlez in posed), zato smo morali povečati količino dodanega superplastifikatorja z 0,28 % na 0,33 % (na maso cementa).

#### PREISKAVE V STRJENEM STANJU:

Za ovrednotenje lastnosti strjenega betona smo uporabili tri preiskave:

- tlačna trdnost



- preiskava z ultrazvokom
- zmrzljinska odpornost

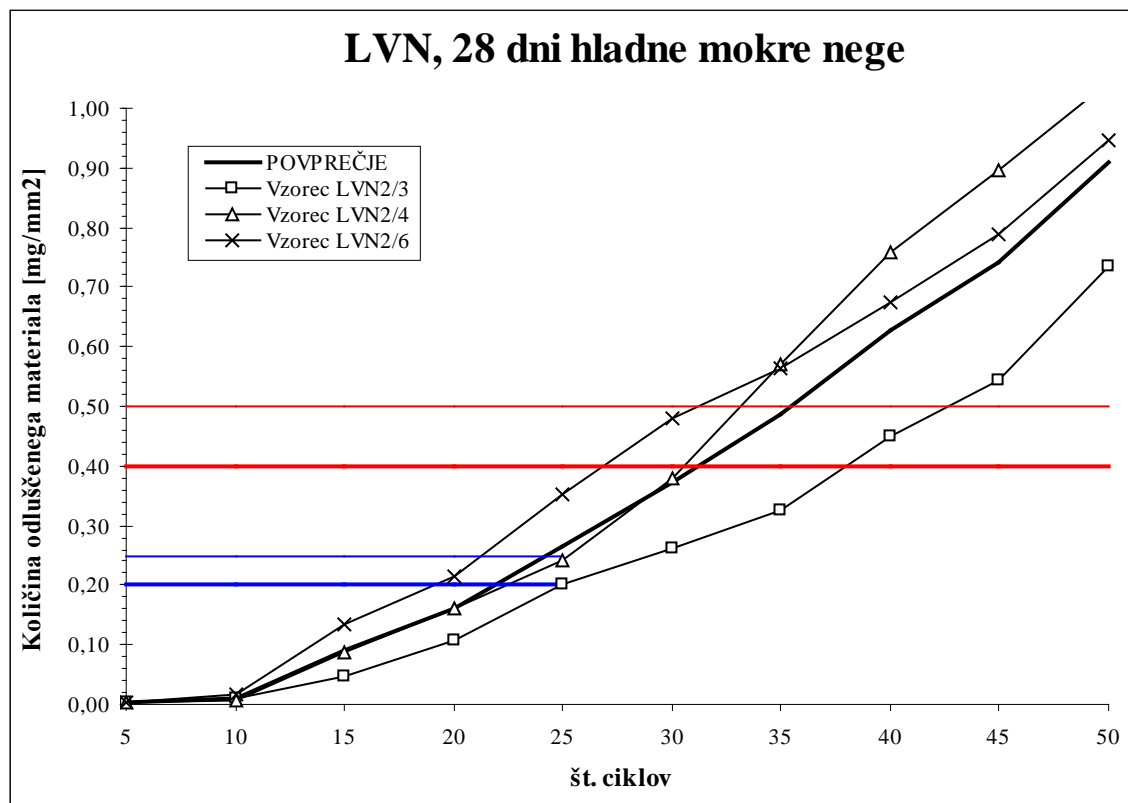
#### **Preiskave tlačne trdnosti in ultrazvoka:**

V preglednici 8.4.1.2.b je podana povprečna tlačna trdnost, (skupaj s pripadajočim koeficientom variacije) na preizkušancih, ki so bili 28 dni izpostavljeni hladni negi pri temperaturi  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Tlačne trdnosti so bile izmerjene na kockah z robom 15 cm pri starosti 28 dni. Preden smo določili tlačno trdnost posamezne betonske kocke smo na njej opravili še meritev časa prehoda ultrazvočnih valov skozi preizkušanec. Povprečen čas prehoda ultrazvoka za beton LA, s pripadajočim koeficientom variacije, je podan v preglednici 8.4.1.2.b.

<b>Neeriran vibriran beton - LVN</b>	
<b>LASTNOSTI OTRDELEGA BETONA</b>	
tlačna trdnost	63,0
COV	1,30%
UZ ( $\mu\text{s}$ )	28,8
COV	0,60%

***Preglednica 8.4.1.2.b: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LVN.***

**Preiskava zmrzilske odpornosti:**



*Slika 8.4.1.2.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LVN (28 dni hladne nege).*

Kot je razvidno iz slike 8.4.1.2.c, ki prikazuje količino odluščenega materiala za beton LVN (2% poroznost), je dovoljena meja po SIST 1026 prekoračena že po 25-ih ciklih, po 50-ih ciklih pa so dobljeni rezultati več kot 120 % nad dovoljeno mejo.

*Opomba: Pri vzorcu LVN2/4 nam je pri preiskavi zmrzilske odpornosti voda pri 45 ciklih enostavno stekla čez vzorec betona, tako da nismo mogli nadaljevati s preiskavo. Pri vzorcu LVN2/4 smo tako po 45 ciklu predpostavili nadaljni razvoj zmrzilske odpornosti.*

## 8.4.2 PREISKAVE VIBRIRANIH BETONOV Z DODATKOM MOKE

### 8.4.2.1 AERIRANI (LVMA)

Pri projektiranju betonske mešanice LVMA smo kot izhodišče vzeli mešanico LA. Delež superplastifikatorja smo zmanjšali, saj smo želeli dobiti primerjalno mešanico, ki se vgrajuje z vibratorjem in ima tekočo konsistenco.

#### Receptura:

LVMA	
MATERIAL	kg/m <sup>3</sup>
cement	430
moka	260
voda	165
kontrola (v/c)	0,390
agregat	1520
p [%]	3,5

#### PREISKAVE V SVEŽEM STANJU:

Mešanica št. (LVMA)	SP (količina - %)	AE (količina - %)	$\Delta h$	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	p <sub>rač</sub>
LVMA1 (1)	0,28	0,05				
LVMA1 (2)	0,36	0,05	9,5	38,5	39,0	5,6
LVMA2 (1)	0,34	0,06	11,5	39,0	39,0	4,2
LVMA2 (2)	0,40	0,06		42,0	42,0	7,2
LVMA3	0,41	0,065	22,5	50,5	50,5	4,6

*Preglednica 8.4.2.1.a: Lastnosti sveže mešanice LVMA.*

#### PREISKAVE V STRJENEM STANJU:

##### Preiskave tlačne trdnosti in ultrazvoka:

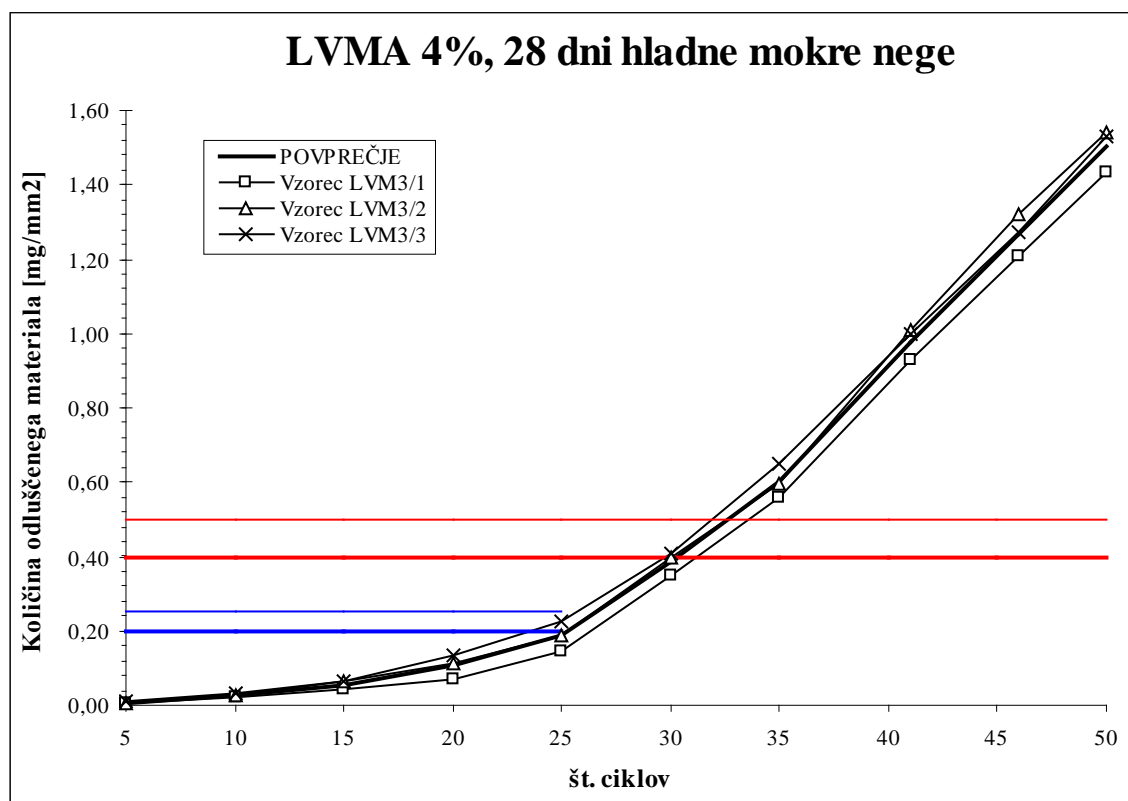
V preglednici 8.4.2.1.b so podane povprečne tlačne trdnosti, izmerjene na preizkušancih, ki so bili 28 dni izpostavljeni hladni mokri negi pri (15±2)°C. Tlačne trdnosti so bile izmerjene na

kockah z robom 15 cm, pri starosti 28 dni. Tik preden smo določili tlačno trdnost posamezne betonske kocke, smo na njej izmerili tudi čas prehoda ultrazvočnih valov skozi preizkušanec. Povprečen čas prehoda ultrazvoka za beton LVMA, s pripadajočim koeficientom variacije, je podan v preglednici 8.4.2.1.b.

<b>Aeriran vibriran beton z dodatkom moke - LVMA</b>	
<b>LASTNOSTI OTRDELEGA BETONA</b>	
tlačna trdnost	64,6
COV	0,80%
UZ ( $\mu$ s)	29,8
COV	0,60%

*Preglednica 8.4.2.1.b: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LVMA.*

### **Preiskava zmrzljinske odpornosti:**



*Slika 8.4.2.1.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LVMA (28 dni hladne nege).*

Kot je razvidno iz slike 8.4.2.1.c, ki prikazuje količino odluščenega materiala za beton LVMA, dovoljeno luščenje materiala po SIST 1026 po 25-ih ciklih še ni preseženo, po 50-ih ciklih pa so dobljeni rezultati tudi več kot 200 % nad dovoljeno mejo. Količino odluščenega materiala, ki je dovoljena pri 50-ih ciklih dosežemo že pri 30-ih ciklih.

#### 8.4.2.2 NEAERIRANI (LVMN)

Pri projektiranju betonske mešanice LVMN smo kot izhodišče vzeli mešanico LN. Delež superplastifikatorja smo zmanjšali, saj smo želeli dobiti primerjalno mešanico, ki se vgrajuje z vibratorjem in ima tekočo konsistenco.

#### Receptura:

LVMN	
MATERIAL	kg/m <sup>3</sup>
cement	430
moka	260
voda	170
kontrola (v/c)	0,390
agregat	1535
p [%]	2,7

#### PREISKAVE V SVEŽEM STANJU:

Mešanica št. (LVMA)	HP (količina - %)	$\Delta h$	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	p <sub>rač</sub>
LVMN1	0,45		60,0	58,0	

*Preglednica 8.4.2.2.a: Lastnosti sveže mešanice LVMN.*

#### PREISKAVE V STRJENEM STANJU:

##### Preiskave tlačne trdnosti in ultrazvoka:

V preglednici 8.4.2.2.b je podana tlačna trdnost (skupaj z koeficientom variacije) izmerjena na preizkušancih, ki so bili 28 dni izpostavljeni hladni mokri negi pri  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Tlačne trdnosti so bile izmerjene na kockah z robom 15 cm, pri starosti 28 dni. Tik preden smo določili tlačno trdnost posamezne betonske kocke, smo na njej izmerili tudi čas prehoda

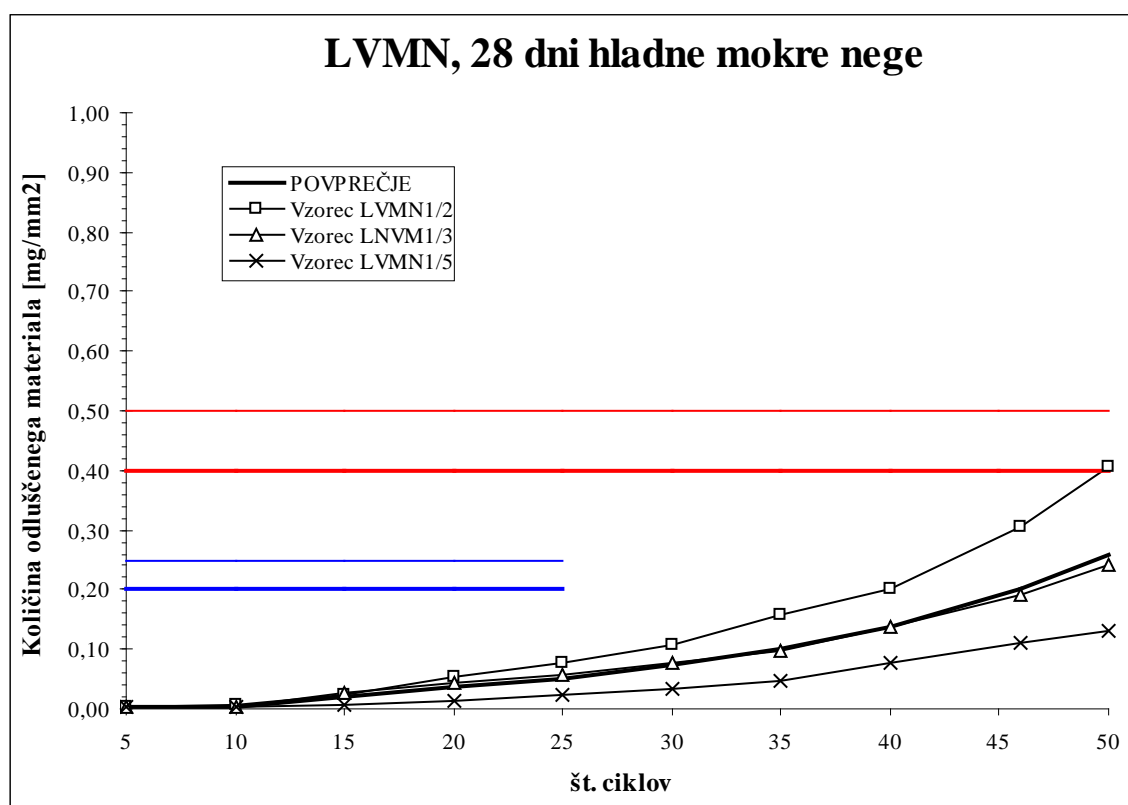
---

ultrazvočnih valov skozi preizkušanece. Povprečen čas prehoda ultrazvoka za beton LVMA, s pripadajočim koeficientom variacije je podan v preglednici 8.4.2.2.b.

<b>Neaeriran vibriran beton z dodatkom moke - LVMN</b>	
<b>LASTNOSTI OTRDELEGA BETONA</b>	
tlačna trdnost	65,1
COV	1,70%
UZ ( $\mu$ s)	28,8
COV	0,50%

*Preglednica 8.4.2.2.b: Tlačna trdnost in čas prehoda ultrazvoka za beton LVMN.*

### Preiskava zmrzilske odpornosti:



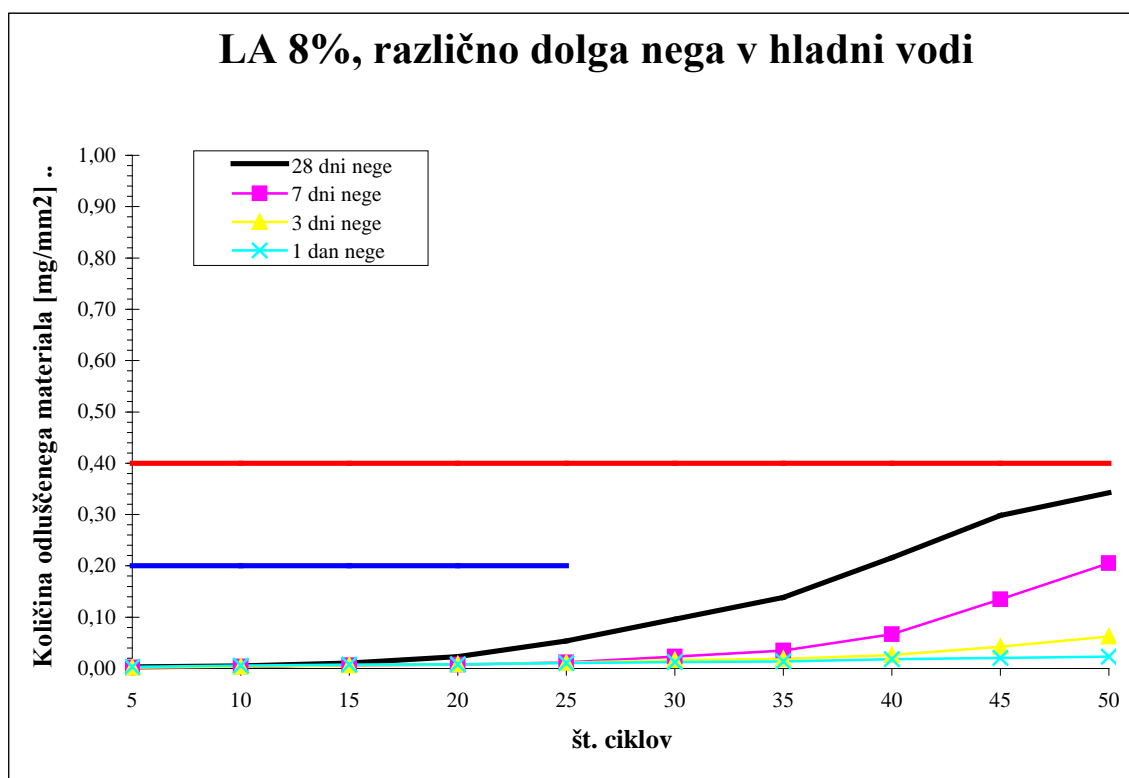
*Slika 8.4.2.2.c: Preiskava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LVMN (28 dni hladne nege).*

Kot je razvidno iz slike 8.4.2.2.c, ki prikazuje količino odluščenega materiala za beton LVMA, je luščenje materiala po SIST 1026 po 25-ih in po 50-ih ciklih v mejah dovoljenega.



## 9. PRIMERJAVA DOBLJENIH REZULTATOV

### 9.1 ZMRZLINSKA ODPORNOST BETONA Z RAZLIČNO DOLGO NEGO



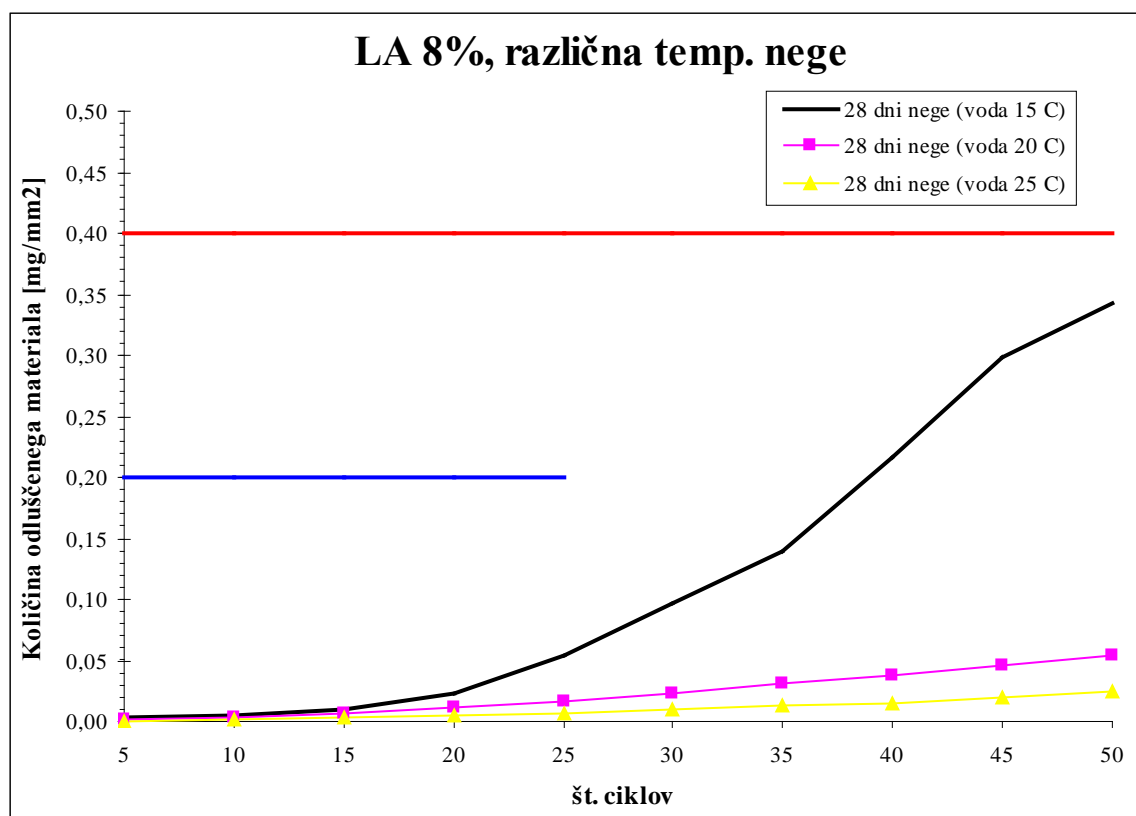
*Slika 9.1.a: Primerjava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (8%).*

Kot vidimo na sliki 9.1.a nam količina odluščenega materiala po SIST 1026 narašča s številom dni nege v hladni vodi, čeprav smo pričakovali, da bo mokra nega pozitivno vplivala na odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju.

MERITVE TEMPERATURE IN VLAGE			
DATUM	LAB. VODA	KOMORA	
	temp.	temp.	vlaga (%)
nov.05	15,7	20,4	73 - 78
dec.05	16,2		
dec.05	14,7	20,8	74 - 77

Preglednica 9.1.b: Meritve temperature in vlage v laboratorijski vodi in v komori.

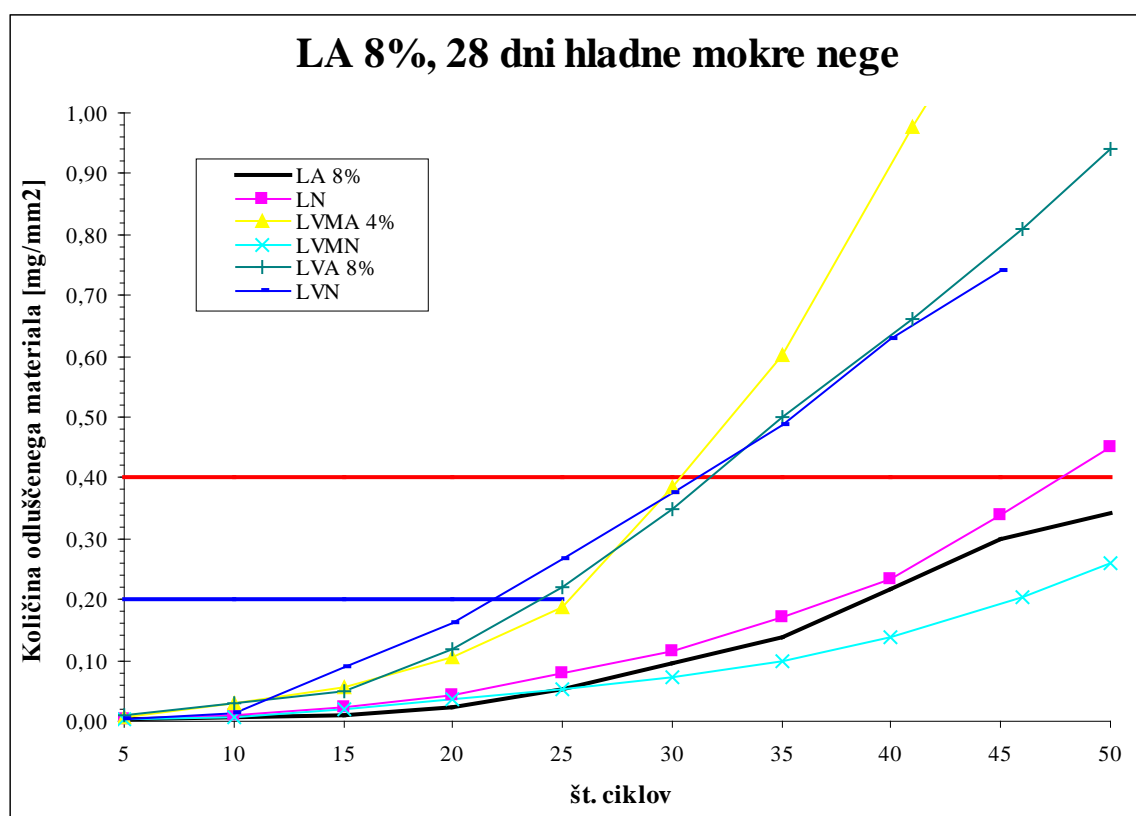
## 8.2 ZMRZLINSKA ODPORNOST BETONA Z NEGO PRI RAZLIČNIH TEMPERATURAH



Slika 9.2: Primerjava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju mešanice LA (8%).

Kot vidimo na sliki 9.2 temperatura vode, v kateri negujemo betonske vzorce močno vpliva na odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju. Temperatura vode pri mojih preiskavah je bila  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , kot primerjavo pa smo vzeli preiskave iz diplomskega dela Barbare Pezdirc, kjer je bila temperatura vode v enem primeru  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , v drugem pa  $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Najbolj ugodna temperatura za odpornost površina betona je bila  $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , kjer je bilo luščenje površine betona po 50-ih ciklih le 5% dovoljene meje po SIST 1026, pri temperaturi  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  je luščenje betona po 50-ih ciklih doseglo 12,5% dovoljene meje, pri temperaturi  $(15\pm 2)^{\circ}\text{C}$  pa 85% dovoljene meje. Zaključimo lahko, da višja temperatura vode ugodno vpliva na odpornost površine betona na zmrzovanje/tajanje.

### 9.3 ZMRZLINSKA ODPORNOST VSEH VZORCEV BETONA



Slika 9.3.a: Primerjava odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju vseh preskušanih vzorcev.

Na sliki 9.3.a vidimo odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju vseh preskušanih vzorcev betona. Po 25-ih ciklih zahteve standarda SIST 1026, ki dovoljuje povprečno količino odluščenega materiala  $0,20 \text{ mg/mm}^2$  izpolnjujejo vzorci LVMN (25% dovoljene vrednosti), LA (25%), LN (40%) ter LVMA (95%) in zaključimo lahko, da je površina teh štirih vrst betona odporna proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Vzorca LVA (10% nad dovoljeno mejo) in LVN (35% nad dovoljeno mejo) ne izpolnjujeta zahtev standarda in zaključimo lahko, da površina teh dveh vrst betona ni odporna proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Po 50-ih ciklih zahteve standarda SIST 1026, ki dovoljuje povprečno količino odluščenega materiala  $0,40 \text{ mg/mm}^2$  izpolnjujeta samo vzorca LVMN (65% dovoljene vrednosti) in LA (85%). Rezultati preiskav ostalih vzorcev (LN, LVN, LVA in LVMA) so nad mejo, ki jo dovoljuje standard.

#### LEGENDA:

- LA 8% - aeriran (8% poroznost) samozgoščevalni beton
- LN – neaeriran samozgoščevalni beton
- LVMA 4% - aeriran (4% poroznost) vibriran beton z dodatkom moke
- LNMN – neaeriran vibriran beton z dodatkom moke
- LVA 8% - aeriran (8% poroznost) vibriran beton
- LVN – neaeriran vibriran beton

LASTNOSTI OTRDELEGA BETONA						
	LV	LN	LVMA	LVMN	LVA	LVN
<b>tlačna trdnost</b>	57,15	63	64,6	65,1	47,9	63,0
<b>COV</b>	1,90%	1,30%	0,80%	1,70%	2,20%	1,30%
<b>UZ (<math>\mu\text{s}</math>)</b>	29,85	28,8	29,8	28,8	30,6	28,8
<b>COV</b>	1,00%	0,60%	0,60%	0,50%	0,60%	0,60%

*Preglednica 9.2.b: Primerjava lastnosti betona v otrdelem stanju vseh preskušanih vzorcev.*

V preglednici 9.2.b lepo vidimo vpliv poroznosti na končno tlačno trdnost betona. Večja poroznost pomeni manjšo tlačno trdnost. Pri vzorcih aeriranega betona LA (8% poroznost) in LVA (7,8% poroznost) smo izmerili veliko manjšo tlačno trdnost kot pri neaeriranih vzorcih.

Pri aeriranemu vzorcu vibriranega betona z dodatkom moke smo dosegli manjšo poroznost (4,6%) kot pri drugih aeriranih mešanicah, zato so tudi tlačna trdnosti višje.

V preglednici 9.2.b tudi vidimo povezavo med časom prehoda ultrazvočnih valov skozi preizkušane in tlačno trdnostjo. Višja kot je tlačna trdnost, manj časa potujejo ultrazvočni valovi skozi preizkušane.

---

## 10 VIRI

Muravljov, M. 1991. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, Građevinska knjiga: 451 strani

Đureković, A. 1996. Cement cementni kompozit i dodaci za beton. Zagreb, 1.izdanje  
Školska knjiga: 358 strani

Žarnič R., Bosiljkov V., Bokan Bosiljkov V. 1997/98. Građiva vaje. Ljubljana, Fakulteta  
za gradbeništvo in geodezijo: 100 strani

Petan S. 2002. Uporaba kamene moke kot dodatnega praškastega materiala za izdelavo  
samozgoščevalnih betonov iz drobljenega kamenega agregata. Ljubljana, diplomska  
naloga, FGG Ljubljana: 109 strani

Pagon E. 2001. Reologija svežega samozgoščevalnega betona, diplomska naloga.  
Ljubljana. FGG Ljubljana

Salonit Anhovo d.d, Gradbeni materiali – Cementi,  
[www.salonit.si](http://www.salonit.si)

Bokan V. 1991. Vpliv nivoja napetosti in kemijskih dodatkov na reologijo betona,  
magistrska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 117 strani

SIST EN 206 – 1. 2003. Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost,  
Slovenski standard. Ljubljana

Bokan Bosiljkov V. 2000. Betoni vgradljivi brez kompaktiranja, Zbornik 22. zborovanja  
GKS. Ljubljana: 171-178 strani

EFNARC. 2002. Spacification and guidelines for Self-Compacting Concrete. Surrey  
(VB), EFNARC: 32 strani

---

Hirschi T., Knauber H., Lanz M., Schlumpf J., Schrabback J., Spring C., Waeber U. 2005.  
Sika Concrete Hanbook: 147 strani

Sika d.o.o. Tehnična dokumentacija

Duh D. 2003. Obdelavnost in mehanske karakteristike aeriranih samozgoščevalnih  
betonov iz domačih materialov, diplomska naloga: 99 strani

---