

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Hidrotehniška smer

Kandidat:

**Lovro Cimperman**

# **Vpliv konsistence in deleža zraka v svežem betonu na značilnosti zračnih por v strjenem betonu**

**Diplomska naloga št.: 3000**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Somentor:**

asist. dr. David Duh

Ljubljana, 28. 2. 2008

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **LOVRO CIMPERMAN** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

**»VPLIV KONSISTENCE IN DELEŽA ZRAKA V SVEŽEM BETONU NA  
ZNAČILNOSTI ZRAČNIH POR V STRJENEM BETONU«**

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

Ljubljana, 15.02.2008

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>691.32(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Lovro Cimperman</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. Prof. Dr. Violeta Bokan-Bosiljkov</b>
<b>Somentor:</b>	<b>univ. dipl. inž. grad. David Duh</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Vpliv konsistence in deleža zraka v svežem betonu na značilnosti zračnih por v strjenem betonu</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>103 str., 31.pregl., 49 sl., 9 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>Linijska mikroskopska analiza, samozgoščevalni beton</b>

### **Izveček:**

Povečano zmrzlinško odpornost betona dosegamo praviloma z dodajanjem aeranta v svežo betonsko mešanico, ustreznost aeriranja pa v praksi preverjamo z določitvijo celotnega deleža zraka v betonu. Na zmrzlinško odpornost pa bolj kot celoten delež zraka vplivajo karakteristike zračnih por, predvsem njihovo število in porazdelitev po velikosti. Namen laboratorijskih preiskav, ki smo jih opravili v okviru te diplomske naloge, je bil analizirati sistem zračnih por v strjenem betonu s pomočjo linijske mikroskopske analize v skladu s SIST EN 480-11:2005. Pri tem nas je zanimal predvsem vpliv konsistence in celotne poroznosti svežega betona, opravili pa smo tudi primerjavo med faktorjem oddaljenosti zračnih por in količino odluščenega materiala dobljeno s preskusom odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju po SIST 1026.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDC:</b>	<b>691.32(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Lovro Cimperman</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assoc. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov</b>
<b>Co-Supervisor:</b>	<b>Civil Engineer David Duh</b>
<b>Title:</b>	<b>Influence of consistency and air content in fresh concrete on characteristics of air bubbles in hardened concrete</b>
<b>Notes:</b>	<b>103 p., 31.tab., 49 fig., 9 eq.</b>
<b>Key Words:</b>	<b>Linear microscopical analyses (LMA), Self-compacting concrete</b>

### **Abstract:**

Increased frost resistance of concrete can be achieved by adding air-entraining agent to the fresh concrete mix. Adequate air entrainment is in practice usually checked by measuring total air content of fresh concrete. However, characteristics of air pore system, above all their number and distribution by size, rather than total air content are responsible for adequate frost resistance of concrete. Therefore aim of tests carried out in framework of my diploma was to analyze characteristics of air bubbles in hardened concrete with help of linear microscopical analyses (LMA) in accordance with SIST EN 480-11:2005. Main influencing parameters that were studied were consistency and total air content of fresh concrete. Also the comparison between spacing factor of air bubbles and amount of materials scaled from surface at salt-frost scaling test according to SIST 1026 have been made for particular concrete mix.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov za strokovno pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge in somentorju univ.dipl.inž.grad. Davidu Duhu in hkrati tudi izr. prof. dr. Roku Žarniču za vzpodbudo in iniciativo. Najgloblje se seveda zahvaljujem mojim najožjim članom družine, mami Slavici, očetu Antonu, sestri Ani in babici Zorki za vso potrpežljivost, vzpodbudne besede, moralno podporo in dobrovoljno pomoč med študijem in skozi življenje. Poleg tega se zahvaljujem še vsem prijateljem, kolegom in sošolcem, ki so mi stali ob strani takrat, ko je bilo potrebno. Nazadnje pa še Katji, ki mi je z vzpodbudo in podporo pomagala k zaključku študija.

Brez vseh vas mi ne bi uspelo,

iskreno se zahvaljujem vsem za vaš prispevek v moj mozaik skozi moje celotno študentsko življenje!

**HVALA!**

## KAZALO

<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 SAMOZGOŠČEVALNI BETON.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Definicija in osnove o SCC betonu.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1 Značilnosti SCC mešanic .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2 Uporabnost SCC betona.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3 Materiali in razmerja mešanice .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.4 Obdelavnost svežega samozgoščevalnega betona .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.5 Odpornost na segregacijo in tečenje .....</b>	<b>10</b>
<b>3 REOLOGIJA BETONA .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Reologija samozgoščevalnega betona .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Priprava in mešanje betona .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Transport betona .....</b>	<b>16</b>
<b>3.4 Lastnosti strjenega samozgoščevalnega betona .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4.1 Trdnost in togost.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.2 Krčenje in lezenje .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.3 Prepustnost, obstojnost in kvaliteta površine .....</b>	<b>18</b>
<b>4 OSNOVNI MATERIALI.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 Cement.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1.1 Hidratacija cementa .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1.2 Hidratacijska toplota.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 Voda .....</b>	<b>23</b>
<b>4.3 Agregat .....</b>	<b>24</b>
<b>4.4 Dodatki betonu.....</b>	<b>26</b>
<b>4.4.1 Kemijski dodatki .....</b>	<b>26</b>
<b>4.4.1.1 Površinsko aktivne kemikalije.....</b>	<b>28</b>

---

<b>4.4.1.2 Sestava .....</b>	<b>28</b>
<b>4.4.1.3 Delovanje .....</b>	<b>28</b>
<b>4.4.1.4 Superplastifikatorji nove generacije.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4.1.5 Aeranti.....</b>	<b>33</b>
<b>4.4.1.6 Sredstva za zgoščevanje .....</b>	<b>34</b>
<b>4.4.1.7 Sredstva za povečanje viskoznosti .....</b>	<b>34</b>
<b>4.4.2 Mineralni dodatki.....</b>	<b>35</b>
<b>4.4.2.1 Elektrofilitrski pepel po SIST EN 197-1:2002 .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4.2.2 Mikrosilika po SIST EN 197-1:2002 .....</b>	<b>39</b>
<b>5 SCC BETON:VPLIVI ZMRZOVANJA/TAJANJA IN NJEGOVE ZNAČILNOSTI.</b>	<b>40</b>
<b>5.1 Poškodbe zaradi zmrzovanja in odtajevanja.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2 Delovanje zmrzali .....</b>	<b>41</b>
<b>5.2.1 Notranja odpornost proti zmrzovanju/tajanju (NOZT) .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2.2 Odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju (OPZT) .....</b>	<b>48</b>
<b>5.3 Voda v cementnem kamnu .....</b>	<b>50</b>
<b>5.3.1 Odpornost proti prodoru vode.....</b>	<b>51</b>
<b>5.4 Pore v cementnem kamnu .....</b>	<b>51</b>
<b>6 PROJEKTIRANJE MEŠANIC BETONA.....</b>	<b>53</b>
<b>6.1 Projektiranje mešanice samozgoščevalnega betona .....</b>	<b>53</b>
<b>7 NEGA BETONA.....</b>	<b>56</b>
<b>8 LASTNE PREISKAVE.....</b>	<b>58</b>
<b>8.1Uvod .....</b>	<b>58</b>
<b>8.2 Materiali .....</b>	<b>59</b>
<b>8.2.1 Osnovni materiali za betone LA, TA, CA .....</b>	<b>59</b>
<b>8.2.2 Osnovni materiali za betone EF .....</b>	<b>63</b>
<b>8.2.3 Osnovni materiali za betone LVA.....</b>	<b>64</b>
<b>8.3 Razlogi za preiskavo strjenih aeriranih betonov z linijsko mikroskopsko metodo....</b>	<b>65</b>

---

<b>8.4 Opis poteka preiskave z metodo linijske mikroskopske analize .....</b>	<b>66</b>
<b>8.4.1 Razlaga izrazov in definicij po SIST EN 480-11:2005 .....</b>	<b>67</b>
<b>8.4.2 Značilnosti in uporaba po ASTM C 457-98 .....</b>	<b>68</b>
<b>8.4.3 Odvzem in priprava vzorca .....</b>	<b>70</b>
<b>8.4.4 Oprema .....</b>	<b>71</b>
<b>8.4.5 Postopek preiskave linijske mikroskopske analize.....</b>	<b>76</b>
<b>8.5 Inerpretacija rezultatov .....</b>	<b>78</b>
<b>8.5.1 Preiskave in rezultati mešanice LA.....</b>	<b>78</b>
<b>8.5.2 Preiskave in rezultati za mešanico CA .....</b>	<b>92</b>
<b>8.5.3 Preiskave in rezultati za mešanico TA.....</b>	<b>94</b>
<b>8.5.4 Preiskave in rezultati za mešanico EF .....</b>	<b>95</b>
<b>8.5.5 Preiskave in rezultati za mešanico LVA.....</b>	<b>98</b>
<b>9 SKLEPI .....</b>	<b>103</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>104</b>
<b>PRILOGE.....</b>	<b>106</b>



## KAZALO PREGLEDNIC

Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic .....	8
Deleži zraka v betonu v odvisnosti od velikosti največjega zrna agregata .....	45
Stopnje izpostavljenosti XF .....	48
Merila za ocenjevanje odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju s soljo: količina odluščenega materiala v $\text{mg}/\text{mm}^2$ .....	49
Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni .....	51
Količina posameznih frakcij agregata glede na velikost največjega zrna .....	55
Količina finih delcev glede na velikost največjega zrna .....	55
Količina veziva glede na velikost največjega zrna .....	55
<b>Preglednica 1:</b> Oznake betonov in razlage posameznih oznak .....	62
<b>Preglednica 2:</b> Količine posameznih materialov za $1\text{ m}^3$ mešanice EF .....	64
<b>Preglednica 3:</b> Količine posameznih materialov za $1\text{ m}^3$ mešanice LVA .....	65
Minimalno področje obdelane površine vzorca za mikroskopske meritve .....	70
Minimalna skupna dolžina linij za preiskavo z metodo linijske mikroskopske analize .....	77
<b>Preglednica 4:</b> Sestava mešanic LA in količina odluščenega materiala pri OSMO preiskavi. ....	78
<b>Preglednica 5:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA5 .....	79
<b>Preglednica 5a:</b> Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico LA5 z 8% vnešenega zraka po SIST EN 480-11:2005, poglavje 8.9. ....	83
<b>Preglednica 6:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA6 .....	85
<b>Preglednica 7:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA8 .....	85
<b>Preglednica 8:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA10 .....	86
<b>Preglednica 9:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA11 .....	87
<b>Preglednica 10:</b> Primerjava kumulativnih deležev zraka za mešanice LA .....	91
<b>Preglednica 11:</b> Sestava mešanice CA .....	92
<b>Preglednica 12:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico CA .....	93

---

<b>Preglednica 13:</b> Sestava mešanice TA. ....	94
<b>Preglednica 14:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico TA. ....	94
<b>Preglednica 15:</b> Sestava mešanice EF. ....	95
<b>Preglednica 16:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico EF. ....	96
<b>Preglednica 17:</b> Primerjava kumulativnih deležev zraka za mešanice LA10, CA4, TA2 s 4% vnešenega zraka in EF6 z 0% vnešenega zraka. ....	97
<b>Preglednica 18:</b> Sestava mešanice LVA4. ....	99
<b>Preglednica 19:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LVA4 – površina. ....	99
<b>Preglednica 20:</b> Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LVA4 – sredina. ....	100
<b>Preglednica 21:</b> Primerjava kumulativnih deležev zraka za mešanice LVA4 z 8% vnešenega zraka, na površini in sredini vzorca, z rezultati za mešanico LA5 z 8% vnešenega zraka. ....	101

## KAZALO SLIK

Reološke lastnosti Newtonovih tekočin in Bingamovih teles .....	15
Centralno mešan beton v betonarni .....	17
Postopek pridobivanja cementa .....	21
Opis in prikaz faz hidratacije cementa .....	22
Zrnavost agregata v betonskem prerezu .....	25
Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov .....	26
Sejalne krivulje – na vodoravni osi so podane odprtine sit, na navpični pa delež materiala, ki se je presejal skozi sito .....	26
(a) Kemijska formula aeranta .....	29
(b) Mehanizem njegovega delovanja.....	29
(a) Tipične formule plastifikatorjev – ogljikovodikov, ki vsebujejo anionske polarne skupine; Shematični prikaz adsorbiranja polarne verige vzdolž cementnega delca (b) in dispergiranost cementnih delcev preden dodamo plastifikator v sistem cement – voda in po tem (c).....	30
Shematični prikaz superplastifikatorja (levo) in superplastifikatorja nove generacije (desno)	31
Shematični prikaz delovanja običajnega superplastifikatorja .....	32
Shematični prikaz delovanja superplastifikatorja nove generacije.....	33
Učinkovitost vrst sredstva za kontrolo viskoznosti .....	35
Tipični delci elektrofiltrskega pepela pod mikroskopom .....	38
Primerjava velikosti raporeditve delcev med portland cementom, elektrofiltrskim pepelom in mikrosiliko.....	38
(a) Propadanje neaeriranega betona vzdolž saturacijske linije .....	42
(b) Velike D razpoke vzdolž vzdolžnih in prečnih stičišč na devet let starem pločniku.....	42
(c) Luščenje površine.....	42
Z povečevanjem vnešenega zraka je možnost večanja prostornine zaradi oblikovanja ledu manjša, saj zračna pora zagotovi prostor, kamor se umakne voda in kjer lahko zmrzne brez povzročanja pritiska.....	43
(a) Shematski diagram prikaza nastajanja ledu v kapilarni pori.....	44
(b) Prikaz nastajanja ledu v zračni pori .....	44

---

(c) Skenirana formacija ledu v zračni pori .....	44
Vpliv vodocementnega razmerja in vsebnosti zraka na odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju .....	46
Tipičen dnevni cikel zmrzovanja/tajanja .....	49
Različni tipi vode v C-S-H gelu .....	50
Shematski prikaz oblike in velikosti por in zračnih mehurčkov v cementnem kamnu .....	52
Izparevanje vode v odvisnosti od temperature zraka, relativne vlažnosti, temperature betona in hitrosti vetra .....	56
Preprost test hidrofilnosti apnenčevih mok L in C .....	62
Mehanizem nastanka zračnega mehurčka v tekočini .....	62
Digitalni video-mikroskopski sistem HIROX KH-3000 .....	71
Prikaz osnovne funkcijske plošče sistema HIROX KH-3000 .....	72
Prikaz funkcije optimizacija slike .....	73
Prikaz funkcije dolge izpostavitve .....	73
Prikaz funkcije razdelitve zaslonov .....	73
Prikaz funkcije avtomatično merjenje .....	74
Prikaz funkcije merjenja z zoomom .....	74
Prikaz funkcije avtomatsko zasledovanje .....	74
Prikaz funkcij različnih opcij meritev .....	75
Shematska slika rotacijske glave .....	75
Prikaz funkcije uporabe difuzorja .....	76
<b>Slika 1:</b> Graf porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por za mešanico LA5 z 8% deležem zraka. ....	84
<b>Slika 2:</b> Primerjava števila tetiv N čez zračne mehurčke za posamezne mešanice LA. ....	88
<b>Slika 3:</b> Primerjava specifičnih površin zraka ( $\alpha$ ) za posamezne mešanice LA. ....	89
<b>Slika 4:</b> Primerjava razmerja cementna pasta (P) – zrak (A) med posameznimi mešanicami LA (modri črti predstavljata priporočeni meji). ....	89
<b>Slika 5:</b> Primerjava faktorjev oddaljenost $\bar{L}$ med posameznimi mešanicami LA .....	90
<b>Slika 6:</b> Primerjava vsebnosti mikropor med posameznimi mešanicami LA – $A_{300}$ .....	90

**Slika 7:** Primerjave porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por za mešanice LA10, CA4, TA2 s 4% vnešenega zraka in mešanico EF6 z 0 % vnešenega zraka. .... 98

**Slika 8:** Primerjave porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por za mešanice LVA4 z 8% zraka (vzorci vzeti iz sredine in površine betonske kocke) z mešanico LA5 z 8% zraka. .... 102

## 1 UVOD

Najbolj razširjen konstrukcijski material je beton, ponavadi narejen tako, da se zameša portland cement, pesek, grob agregat in voda. V ZDA so leta 1964 iz 63 milijonov ton portland cementa naredili kar 500 milijonov ton betona. To je kar 5x večja poraba napram jeklu. V večini držav je razmerje med porabo betona in jekla 10:1. V letu 1964 naj bi se po nekkih okvirnih podatkih porabilo na celem svetu okrog 3 milijarde ton betona ali drugače povedano 1 tona na vsakega prebivalca Zemlje. To je edini material na svetu, ki ga človek uporablja tako masovno, poleg tekoče vode.

Danes naj bi se porabilo nekje 11 milijard ton betona vsako leto. Zakaj se beton tako pogosto uporablja? Obstajajo trije osnovni razlogi za to. Prvič, beton je zelo dobro odporen proti vodi. Za razliko od lesa in jekla beton prenese vsakršen napad vode brez večjih posledic. Torej je zelo primeren material za vodne objekte in objekte, kjer se shranjuje voda. Drugi razlog je enostavnost oblikovanja gradbenih elementov iz betona, ki so lahko najrazličnejših velikosti in oblik. Bistveno je, da je svež beton plastične konsistence, kar omogoča, da material enostavno vgrajujemo v opaže z nameščeno armaturo. Tretji razlog pa je, da je beton ponavadi relativno poceni in vedno na razpolago. Seveda cena kubičnega metra betona niha glede na transportne možnosti, v kateri državi se delo izvaja in glede na zahteve, ki jih mora betonska mešanica izpolniti. Ampak vseeno lahko rečemo, da je okvirna cena betona med 50 in 68 evrov na kubik. To so torej osnovni razlogi, zakaj ljudje tako masovno uporabljamo beton.

Če pa gledamo korak dlje vidimo, da se da beton na najrazličnejše načine izboljšati. Z raznimi dodatki betonu povečamo nosilnost, duktilnost, obstojnost itd. Zato se danes še vedno daje velik poudarek raziskavam najrazličnejših betonskih mešanic. Zadnje čase je v ospredju praviloma vprašanje obstojnosti betona. Propadanje betona je lahko posledica mehanskih preobremenitev ali pa kemijsko-fizikalnih dejavnikov.

V moji diplomski nalogi se bom posvetil samozgoščevalnemu betonu. Gre za beton, ki vsebuje različne dodatke in ga vgrajujemo brez zgoščevanja z vibriranjem. Poraba samozgoščevalnega betona je v svetu vse bolj razširjena, zaradi njegovih posebnih lastnosti v svežem in kvalitete v strjenem stanju. Njegova uporaba vodi v bolj industrializirano izdelavo betonskih konstrukcij, zmanjšanje stroškov pri betoniranju na gradbišču, izboljšanje kvalitete, trajnosti in zanesljivosti betonskih konstrukcij ter zmanjšuje možnosti

človeških napak. Ročno zgoščevanje svežega betona zamenja moderna polavtomatska tehnologija, s čimer se izboljšajo delovni pogoji ter varnost na gradbišču in okoli njega. Vendar samozgoščevalni beton, v primerjavi z običajnim vibriranim betonom, zahteva večjo natančnost pri določevanju mešanice in skrbnejše zagotavljanje kvalitete z več testiranja in preverjanja, vsaj na začetku njegove uporabe.

Posebne lastnosti svežega samozgoščevalnega betona omogoča uporaba ustreznih materialov, povečan delež praškastih delcev v mešanici in dodatek superplastifikatorjev nove generacije z dovolj dolgim časom delovanja. Samozgoščevalne lastnosti sveže mešanice in ustrezne lastnosti strjenega betona pa se lahko zagotovi le z učinkovitim mešanjem, s pravilnim mešalnim zaporedjem, z ustreznim časom mešanja, s primernim načinom in časom transportiranja betona na mesto vgradnje ter z ustreznim načinom vgradnje. Kontrolo obdelavnosti svežega samozgoščevalnega betona takoj po zamešanju in pred vgradnjo betona v opaž omogočajo številne nestandardne metode preiskav. Mehanske in druge lastnosti strjenega betona lahko preverimo s standardnimi porušnimi in neporušnimi preiskavami.

V nalogi se bom osredotočil na aerirane samozgoščevalne betone, to je na SCC mešanice, ki poleg ostalih dodatkov (superplastifikator, dodatni praškasti material) vsebujejo tudi aerant.

Kaj so aeranti?

Aeranti so dodatki, s katerimi v strukturo betona uvedemo veliko število majhnih zračnih mehurčkov, ki se enakomerno porazdelijo po cementnem kamnu. Z aeriranjem betonske mešanice se izboljša obdelavnost svežega betona ter poveča njegova odpornost na segregacijo. Večja poroznost betona ima sicer za posledico zmanjšanje tlačne trdnosti betona, vendar lahko slednje kompenziramo z zmanjšanjem vodocementnega razmerja. S tem se zmanjša vodovpojnost betona, kar preprečuje prekomerno navlaženje betona in vstop agresivnih snovi v beton. Osnovna naloga vnešenih zračnih mehurčkov pa je povečanje zmrzilske odpornosti betona.

Zaradi odlične sposobnosti tečenja SCC mešanic in s tem povezane relativno nizke viskoznosti je učinkovito aeriranje SCC betonov mnogo bolj problematično, kot je pri običajnih vibriranih betonih. Aerirani SCC betoni se velikokrat ekstremno odzračijo, kar pomeni, da se iz njih izloči večji del vnešenih zračnih mehurčkov. Da bi ugotovili

značilnosti zračnih por v različnih SCC betonih, sem na ustrezno pripravljenih vzorcih opravil linijsko mikroskopsko analizo v skladu s SIST EN 480-11:2005.



## **2 SAMOZGOŠČEVALNI BETON**

### **2.1 Definicija in osnove o SCC betonu (Kumar Mehta, Monteiro, 2006)**

Visokotrdne betonske mešanice, z gostimi jeklenimi oziroma armaturnimi ojačitvami, kličejo po bolj nosilnih in duktilnih konstrukcijah. Vendar pa elementi, ki vsebujejo veliko armature, potrebujejo sveže betonske mešanice, ki morajo biti čim bolj tekoče. Razvoj superplastifikatorjev je omogočil posede 200 - 250 mm, brez uporabe prevelikih količin vode. Kljub temu pa so betonske mešanice s tekočo konsistenco zelo nagnjene k segregaciji in posedanju večjih agregatnih zrn, istočasno pa še vedno potrebujejo določeno stopnjo zgoščevanja z vibriranjem ali prebadanjem. Segregacija poruši strukturo betonske mešanice, največkrat oslabi stično območje med večjimi zrni agregata in cementnim kamnom. Zaradi tega so poslabšane mehanske lastnosti betona in njegova obstojnost.

Riziko ločitve posameznih sestavin v betonu pride še toliko bolj do izraza v konstrukcijah z veliko armature, velikih višin (visoka stavba) in kadar se beton prekomerno vibrira med zgoščevanjem. Vprašanje je torej, kako povečati stabilnost kompozitnega sistema, ki je izpostavljen velikim strižnim obremenitvam in se obnaša kot nestabilna disperzija delcev agregata v tekoči cementni pasti? Z drugimi besedami, kako proizvesti betonsko mešanico, ki bo posedovala visoko obdelavnost? To pomeni, da bo hkrati dovolj tekoča in dovolj kohezivna. V 90-ih letih prejšnjega stoletja so japonski raziskovalci prišli do betona imenovanega SAMOZGOŠČEVALNI BETON ali SCC (self-compacting concrete). To je beton, ki je definiran kot tekoči beton in se vgrajuje v konstrukcijo oziroma opaže brez zgoščevanja z vibriranjem ali prebadanjem.

#### **2.1.1 Značilnosti SCC mešanic (Kumar Mehta, Monteiro, 2006)**

Osnovna razlika med navadnim betonom in SCC betonom so veliko boljše reološke lastnosti, o katerih bom govoril pozneje. Tipična SCC mešanica je tekoč oz. fluiden beton, ki je visoko koheziven in je lahko vgrajen in zgoščen brez uporabe vibriranja. To je ponavadi doseženo z večjo količino cementne paste in manjšo količino agregata v primerjavi z vibriranim betonom. Zaradi večje količine portland cementa lahko pri SCC mešanicah pričakujemo večje krčenje pri sušenju in hkrati večje toplotno krčenje. Navadne SCC mešanice so projektirane na vodocementno razmerje med 0,45 in 0,50 ter ponavadi potrebujejo 28 dni, da dosežejo tlačno trdnost 40 MPa. Če spreminjamo

vodocementno razmerje in količino ter vrsto mineralnega dodatka lahko dobimo visokotrden beton (mešanica B v *Preglednici: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic*) ali beton z nizko toploto hidratacije (mešanica C in D v *Preglednici: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic*).

### **2.1.2 Uporabnost SCC betona (Kumar Mehta, Monteiro, 2006)**

V Evropi in na Japonskem naj bi se SCC betoni uporabljali predvsem za podvodne zgradbe in konstrukcije z veliko količino armature. Lahko pa se, kot bomo videli v nadaljevanju, uporablja tudi v cestogradnji ali na objektih, kjer je potrebno zagotoviti visoko kontrolo kakovosti. Skozi razvoj so se pokazale številne prednosti uporabe samozgoščevalnega betona, kot so:

- lažja in hitrejša gradnja,
- zmanjšanje števila delavcev na gradbišču,
- bolj kvalitetna površina strjenega betona,
- izboljšana trajnost,
- večja svoboda pri oblikovanju,
- manjši prerezi elementov,
- zmanjšanje nivoja hrupa na gradbišču, odsotnost vibriranja, varnejše delovno okolje.

Samozgoščevalni beton so začeli razvijati v 90-ih letih prejšnjega stoletja na Japonskem. Izdelavo samozgoščevalnega betona je omogočil predhodni razvoj superplastifikatorjev nove generacije.

Samozgoščevalni beton (Self-Compacting concrete, SCC) je beton, ki izkazuje naslednje lastnosti:

- sposobnost tečenja pod vplivom lastne teže,
- visoka sposobnost zapolnjevanja (sposoben je popolnoma zapolniti opaž, tudi v močno armiranih območjih),
- vgradnja brez zgoščevanja (vibriranja),
- visoka odpornost na segregacijo med in po vgradnji (homogenost se vseskozi ohranja).

Ko izbiramo beton in materiale zanj so seveda na prvem mestu tehnične zahteve, takoj za tem pa pride na vrsto ekonomski vidik. Izmed betonov, ki izpolnjujejo postavljene zahteve bomo izbrali tistega, ki je cenejši. Navkljub dejstvu, da so mogoče razlike v ceni majhne, npr. za agregat, so skupni prihranki na velikem projektu vredni razmisleka. Predpostavimo, da je betonska mešanica sestavljena iz  $1800 \text{ kg/m}^3$  agregata in potrebujemo 6 milijonov kubičnih metrov betona. Imamo dva vira, ki sta sposobna zagotoviti primeren agregat, vendar je razlika v ceni 10 centov na  $\text{m}^3$  betona. Preprost izračun pokaže, da je pri izbiri cenejšega agregata prihranek milijon dolarjev.

Ko določamo razmerje med posameznimi materiali, ki jih bo vseboval beton, moramo upoštevati, da je cement veliko dražji od agregata. Se pravi, da je ekonomsko upravičeno, da zmanjšamo količino cementa v betonski mešanici na najmanjšo možno vrednost, tako da hkrati ne ogrozimo zahtevanih karakteristik našega betona, kot sta na primer trdnost in obstojnost. Velikokrat lahko relativno nizko ceno betonske mešanice dosežemo z zamenjavo dela cementa z elektrofitrskim pepelom.

Poleg pravilne izbire materiala pa je pomembno tudi dejstvo, da popolna izločitev vibriranja poveča hitrost betoniranja, zmanjša ceno objekta in s tem poveča produktivnost. Odlična sposobnost tečenja svežega samozgoščevalnega betona omogoča razvoj novih metod črpanja betona in polnjenja opažev, kar pomeni lažjo in hitrejšo vgradnjo. Hitrejša vgradnja betona pa ni pomembna le v smislu zmanjšanja stroškov v času gradnje, ampak omogoča tudi skrajšanje časa od začetka izdelave konstrukcije do njene predaje v uporabo. To pomeni, da uporaba samozgoščevalnega betona z zmanjšanjem stroškov in izboljšanjem karakteristik za uporabnike lahko igra pomembno vlogo pri povečanju konkurenčnosti betonskih konstrukcij.

Seveda pa bodo morale države v prihodnosti misliti tudi na okoljski faktor, preden bodo uporabile materiale, ki bodo v obliki objektov del našega okolja. Nevarnost negativnega učinka na okolje, zaradi uporabe kemijskih dodatkov, je pri samozgoščevalnem betonu tako nizka kot pri običajnem betonu, saj se največkrat uporabljajo enaki dodatki. Nova generacija dodatkov, ki so bili razviti prvenstveno za uporabo v samozgoščevalnih betonih, ima pogosto še dodatno znižan potencialen vpliv na okolje in zdravje delavcev.

### 2.1.3 Materiali in razmerja mešanice (Kumar Mehta, Monteiro, 2006)

Poleg peska, grobega agregata (maksimalna velikost zrna je od 16 mm do 25 mm) in čistega portland cementa so nujne sestavine SCC betona superplastifikatorji, dodatki za povečanje viskoznosti in mineralni dodatki iz finih delcev. Na splošno, odvisno od pristopa h kontroliranju tečenja in segregacije, so SCC mešanice razdeljene v 2 kategoriji: (a) mešanice, ki vsebujejo veliko količino praškastih delcev ( več kot  $400 \text{ kg/m}^3$  cementa + elektrofiltrski pepel + praškasto žlindro ali apnenec); (b) sem pa spadajo mešanice, ki vsebujejo dodatke za povečanje viskoznosti, kot npr. welangum, hidroliziran škrob, mikrosiliko in ultrafino amorfoidno koloidno siliko, ki se imenuje tudi nanosilika. Ta druga kategorija ne potrebuje visoke vsebnosti cementa za kontrolo viskoznosti. Mešanica A je bila (*Preglednica: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic*) uporabljena predvsem za podvodne konstrukcije, izdelane iz tekočega betona. Visoka konsistenca (posed 260 mm) je bila dosežena z veliko dozo superplastifikatorja. Zelo dobra kohezivnost je bila dosežena z omejitvijo maksimalnega zrna agregata do velikosti 15 mm in z dodatkom 180 kg zelo finega peska (0,075 do 0,6 mm) v skupni količini 1170 kg peska. Mešanica B (*Preglednica: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic*) pa predstavlja visoko-trdni (čez 90 MPa tlačne trdnosti) SCC beton, ki je bil uporabljen za gradnjo World Trade Centra v San Marinu. Visoko učinkovit superplastifikator polikarboksilatnega tipa je bil uporabljen, da je bila dosežena fluidnost betona. Hkrati je bila dodana velika količina ( $65 \text{ kg/m}^3$ ) mikrosilike, da se je preprečila segregacija. Mešanica C (*Preglednica: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic*) pa predstavlja SCC beton primeren za gradnjo masivnih konstrukcij, kjer je potrebna kontrola toplote zaradi hidratacije. Zaradi nizke vsebnosti cementa ( $120 \text{ kg/m}^3$ ), je bil porast temperature v betonu pod  $20^\circ\text{C}$ . Ta temperatura je privzeta kot ustrezna za preprečevanje termičnih razpok. Mešanica D v *Preglednici: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic* pa pokaže, kako lahko pridemo do relativno poceni SCC mešanice, če ji dodamo kalcijski elektrofiltrski pepel (W). SCC mešanice z vodocementnim razmerjem od 0,35 - 0,45 so vsebovale čisti portland cement, 40 – 60% mase cementa je bilo nadomeščeno z elektrofiltrskim pepelom, vsebovale pa so še lokalni naravni pesek, zdrobljen apnenec maksimalnega zrna 19 mm, vnešen zrak in manjšo količino superplastifikatorja. V primerjavi z 35 MPa betonom brez superplastifikatorja, je mešanica z visoko vsebnostjo elektrofiltrskega pepela pokazala veliko fluidnost, odpornost proti segregaciji in termičnemu razpokanju in ni bila prav nič dražja kot mešanica brez superplastifikatorja. V *Preglednici: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic* mešanici E in F vsebujeta welangum kot dodatek za povečanje

viskoznosti v kombinaciji s superplastifikatorjem, dobro granuliran pesek in grobi agregata z največjim zrnem 10 mm. Mešanica F v *Preglednici: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic*, z  $0,25 \text{ kg/m}^3$  welangum-a, je pokazala boljšo stabilnosti proti segregaciji kot mešanica E v *Preglednici: Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic*, ki je vsebovala  $0,13 \text{ kg/m}^3$  welangum-a v kombinaciji s  $30 \text{ kg/m}^3$  mikrosilike.

*Kompozicija in lastnosti tipičnih SCC mešanic. (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

Oznaka mešanice	A	B	C	D
<b>Proporciji mešanice, <math>\text{kg/m}^3</math></b>				
Navaden portland cement	400	465	120	207
Elektrofiltrski pepel	-	-	127	207
Žlindra	-	-	184	-
Pesek	1170*	710	964	845
Grobi agregat	630	915	822	843
Voda	190	175	176	188
Superplastifikator	7.0	4.6	5.0	0.5
<b>Dodatek za povečanje viskoznosti</b>				
Welangum	-	-	-	-
Mikrosilika	-	65	-	-
Nanosilika	-	-	8	-
<b>Lastnosti</b>				
Posed (mm)	260	-	-	240
Razlez s posedom (mm)	-	730	800	-
v/c	0.47	0.33	0.40	0.45
28 dnevna tlačna trdnost, MPa	-	95	40	33

\*Mešanica A vsebuje  $990 \text{ kg/m}^3$  sandardnega peska in  $180 \text{ kg/m}^3$  zelo finega peska

Naj še enkrat povzamem bistvene zahteve glede sestave SCC betonov:

- Velika prostornina paste v betonski mešanici je potrebna za doseganje ustrezne sposobnosti prehajanja med ovirami in odpornosti na segregacijo. Ustrezno prostornino paste dosežemo z vključitvijo drugih praškastih materialov, poleg cementa.
- Z nizkim razmerjem med vodo in praškastimi delci in velikim deležem finih delcev zagotavljamo ustrezno obdelavnost sveže mešanice in hkrati zmanjšujemo nevarnost segregacije samozgoščevalnega betona.
- Uporaba superplastifikatorja omogoča odlično sposobnost tečenja in zapolnjevanja samozgoščevalnega betona ter zmanjšuje potrebno količino zamesne vode.

- Potrebno je omejiti prostornino grobega agregata, da se prepreči blokiranje samozgoščevalnega betona v ozkih predelih med ovirami.
- V določenih primerih je potrebno uporabiti sredstvo za povečanje viskoznosti, ki ima enako vlogo kot praškasti delci, to je preprečevanje izcejanja vode in oviranje segregacije grobega agregata s povečevanjem viskoznosti paste.

#### **2.1.4 Obdelavnost svežega samozgoščevalnega betona**

Obdelavnost svežega betona ima direkten vpliv na črpnost betona in njegove karakteristike v strjenem stanju, kar odloča o tem, s kakšno lahkoto betonsko mešanico obdelujemo brez večje segregacije. Po vsej verjetnosti bo betonska mešanica, ki jo je težko vlti oz. vgraditi in zgostiti, ne samo povečala stroške, ampak bo imela tudi slabšo trdnost, obstojnost ter izgled. Čeprav neustrezna obdelavnost betona vodi k dvigu cene in zmanjšanju kvalitete je to lastnost, ki jo težko natančno definiramo. Izraz obdelavnost namreč pomeni še veliko različnih karakteristik svežega betona, ki jih je težko kvantitativno izmeriti. Torej je izbira prave mešanice samozgoščevalnega betona prej umetnost kot znanost. (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

Glede obdelavnosti veljajo praviloma kriteriji, ki jih podajam v nadaljevanju:

- Konsistenca betona ne bi smela biti večja kot je potrebna za lažje vgrajevanje, zgoščevanje in finalizacijo.
- Potrebe po vodi za posamezno konsistenco naraščajo z naraščanjem razmerja pesek/grobi agregat in glede na količino finega peska. Kadar imamo možnost, moramo poskušati izboljšati kohezivnost in enostavnost zaključne obdelave/finalizacije betona. Če se le da, poskušamo to narediti s povečanjem razmerja pesek/grobi agregat in ne s povečanjem deleža praškastih delcev.
- Za betone, ki potrebujejo visoko konsistenco med vgrajevanjem, naj bi bili uporabljeni superplastifikatorji in dodatki kot so zaviralci vezanja, ne pa več vode na samem gradbišču; prav voda, ki se dodaja na gradbišču zaradi doseganja željene konsistence tik pred vgrajevanjem betona v opaže, je največkrat odgovorna za poslabšane karakteristike vgrajenega betona.

Samozgoščevalni beton ima sposobnost tečenja in deformiranja tako veliko, da lahko teče skozi odprtine, zapolni poljuben opaz in se zgosti samo zaradi delovanja lastne teže. Takšne lastnosti betona so dosežene, če so izpolnjene naslednje zahteve glede obdelavnosti:

- odlična sposobnost zapolnjevanja,
- odpornost na segregacijo,
- odlična sposobnost prehajanja.

### **2.1.5 Odpornost na segregacijo in tečenje**

Posedanje ali segregacija je definirana kot razdelitev komponent svežega betona na tak način, da komponente med sabo niso več homogeno porazdeljene. Obstajata dve vrsti segregacije. Prva, ki je značilna za suhe betonske mešanice, je sestavljena iz separacije oziroma razdružitve malte od večjih agregatnih zrn. Izcejanje vode je druga vrsta segregacije, ki je značilna za plastične in tekoče betonske mešanice. Zunanji pokazatelj druge vrste segregacije je voda, ki pride na površje potem, ko je beton že vgrajen in zgoščen. Voda je namreč najlažja komponenta v betonski mešanici in njeno izcejanje na površino je posledica segregacije agregata v suspenziji, ki se premika proti dnu zaradi gravitacije. Po drugi strani pa je izcejanje tudi rezultat nesposobnosti osnovnih materialov, da zadržijo zamesno vodo v disperzijskem stanju.

Zelo pomembno je zmanjšati nagnjenost betonske mešanice k segregaciji, saj je popolna zgoščenost, ki je odločilnega pomena za doseg maksimalne trdnosti možna le, če beton ni segregiran. Poleg tega pa samo del te vode, ki se izceja, pride na površje. Velika večina te vode ostane ujeta v betonu. Pri navadnih armiranobetonskih konstrukcijah se pojavi velik del vode, ki je posledica izcejanja, v žepih pod zrnimi grobega agregata in pod horizontalnimi armaturnimi palicami. To so deli, ki so odgovorni za napake in oslabitve. Zato so velikokrat zgornji deli gred šibkejši od spodnjih delov.

Področja, kamor se izceja voda zaradi segregacije, imajo visoko vodocementno razmerje, zato so bolj porozna in manj trdna. Kadar je površina izpostavljena izcejanju vode ali cementnega mleka, velikokrat na površini ni trdnega betona in obstojne površine, ampak ima beton mehko površino. Produkti hidratacije v porozni cementni plasti so hitro podvrženi karbonatizaciji. Poleg tega pa oslabljen površinski sloj pomeni tudi slab stik med obstoječim in naslednjim slojem vgrajenega betona. Zato je potrebno oslabljen površinski sloj, ki je posledica izcejanja

vode, obvezno odstraniti, preden vgradimo naslednji sloj betona. (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

Kvaliteten samozgoščevalni beton mora poleg visoke deformabilnosti paste oz. malte izkazati tudi ustrezno odpornost na segregacijo grobega agregata v malti, pri tečenju skozi gosto armirana območja.

Pri samozgoščevalnem betonu se ne smejo pojaviti naslednje vrste segregacije:

- izcejanje vode (v angleščini bleeding),
- oddvojitev paste in agregata,
- oddvojitev grobega agregata, ki vodi do blokiranja,
- neenakomerna porazdelitev zračnih por.

Izcejanje vode v veliki meri preprečimo z zmanjšanjem količine gibljive vode v mešanici.

Metode za zmanjšanje gibljive vode so:

- nizka vsebnost zamesne vode,
- nizko razmerje med vodo in praškastimi delci,
- uporaba praškastih delcev z visoko razvito površino (zaradi adhezije se bo na površini praškastih delcev zadržalo več vode),
- uporaba sredstva za povečanje viskoznosti.

Ostale vrste segregacij preprečujemo z naslednjimi ukrepi:

- omejitev vsebnosti agregata,
- zmanjšanje največjega zrna agregata,
- uporaba paste z nizkim razmerjem med vodo in praškastimi delci, s katero povečamo kohezivne sile med različnimi fazami v betonu,
- uporaba sredstva za povečanje viskoznosti.



### 3 REOLOGIJA BETONA

Reologija je veda, ki proučuje deformiranje in tečenje snovi. Pri proučevanju betona se je s časom večal pomen vgradljivosti, sposobnosti 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 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.

Kaj pa je pravzaprav konsistenca betona?

Konsistenca betona je tisti parameter, ki določa plastičnost betona. Standardi predpisujejo metode določanja konsistence sveže mešanice običajnih vibriranih betonov ( Ve-Be metoda, metoda s posedom, metoda z razlezom, metoda z vibriranjem) in kriterije za posamezne stopnje konsistence (trdoplastična, srednjeplastična, mehkoplastična in tekoča). V splošnem velja, naj bo mešanica vibriranega betona taka, da se jo lahko oblikuje z rokami. Tekoč beton uporabljamo pri betoniranju tankih profilov ali izjemno gosto armiranih elementov. Tak beton mora imeti vse lastnosti homogene mešanice. Zato se plastičnemu betonu dodajajo superplastifikatorji, ki povečujejo vgradljivost. Plastična mešanica omogoča izdelavo trdnega in homogenega betona, vendar je pri vgradnji potrebno nekaj več energije (Žarnič, 2003).

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 (začetek strjevanja) se prične oblikovati vedno večja količina C-S-H gela in drugih produktov hidratacije, s čimer 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 zrn preostalega – grobega agregata, tako da ni potrebnega mazivnega učinka. 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 vodocementnega 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 odvečne vode iz betonske mešanice, ker je ni sposobna zadrževati). Prav tako se zniža mehanska trdnost, vodoneprepustnost, 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 razmerje. Od trenutka zamešanja do začetka vezanja cementa se poleg fizikalno kemijskih procesov in reakcij spreminja tudi strukturna viskoznost. Dolžina časovnega intervala je odvisna od časa vezanja cementa, količine vode in temperature. S porastom količine vode se interval podaljšuje, 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 obdelata 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-zaboj, 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 v močno armirane prereze. S tem se izognemo tudi slabim vplivom ročnega vibriranja. (RILEM, 2000).

### 3.1 Reologija samozgoščevalnega betona

Tako kot ostale vrste betonov lahko tudi samozgoščevalni beton opišemo kot suspenzijo delcev, kjer so delci grobega agregata razpršeni v malti. Malta ima delce drobnega agregata razpršene v pasti, pasta pa cementne in praškaste delce v vodi. Iz tega sledi, da ni mogoče optimizirati reoloških lastnosti betona, če prej ne optimiziramo reoloških lastnosti paste in malte (RILEM, 2000).

Zmogljivost samozgoščevalnega betona ovrednotimo:

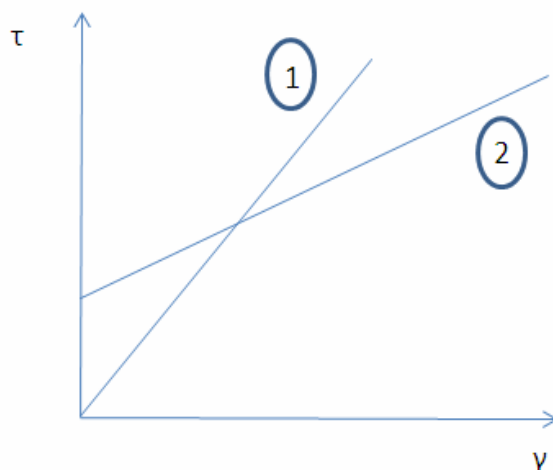
- s sposobnostjo tečenja (beton se horizontalno razprostira samo zaradi delovanja lastne teže; za mero sposobnosti tečenja se uporablja premer razleza pri ustrezni preiskavi)
- z viskoznostjo betona (imenovano tudi notranje trenje v tekočini, je posledica medsebojnega delovanja sosednjih tekočinskih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

Tekoči beton se obnaša podobno kot plastični fluid, katerega reološko obnašanje opisuje Binghamova enačba:

$$\tau = \tau_0 + \beta_p * \gamma \quad (1)$$

kjer je:

$\gamma$  - strižna hitrost



*Reološke lastnosti Newtonovih tekočin in Bingamovih teles (RILEM, 2000).*

$\tau$  - 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 linerana)

$\beta_p$  - plastična viskoznost

Za določitev reoloških parametrov (priporočene vrednosti: napetost na meji tečenja pod 12 Pa, plastična viskoznost med 150 in 250 Pa) 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.

## 1. NEWTONOVE TEKOČINE

$$\tau = \eta * \gamma \quad \eta \dots \text{viskoznost} \quad (2)$$

## 2. BINGHAMOVO TELO

$$\tau = \tau_0 + \beta_p * \gamma \quad \beta_p \dots \text{plastična viskoznost} \quad (3)$$

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 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 superplastifikatorja v betonsko mešanico.

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

- z zadostno količino praškastih delcev ustrezne zrnivosti,
- s sredstvom za povečanje viskoznost.

### **3.2 Priprava in mešanje betona**

Priprava je proces merjenja in vstavljanja sestavin v mešalec. Večino sestavin se meri po masi in ne prostornini. To pa zato, ker če merimo npr. pesek po prostornini, lahko to povzroči nenatančnost v merjenju. Voda in tekoči dodatki se merijo lahko po prostornini ali po masi. Po večini je priprava mešanic avtomatska ali vsaj polavtomatska.

Glede na ceno, tip konstrukcije ali količino potrebnega betona so lahko operacije mešanja opravljene na samem gradbišču ali pa v betonarni.

Pripravljena mešanica je definirana kot beton, ki je narejen za dostavo naročniku v plastičnem in nestrjenem stanju.

Pred pričetkom proizvodnje samozgoščevalnega betona je potrebno mešanico sprojektirati in preskusiti. Potrebno je preiskati opremo in materiale, ki jih nameravamo uporabiti, določiti prava mešalna zaporedja in čase mešanja.

Na kinetiko reakcij v mešalcu za beton vplivajo količina, vrste in razmerja ter vrstni red doziranja posameznih sestavin, pa tudi oblika in velikost mešalne posode, oblika mešal, način, intenzivnost, čas mešanja itd. S spreminjanjem navedenih parametrov se lahko bistveno spremenijo pričakovane lastnosti sveže, še bolj pa lastnosti strjene betonske mešanice.

### **3.3 Transport betona**

Transport pripravljenega betona na samo gradbišče naj bi bil opravljen čim hitreje, obvezno pa pred začetkom vezanja betona, tako, da ko se beton vgradi v opaže, ga je možno optimalno zgostiti in, če je potrebno, tudi površinsko obdelati. Če je transport predolg, beton izgubi na konsistenci. Pri normalnih pogojih okolja so zelo majhne oziroma niso omembe vredne izgube konsistence 30 minut po tem, ko se začne hidratacija cementa. Ko je beton vzdrževan

v počasnem stanju agitacije oziroma je mešan periodično, sicer izgubi nekaj na konsistenci, ampak če je dostavljen in vgrajen v 90 minutah po začetku hidratacije, je vse v redu. Posebno pozornost pa je treba posvetiti transportu in vgrajevanju betona v vročih in suhih pogojih okolja (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

Pri transportiranju samozgoščevalnega betona iz betonarne na gradbišče obstaja nevarnost segregiranja mešanice (neprimerno agitiranje, čakanje ...). Potrebno je opraviti predhodne preiskave časovnega spreminjanja samozgoščevalnih lastnosti betona, da se lahko zagotovi specifične lastnosti mešanice pri vgrajevanju. Čas transportiranja betona mora biti čim krajši in naj ne bi presegel 60 minut.

Pri takemu betonu lahko povečamo sposobnost zapolnjevanja z dodajanjem superplastifikatorja neposredno v boben avtomešalca. Dodajanje vode v boben ni dovoljeno, saj je ta metoda precej nezanesljiva in lahko zelo hitro pride do pojava segregacije. V primeru korigiranja mešanice v avtomešalcu je potrebno preveriti mešanico na gradbišču z enakimi preskusi, kot se praviloma izvajajo v betonarni.



*Centralno mešan beton v betonarni (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

### **3.4 Lastnosti strjenega samozgoščevalnega betona**

Samozgoščevalni beton se mora zgostiti samo zaradi lastne teže. Zaradi tega je pomembno, da svoje samozgoščevalne lastnosti (odpornost na segregacijo, sposobnost samoodzračevanja...) obdrži dovolj dolgo, tako da ima tudi v strjenem stanju čim bolj homogeno strukturo.

Pri vgraditvi homogene sveže mešanice samozgoščevalnega betona se oblikuje omejeno stično območje med agregatnimi zrnji in tekočo fazo. Zaradi velike količine praškastih delcev z veliko razvito površino lahko pri samozgoščevalnem betonu pričakujemo bolj neprepustno mikrostrukturo kot pri običajnem vibriranem betonu. Večja homogenost in

neprepustnost samozgoščevalnega betona se običajno odražata v izboljšanih karakteristikah strjenega betona.

### **3.4.1 Trdnost in togost**

Trdnost in neprepustnost hidratizirane cementne paste je povezana s kapilarno poroznostjo, ki jo kontroliramo z vodocementnim razmerjem in stopnjo hidratacije. Z izjemo zmrzlinke odpornosti je trajnost betona v večini primerov kontrolirana s prepustnostjo.

Zaradi izboljšane mikrostrukture ima samozgoščevalni beton običajno nekoliko višjo tlačno trdnost kot običajni vibrirani beton z enakim vodocementnim razmerjem. Za natezno trdnost (ocenjena posredno iz cepilnega nateznega preskusa na valjastih vzorcih) poročajo, da je enaka kot pri običajnem vibriranem betonu.

Poleg trdnosti betona je pri armiranobetonskih konstrukcijah pomembna tudi trdnost stika med betonom in armaturo. S preskusi izvleka armature na betonskih prizmah so ugotovili, da je pri samozgoščevalnem betonu trdnost stika večja kot pri referenčnem vibriranem betonu enake tlačne trdnosti.

### **3.4.2 Krčenje in lezenje**

Zaradi visoke vsebnosti praškastih delcev v samozgoščevalnem betonu lahko pričakujemo večje plastično krčenje ali lezenje kot pri običajnih betonih. Primerjave vibriranih in samozgoščevalnih betonov opravljene v sklopu mednarodnega projekta so pokazale, da lezenje in krčenje pri samozgoščevalnih mešanica ni bilo bistveno večje kot pri običajnem vibriranem betonu.

Na krčenje in lezenje samozgoščevalnega betona lahko bolj ali manj vpliva izbira konstitutivnih materialov. Nekateri poročajo, da uporaba apnenčeve moke z ustrežno finostjo zmanjša krčenje samozgoščevalnega betona.

Velikost krčenja in lezenja betona je odvisna tudi od nege betona. Zato je pomembno, da se negovanje betona prične v kar najkrajšem času.

### **3.4.3 Prepustnost, obstojnost in kvaliteta površine**

Primeren pokazatelj obstojnosti betona je njegova prepustnost. Pri merjenju vodovpojnosti površine betona so ugotovili, da je beton na površini pri samozgoščevalnih mešanica gostejši in manj vodoprepusten kot pri referenčnih (običajnih vibriranih) betonih. Razlog za manjšo

prepustnost samozgoščevalnega betona naj bi bila gostejša mikrostruktura zaradi izločitve vibriranja in uporabe večje količine praškastih delcev. Zato lahko pričakujemo tudi večjo obstojnost zaradi manjše nevarnosti karbonatizacije, zmanjšane prepustnosti za kloride itd. Vse kaže, da imata velik vpliv na obstojnost samozgoščevalnega betona količina in vrsta praškastega materiala, ki ga uporabimo poleg cementa. Možna je tudi vključitev ustrezne količine zračnih mehurčkov, kar omogoča dobro zmrzlinško odpornost samozgoščevalnega betona, ki naj bi bila v določenih primerih celo boljša kot pri običajnem vibriranem betonu.

Izkušnje pridobljene z raziskavami visoko in srednje trdnih betonov kažejo, da je pri samozgoščevalnih betonih površina betona manj porozna in ima bolj enakomerno barvo kot pri običajnem vibriranem betonu. Gladkost površine je bila še posebej izrazita v primerih, ko se je beton s pomočjo črpalke in ventilov vgrajeval z dna opaža. (Petan, 2002).



## 4 OSNOVNI MATERIALI

Čeprav ima samozgoščevalni beton v svežem stanju zelo drugačne lastnosti kot običajni vibrirani beton, so osnovni materiali za izdelavo popolnoma enaki, in sicer cement, voda in agregat. Bistvene razlike so v potrebni količini posameznega materiala. Osnovni razlike v primeru samozgoščevalnega betona sta:

- večja prostornina praškastih delcev, katerih velikost je manjša od 150  $\mu\text{m}$  (cement, fine frakcije kamnitega agregata-kamena moka in mineralni dodatki),
- manjši delež grobega agregata, katerega največje zrno običajno ne presega 20 mm.

Osnovni materiali za izdelavo samozgoščevalnega betona morajo ustrezati namenu uporabe betona in ne smejo vsebovati škodljivih primesi v količinah, ki bi lahko poslabšale kvaliteto in obstojnost betona ali povzročile korozijo armature.

### 4.1 Cement

Obstajata dve večji skupini cementov:

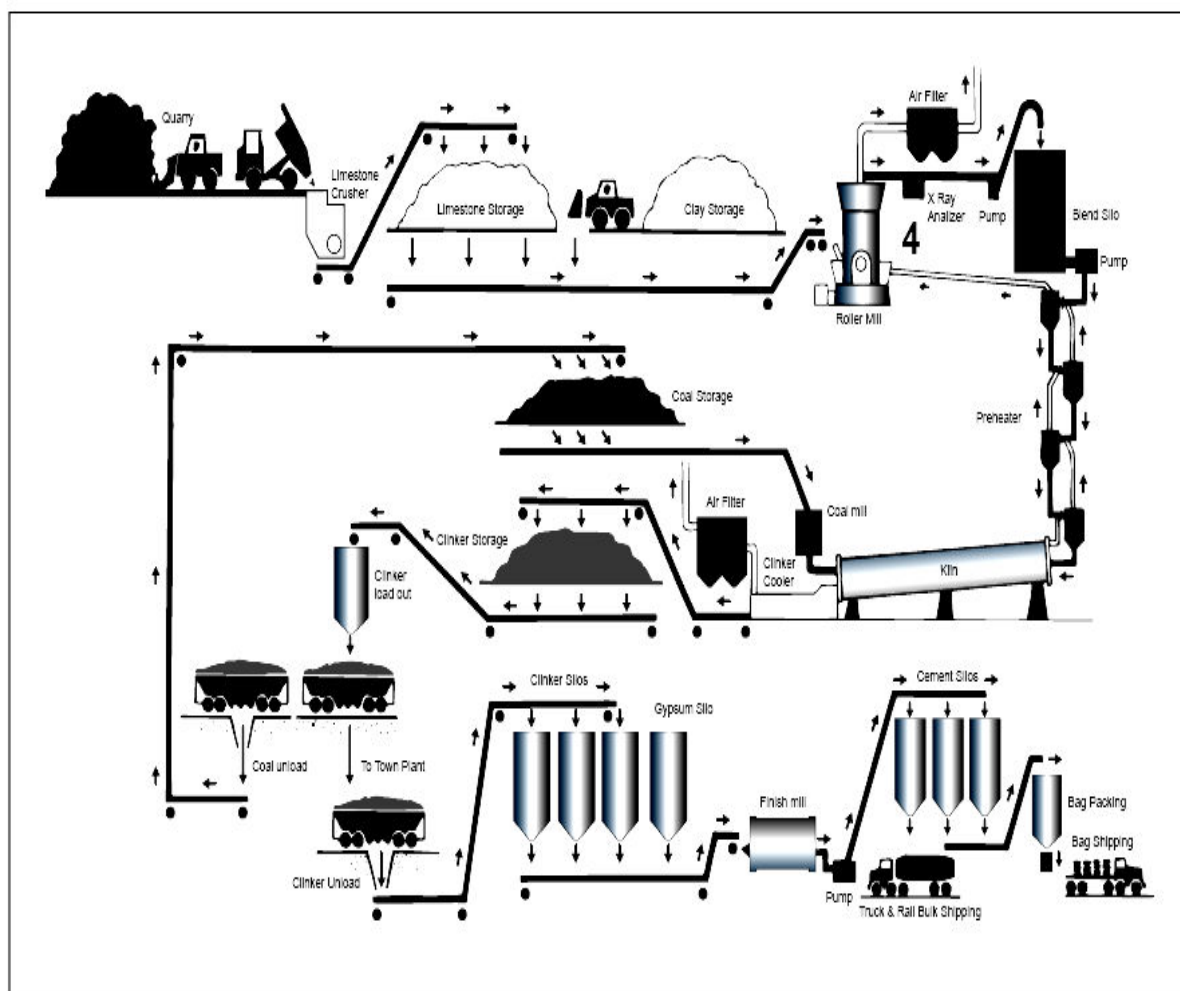
- silikatni (glavna sestavina so silikati kalcija,  $\text{C}_3\text{S}$ ),
- aluminatni (glavna sestavina so kalcij aluminati,  $\text{C}_3\text{A}$ ).

#### Portland cement

Portland cement je značilen predstavnik silikatnih cementov. Uporablja se brez ali s hidravličnimi dodatki. Dodatki sami ne morejo vezati z vodo, to sposobnost pa dobijo, ko se pomešajo s cementom (mleta granulirana plavžna žindra, naravna pucolanska zemlja, opalska breča, elektrofiltrski pepel). Cement, ki vsebuje večjo količino žindre (od 31 do 85%), se imenuje žlindrin cement. Cement z veliko količino pucolana (nad 30%) se imenuje pucolanski cement.

Žlindrini in pucolanski cementi so bolj odporni na agresivno delovanje sulfatnih soli, ki se nahajajo v vodi ali v tleh, razvijajo manj hidratacijske toplote kot portland cement, imajo pa manjšo začetno trdnost. Ta se s časom veča in kasneje lahko doseže enako vrednost kot pri ustreznem portland cementu. Uporabljajo se za podmorske gradnje in gradnje masivnih betonskih objektov.

Z raznimi dodatki lahko spreminjamo lastnosti portland cementa.



*Postopek pridobivanja cements (Žarnič, 2003).*





#### 4.1.1 Hidratacija cements

Hidratacija je proces vezanja vode in cements. To je kompleksna serija reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Nekatere reakcije potekajo istočasno nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na drugo. Na začetku je proces odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih mineralov in kalcijevega sulfata. V nadaljevanju postane proces bolj kontroliran z rastjo kristalov hidratacijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov (Žarnič, 2003).

Hitrost hidratacije je odvisna od:

- sestave klinkerja in količine primesi v mineralih klinkerja,
- mikrostrukture klinkerja, ki je odvisna od razmer pri žganju klinkerja,
- količine in oblike kalcijevega sulfata,
- finosti in granulacijske sestave cements,

- vodocementnega razmerja pri pripravi mešanice,
- razmer pri zorenju mešanice in
- prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici.

Faza	Shema	Opis dogajanja
1.		<p><b>Pred-indukcijsko obdobje (traja nekaj minut)</b></p> <p>Po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Proces sta ekzotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Na tej stopnji reagira le 2 do 10% C<sub>3</sub>S. Mineral C<sub>3</sub>A se v deležu med 5 in 25% raztaplja in reagira s sulfatnimi ioni. Ob tem nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Mineral C<sub>4</sub>AF reagira podobno kot C<sub>3</sub>A, delež reagiranega C<sub>2</sub>S pa je zelo majhen.</p>
2.		<p><b>Indukcijsko obdobje - relativno mirovanje (traja nekaj ur)</b></p> <p>Po začetni hitri hidrataciji se reakcijska hitrost zelo zmanjša. To zmanjšanje se razlaga na dva načina:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- po teoriji zaščitne plasti se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v pred-indukcijskem obdobju. Zaradi tega se hidratacija upočasni. Zaščitna plast se počasi spreminja in postane propustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidratacije</li> <li>- po teoriji kristalizacijskih jeder, nadaljevanje hidratacije ovirajo nastale nasičene raztopine kalcijevega hidroksida. S pojavom hidratacijskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, koncentracija kalcijevih ionov se zniža in hidratacijski proces ponovno steče.</li> </ul>
3.		<p><b>Obdobje pospešene hidratacije (tretja do dvanajste ure procesa)</b></p> <p>Nasičena otopina z novo nastalimi kristali preide iz faze sola v fazo cementnega gela, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrnji. Hitrost hidratacije C<sub>3</sub>S in C<sub>2</sub>S narašča in doseže maksimalne vrednosti.</p>
4.		<p><b>Obdobje pojemajoče hidratacije (do konca hidratacije)</b></p> <p>Hitrost reakcij se zmanjšuje in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki tvorijo opno okoli nehidratiziranih jeder cementnih delcev. Nastaja C-S-H gel kot posledica hidratacije C<sub>3</sub>S in C<sub>2</sub>S. Na začetku nastali etringit reagira s nehidratiziranim C<sub>3</sub>A in C<sub>4</sub>AF in nastane monosulfat. V nadaljevanju hidratizirani material zori. Nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen, gel se prepleta z novo nastajajočimi kristali, ti rastejo in tvorijo mrežo.</p>

*Opis in prikaz faz hidratacije cementa (Žarnič, 2003).*

Pri prehodu koloidnega sistema v cementni gel (2. faza v 3. fazo) nastaja porozna struktura. Nastajajo:

- gelske pore (0,2 do 5  $\mu\text{m}$ ), ki so vedno zastopane v enakem deležu, ne glede na stopnjo hidratacije cementa in so zapolnjene z vodo,
- kapilarne pore (0,05 do 1,3  $\mu\text{m}$ ), ki jih je najmanj pri popolni hidrataciji cementa, to je pri  $v/c = 0,38$ , ko se vsa cementna masa transformira v gel, in
- zračni mehurčki (10 do 1000  $\mu\text{m}$ ), ki so zaprti za vdor vode pri običajnih pritiskih.

#### 4.1.2 Hidratacijska toplota

Hidratacijska toplota se razvija med vezanjem in strjevanjem cementa pri določeni temperaturi okolja. Meri se v J/g. K razvoju hidratacijske toplote veliko prispeva  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

#### 4.2 Voda

Na splošno velja, da je pitna voda primerna za pripravo mešanic z vezivi. Pri bolj zahtevnih konstrukcijah (prednapete betonske konstrukcije) je zaradi občutljivosti visokotrdnih jekel za kable v vsakem primeru treba analizirati sestavo vode. Morska voda vsebuje velike količine mineralov in se za izdelavo betona ne sme uporabljati. Zgornja meja prisotnosti soli v vodi za pripravo armiranega betona je 5g/l (Hočevar, 2007), morska voda pa jo vsebuje okoli 7x več.

Drobni delci (glina, organske snovi) in soli, ki so razpršeni v vodi, ustvarjajo prevleke na agregatu in prekinitve med zrnici cementa ter s tem bistveno vplivajo na proces hidratizacije in sprijemanje cementne paste z agregatom. Posamezne spojine, ki so raztopljene v vodi, povzročajo tudi korozijo cementnega kamna.

Vpliv neznane vode na trdnost cementne paste lahko preskušamo s primerjalnimi poskusi prizem izdelanih z vodo znane in neznane kakovosti. Neprimernost vode se lahko pokaže tudi z naslednjimi pojavi: eflorescenca (površinsko izločanje soli), prostorninska nestabilnost cementnega kamna, sprememba časovnega poteka hidratacije paste, sprememba barve paste in različne vrste korozije.

Voda ne sme vsebovati snovi, ki bi vplivale:

- na čas začetka vezave cementa,
- na hidratacijo cementa,
- na kasnejše mehanske lastnosti,
- na obstojnost betona ali,

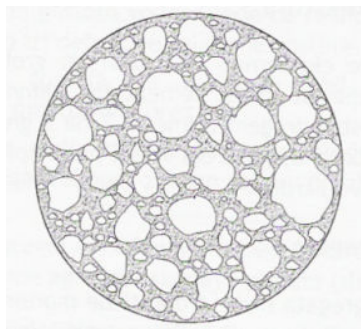
- ki bi povzročale korozijo armature v armirano betonskih konstrukcijah.

### 4.3 Agregat

Agregat mora biti čist. Izpolnjevati mora celo vrsto zahtev, da je primeren za uporabo v betonu. Zahteve so povezane z omejitvijo prisotnosti snovi, ki bi lahko poslabšale karakteristike betona:

- mineraloško petrografska sestava in ugotavljanje prisotnosti snovi, ki bi lahko kakorkoli vplivale na hidratacijo in strjevanje betona ter na mehanske lastnosti in obstojnost strjenega betona. Vse morajo biti v določenih mejah. V primeru armiranega betona pa je pomembno tudi, da ne povzročajo korozije armature,
- organske snovi (masti) zavirajo hidratacijo,
- obvitost posameznih zrn z glino onemogoča dobro povezavo med cementno pasto in zrnji agregata,
- grudice gline,
- slaba odpornost zrn proti drobljenju,
- velika dovzetnost zrn za vpijanje vode,
- slaba oblika zrn (ploščata in podolgovata zrna) in
- slaba odpornost na mraz (zmrzovanje - tajanje) negativno vplivajo na mehanske lastnosti strjenega betona.

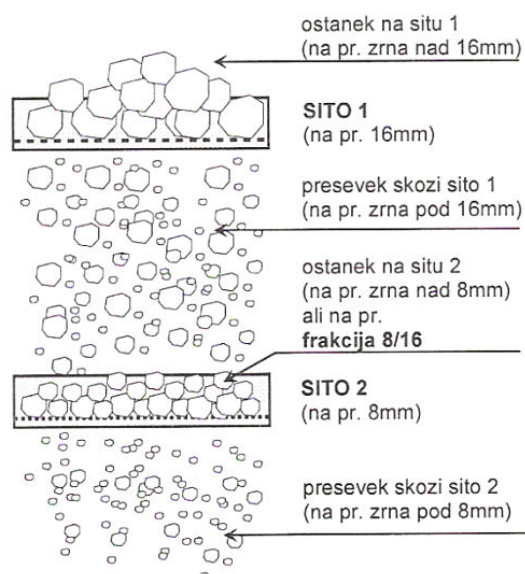
Prodnat agregat zaradi svojih zaobljenih robov omogoča lažje vgrajevanje betona in s tem manjšo porabo vode in posledično manjše vodocementno razmerje. Vendar pa ima svoje slabe lastnosti. Ker je zelo nehomogen in je njegovo mineraloško sestavo težko kontrolirati, predstavlja večjo nevarnost za pojav alkalno - silikatne reakcije, prav tako pa lahko vsebuje veliko organskih snovi. Danes se v proizvodnji betona večinoma uporablja drobljen agregat, ker je veliko bolj homogen kot naravni agregat, istočasno pa je tudi cenejši. Zaradi ostrih robov se zrna med seboj zaklinijo, kar nam daje boljše mehanske lastnosti betonov. Z uporabo kemijskih dodatkov pa lahko zmanjšamo sicer večje vodocementno razmerje. Lastnosti betonov so pogosto odvisne od vsebnosti posamezne vrste agregata.



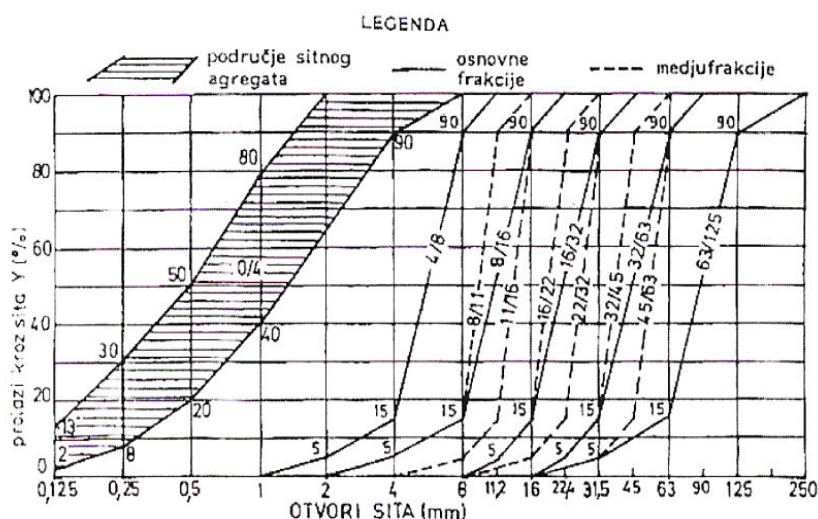
*Zrnavost agregata v betonskem prerezu (Žarnič, 2003).*

Beton mora vsebovati določeno mešanico grobih in finih frakcij, ker s tem vplivamo na vgradljivost betona in njegove mehanske lastnosti. Če imamo v betonu velik delež agregata grobe frakcije, mu izboljšamo mehanske lastnosti, vendar poslabšamo vgradljivost in povečamo možnost segregacije. Prav tako zmanjšamo potrebo po cementni pasti in s tem ceno betona.

Velikost agregatnih zrn določamo s pomočjo sejalne analize. S tem postopkom določimo njihovo zrnastostno sestavo. Vzorec agregata presejemo skozi niz sit, ki so postavljena eno nad drugim. Sito z največjimi odprtinami je na vrhu. Zanima nas, koliko materiala se je presejalo skozi posamezno sito. Osnovni komplet sit vsebuje sita z odprtinami 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm in 63 mm. Za posebne zahteve vmes dodajamo sita 5,6 mm, 11,2 mm, 22,4 mm in 45 mm. Polnilni material, s katerim dosežemo posebne lastnosti v betonu, pa zahteva še uporabo sit 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm in 0,5 mm. Pri projektiranju betona govorimo o tem, koliko posamezne frakcije potrebujemo v sestavi betona, da dosežemo željene lastnosti. Frakcija je material, ki je ostal med dvema siti. Označimo jo po sistemu  $d/D$ , kjer  $d$  pomeni velikost odprtine sita na katerem se je material zaustavil in  $D$  velikost odprtine sita, skozi katerega se je agregat presejal (primer: frakcija 8/16).



Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov (Žarnič, 2003).



Sejalne krivulje – na vodoravni osi so podane odprtine sit, na navpični pa delež materiala, ki se je presejal skozi sito (Žarnič, 2003).

## 4.4 Dodatki betonu

### 4.4.1 Kemijski dodatki

Ti dodatki se betonu dodajajo tik pred ali med mešanjem. S svojim fizikalnim, kemičnim ali kombiniranim delovanjem vplivajo na lastnosti svežega ali strjenega betona. Beton mora biti primeren za uporabo, trden, obstojen in odporen proti prodoru vode. Te lastnosti lahko zlahka dosežemo z uporabo kemijskih dodatkov. Glavni namen teh dodatkov je:

- zmanjšanje cene betona,

- doseganje določenih lastnosti betona lažje kot z drugimi načini,
- vzdrževanje kakovosti betona med prevozom, vgrajevanjem in nego betona.

Razdelitev kemijskih dodatkov glede na njihov vpliv v betonu je lahko sledeča:

- aeranti – v beton se uvedejo mikroskopsko majhni mehurčki zraka. Povečajo odpornost proti ciklom zmrzovanja in tajanja ter povečujejo odpornost proti kemijski koroziji betona. Prav tako omogočajo lažje vgrajevanje betona in preprečujejo njegovo segregacijo,
- plastifikatorji – dodajajo se betonom srednje konsistence in srednjega v/c razmerja. Izboljšajo plastičnost betona in s tem olajšajo vgradljivost betona in zmanjšajo porabo vode (manjši v/c). Uporabljajo se pri betonih, ki se vgrajujejo v ozke konstrukcije in v konstrukcije z velikim deležem armature,
- pospeševalci – pospešijo vezanje cementa in povečajo zgodnje trdnosti betona. Pri uporabi pospeševalcev moramo biti previdni, saj predozacija lahko povzroči povečano krčenje ob sušenju betona, korozijo armature, težje vgrajevanje in izgubo trdnosti s starostjo,
- zaviralci – zavirajo vezanje cementa in s tem omogočajo lažje vgrajevanje betona ob visokih temperaturah svežega betona, ki povzročajo hitro vezanje. Uporabo zaviralcev spremlja manjše zmanjšanje začetnih trdnosti,
- antifrizi – omogočajo betoniranje v hladnem vremenu (pod 0°C). Delujejo tako, da znižajo temperaturo ledišča vode,
- preprečevalci korozije armature – povečajo odpornost armature proti kloridom,
- dodatki za kompenziranje krčenja – zmanjšajo krčenje ob sušenju betona. Uporabljamo jih v objektih, kjer morajo biti razpoke omejene na minimum zaradi obstojnosti ali estetskih zahtev,
- mešani dodatki – povečanje vodotesnosti, izboljšanje povezave med starim in novim betonom, povzročanje nabrekanja betona pred strjevanjem, preprečevanje poraščenja z lišaji, sredstva proti spiranju cementa za uporabo pri betoniranju pod vodo...



#### 4.4.1.1 Površinsko aktivne kemikalije

Med površinsko aktivne kemikalije spadajo dodatki, ki jih uporabljamo za vnos kontrolirane količine zraka v beton (aeranti) in za povečanje plastičnosti betona (plastifikatorji).

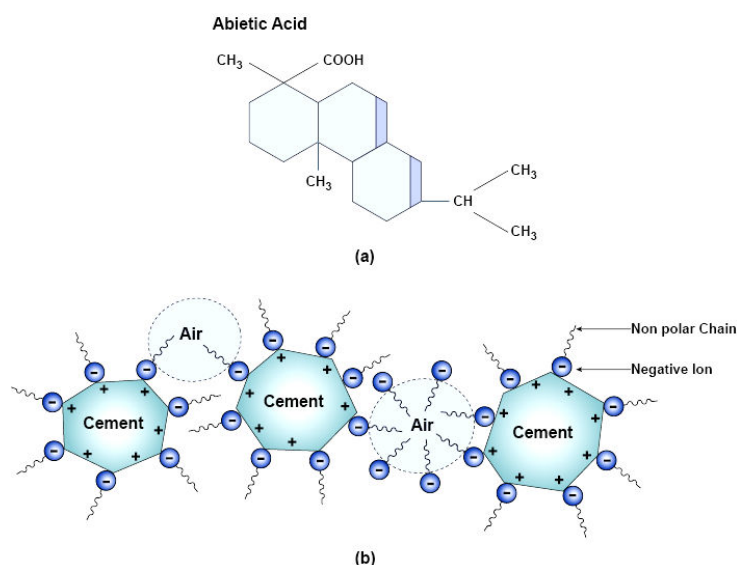
#### 4.4.1.2 Sestava

Površinsko aktivni dodatki so sestavljeni iz dolgih verig organskih molekul, katerih en konec je hidrofilen (privlači vodo), drug konec pa hidrofoben (odbija vodo). Hidrofilen del vsebuje eno ali več polarnih skupin, kot so  $-\text{COO}^-$ ,  $-\text{SO}_3^-$  ali  $\text{NH}_4^+$ . V tehnologiji betona uporabljamo običajno anionske dodatke, bodisi z nepolarno verigo ali z verigo, ki vsebuje nekaj polarnih skupin. Prvi služijo kot aeranti, drugi kot plastifikatorji. Površinsko aktivne kemikalije se adsorbirajo na površinah zrak – voda in cement – voda. Orientacija njihovih molekul določa, ali je prevladujoč učinek aeriranja betona ali plastifikacija sistema cement – voda. (Bokan, 1991).

#### 4.4.1.3 Delovanje (Bokan, 1991)

##### Aeranti

Na sliki (a) *Kemijska formula aeranta* sta prikazana kemijska formula tipičnega aeranta, ki je zgrajen iz nepolarne ogljikovodikove verige z anionsko polarno skupino, in mehanizem njegovega delovanja. Mehanizem, pri katerem pride do vnosa zraka in njegove stabilizacije v primeru, da dodamo aerant mešanici cementa in vode, opisuje Lea /14/. Na površini zrak – voda so polarne skupine orientirane proti vodni fazi z namenom, da zmanjšajo površinsko napetost vode, pospešujejo formiranje zračnih mehurčkov in preprečujejo, da bi se dispergirani mehurčki združili. Na površini cement – voda, kjer na površini delcev cementa že obstajajo usmerjene sile, se polarne skupine povežejo s komponentami cementa, nepolarni del verige pa je usmerjen proti vodi. Posledica tega je hidrofobnost cementne površine, zračni mehurčki nadomestijo vodo in ostanejo v stiku s trdnimi delci cementa.

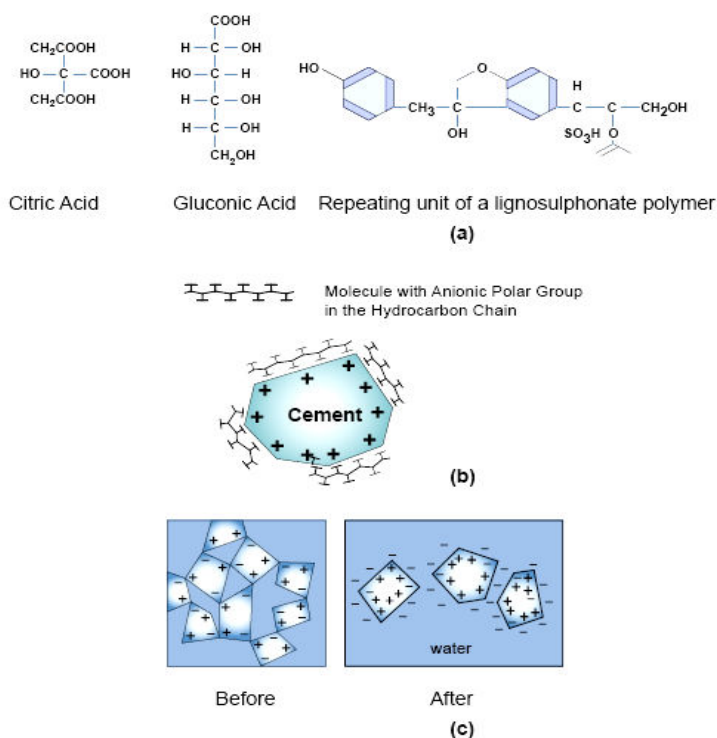


(a) *Kemijska formula aeranta (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

(b) *Mehanizem njegovega delovanja (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

## Plastifikatorji

Formule treh tipičnih plastifikatorjev so prikazane na sliki (a) *Tipične formule plastifikatorjev – ogljikovodikov, ki vsebujejo anionske polarne skupine*. Opazimo, da je v tem primeru anionska polarna skupina povezana z ogljikovodikovo verigo, ki je sama zase polarna oziroma hidrofilna. Če dodamo cementu le majhno količino vode in ne uporabimo plastifikatorja, ne dobimo dobro dispergirane sistema, saj poseduje voda visoko površinsko napetost, hkrati pa težijo cementni delci za tem, da se združijo v kosme. Ko dodamo v sistem cement – voda plastifikator, se polarna veriga adsorbira vzdolž cementnega delca; namesto da bi usmeril nepolarni konec proti vodi, usmeri v tem primeru proti vodi polarni konec in tako ne zmanjša samo površinske napetosti vode, ampak povzroči tudi hidrofilnost delcev cementa (*spodnja slika b in c*). Ker sloj vodnih dipolov obdaja hidrofilne cementne delce, je njihovo kosmičenje preprečeno in tako dobimo dobro dispergirani sistem.



(a) Tipične formule plastifikatorjev – ogljikovodikov, ki vsebujejo anionske polarne skupine (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

Shematični prikaz adsorbiranja polarne verige vzdolž cementnega delca (b) in dispergiranost cementnih delcev preden dodamo plastifikator v sistem cement – voda in po tem (c) (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

#### 4.4.1.4 Superplastifikatorji nove generacije (Petan, 2002)

Superplastifikator je dodatek za uravnavanje reoloških lastnosti sveže betonske mešanice s tem, da omogoča:

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

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

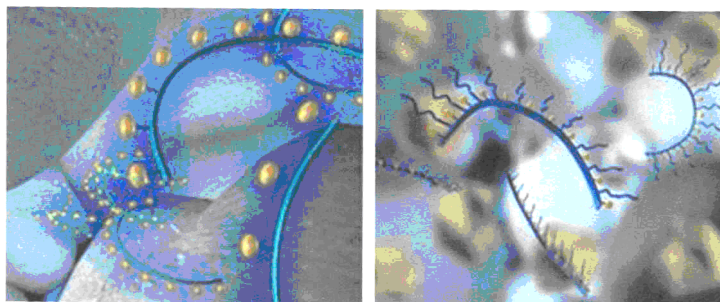
Glede na kemijsko sestavo so superplastifikatorji razvrščeni v štiri skupine:

- (a) sulfonirani melamin-formaldehidni kondenzati (SMF),
- (b) sulfonirani naftalen-formaldehidni kondenzati (SNF),
- (c) modificirani lignin-sulfonati (MLS),

(d) modificirani polikarboksilati.

Izdelavo samozgoščevalnih betonov omogočajo superplastifikatorji nove generacije, ki imajo veliko močnejši učinek kot običajni superplastifikatorji. Običajni superplastifikatorji na bazi melanin- in naftalen-sulfonatov lahko »utekočinijo« beton za 15 – 30 minut in pri tem zmanjšajo potrebo po vodi za 5 – 25%. Superplastifikatorji nove generacije na bazi polikarboksilatov pa lahko vzdržujejo tekoče stanje betonske mešanice dlje časa, 120 – 180 minut, količina potrebne vode pa se zmanjša za 25 – 40%. Čas vzdrževanja obdelavnosti betona je odvisen od kompatibilnosti superplastifikatorja in mešanice praškastih delcev. Če le ti niso kompatibilni, se v prvih 15-ih minutah po zamešanju opazi očitna izguba konsistence betonske mešanice.

Razlika v učinku superplastifikatorja in superplastifikatorja nove generacije je v njuni kemijski sestavi. Superplastifikator nove generacije 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 polietilen oksidov kratke verige, ali jih sploh nima (*slika: Shematični prikaz superplastifikatorja (levo) in superplastifikatorja nove generacije (desno)*).



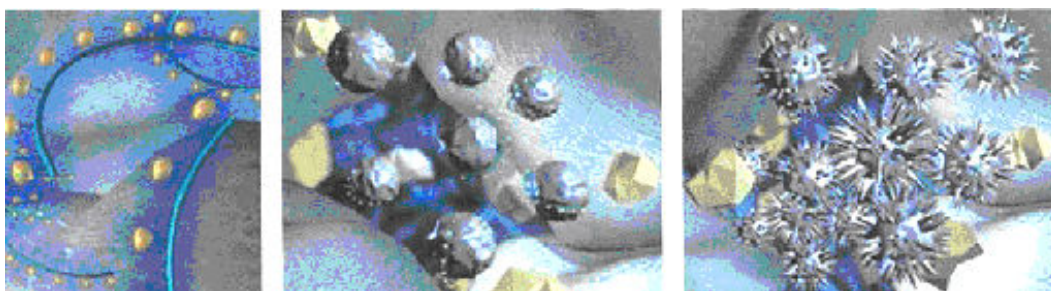
*Shematični prikaz superplastifikatorja (levo) in superplastifikatorja nove generacije (desno) (Petan, 2002).*

Superplastifikator nove generacije 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 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 odboj.

Delovanje običajnega superplastifikatorja je prikazano na sliki spodaj:

- (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 onemogočijo nadaljni učinek dodatka



(a)

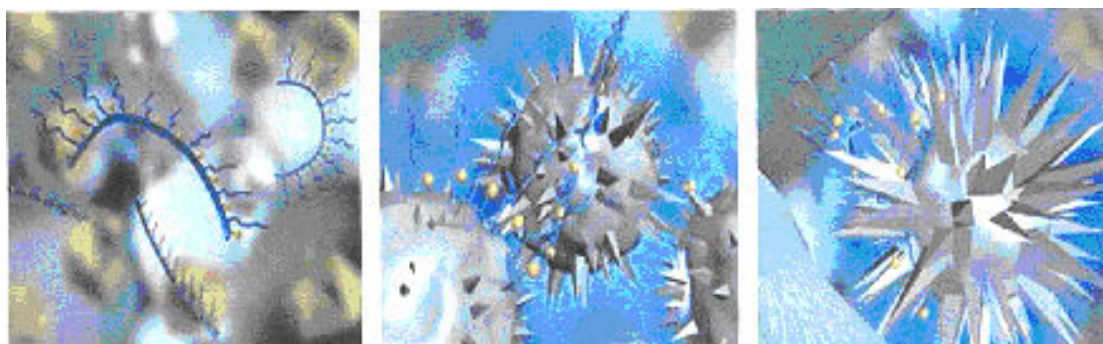
(b)

(c)

*Shematični prikaz delovanja običajnega superplastifikatorja (Petan, 2002).*

Delovanje superplastifikatorja nove generacije je prikazano na sliki spodaj:

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



(a)

(b)

(c)

*Shematični prikaz delovanja superplastifikatorja nove generacije (Petan, 2002).*

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

Način adsorbiranja superplastifikatorja nove generacije na cementne delce je odvisen od posameznih komponent cementa. Adsorbcija superplastifikatorja nove generacije na površino trikalcijevega aluminata ( $C_3A$ ) je zelo hitra in obsežna, zlasti če se dodatek dozira z vodo takoj na začetku mešanja. Na površino trikalcijevega silikata ( $C_3S$ ) pa se superplastifikator nove generacije veže veliko počasneje in sicer se v prvi uri adsorbira majhna količina dodatka, v nadaljnjih štirih urah adsorbcije skoraj ni, nato pa je adsorbcija dodatka konstantna.

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

#### **4.4.1.5 Aeranti**

Aeranti so dodatki, s katerimi v strukturo betona uvedemo zračne mehurčke. Mehurčki se enakomerno porazdelijo po cementnem kamnu; njihova medsebojna razdalja naj ne bi bila večja od 0,25 mm. Takšna struktura omogoča povečanje zmrzlinke odpornosti betona. Zračni mehurčki prekinejo mrežo finih kapilar, kar zmanjša kapilarno vpijanje vode, poleg tega pa ima voda, ki v primeru izpostavljenosti betona mrazu zamrzne, dovolj prostora za neovirano širjenje. V strukturi aeriranega betona se pojavijo bistveno manjše napetosti zaradi zamrzovanja vode kot v primeru odsotnosti zračnih mehurčkov, s čimer se bistveno zmanjša nevarnost poškodb betonske strukture. Z aeriranjem betonske mešanice se izboljša tudi obdelavnost svežega betona ter poveča odpornost na segregacijo.

Večja poroznost betona ima sicer za posledico zmanjšanje tlačne trdnosti betona, vendar lahko slednje kompenziramo z manjšanjem vodocementnega razmerja. Zračni mehurčki v svežem betonu namreč delujejo kot mazivo (podobno kot plastifikator) in s tem omogočajo znižanje količine vode pri vzdrževani obdelavnosti sveže mešanice. Preiskave predhodnikov so pokazale, da se z vnosom aeranta v betonsko mešanico zmanjšajo potrebne količine apnenčeve moke in superplastifikatorja ter zniža v/c razmerje, zaradi nevarnosti segregacije pa je bilo potrebno v mešanico vključiti tudi sredstvo za povečanje viskoznosti. V primerjavi z neaerirano mešanico je aerirana mešanica izkazala višje tlačne trdnosti, verjetno zaradi nižjega v/c razmerja.

Izkušnje kažejo, da v smislu zmrzljinske odpornosti običajnega vibriranega betona dajejo najboljše rezultate vnešeni zračni mehurčki velikosti 0,15 - 0,25 mm in poroznost betona 4 – 8%. Tako stopnjo poroznosti se lahko doseže že z zelo majhno količino dodanega aeranta. Pri doziranju moramo biti zelo previdni, saj lahko s preveliko količino dodanega aeranta dosežemo ravno nasprotni učinek; poroznost betona se z dodajanjem aeranta najprej povečuje, po določeni meji pa se začne zmanjševati (Pezdir, 2005).

#### **4.4.1.6 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 boljšo obdelavnost,
- v strjeni obliki zmanjšano vpojnost in visoko vodoneprepustnost.

#### **4.4.1.7 Sredstva za povečanje viskoznosti**

Sredstva za povečanje viskoznosti (znana tudi kot dodatki proti izpiranju) so dodatki, ki povečujejo stabilnost materialov na bazi cementa. Tovrstni dodatki zmanjšujejo nevarnost ločitve heterogenih sestavin betona med transportom, vgrajevanjem in zgoščevanjem ter zagotavljajo dodatno stabilnost mešanice do začetka strjevanja.

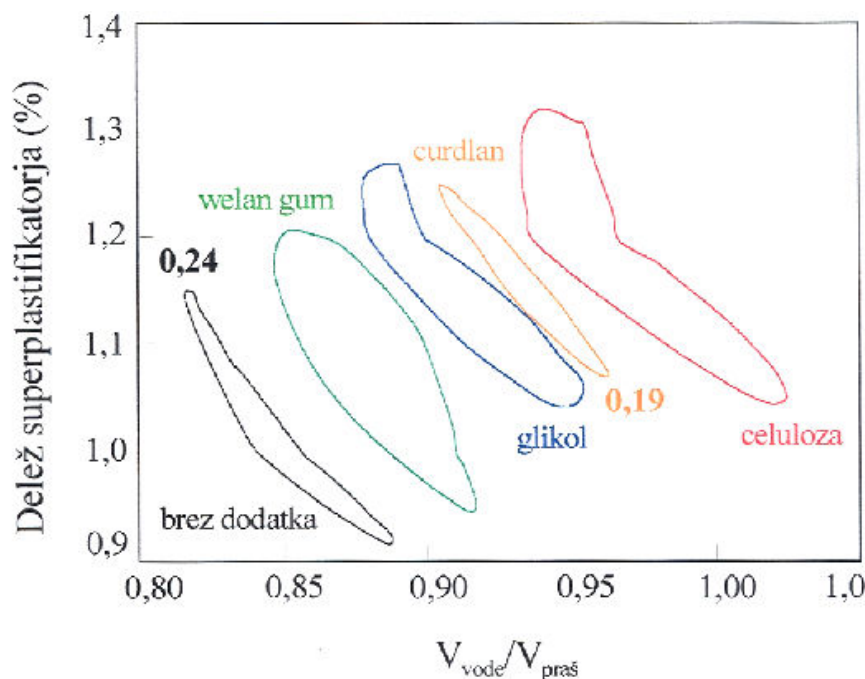
V samozgoščevalnih betonih jih uporabljamo za zmanjševanje potrebne količine praškastih materialov v mešanici ali za zagotavljanje ustreznih samozgoščevalnih lastnosti v primeru večjega nihanja lastnosti sestavin (predvsem vlažnosti drobnega agregata). Sredstvo za povečanje viskoznosti se pogosto uporablja v betonskih



mešanicah, ki kažejo nagnjenost k segregaciji. Izgubo sposobnosti tečenja zaradi vključitve sredstva za povečanje viskoznosti lahko kompenziramo z ustreznim povečanjem deleža superplastifikatorja in/ali vode brez pomembnega vpliva na kohezivnost.

Z dodajanjem sredstva za povečanje viskoznosti v betonsko mešanico se izboljša obdelavnost sveže betonske mešanice brez povečanja nevarnosti segregiranja, skrajša pa se čas, v katerem mešanica izkazuje ustrezno stopnjo obdelavnosti za kvalitetno vgradnjo. Zato je uporaba sredstva za povečanje viskoznosti v samozgoščevalnih betonih lahko problematična. Ugotovili so tudi, da sredstvo za povečanje viskoznosti povzroči zmanjšanje zgodnjih tlačnih trdnosti.

Pri uporabi sodobnih superplastifikatorjev in mineralnih dodatkov v samozgoščevalnem betonu običajno ni potrebe po dodajanju sredstva za povečanje viskoznosti; le-to naj bi se uporabilo le za specialne potrebe (Petan, 2002).



*Učinkovitost vrst sredstva za kontrolo viskoznosti (Petan, 2002).*

#### 4.4.2 Mineralni dodatki

Poznamo nepucolanske in pucolansko hidravlične dodatke, ki izboljšajo kohezijo in odpornost na segregacijo. Zmanjšajo tudi potrebo po cementu, kar zmanjša hidratacijsko toploto in kasnejše krčenje. Mineralne dodatke klasificiramo glede na reakcijsko sposobnost z vodo in jih delimo na dva tipa:



- Tip I, nepucolanski dodatki, kot je apnenčeva ali dolomitna kamena moka. Presevek na situ 0,063 mm mora biti večji kot 70% (Hočevar, 2007),
- Tip II so pucolanski dodatki. Prvi je elektrofiltrski pepel (EFP), ki izboljša kohezivnost in zmanjša občutljivost na vsebnost vode v mešanici. Mikrosilika zboljša kohezivnost in odpornost na segregacijo. Granulirana plavžna žindra zmanjša hidrationsko toploto in je običajno že sestavni del cementov CEM II in CEM III.

### **Stranski produkti kot mineralni dodatki**

Razni pepeli iz sežiganja oglja ali ostankov žetve, kot so naprimer luščine riža, stebila riža, mikrosilika kot ostanek določenih metalurških operacij in granulirana žindra iz železnih in neželeznih metalnih industrij so stranski produkti, ki so uporabni kot mineralni dodatki v betonih. Kitajska, Indija, ZDA, Rusija, Nemčija, Južna Afrika in Velika Britanija so države, ki proizvajajo največ elektrofiltrskega pepela. Stopnja proizvodnje je nekje 500 milijonov ton letno. Norveška je vodilna v proizvodnji mikrosilike. Seveda pa imajo Kitajska, Indija in ostale azijske države potencial, da proizvedejo velike količine riževih lupin in stebel. Jaz bom opisal dva stranska produkta, in sicer elektrofiltrski pepel, ki so ga vsebovali tudi moji vzorci in mikrosiliko.

Elektrofiltrski pepel in mikrosilika sta mineralna dodatka v obliki prahu, ki sta zaradi velike specifične površine in pucolanskih lastnosti posebej primerna za izdelavo visoko kvalitetnih malt in betonov visokih trdnosti, vodoneprepustnosti in povečane odpornosti na abrazijo in kemijsko agresijo. V hidrationskem procesu cementa in vode reagirata s kalcijevim hidroksidom, ki se zato ne izloča oziroma ni na razpolago za reakcijo z agresivnimi snovmi iz okolja. Doziramo ju lahko od 5% do 10% glede na maso cementa, elektrofiltrski pepel pa tudi v večjih količinah. Zaradi njune velike specifične površine se močno poveča potreba po vodi. Da se temu izognemo, mikrosiliko vedno uporabimo v kombinaciji z enim od superplastifikatorjev, kar pa za elektrofiltrski pepel ni nujno potrebno. Beton pripravljen z mikrosiliko je zelo lepljiv. Mineralne dodatke je potrebno skladiščiti v suhih prostorih (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

#### **4.4.2.1 Elektrofitrski pepel po SIST EN 197-1:2002**

##### **Splošno**

Elektrofitrski pepel se dobi z elektrostatičnim ali mehanskim izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov peči, ki so kurjene z uprašenim premogom. Pepel, dobljen na druge načine, se ne sme uporabljati za cement, ki je skladen z EN-197-1.

Elektrofitrski pepel je po naravi silikatno-aluminatni (silicijski) ali silikatno-apneni (kalcijski). Prvi ima pucolanske lastnosti, drugi ima lahko dodatno še hidravlične lastnosti. Žarilna izguba elektrofitrskega pepela, preskušeno po EN 196-2 z enournim žarjenjem, ne sme biti večja od 5,0% mase.

Sprejemljivi so tudi elektrofitrski pepeli z žarilno izgubo od 5,0% do 7,0% mase ob predpostavki, da so glede trajnosti, zlasti odpornosti proti učinkom mraza, in združljivosti z dodatki izpolnjene zahteve ustreznih standardov in/ali predpisov za beton ali malto, ki veljajo na mestu uporabe. Pri elektrofitrskem pepelu, ki ima žarilno izgubo med 5,0% in 7,0% mase, mora biti zgornja mejna vrednost 7,0% navedena na embalaži in/ali spremnem dokumentu.

##### **Silicijski elektrofitrski pepel (V)**

Silicijski elektrofitrski pepel je fin prah iz pretežno kroglastih delcev, ki imajo pucolanske lastnosti. Vsebovati mora predvsem reaktivni silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) in aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ostanek vsebuje železov oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in druge spojine.

Delež reaktivnega kalcijevega oksida mora biti manjši od 10,0% mase, delež prostega kalcijevega oksida, določen po metodi, opisani v EB 451-1, ne sme biti večji od 1,0% mase. Sprejemljiv je tudi elektrofitrski pepel, ki vsebuje več kot 1,0% mase in manj od 2,5% mase prostega kalcijevega oksida, ob predpostavki, da ekspanzija (prostorninska obstojnost), preskušena po EN 196-3 na mešanici iz 30% mase silicijskega elektrofitrskega pepela in 70 % mase CEM I cementa, skladnega z EN 197-1, ni večja od 10 mm.

Delež reaktivnega silicijevega dioksida mora biti najmanj 25,0% mase.

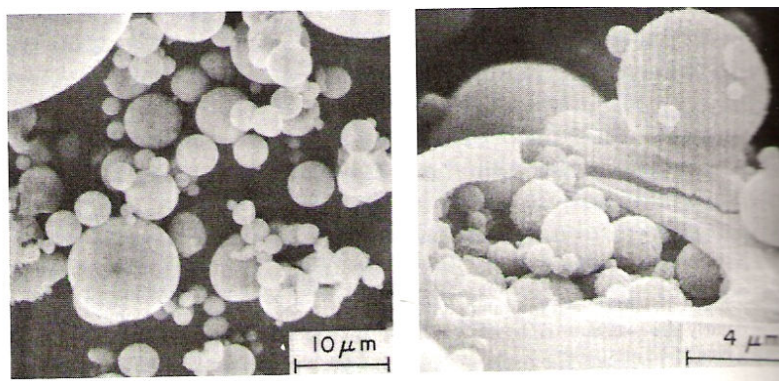
##### **Kalcijski elektrofitrski pepel (W)**

Kalcijski elektrofitrski pepel je fin prah, ki ima hidravlične in/ali pucolanske lastnosti. Vsebuje predvsem reaktivni kalcijev oksid ( $\text{CaO}$ ), reaktivni silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) in aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ostanek vsebuje železov oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in druge spojine. Delež

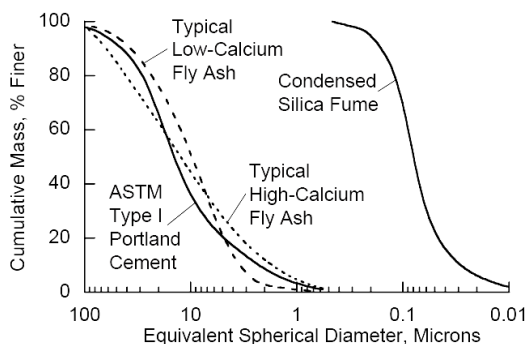
reaktivnega kalcijevega oksida ne sme biti manjši od 10,0% mase. Kalcijski elektrofiltrski pepeli, ki vsebujejo od 10,0% do 15,0% mase reaktivnega kalcijevega oksida, morajo vsebovati najmanj 25,0% mase reaktivnega silicijevega dioksida.

Primerno zmleti kalcijski elektrofiltrski pepel, ki vsebuje več kot 15,0% mase reaktivnega kalcijevega oksida, mora imeti tlačno trdnost po 28 dneh, preskušeno po EN 196-1, najmanj 10,0 MPa. Pred preskušanjem se mora elektrofiltrski pepel zmleti tako, da je finost, ki se izrazi kot masni delež ostanka pepela po mokrem sejanju na situ z velikostjo odprtin 40  $\mu\text{m}$ , med 10,0% do 30,0% mase. Preskusna malta se mora namesto s cementom pripraviti samo z zmletim kalcijским elektrofiltrskim pepelom. Preskušanci se morajo razkalupiti 48 ur po pripravi in nato do preskušanja negovati v prostoru z relativno vlažnostjo najmanj 90%.

Ekspanzija (prostorninska obstojnost) kalcijevega elektrofiltrskega pepela, preskušena po EN 196-3 na mešanici iz 30% mase kalcijskega elektrofiltrskega pepela, zmletega, kot je opisano zgoraj, in 70% mase cementa CEM I, skladnega z EN 197-1, mora biti manjša od 10 mm.



Tipični delci elektrofiltrskega pepela pod mikroskopom (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).



Primerjava velikosti raporeditve delcev med portland cementom, elektrofiltrskim pepelom in mikrosiliko (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

#### **4.4.2.2 Mikrosilika po SIST EN 197-1:2002**

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 amorfnega silicijevega dioksida.

Mikrosilika mora izpolniti te zahteve:

- (a) žarilna izguba, preskušena po EN 196-2 z enournim žarjenjem, ne sme biti večja od 4,0% mase;
- (b) specifična površina (BET) neobdelane mikrosilike, preskušena po ISO 9277:1995, mora biti najmanj 15,0 m<sup>2</sup>/g

Mikrosilika, ki se melje skupaj s klinkerjem in kalcijevim sulfatom, je lahko v originalnem stanju, stisnjena ali granulirana (z vodo).

## **5 SCC BETON: VPLIVI ZMRZOVANJA/TAJANJA IN NJEGOVE ZNAČILNOSTI**

### **5.1 Poškodbe zaradi zmrzovanja in odtajevanja (St John, Poole, Sims, 1998)**

Strjen beton je izpostavljen poškodbam zaradi zmrzovanja/tajanja v deželah, kjer se pozimi izmenjujejo temperature pod in nad 0°C. Poškodba se ponavadi začne s površinsko liso, ki je posledica naključnih nevzporednih razpok. Potem, ko postane poškodba večja, pa nastanejo odprte površine in razni robovi razpok.

Da do zmrzinskih poškodb sploh lahko pride, mora biti seveda prisotna vlaga v porah betona. Če pa je beton homogen, dobro zgoščen in ima nizko v/c razmerje, je poškodba minimalna. Aeriran beton, pripravljen dobro in z nizkim v/c razmerjem ter s pravilnim razmakom med zračnimi porami je zelo široko uporabljen način za zmanjšanje vpliva zmrzinskih poškodb.

Skozi zgodovino imamo različne avtorje, ki so poskušali razložiti delovanje mehanizma oblikovanja poškodb zaradi zmrzovanja. Pa pojdimo po vrsti:

- Zgodnje teorije so se nagibale k temu, da je volumska ekspanzija porne vode zaradi zmrzovanja posledica neke napake v spodnjih slojih betona.
- Collins leta 1944 predpostavi, da bi lahko to bila posledica rasti kristalov vode oz. ledu ter, da se posledično voda premakne proti ledu zaradi razlike v tlakih. Gre za hidravlični tlak. Kasneje se je k tej teoriji nagibalo veliko avtorjev.
- Powers leta 1956 govori o tem, da je ta volumska razširitev (z dovolj velikim hidravličnim pritiskom) posledično potisnila vodo skozi manjše pore in s tem posledično premaknila okoliški material.
- Leta 1995 sta Pigeon in Pleau že nakazala vpliv dodajanja aeranta v beton in s tem povedala, da je to mogoč način izboljšanja zmrzinske odpornosti betona.
- Leta 1986 in 1987 sta Bager in Sellevold delala poskuse, kjer sta uporabljala nizko-temperaturni kalorimeter. Pokazala sta, da je migracija ledu iz površine proti notranjosti mogoče posledica ciklov sušenja betona v zgodovini.

Zelo verjetno je, da je nastala poškodba, ki je posledica zmrzovanja, skupek vseh teh zgoraj opisanih mehanizmov. Iz petrografskega stališča ni ne na cementu ne na agregatu nobenih sprememb, poškodbe so vidne kot serija nerednih, nehomogenih, heterogeno razporejenih razpok. Takšne razpoke se ponavadi pojavijo v cementni pasti in na robovih agregata.

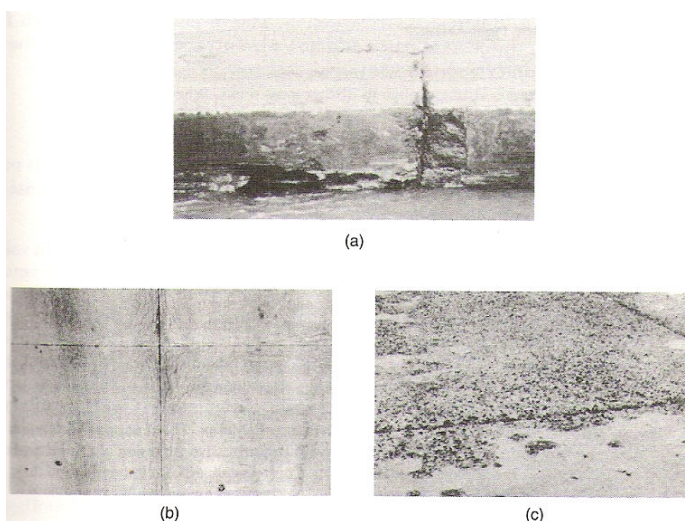
Razdalja med razpokami je odvisna od velikosti agregata in zmrzovalno/tajalnih pogojev. Bolj kot se premikamo s površine v notranjost vzorca vidimo, da so razpoke naključne in nekonstantne. Je pa res, da postanejo v notranjosti vedno bolj pogoste, bolj odprte in premostitvene razpoke vzporedne s površino postanejo bolj pogoste.

Da bi lahko pravilno napovedali poškodbe betona zaradi zmrzovanja, moramo pogledati naslednje parametre:

- vzorec razpok,
- značilnosti lokalnih okoljskih razmer,
- vzorce betona,
- zgodovino oz. nego betona,
- petrografske značilnosti betona.

## 5.2 Delovanje zmrzali

V hladnih klimatskih pogojih se poškodbe na betonskih pločnikih, raznih zidovih, mostovih in železnicah pripiše delovanju zmrzali (zmrzovanje in tajanje). Poškodbe zaradi zmrzovanja predstavljajo v teh področjih velik problem, saj so praviloma povezane z velikimi stroški sanacijskih posegov. Propadanje strjenega betona zaradi zmrzali lahko pripišemo zapleteni mikrostrukturi materiala. Poškodbe zaradi zmrzali v betonu lahko zavzamejo različne oblike. Najbolj pogoste so razpoke v betonu, ki so posledica ekspanzije matrice cementne paste zaradi ponavljajočega cikla tajanja in zmrzovanja. Betonski kamni izpostavljeni zmrzovanju in tajanju v prisotnosti vlage in talilne soli so podvrženi še luščenju (končna površina se odlučči).



*(a) Propadanje neaeriranega betona vzdolž saturacijske linije (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

*(b) Velike D razpoke vzdolž vzdolžnih in prečnih stičišč na devet let starem pločniku (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

*(c) Luščenje površine (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

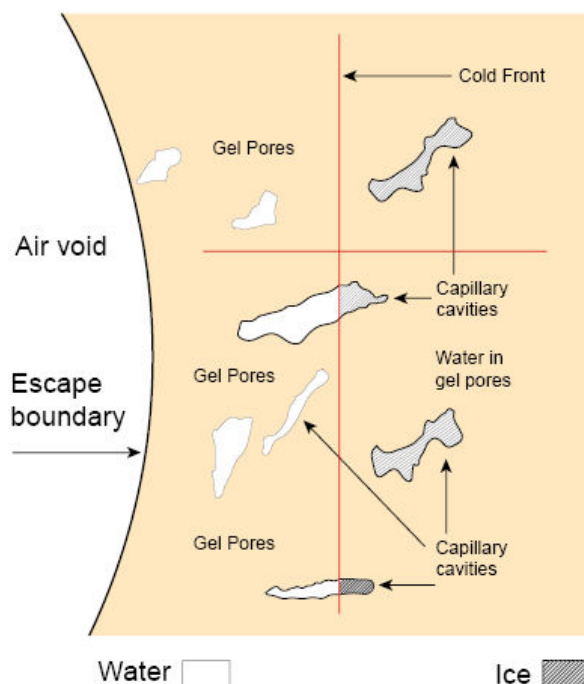
Vnos zračnih mehurčkov v betonsko mešanico se je izkazal kot učinkovit način zmanjševanja poškodb betona zaradi zmrzovanja/tajanja.

### **Delovanje zmrzovanja/tajanja na cementni kamen (Kumar Mehta, Monteiro, 2006)**

Powers je bil tisti, ki je razložil delovanje zmrzovanja/tajanja na cementni kamen in razložil, zakaj je vnašanje zraka efektiven način preprečevanja poškodb zaradi zmrzovanja/tajanja.

“Ko voda začne zmrzovati v kapilarnih porah, potrebuje povečanje prostornine, ki znaša okrog 9% prvotne prostornine vode pred zmrzovanjem. Med tem procesom nastaja hidravlični pritisk in njegova velikost je odvisna od oddaljenosti do mest, kjer se pritisk lahko sprosti, prepustnosti materialov in hitrosti, s katero nastaja led. Izkušnje kažejo, da bo ta pritisk nastal v nasičenem vzorcu cementnega kamna, razen če je vsaka kapilarna pora oddaljena največ 0,1 mm od mesta, kjer se pritisk lahko sprosti. Takšne pogoje lahko ustvarimo le z vnosom zračnih mehurčkov v cementni kamen.”

Med zmrzovanjem do  $-24^{\circ}\text{C}$ , je z vodo zasičen vzorec cementnega kamna brez vnešenega zraka pokazal 1,6‰ raztega, med tajanjem do prvotne temperature pa 0,5‰ permanentnega raztega. Če se doda 2% vnešenega zraka se pri zmrzovanju pojavi 0,8‰ raztega in pri tajanju 0,3‰. Ko je imel vzorec 10% vnešenega zraka se ni pojavila nobena omembe vredna deformacija, tako med zmrzovanjem kot tajanjem.



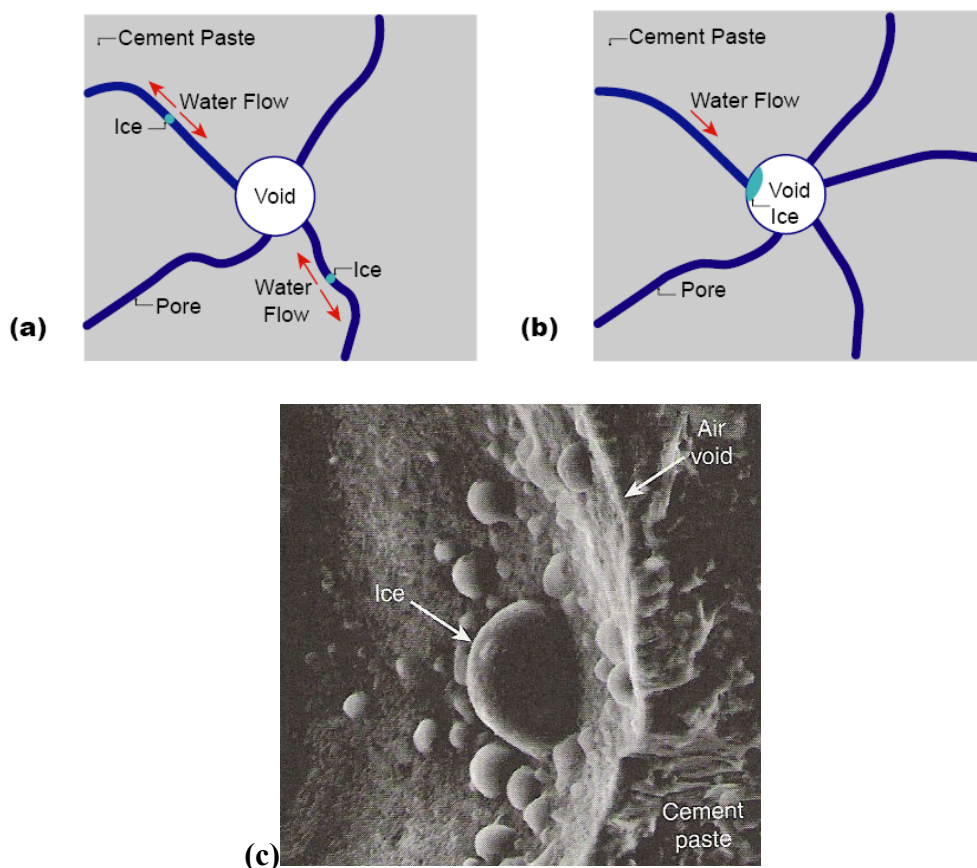
*Z povečevanjem vnešenega zraka je možnost večanja prostornine zaradi oblikovanja ledu manjša, saj zračna pora zagotovi prostor, kamor se umakne voda in kjer lahko zmrzne brez povzročanja pritiska (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

Powers je predlagal, poleg hidravličnega pritiska, ki je posledica zmrzovanja vode v kapilarnih votlinah, še osmotski pritisk, ki je rezultat delnega zmrzovanja raztopin v kapilarah in lahko povzroči dodatno destruktivno ekspanzijo v cementnem kamnu. Voda v kapilarah ni čista; vsebuje razne raztopljive substance, kot so alkalije, kloridi in kalcijev hidroksid. Te raztopine zmrznejo pri nižji temperaturi kot čista voda: torej večja kot je koncentracija soli v raztopini, nižja je točka ledišča.

Ocenjeno je, da voda v gelnih porah ne zmrzne nad  $-78^{\circ}\text{C}$ . Tako potem v zasičenem cementnem kamnu, ki je izpostavljen zmrzovanju, voda v velikih porah zmrzne, medtem ko gelna voda ostane še vedno tekoča v superpodhlajenem stanju. To ustvari termodinamično neravnotežje med zmrznjeno vodo v kapilarah, ki vsebuje nizko energijsko stanje in na drugi strani superpodhlajeno vodo v gelnih porah, ki ima visoko energijsko stanje. Razlika v entropiji ledu in superpodhlajene vode prisili, da se voda iz gelnih por premakne proti kapilaram, torej proti nizko energijskemu stanju, kjer lahko zmrzne. Ta nova voda v kapilarnih porah poveča prostornino ledu, dokler ne zmanjka prostora. Ni pa nujno, da ta mehanizem povzroči mehanske poškodbe. Do mehanskih poškodb pride, ko obstajajo za to pogoji (velik temperaturni gradient, nizka prepustnost, visoka stopnja zasičenosti). To je



dovolj dobra razlaga, zakaj v vzorcu brez vnešenega zraka pride do raztegovanja, medtem ko v vzorcu z vnešenim zrakom pride celo do krčenja. Mikroskopska opazovanja so potrdila, da kadar se je oblikoval led znotraj zračne pore, je prišlo do krčenja cementnega kamna.



(a) Shematski diagram prikaza nastajanja ledu v kapilarni pori (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

(b) Prikaz nastajanja ledu v zračni pori (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

(c) Skenirana formacija ledu v zračni pori (St John, Poole, Sims, 1998).

### Delovanje zmrzali na agregat

Zmrzovanje pa ne vpliva samo na cementno pasto, ampak tudi na druge porozne materiale kot so porozni kamni, zrna peska, apnenec,...; Niso vsi porozni agregati občutljivi na zmrzovanje/tajanje, ampak je njihova občutljivost odvisna od velikosti, števila in povezanosti por. Verbeck in Langren sta predlagala 3 osnovne razrede agregatov: v prvi skupini so agregati z nizko prepustnostjo in visoko trdnostjo. Tu ne pride do razpok. Druga skupina so agregati s srednjo prepustnostjo, t.j. vsebujejo večino por, manjših od 500 nm. Kapilarne sile

v tako majhnih porah povzročijo, da je agregat z lahkoto zasičen in zadrži vodo. (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

Agregati z visoko prepustnostjo, ki načeloma vsebujejo veliko število velikih por, pa spadajo v 3 kategorijo. Čeprav dovolijo lahek vstop vode, pa lahko povzročijo probleme glede obstojnosti. Lahko pride do poškodb stičnega območja med agregatom in cementnim kamnom, ko je voda pod pritiskom izločena iz agregatnega zrna.

*Deleži zraka v betonu v odvisnosti od velikosti največjega zrna agregata (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

**Vsebnost zraka (%)**

<b>Nominalno maksimalno zrno agregata (mm)</b>	<b>Močna izpostavljenost</b>	<b>Povprečna izpostavljenost</b>
9	7.5	6
12.5	7	5.5
19	6	5
25	6	4.5
37.5	5.5	4.5
50	5	4
76	4.5	3.5

### **Parametri, ki kontrolirajo odpornost na zmrzovanje**

Na podlagi predhodno povedanega je jasno, da na zmrzlinško odpornost betona vplivata tako karakteristike cementnega kamna kot agregata. Vendar pa je zmrzlinška odpornost betona odvisna še od mnogih drugih parametrov, kot so lokacija meje sprostitve (razdalja, ki jo mora voda prepotovati, da doseže območje sprostitve pritiska), struktura pornega sistema (velikost, število, povezanost por), stopnja zasičenosti (količina prisotne vode), hitrost ohlajanja, natezna trdnost materiala, ki mora biti prekoračena, da pride do razpok.

### **Vnašanje zraka**

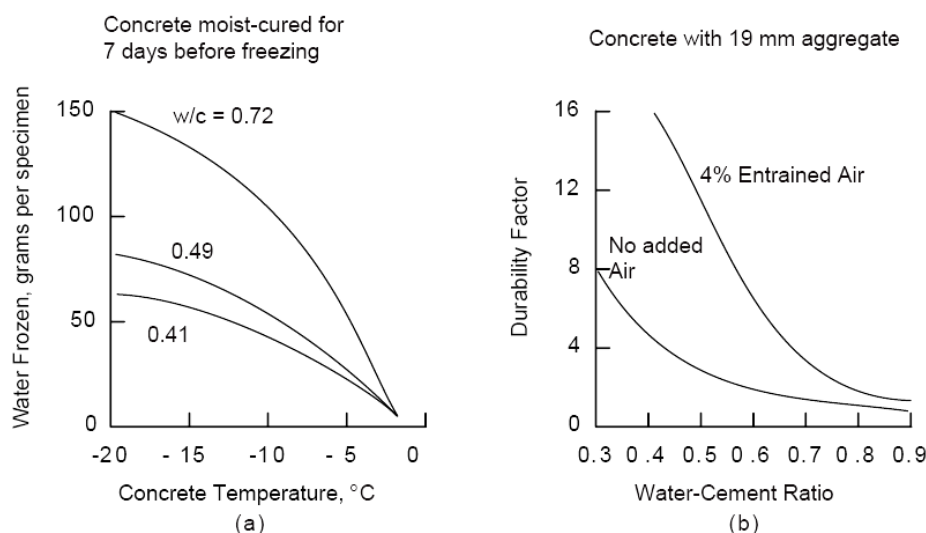
Ni bistvena celotna vsebnost zraka, ampak razdalja med zračnimi mehurčki 0,1 do 0,2 mm v vsaki točki strjenega cementnega kamna, ki je nujno potrebna za zaščito betona pred zmrzovanjem/tajanjem. Z dodajanjem majhnih količin aeranta v cementno pasto (približno 0,05% glede na maso cementa) je mogoče vnesti 0,05 - 1 mm velike zračne mehurčke. Vendar pa lahko pri dani prostornini vnešenega zraka zmrzlinška odpornost betona zelo niha, saj je odvisna predvsem od razdalje med zračnimi mehurčki in s tem od njihove velikosti in porazdelitve v cementnem kamnu.

To pomeni, da celotna poroznost betona ali prostornina vnešenih zračnih mehurčkov ni parameter, ki bi kontroliral zmrzlinško odpornost betona. Potreba po cementu je praviloma povezana z največjim zrnom agregata in deležem grobega agregata v betonu. Če je grobega agregata relativno veliko, veliko pa je tudi največje zrno agregata, je količina potrebne cementne paste manjša, zato bo z vključitvijo določenega deleža zraka pri tem betonu v cementnem kamnu več zračnih mehurčkov, ki bodo bližje skupaj, kot pri betonu, v katerem prevladuje droben agregat in ki ima manjše največje zrno agregata.

Tudi zrnovostna sestava agregata torej vpliva na prostornino vnešenega zraka, nanj pa vpliva tudi dodajanje dodatkov, kot je na primer elektrofiltrski pepel ali uporaba zelo finih zrn cementa. Na splošno velja, da lahko bolj kohezivna betonska mešanica zadrži več zraka kot zelo tekoča ali zelo suha mešanica. Tudi neustrezno ali premočno mešanje, podaljšanje časa transporta betona, premočno vibriranje, lahko povzroči padec vsebnosti zraka.

### Vodocementno razmerje

Velja da, večje ko bo vodocementno razmerje za določeno stopnjo hidratacije ali nižja kot bo stopnja hidratacije za dano vodocementno razmerje, večja bo prostornina velikih por v hidratizirani cementni pasti/cementnem kamnu.



*Vpliv vodocementnega razmerja in vsebnosti zraka na odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

Ker lahko voda enostavno zamrzne v velikih porah, kjer ni izpostavljena močnim površinskim silam, lahko na podlagi tega predpostavimo, da bo pri določeni temperaturi zmrzovanja več zmrzljive vode pri višjem v/c razmerju.

Verbeck in Klieger sta domnevo tudi eksperimentalno dokazala.

ACI 318-83 predpisuje za normalne pogoje zmrzovanja v/c razmerje največ 0,45 v primeru robnikov, odtočnih kanalov, ... itd, za vse ostale elemente pa v/c razmerje največ 0,50. Seveda te omejitve v/c razmerja predvidevajo normalno hidratacijo cementa. Zato je potrebno vsaj 7 dni mokre nege pri normalnih temperaturah, pred izpostavitvijo zmrzovanju/tajanju.

### **Stopnja zasičenosti**

Znano je, da suhe oziroma delno suhe snovi niso podvržene poškodbam zaradi zmrzovanja. Obstaja meja zasičenosti, pri kateri bo beton po vsej verjetnosti počil pri zelo nizkih temperaturah. V bistvu je odločilnega pomena razlika med kritično in dejansko stopnjo zasičenosti tista, ki odloča o zmrzlinški odpornosti betona. Beton lahko zataji že pod kritično stopnjo zasičenosti po primerni negi, pri ustrezni prepustnosti pa lahko to mejo preseže, tudi če je izpostavljen vlažnemu okolju. Prepustnost je torej pomembna pri zmrzlinški odpornosti, ker ne samo da kontrolira hidravlični pritisk, ki je povezan z notranjim gibanjem vode med zmrzovanjem, ampak tudi kritično stopnjo zasičenosti pred zmrzovanjem. (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

### **Trdnost**

V nasprotju s splošnim prepričanjem, visokotrden beton ne zagotavlja vedno najvišje trajnosti. Vzemimo na primer zmrzlinške poškodbe. Če vzamemo beton brez vnešenega zraka, bo vzorec z vnešenim zrakom zagotovil boljšo odpornost proti zmrzovanju, čeprav ima prvi višjo trdnost. Velja pravilo, da pri srednje in visokotrden betonih, vsak 1% vnešenega zraka zmanjša trdnost betona za 5%. Torej bi brez spreminjanja v/c razmerja 5% vnešenega zraka zmanjšalo trdnost betona za 25%. Ker vnešen zrak izboljša obdelavnost betona, lahko ob vzdrževani obdelavnosti nekoliko zmanjšamo v/c razmerje in s tem delno kompenziramo padec trdnosti zaradi vnešenega zraka. (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

### **Zmrzovanje/tajanje v prisotnosti talilnih soli (Kumar Mehta, Monteiro, 2006)**

Seveda je odpornost na zmrzovanje in tajanje v prisotnosti talilnih soli manjša kot samo na zmrzovanje. Mnogo raziskovalcev je opazilo, da do maksimalnih poškodb pride pri koncentraciji soli nekje 4 – 5%.

Uporaba talilnih soli ima hkrati pozitivne in negativne učinke. Znižanje temperature zmrzovanja vode zaradi prisotnosti soli je vsekakor pozitiven učinek soli. Na drugi strani pa imamo 5 negativnih učinkov:

- povečanje stopnje zasičenosti betona zaradi higroskopnih lastnosti soli,
- povečan razvoj vplivov, ko superpodhlajena voda v porah dejansko zmrzne,
- razvoj diferencialnih napetosti, kot posledica zmrzovanja "plast po plast" v betonu, zaradi gradientov solnih koncentracij,
- temperaturni šok, kot rezultat suhe aplikacije soli na beton pokrit z ledom ali snegom,
- kristalizacija soli v zasičenih raztopinah v porah.

Iz naštetega je očitno, da negativni učinki talilnih soli prevladajo nad eno pozitivno, zato lahko zaključimo, da je odpornost betona na zmrzovanje/tajanje bistveno zmanjšana, ko so prisotne talilne soli.

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

Če se zahteva, je treba notranjo odpornost proti zmrzovanju/tajanju določevati po postopku, skladnem 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 XF3 ( $n = 150$ ). 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% (Žnidaršič, 2007).

*Stopnje izpostavljenosti XF (Žnidaršič, 2007).*

<b>XF1</b>	Zmerna zasičenost z vodo brez talilnih soli	Vertikalna površina betona izpostavljena dežju in zmrzali
<b>XF2</b>	Zmerna zasičenost z vodo s prisotnostjo talilnih soli	Vertikalna površina betona izpostavljena 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

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

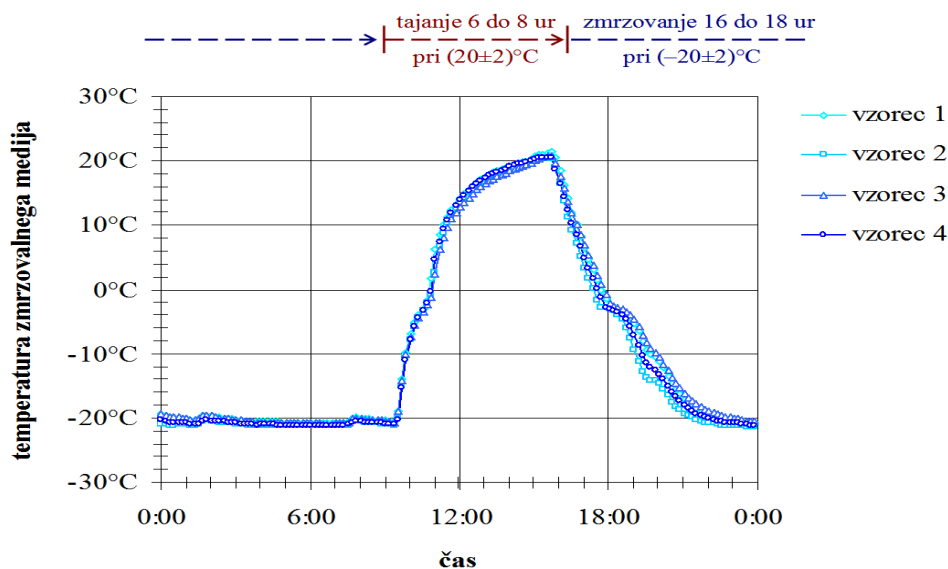
Če se zahteva, je treba odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju določevati po postopku, skladnem s standardom SIST 1026, pri starosti betona najmanj 28 dni in največ 35 dni, če ni drugače predpisano. Kot zmrzovalni medij je treba pri poskusu uporabiti 3%-no

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 s količino odluščene 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 odluščene materiala iz preglednice: *Merila za ocenjevanje odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju s soljo: količina odluščene materiala v  $\text{mg}/\text{mm}^2$* . Če se preskus izvaja na opaženi površini in če so po 25. ciklih prekoračene osnovne mejne vrednosti odluščene materiala, se sme s preskusom nadaljevati do 50. ciklov, pod pogojem, da po 25. ciklih niso bile prekoračene skrajne vrednosti iz spodnje preglednice. Šteje, da je opažena površina odporna proti zmrzovanju/tajanju, če po 50. ciklih niso bile prekoračene dovoljene mejne vrednosti iz spodnje preglednice (Žnidaršič, 2007).

*Merila za ocenjevanje odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju s soljo: količina odluščene materiala v  $\text{mg}/\text{mm}^2$ . (Žnidaršič, 2007).*

Stopnja izpostavljenosti XF		Osnovne mejne vrednosti po 25 ciklih	Skrajne mejne vrednosti po 25 ciklih	Dovoljene mejne vrednosti po 50 ciklih
XF2	Povprečje	0,3	0,5	0,6
	Posamezna vrednost	0,4	0,65	0,8
XF4	Povprečje	0,2	0,35	0,4
	Posamezna vrednost	0,25	0,4	0,5

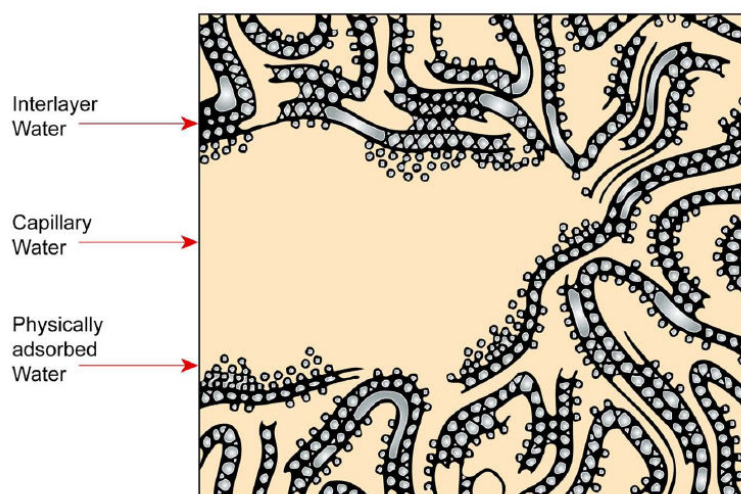


*Tipičen dnevni cikel zmrzovanja/tajanja (Duh, Žarnič, Bokan-Bosiljkov, 2006).*

### 5.3 Voda v cementnem kamnu (Bokan, 1991)

Voda je prisotna v cementnem kamnu v več oblikah, ki se razlikujejo po stopnji težavnosti, s katero jo odstranimo iz cementnega kamna.

**Kapilarna voda** je voda, ki se nahaja v porah večjih od 50 Å. Predstavljamo si jo lahko kot nakopičeno vodo, na katero ne delujejo privlačne sile trdne površine. Glede na njeno obnašanje v cementnem kamnu jo razdelimo v dve kategoriji. Vodo v porah večjih od 50 nm imenujemo prosta voda, saj njena odstranitev iz cementnega kamna ne povzroča nobenih prostorninskih sprememb. Na vodo v majhnih kapilarah (5-50 nm) pa delujejo kapilarne sile, zato povzroči odstranitev te vode iz sistema krčenje cementnega kamna.



*Različni tipi vode v C-S-H gelu (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

**Adsorbirana voda** je voda v neposredni bližini trdne površine. Pod vplivom privlačnih sil so vodne molekule fizikalno adsorbirane na površino cementnega kamna. Predpostavljajo, da je lahko do 6 monomolekularnih slojev vode (15 Å) fizikalno vezanih z vodikovimi vezmi. Ker energija posamezne vodne molekule upada z njeno oddaljenostjo od trdne površine, se lahko večji del adsorbirane vode izgubi s sušenjem cementnega kamna pri relativni vlagi do 30%. Prav izguba adsorbirane vode je v največji meri odgovorna za krčenje cementnega kamna zaradi sušenja.

**Medslojna voda** je voda, ki je povezana s strukturo C-S-H gela. Predpostavljajo, da so monomolekularni sloji vode na trdno površino gela močno vezani z vodikovimi vezmi. Izguba te vode je možna le pri zelo intenzivnem sušenju (11% relativna vlaga okolice). Ko pride do izgube te vode, se struktura C-S-H gela bistveno skrči.

**Kemično vezana voda** je voda, ki je sestavni del produktov hidratacije in se pri sušenju ne izgublja.

Ob upoštevanju modela Feldman-Sereda so različni tipi vode v C-S-H gelu prikazani na sliki *Različni tipi vode v C-S-H gelu (Kumar Mehta, Monteiro, 2006)*.

### 5.3.1 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: Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni* 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 (Žnidaršič, 2007).

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

- visoko kakovost zaščitne plasti betona nad armature ali
- vodotesnost betonske konstrukcije.

*Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni (Žnidaršič, 2007).*

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

### 5.4 Pore v cementnem kamnu (Bokan, 1991)

**Medslojne pore v C-S-H gelu** (včasih so jih imenovali gel pore) imajo glede na Powersov model velikost 18 Å in zavzemajo 28% C-S-H gela. V modelu, ki ga predlagata Feldman in Serala, pa se velikost medslonjih por spreminja med 5 in 25 Å. Tako majhne pore ne vplivajo na trdnost in prepustnost cementnega kamna. Voda v teh porah je na trdne površine vezana z vodikovimi vezmi. Odstranitev le te pod določenimi pogoji povzroči krčenje zaradi sušenja in lezenja cementnega kamna.

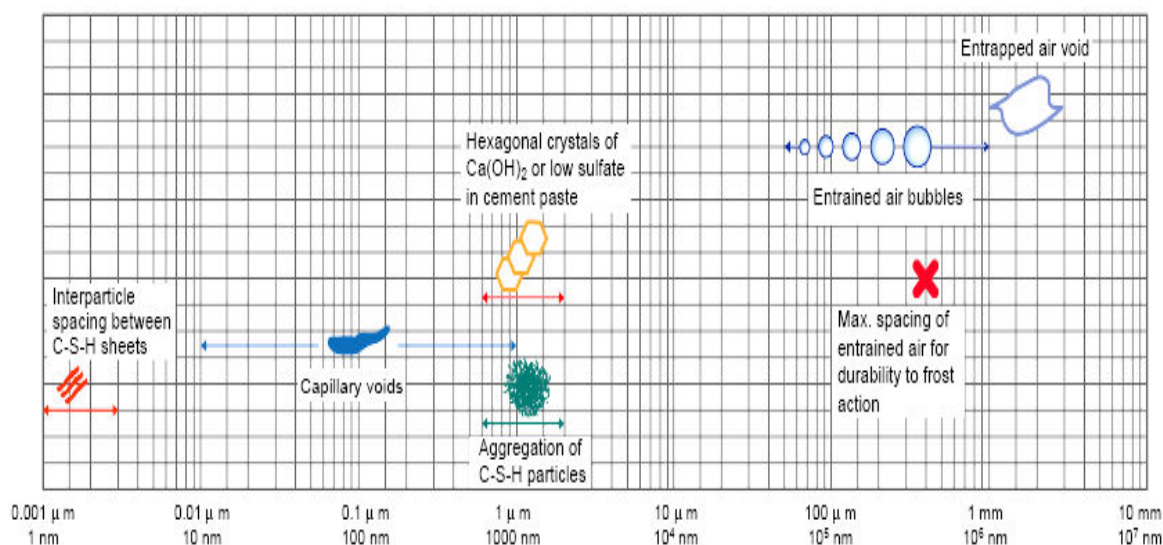


Hidratacijo cementa lahko smatramo kot proces, med katerim postaja prostor, ki sta ga v začetku zapolnjevala voda in cement, vse bolj zapolnjen s produkti hidratacije. Prostor, ki ga ne zavzemajo produkti hidratacije ali cement, sestavljajo **kapilarne pore**. Prostornina in velikost teh por sta določena z vodocementnim razmerjem in stopnjo hidratacije cementa. V dobro hidratiziranem cementnem kamnu z nizkim v/c razmerjem so kapilarne pore velike od 10 do 50 nm. V cementnem kamnu z visokim v/c razmerjem pa je velikost kapilarnih por pri zgodnji stopnji hidratacije 3-5  $\mu\text{m}$ .

Ugotovili so, da je boljši kriterij za oceno karakteristik cementnega kamna razporeditev velikosti por in ne celotna kapilarna poroznost. Kapilarne pore večje od 50 nm vplivajo na trdnost in prepustnost cementnega kamna, kapilarne pore manjše od 50 nm pa so bolj pomembne za krčenje zaradi sušenja in lezenja betona.

### Zračni mehurčki

So v splošnem kroglaste oblike. Mehurčki, ki nastanejo zaradi zajemanja zraka med mešanjem betonske mešanice, so veliki okrog 3 mm, velikost mehurčkov, ki nastanejo zaradi dodajanja aeranta betonu, pa se giblje od 50 do 200  $\mu\text{m}$ . Tako ujeti kot umetno ustvarjeni zračni mehurčki so bistveno večji od kapilarnih por, zato imajo negativen vpliv predvsem na trdnost in prepustnost betona.



*Shematski prikaz oblike in velikosti por in zračnih mehurčkov v cementnem kamnu (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).*

## 6 PROJEKTIRANJE MEŠANIC BETONA

### Splošno

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

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

### 6.1 Projektiranje mešanice samozgoščevalnega betona (Žnidaršič, 2007)

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 karakteristike 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 zasnove mešanice samozgoščevalnega betona. Tukaj bomo najprej predstavili zasnovo 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 praksi pa še vedno največkrat uporabljamo 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% prostornine mešanice.
- Vodocementno razmerje se izbere glede na zahteve, ki jih podaja SIST EN 206-1. Navadno pa količina vode v m<sup>3</sup> betona ne 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 mešanice. Pričakovati moramo tudi, da lahko pride do precejšnjih nihanj v vlažnosti agregata, na kar je samozgoščevalni beton bolj občutljiv kot običajni vibriran beton. S sredstvom za povečanje viskoznosti, ki je pomemben dodatek samozgoščevalnim betonom, lahko uspešno kompenziramo tako nihanja v vsebnosti vlage kot tudi variiranje zrnastostne sestave drobnozrnatega agregata. Vendar pa je kompenziranje s pomočjo dodatka za povečanje 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 povečanje viskoznosti,
- uporaba superplastifikatorja drugega tipa ali proizvajalca.

*Količina posameznih frakcij agregata glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Book).*

Velikost frakcij	SCC 0/8 mm	SCC 0/16 mm	SCC 0/32 mm
0/4 mm	60%	53%	45%
4/8 mm	40%	15%	15%
8/16 mm		32%	15%
16/32 mm			30%

*Količina finih delcev glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Book).*

Količina finih delcev ( $\leq 0,125$ mm)	
SCC 0/4 mm	$\geq 650$ kg/m <sup>3</sup>
SCC 0/8 mm	$\geq 550$ kg/m <sup>3</sup>
SCC 0/16 mm	$\geq 500$ kg/m <sup>3</sup>
SCC 0/32 mm	$\geq 475$ kg/m <sup>3</sup>

*Količina veziva glede na velikost največjega zrna (Sika Concrete Handbook).*

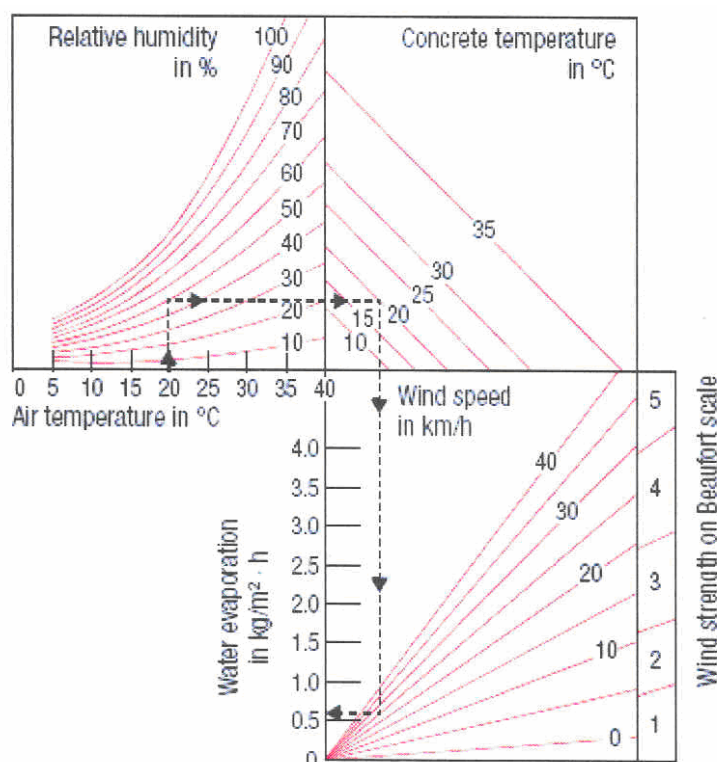
Količina veziva	
SCC 0/4 mm	550 - 600 kg/m <sup>3</sup>
SCC 0/8 mm	450 - 500 kg/m <sup>3</sup>
SCC 0/16 mm	400 - 450 kg/m <sup>3</sup>
SCC 0/32 mm	375 - 425 kg/m <sup>3</sup>

## 7 NEGA BETONA

Na lastnosti strjenega betona močno vpliva njegova nega. Za doseganje ustrezne trajnosti mora biti beton ne samo trden ampak tudi gost, posebej v površinskem delu. Zato moramo sveži beton zavarovati predvsem pred (Žnidaršič, 2007):

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

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



*Izparevanje vode v odvisnosti od temperature zraka, relativne vlažnosti, temperature betona in hitrosti vetra (Žnidaršič, 2007).*

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

- trdnost na površini se zmanjša,

- večja prepustnost za vodo,
- zgodnje razpoke zaradi krčenja betona in
- povečana nevarnost kasnejših razpok zaradi izgube vode.

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.

## 8 LASTNE PREISKAVE

### 8.1 Uvod

Eksperimentalni del diplomske naloge je potekal v laboratoriju FGG. Preiskovali smo karakteristike vnešenih zračnih por v različnih mešanicah samozgoščevalnega betona. V ta namen smo opravili linijsko mikroskopsko analizo, v skladu s slovenskim standardom SIST EN 480-11:2005. Pomagali pa smo si tudi z ameriškim standardom ASTM C 457-98, saj je le ta napisan veliko bolj praktično in vsebuje veliko uporabnih informacij, ki jih v slovenskem standardu ni.

Preiskave smo opravili na 30 različnih vzorcih. Vzorci SCC betona so se med seboj razlikovali po vrsti in vsebnosti kamene moke, analize pa smo opravili tudi na vibriranem betonu. Betoni so se med seboj razlikovali tudi glede na količino deleža vnešenega zraka. Korak spreminjanja vsebnosti zraka je bil  $\pm 2\%$ . Treba je omeniti tudi, da so trije preiskovani vzorci vsebovali namesto apnenčeve moke elektrofiltrski pepel kot mineralni dodatek. Pri tem betonu ni bilo potrebno vnašati dodatnega zraka, saj je bila željena vrednost oziroma vsebnost zraka dosežena že samo z uporabo elektrofiltrskega pepela.

Linijska mikroskopska analiza je metoda, opisana v slovenskem standardu SIST EN 480-11:2005 in predstavlja preskusno metodo za določanje strukture zračnih por v strjenem vzorcu betona, ki vsebuje vnešen zrak. Vzorci aeriranega betona za linijsko mikroskopsko analizo se izrežejo iz sredine standardnih betonskih kock ali valjev in sicer pravokotno glede na zgornjo prosto površino. Ti vzorci se nato brusijo in polirajo, da se dobi gladka in ravna površina primerna za preiskave z optičnim mikroskopom.

Struktura zračnih por se preverja z odčitavanjem parametrov vzdolž serije horizontalnih linij, ki potekajo vzporedno z originalno prosto zgornjo površino vzorca. Zapišemo število zračnih por, ki jih sekajo horizontalne linije (N) in vsako posamezno dolžino tetive čez zračno poro vzdolž horizontalnih linij. Sledi matematična analiza zabeleženih podatkov, rezultat katere je opis sistema por s pomočjo zahtevanih parametrov. Za določitev teh parametrov moramo nujno poznati sestavo betonske mešanice, ki jo analiziramo.

Potem, ko smo opravili vse analize z linijsko mikroskopsko metodo, smo dobljene rezultate primerjali s količino odluščenega materiala s površine betonskih preskušancev, ki so bili 50x izpostavljeni ciklom zmrzovanja/tajanja ob prisotnosti talilnih soli. Na ta način smo želeli dobiti korelacijo med rezultati linijske mikroskopske analize, ki je relativno hitra metoda, saj

omogoča izvedbo analize že nekaj dni po zamešanju betona, in tako imenovano OSMO metodo (SIST 1026), ki jo lahko začnemo izvajati šele pri starosti betona vsaj 28 dni in traja najmanj 39 dni.

## **8.2 Materiali**

Aerirani betoni na katerih sem opravil analize, so bili izdelani v okviru prejšnjih diplom. Vzorci LA, TA, CA so bili pripravljene v okviru diplomske naloge Barbare Pezdirc (2005), vzorci iz vibriranega betona so bili pripravljene v okviru diplomske naloge Mitje Žnidaršiča (2007), vzorci EF pa so bili pripravljene v okviru diplomske naloge Jure Trtnika (2004). Opisal bom uporabljene materiale iz vseh diplom.

### **8.2.1 Osnovni materiali za betone LA, TA, CA**

#### **Agregat**

Uporabljen je bil drobljen apnenčev agregat. Premer največjega zrna je bil  $D_{max} = 16$  mm.

Predhodne preiskave so pokazale, da mejna krivulja zrnivosti B16 za mešanico agegata 0/16 mm (SIST 1026:2004) predstavlja ustrezno izhodišče za optimalno zrnovostno sestavo drobljenega agregata za samozgoščevalni beton, ob istočasno nekoliko večjem deležu finih delcev. Zrnovostno sestavo frakcije 0/4 smo zato korigirali z dodajanjem drobnega agregata frakcije 0/2. Kombinacija frakcij agregata v betonih je bila naslednja: 55% 0/4 (40% 0/2 in 60% 0/4) in 45% 4/16 (40% 4/8 in 60% 8/16).

Razmerje med grobim in drobnim agregatom je odvisno od izbranega postopka projektiranja sveže betonske mešanice. Po splošni metodi je prostornina drobnega agregata enaka 40% prostornine malte in prostornina grobega agregata približno enaka 50 % njegove prostornine v zbitem stanju.

Uporabljal se je suh agregat. Na podlagi rezultatov predhodnih preiskav in naših izkušenj pri prvih maltah smo predpostavili, da je vodovpojnost grobega agregata zanemarljivo majhna (agregat je bil površinsko suh).



## **Cement**

Kot vezivo za samozgoščevalni beton smo uporabili portland cement CEM II/A-S 42,5R.

Količina cementsa je bila 400 kg v m<sup>3</sup> samozgoščevalnega betona. S tem je bilo izpolnjeno priporočilo v standardu SIST EN 206-1:2003, ki za stopnje izpostavljenosti XF priporoča najmanjšo vsebnost cementsa CEMI/PC klinkerja 300 do 340 kg v m<sup>3</sup> betona.

## **Voda**

Uporabila se je pitna voda iz vodovoda.

V mešanicah samozgoščevalnega betona je bilo razmerje med maso vode in maso cementsa enako 0,39 (v maltah LA1 in LA2 je bilo v/c razmerje enako 0,38. Potem so predpostavili, da je vodovpojnost površinsko suhega agregata zanemarljivo majhna in povečali v/c razmerje na 0,39). Tudi v tem primeru je bilo zadoščeno priporočilu standarda SIST EN 206-1:2003, ki v primerih izpostavljenosti XF omejuje v/c (pri CEM I / PC klinkerju) na največ 0,45.

## **Kamene moke**

V mešanicah za preiskave vpliva stopnje poroznosti betona na odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju so kot dodatni praškasti material uporabili apnenčevo moko pridobljeno z odpraševanjem drobljenega kamenega agregata (moka L). Njena prostorninska masa brez por in votlin je 2,75 g/cm<sup>3</sup>. Za proučevanje vpliva vrste moke na odpornost površine betona proti zmrzovanju/tajanju so izdelali tri mešanice z enako stopnjo poroznosti. Prva mešanica (LA) je vsebovala zgoraj omenjeno apnenčevo moko. V mešanico CA pa so vključili prvo apnenčevo moko pridobljeno z mletjem (moka C), v mešanico TA pa drugo apnenčevo moko pridobljeno z mletjem (moka T). Količina moke je bila 8,47 kg v 35 l zamešanega betona, t.j. okrog 242 kg moke v m<sup>3</sup> betona in je bila enaka za vse mešanice.

Izkušnje s prvima dvema vrstama apnenčevih mok (moki L in C) iz predhodnih preiskav:

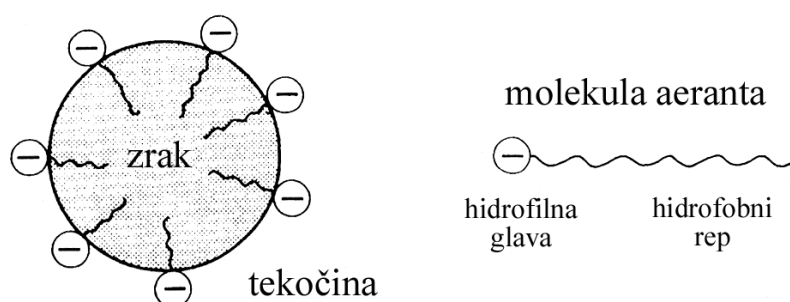
- Bolj kot vrsta superplastifikatorja vpliva na lastnosti samozgoščevalnih betonskih mešanic ustrezna kombinacija cementsa in dodanega praškastega materiala. Za zelo primeren praškast material se je izkazala apnenčevo moka, saj deluje kot plastifikator.
- Apnenčevo moka pridobljena z odpraševanjem drobljenega agregata (moka L) je boljši plastifikator paste kot z mletjem pridobljena apnenčevo moka (moka C). Vendar je mešanica samozgoščevalnega betona izdelana z moko L bolj občutljiva na nihanja vlažnosti agregata in natančnosti doziranja vode.

- Pri aerirani mešanici z relativno slabo granuliranim drobljenim apnenčevim agregatom lahko dosežemo ustrezne samozgoščevalne lastnosti z vključitvijo okrog 30%  $m_{\text{praš}}$  apnenčeve moke. Uporaba apnenčeve moke v betonu poveča tudi trdnost betona. Poveča se zgoščenost strukture betona in posledično se zmanjša vodovpojnost betona.
- Apnenčeva moka pospešuje hidratacijo cementa. Večji kot je delež apnenčeve moke v mešanici, večje so zgodnje tlačne trdnosti strjenega betona.
- Betoni, pri katerih del cementa zamenjamo z moko, zahtevajo manj kot 28 dni mokre nege. Pokazalo se je, da prekinitev mokre nege po treh dneh ali pozneje ne vpliva bistveno na tlačno trdnost betona pri starosti 28 dni ali več, saj je tlačna trdnost betona znašala vsaj 93% tlačne trdnosti pri neprekinjeni mokri negi.
- Prisotnost apnenčeve moke v betonu ne vpliva negativno na notranjo zmrzlinško odpornost betona, poslabša pa se zmrzlinška odpornost površine betona v prisotnosti soli. Pri zagotavljanju ustrezne zmrzlinške odpornosti površine betona v prisotnosti soli je pomembna količina moke, še posebej pa razmerje med količino moke in količino cementa.

Zelo pomembna ugotovitev pa je bila narejena s preprostim testom hidrofilitnosti uporabljenih apnenčevih mok (Duh, Žarnič, Bokan-Bosiljkov, 2006). Iz slike: *Preprost test hidrofilitnosti apnenčevih mok L in C* je lepo razvidno, da imata apnenčevi moki C in L različne površinske lastnosti. Apnenčeva moka C je precej bolj hidrofobna kot apnenčeva moka L. Iz iste slike je razvidno, da se je veliko vodnih kapljic od moke C dobesedno odbilo in skotalilo v stran. Ker imajo tudi zračni mehurčki, ki nastajajo v cementni pasti sveže betonske mešanice zaradi dodanega aeranta, hidrofilni obroč (slika: *Mehanizem nastanka zračnega mehurčka v tekočini*), se verjetno podobno kot vodne kapljice odbijajo od hidrofobnih delcev apnenčeve moke v sveži samozgoščevalni mešanici. Torej je bilo pri mešanicah CA praktično nemogoče doseči visoko stopnjo poroznosti. Čeprav so je količina aeranta večala do maksimalne priporočene vrednosti, se delež zraka ni večal. Mešanice so se takoj po zamešanju le močneje odzračile in v povprečju izkazovale delež zraka 4 – 5%. Verjetno je bila tudi struktura preostalih por v sveži mešanici CA4 neustrezna, da je le-ta v strejenem stanju izkazala toliko nižjo OSMO odpornost v primerjavi z LA4 in TA4.



*Preprost test hidrofilitnosti apnenčevih mok L in C (Duh, Žarnič, Bokan-Bosiljkov, 2006).*



*Mehanizem nastanka zračnega mehurčka v tekočini (Hewlett, 2004).*

Povzetek tega preprostega eksperimenta:

- OSMO odpornost aeriranega samozgoščevalnega betona je očitno bolj odvisna od vrste uporabljenega mineralnega dodatka kot od deleža vnešenega zraka,
- za večjo OSMO odpornost samozgoščevalnih betonov je bolje uporabljati hidrofilne oziroma čim manj hidrofobne mineralne dodatke.

Vrste betonov so bile označene kot LA, TA, CA. Razlog za to podajam v naslednji tabeli:

***Preglednica 1: Oznake betonov in razlage posameznih oznak.***

Oznaka betona	Razlaga oznake
LA	Aeriran samozgoščevalni betoni, ki vsebujejo apnenčevo moko pridobljeno z odpraševanjem drobljenega kamenega agregata (moka L)
CA	Aeriran samozgoščevalni betoni, ki vsebujejo prvo apnenčevo moko pridobljeno z mletjem (moka C)
TA	Aeriran samozgoščevalni betoni, ki vsebujejo drugo apnenčevo moko pridobljeno z mletjem (moka T)

Naj omenim še standard SIST EN 206-1:2003, ki omejuje količino finih delcev glede na količino cementa v betonu. Za 400 kg cementa v m<sup>3</sup> betona je priporočena največja vsebnost praškastih delcev 100 kg/m<sup>3</sup>. V tem primeru gre le za priporočilo, ki je za vibrirane betone smiselno. Pri samozgoščevalnih betonih, kjer je potreba po praškastih delcih bistveno večja kot pri vibriranem betonu, pa ga ne moremo izpolniti brez bistvenega povečanja količine cementa na račun apnenčeve moke.

### **Superplastifikator**

Uporabljen je bil visoko učinkovit superplastifikator nove generacije. Gre za tekočino rumeno-rjave barve z gostoto 1,09 g/cm<sup>3</sup>. Priporočena dozacija je 0,2 – 1,5% na maso cementa. Proizvajalec namreč priporoča dozacijo za običajne vibrirane betone, zato je izražena glede na maso cementa v betonu. Pri samozgoščevalnih betonih izražamo vsebnost superplastifikatorja v mešanici glede na skupno maso vseh praškastih delcev v betonu. Superplastifikator je bil dodan betonski mešanici razredčen z delom zamesne vode.

### **Aerant**

Uporabljen aerant je bila tekočina rumene barve z gostoto 1,01 g/cm<sup>3</sup>. Priporočena dozacija je 0,02 – 0,30% na maso cementa. Mešanicam je bil dodan razredčen z delom zamesne vode (v razmerju 1:9) v točno določenem trenutku mešanja.

## **8.2.2 Osnovni materiali za betone EF**

Pucolanski mineralni dodatki kot je elektrofiltrski pepel, se smejo upoštevati v računu vsebnosti veziva in vodo-vezivnega razmerja. Pri elektrofiltskem pepelu lahko uporabljamo koncept k-vrednosti. Koncept k-vrednosti dovoljuje upoštevanje mineralnega dodatka tipa II: z nadomestitvijo v/c razmerja z razmerjem voda/(cement + k \* mineralni dodatek). Dejanska k-vrednost za elektrofiltrski pepel je odvisna od posameznega pepela in njegovega pridobivanja. Največja količina elektrofiltrskega pepela, ki se sme upoštevati v konceptu k-vrednosti, mora ustrezati naslednjemu masnemu razmerju (Trtnik, 2004):

$$\text{elektrofiltrski pepel} / \text{cement} \leq 0,33$$

Če se uporabi večja količina elektrofiltrskega pepela, se ta višek ne sme upoštevati pri izračunu razmerje voda/(cement + k \* elektrofiltrski pepel) in najmanjše količine cementa.

Za beton, ki vsebuje cement vrste CEM I po EN 197-1, so dovoljene naslednje k-vrednosti:

- CEM I 32,5      k = 0,2

- CEM I 42,4 in višji  $k = 0,4$

Za posamezno stopnjo izpostavljenosti se zahtevana najmanjša vsebnost cementa sme zmanjšati največ za količino  $k \times$  (najmanjša vsebnost cementa – 200 )  $\text{kg/m}^3$ , poleg tega pa skupna količina cementa in elektrofiltrskega pepela ne sme biti manjša od najmanjše vsebnosti cementa, ki se zahteva v skladu s točko 5.3.2 standarda SIST EN 206-1.

Trije vzorci, ki sem jih analiziral, so vsebovali kot mineralni praškasti dodatek elektrofiltrski pepel. Vodo-vezivno razmerje te mešanice je enako  $v/c$  razmerju primerljivih mešanic, pri čemer je upoštevana  $k$ -vrednost enaka  $k_{EF} = 0,4$  in to za celotno količino dodanega pepela. Velja poudariti, da je ta mešanica dosegla delež zraka ( $4 \pm 1$ )% brez uporabe aeranta. Pri preskusih zmrzovanja/tajanja v prisotnosti soli (OSMO odpornost) je mešanica z elektrofiltrskim pepelom izkazala najnižjo OSMO odpornost med vsemi preskušeni betoni. Ker pri teh vzorcih aeranta sploh nismo uporabili, lahko ugotovimo, da izpolnitev zahteve glede najmanjšega deleža zraka v svežem betonu (priporočilo v dodatku F v SIST EN 206-2:2003 in SIST 1026:2004) pri stopnjah izpostavljenosti XF2 in XF4 še ne zagotavlja, da bo površina betona odporna proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. To je eden izmed razlogov, zakaj je potrebno analizirati sistem zračnih por v strjenem betonu.

**Preglednica 2:** Količine posameznih materialov za  $1\text{m}^3$  mešanice EF.

MATERIAL	EF6
	$\text{kg/m}^3$
cement	400
EF pepel	216
voda	190
kontrola ( $v/c$ )	0,475
agregat	1485

### 8.2.3 Osnovni materiali za betone LVA

Beton LVA je primerjalni vibrirani beton brez dodane apnenčeve moke in z 8% deležem vnešenega zraka. Pri projektiranju betonske mešanice LVA je bila kot izhodišče vzeta mešanica LA, le da je bila apnenčeva moka nadomeščena z agregatom, istočasno pa je bil zelo zmanjšan delež superplastifikatorja. Tako dobljena mešanica običajnega betona je imela tekočo konsistenco in se je vgrajevala v kalupe z vibriranjem.

Receptura je bila naslednja:

**Preglednica 3:** Količine posameznih materialov za 1 m<sup>3</sup> mešanice LVA.

MATERIAL	LVA kg/m <sup>3</sup>
cement	409
moka	0
voda	160
kontrola (v/c)	0,390
agregat	1700
p [%]	7,9

Pri mešanici vibriranega aeriranega betona brez dodane moke je bila, na podlagi rezultatov prejšnjih raziskav, dozacija superplastifikatorja zelo majhna (0,20% na maso cementa), vendar je bil dobljen posed občutno premajhen (4 cm). Zato je bila količina superplastifikatorja povečana na končnih 0,28% (na maso cementa). Tudi poroznost je bila na začetku premajhna, zato je bila količina aeranta z začetnih 0,02% (na maso cementa) povečana na končnih 0,05% (na maso cementa).

### 8.3 Razlogi za preiskavo strjenih aeriranih betonov z linijsko mikroskopsko metodo

Če si postavim vprašanje, zakaj je izvedba linijske mikroskopske metode smiselna, lahko takoj navedem dva pomembna razloga, povezana z alternativnimi metodami preiskav. Preiskava vsebnosti zraka v svežem betonu s porozimetrom nam da kot rezultat samo celoten delež zraka. Iz rezultatov te preiskave ne moremo ugotoviti, ali beton vsebuje večjo količino manjših zračnih mehurčkov ali manjšo količino večjih zračnih mehurčkov. Jasne odgovore na ta vprašanja pa nam da linijska mikroskopska metoda. Prav porazdelitev por po velikosti, predvsem pa razdalja med njimi so namreč parametri, ki bistveno vplivajo na odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju, brez in v prisotnosti talilnih soli.

Drugi pomemben razlog povezan z drugo metodo za oceno zmrzlinke odpornosti betona v prisotnosti soli (OSMO preiskava) pa je njena dolgotrajnost. Najprej moramo vgraditi betonsko mešanico in ta mora pridobivati na trdnosti in obstojnosti vsaj 28 dni. Potem pa je potrebno opraviti 25 ali 50 ciklov zmrzovanja/tajanja, da dobimo relevantne rezultate. Preiskava torej traja 2 - 3 mesece, preden so rezultati na voljo. Res pa je, da dobimo jasen rezultat, saj v bistvu z OSMO preiskavo simuliramo dogajanje v betonu na terenu, vendar pospešeno. To pomeni, da bi v primeru jasno postavljenih kriterijev glede

karakteristik zračnih por, ki zagotavljajo zmrzlinško odpornost betona, z linijsko mikroskopsko metodo prišli do ocene o ustreznosti ali neustreznosti zmrzlinški odpornosti betona nekajkrat hitreje (praviloma že po 14-ih dneh od vgraditve betona v kalupe) kot z OSMO preiskavo.

Slovenski standard SIST EN 480-11:2005, v skladu s katerim smo izvajali linijsko mikroskopsko analizo, se praviloma uporablja za kontrolo učinkovitosti aerantov v betonu. Torej je namenjen predvsem proizvajalcem aerantov oziroma laboratorijem, ki izvajajo njihovo zunanjo kontrolo. Z vključitvijo določila, citiram: »Pri aeriranih betonih je možno uporabiti tudi metodo linijske mikroskopske analize po SIST EN 480-11. Faktor oddaljenosti ne sme biti večji od 0,2 mm.«, v točki 5.5.5 Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju ter 5.5.6 Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju, v revidiran standard SIST 1026, ki naj bi bil izdan še to pomlad, pa lahko pričakujemo, da se bo metoda linijske mikroskopske analize začela uporabljati tudi v okviru začetnih preskusov na novo zasnovanih betonskih mešanica.

Čeprav smo postopek linijske mikroskopske analize opravili v skladu z določili SIST EN 480-11, pa smo uvedli eno modifikacijo, povezano s položajem preiskovane površine. Zbrušena in spolirana površina ni bila na vzorcu izrezanem iz sredine betonskega preskušanca, ampak je bila površina tik pod površino betona, ki je bila v okviru OSMO preiskav izpostavljena luščenju materiala zaradi zmrzovanja/tajanja in delovanja talilnih soli. Ocenili smo namreč, da bomo na ta način dobili ustrezno korelacijo med količino odluščenega materiala pri OSMO preiskavi in karakteristikami sistema vnešenih zračnih mehurčkov.

## **8.4 Opis poteka preiskave z metodo linijske mikroskopske analize**

### **Povzetek metode**

Postopek preiskave je namenjen ugotavljanju prostorske porazdelitve in prostorninskega deleža obravnavane faze/komponente s seštevanjem tetiv čez obravnavano komponento vzdolž serije enkomerno porazdeljenih horizontalnih linij, ki prečkajo vzorec. Podatki, ki jih pri izvedbi metode pridobimo so skupna (totalna) dolžina horizontalnih linij ( $T_t$ ), dolžina tetiv čez fazo (v našem primeru so to zračne pore) ( $T_a$ ), dolžina horizontalnih linij izven faze (v našem primeru je to trdna faza) ( $T_p$ ) in število tetiv čez obravnavano fazo ( $N$ ). Ti podatki se potem uporabijo za izračun deleža obravnavane faze in različnih parametrov zračnega sistema. V nadaljevanju se bomo osredotočili na karakteristike sistema zračnih por v betonu.

#### **8.4.1 Razlaga izrazov in definicij po SIST EN 480-11:2005**

##### **Zračna pora**

Prostor objekt s cementno pasto, ki je bil zapolnjen z zrakom ali drugim plinom pred vezanjem paste. V to niso vštete pore podmikroskopskih dimenzij, kot so na primer pore v hidratizirani cementni pasti. Za namene te preskusne metode upoštevamo vse pore v cementnem kamnu, ki so vidne pod mikroskopom pri zahtevani povečavi in pri katerih dolžina tetive ni večja od 4 mm. V to niso vštete očitne razpoke.

##### **Celoten delež zraka (A)**

To je razmerje med prostornino zračnih por in prostornino betona vključno z zračnimi porami. Izraženo je v %.

##### **Delež cementne pase (P)**

To je razmerje med prostornino cementnega kamna in prostornino betona, izraženo v %. Prostornina cementnega kamna je enaka vsoti prostornin cementa, zamesne vode in morebitnih dodatkov. To prostornino določimo na podlagi zapisov o masah sestavin v šarži betona, iz katerega so vzorci odvzeti.

##### **Specifična površina sistema zračnih mehurčkov ( $\alpha$ )**

Izračunan parameter, ki predstavlja razmerje med celotno površino vnešenih zračnih mehurčkov in njihovo prostornino; enota je  $\text{mm}^{-1}$ . Uporabljena metoda izračuna temelji na povprečni dolžini tetiv čez zračne pore in jo lahko določimo za vsak sistem kroglastih zračnih mehurčkov.

##### **Faktor oddaljenosti ( $\bar{L}$ )**

Izračunan parameter povezan z največjo razdaljo med katerokoli točko v cementnem kamnu in zračnim mehurčkom, izmerjeno vzdolž cementnega kamna; enote so mm. Izračun tega parametra temelji na predpostavki, da so vsi zračni mehurčki enako veliki in so enakomerno porazdeljeni po cementni pasti, pri čemer ima model enak celoten delež zraka in enako specifično površino zračnih mehurčkov kot dejanski sistem.



### **Delež mikropor ( $A_{300}$ )**

Izračunan parameter, ki predstavlja delež zraka, ki pripada zračnim poram s premerom 0,3 mm ali manj. Vrednost dobimo iz izračuna porazdelitve por po velikosti.

### **Horizontalna linija**

Ena izmed serije linij, ki potekajo čez polirano površino vzorca in vzdolž katere se relativno premikata mikroskop in vzorec med preiskavo.

### **Dolžina horizontalnih linij $T_{tot}$**

Skupna dolžina horizontalnih linij čez površino vzorca je med preiskavo sestavljena iz dveh delov, skupne dolžine linije čez trdno fazo (cementni kamen brez zračnih mehurčkov),  $T_s$ , in skupne dolžine linij čez zračne mehurčke,  $T_a$ . Enote so mm.

### **Klasifikacija dolžine tetive čez zračni mehurček**

Dolžine tetiv čez posamezne zračne mehurčke so razvrščene v razrede na podlagi dolžine tetive.

## **8.4.2 Značilnosti in uporaba po ASTM C 457-98**

Karakteristike sistema zračnih mehurčkov, ki jih določimo s to metodo, so povezane z občutljivostjo betona na poškodbe zaradi zmrzovanja in tajanja. Zato se ta metoda uporablja za oceno verjetnosti nastanka poškodb zaradi zmrzovanja oziroma lahko razloži, zakaj je do poškodb prišlo. Hkrati pa je ta metoda lahko zelo uporabna pri razvoju produktov za izboljšanje odpornosti proti zmrzovanju/tajanju.

Za aeriran beton v skladu z ACI 201.2R in ACI 211.1 je razmerje pasta-zrak (P/A) ponavadi od 4 - 10, specifična površina ( $\alpha$ ) med 24 in 43 mm<sup>-1</sup> in faktor oddaljenosti  $\bar{L}$  med 0,1 - 0,2 mm.

Vsebnost zraka ugotovljena z linijsko mikroskopsko analizo je ponavadi blizu vrednostim dobljenim na svežem betonu z metodo s porozimetrom. Vendar pa lahko pride do precejšnje razlike, če je bil vzorec svežega betona zgoščen na drugo stopnjo kot vzorec, ki ga kasneje pregledamo pod mikroskopom. Za beton, ki vsebuje relativno visok delež zraka (ponavadi čez 7,5%) je lahko delež zraka določen s pomočjo mikroskopa odstotek ali več večji/manjši v primerjavi s tistim, ki smo ga določili s porozimetrom.

Od vseh parametrov, ki jih dobimo z linijsko mikroskopsko analizo, je najbolj pomemben faktor oddaljenosti ( $\bar{L}$ ). Ta faktor se vzame kot pokazatelj odpornosti cementnega kamna proti zmrzovanju/tajanju. Maksimalna vrednost faktorja oddaljenosti pri zmerni izpostavitvi betona je ponavadi nekje okrog 0,20 mm. Nekoliko višje vrednosti so primerne za blažje pogoje okolja in manjše vrednosti za ostrejšje, še posebej, če je beton v kontaktu s talilnimi solmi. Standardna deviacija faktorja  $\bar{L}$  je okrog ene petine povprečne vrednosti in je odvisna od laboratorija, ki preiskave izvaja.

Delež zraka in pripadajoči parametri sistema zračnih por so primarno odvisno od vrste in doziranja uporabljenega aeranta, stopnje zgoščenosti betona in vodocementnega razmerja. Vrednosti specifične površine ( $\alpha$ ) in števila mehurčkov na enoto ( $n$ ) padejo dramatično s povečanjem vodocementnega razmerja ali vsebnosti paste, če ostanejo ostali pogoji nespremenjeni. Zadovoljive vrednosti specifične površine ( $\alpha$ ) in faktorja oddaljenosti ( $\bar{L}$ ) zahtevajo frekvenco por večjo od 315/m. Povečanje vodocementnega razmerja ali vsebnosti paste morata biti spremljana s povečanjem vsebnosti zraka, v nasprotnem primeru se poveča faktor oddaljenosti ( $\bar{L}$ ). Delež zraka lahko močno zmanjšamo z daljšim vibriranjem betona, brez velike spremembe faktorja oddaljenosti ( $\bar{L}$ ). Pred tem mora biti zagotovljeno, da je bil v beton primerno vnešen zrak. Predolgo vibriranje sicer ni primerno, zaradi nevarnosti prevelikega izcejanja.

Frekvenca zračnih mehurčkov ( $n$ ) je kritični parameter pri določanju specifične površine ( $\alpha$ ) in faktorja oddaljenosti ( $\bar{L}$ ). Zato moramo s posebno previdnostjo in natančnostjo detektirati vse zračne mehurčke, čez katere poteka horizontalna linija. Detekcija majhnih zračnih mehurčkov, na primer velikosti 10  $\mu\text{m}$ , je izrednega pomena za pravilno oceno obravnavanih parametrov. Zato moramo zelo natančno pripraviti vzorec, da je dovolj gladek, povečava pa ne sme biti manjša od 50x.

Če je vrednost specifične površine ( $\alpha$ ) ali frekvenca zračnih mehurčkov ( $n$ ) visoka, bo tudi faktor oddaljenosti ustrezen in to tudi v primeru, če je vsebnost zraka nizka.

Betoni izpostavljeni zmrzovanju in tajanju, ki so kritično zasičeni z vodo, morajo doseči minimalno tlačno trdnost in to pred izpostavitvijo zmrzovanju. Ta trdnost mora biti vsaj 28 MPa.

### 8.4.3 Odvzem in priprava vzorca

Vzorci betona so lahko pridobljeni na terenu ali v laboratoriju, z žaganjem, odvzemom jeder ali kako drugače odvzeti iz konstrukcije ali proizvoda. Vzorec je lahko sestavljen iz večih podvzorcev. Za to preiskavo je potrebno odvzeti vzorce iz treh naključno izbranih lokacij na celotnem objektu.

*Minimalno področje obdelane površine vzorca za mikroskopske meritve (ASTM C 457-98).*

Nominalno oziroma opazovano maksimalno zrno agregata v betonu (mm)	Celotno področje, ki mora biti pregledano za ugotovitev $\alpha$ ali $\bar{L}$ , min, cm <sup>2</sup> , temelječe na direktni meritvi:	
	Celotna vsebnost zraka	razmerje P/A
150	1613	645
75	419	194
37.5	24	97
25	77	77
19	71	71
12.5	65	65
9.5	58	58
4.75	45	45

#### Priprava vzorca

Če so prisotne velike napake v betonskem vzorcu, začnemo pripravo površine z mokrim brušenjem površine z grobim brusom (št. 100). Potem prehajamo na vedno bolj fine bruse (št. 220, 320, 600, 800). Brušenje mora ves čas potekati v prisotnosti vode (mokro brušenje). Površina, ki je zadovoljiva za mikroskopsko preiskavo, bo izkazovala odlično odsevnost ob prisotnosti vira svetlobe, ki ga postavimo pod nizkim kotom glede na horizontalo in ob strani vzorca. Ne sme biti vidnega oziroma opaznega reliefa med cementnim kamnom in površino agregata. Deli vzorca, ki so opraskani, se morajo še dodatno obdelati. Robovi zračnih mehurčkov morajo biti ostri in neerodirani. To velja tudi za zračne mehurčke majhnih velikosti do 10  $\mu\text{m}$ . Če opraskanih delov vzorca ne moremo odstraniti, jih pa definitivno ne smemo vključiti v preiskavo.

(1) Pripravimo vzorec, ki vsebuje del končnega, v skladu z zahtevami standarda pripravljenega, betonskega vzorca, ki bo preiskan. Debelina mora biti primerna in ne manjša od 12 mm oziroma ene polovice največjega zrna agregata. Merodajna je večja vrednost.

(2) Obdelamo vzorec z brusi kot je opisano zgoraj in na ta način pripravimo površino vzorca, na kateri bodo kasneje opravljene meritve.

(3) Potem je potrebno izravnati zadnjo stran vzorca zaradi stabilnosti (če ni že ravna).

(4) Nato izmerimo debelino vzorca tam, kjer je le ta najtanjši, in sicer na vsaj štirih mestih, enakomerno porazdeljenih po obodu. Izračunamo povprečje meritev in ga zabeležimo.

(5) Nato določimo parametre sistema zračnih por.

#### **8.4.4 Oprema (3D Video-Microscope Solutions)**

Za analize smo uporabljali mikroskop proizvajalca HIROX. Gre za digitalni video-mikroskopski sistem, ki je na področju optičnih mikroskopov inovacija in odlična mikroskopska oprema. Visoka kvaliteta optike ter mehanični in osvetlitveni dizajn dajeta HIROXU možnost 3-D mikroskopiranja in največjo možno optično povečavo (7000x na 15 colskem monitorju). Poleg tega ima še veliko dodatkov in raznih opcij, vključno z 3-D vrtečim se nastavkom. Jaz sem uporabljal model HIROX KH-3000 (glej sliko: *Digitalni video-mikroskopski sistem HIROX KH-3000*). Ker gre za veliko inovacijo na področju mikroskopiranja, kolikor mi je znano, in prvi tak mikroskop v Sloveniji, moram vsekakor nekoliko bolj podrobno opisati njegove lastnosti.



*Digitalni video-mikroskopski sistem HIROX KH-3000 (3D Video-Microscope Solutions).*

#### **Uporabniške storitve**

Do 12 nastavitvev tipov kamere, 6 prednastavljenih, se lahko shrani za opazovalca. In sicer vzorci kriterijev barv ter ostrine, gamma vrednosti in ostalo. Z opazovanjem lahko začnemo takoj, ko nastavimo ali izberemo željene nastavitve kamere (glej spodnjo sliko).



*Prikaz osnovne funkcijske plošče sistema HIROX KH-3000 (3D Video-Microscope Solutions).*

### **Dodajanje slik in shranjevanje podatkov**

Compact Flash spominska kartica je uporabljena, ko želimo shraniti večje količine podatkov, da dosežemo višjo zanesljivost in, da zadržimo kvaliteto slike. Naprava se baha z zelo priročnim "timerjem", ki ima sposobnost zaporednega snemanja slik, hkrati pa ponuja shranjevanje izmer, natančno kalibracijo vrednosti povečav in nastavitve kamere. Na voljo je CRT ali S-video izhod za snemanje mirujočih ali premikajočih se slik.

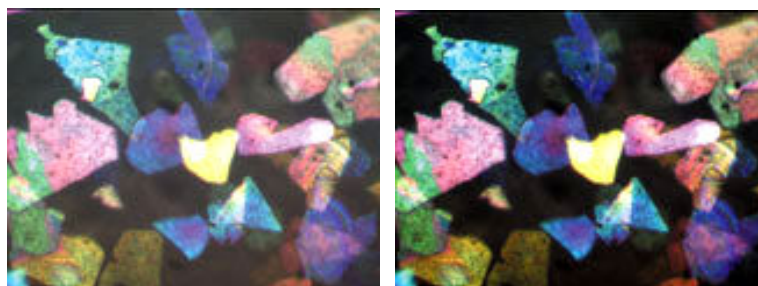
Slike lahko shranjujemo neprekinjeno, brez posredovanja, s preprostim stiskom na gumb. Zelo priročna funkcija je tudi nastavitev intervala in števila snemalnih listov, s katero lahko posnamemo naprimer spreminjanje oblike površine v nekem fiksnem časovnem intervalu.

### **Metalna svetilna luč**

Uporabljajo se metalne svetilne luči, ker so podobne naravni svetlobi in priskrbijo večji zajem barv. Omogočajo ohranjanje originalnih vzorcev barv in hkrati zelo žive barve med opazovanjem. Mehanični zapiralno-odpiralni gumb služi za kontroliranje jakosti svetlobe in hkrati vzdržuje temperature barv konstantne.

Jedro moči optičnega sistema HIROX, je prav v tem, da je zmožen zajemati slike zelo visokih resolucij in premikajoče se slike hkrati. Frekvenca zajemanja je 15 slik na sekundo v formatu UXGA (1600 x 1200 pikslov).

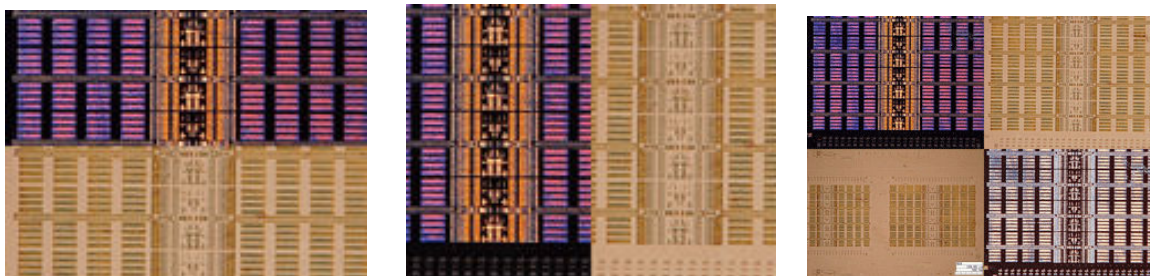
Temperatura barve metalne svetilne luči je 5600 K (v primerjavi z halogensko lučjo, kjer je temperature barve 3000 K), kar je mnogo bližje naravni svetlobi. Svetilnost metalne luči je 5x večja kot pri halogenskih lučeh. To pomeni, da je naprimer 21 W metalna luč bolj svetla kot 100 W halogenska luč.



*Prikaz funkcije optimizacija slike (z enim pritiskom na gumb lahko hkrati prilagodimo svetlost in kontrast) (3D Video-Microscope Solutions).*



*Prikaz funkcije dolge izpostavitve (z največ 8 sekundami trajanja, z odprtim pokrovom lahko dosežemo svetlejše opazovanje) (3D Video-Microscope Solutions).*



*2 horizontalna zaslona*

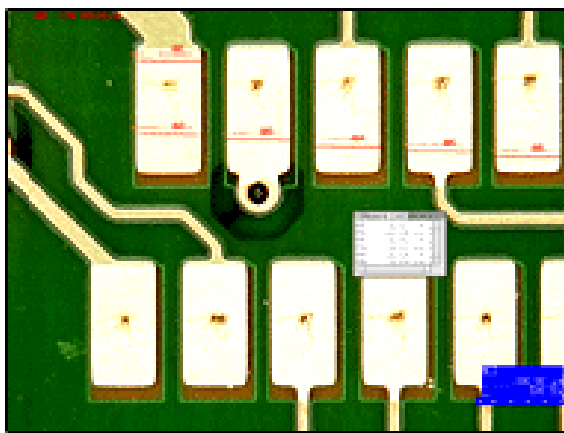
*2 vertikalna zaslona*

*4 zaslona*

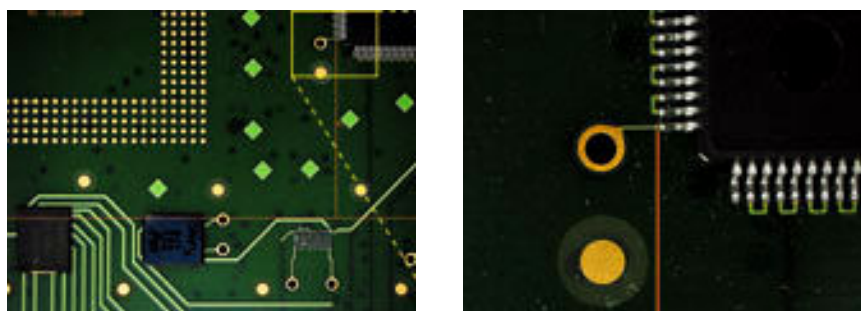
*Prikaz funkcije razdelitve zaslonov (nam omogoča primerjavo zabeleženih slik) (3D Video-Microscope Solutions).*

## **Meritve**

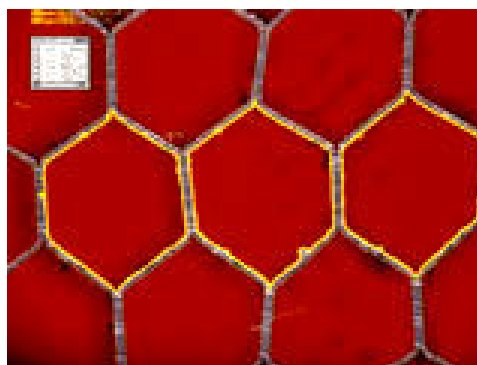
Zelo natančne meritve lahko pridobimo relativno lahko, saj imamo na voljo kar najbolj primerna sredstva za merjenje za vsako aplikacijo posebej in hkrati še digitalni zoom, ki podpira merjenje v živo. Sistem vsebuje tudi funkcijo avtomatizacije meritev, da se čim bolj zmanjšajo individualne razlike. Podatki, ki so bili izmerjeni, se lahko shranijo tudi v obliki Excel formata. S tem so naša poročila zelo dosegljiva. Dodatno je postreženo tudi z meritvijo višine.



*Prikaz funkcije avtomatično merjenje (ta funkcija nam omogoča avtomatsko prepoznavanje in hkrati avtomatsko merjenje objekta, preprosto s klikom na objekt in s smerjo premice (rdeča črta na zgornji sliki)) (3D Video-Microscope Solutions).*

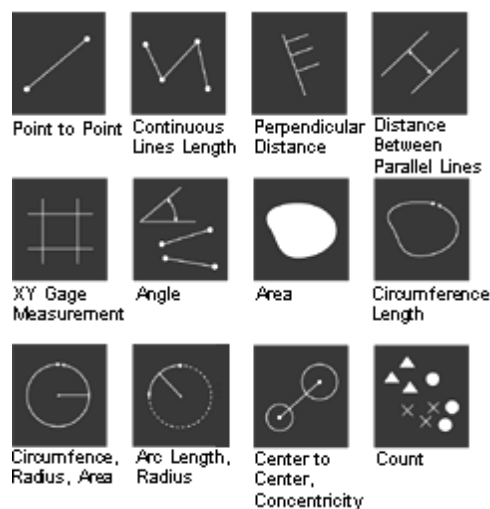


*Prikaz funkcije merjenja z zoomom (označimo lahko samo zelen del na mikroskopski sliki, ki bi ga radi približali, nato nam sistem izbere primerno ločljivost slike, optični zoom pa nam omogoči pogled celotnega merjenega dela) (3D Video-Microscope Solutions).*



*Prikaz funkcije avtomatsko zasledovanje (naprava omogoča avtomatsko zasledovanje robov objektov in hkrati izmeri njihov obseg ter ploščino, in sicer kliknemo preprosto samo na rob objekta in zajamemo podatke) (3D Video-Microscope Solutions).*

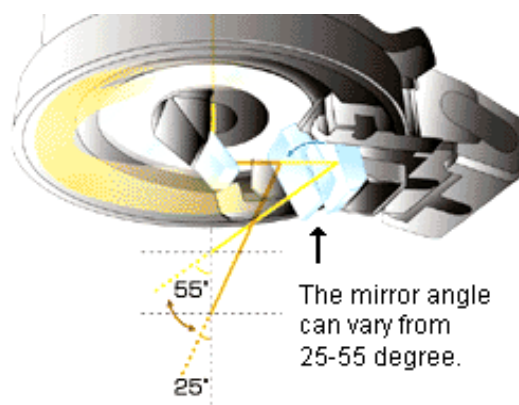




*Prikaz funkcij različnih opcij meritev (rezultati izmer so lahko zajeti v tekstovnem formatu ali v statistični obliki Excel-ovega formata) (3D Video-Microscope Solutions).*

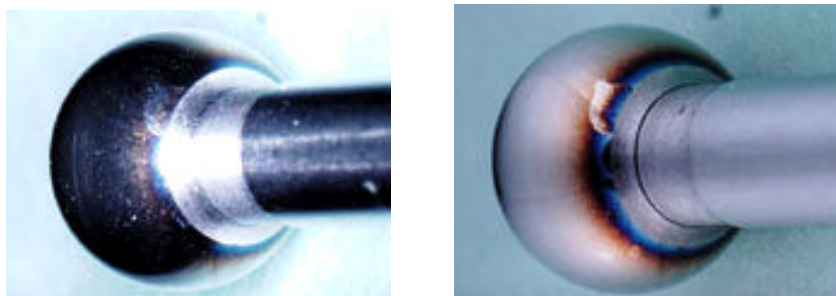
### **Možnosti opazovanja**

Sistem HIROX KH-3000 vsebuje celo paleto raznovrstnih leč, od zelo majhne povečave do povečave 7000x (na 15 colskem monitorju). Omogočeno je tudi 3-D opazovanje. Ta sistem nadomesti vrsto različnih konvencionalnih mikroskopov za različne namene. Osnovna delovna enota omogoča tudi okolje za obdelavo slik visokih resolucij.



*Shematska slika rotacijske glave (360 stopinjska rotacijska prizma omogoča avtentično opazovanje objektov iz strani. Je zelo preprosto, predvsem pa zavzame veliko manj prostora kot nagibanje leč. Še več, opazovanje skozi premikajoče se slike omogoča, da predmet vidimo zelo ostro in jasno, kot bi ga imeli na dlani) (3D Video-Microscope Solutions).*





*Prikaz funkcije uporabe difuzorja (nam omogoča mehko osvetlitev v vseh smereh in preprečuje odboj močne svetlobe) (3D Video-Microscope Solutions).*

Poleg naštetih lastnosti ima še naslednje: fluorescentna mikroskopija, sprememba povečave, poljubna osvetlitev iz različnih kotov, polarizator, itd...

#### **8.4.5 Postopek preiskave linijske mikroskopske analize**

Ustrezno pripravljen vzorec (zbrušen in spoliran) postavimo na v horizontalni ravnini gibljivo podlago – mizico. Vzorec poravnamo tako, da je njegov zgornji rob vzporeden s horizontalno linijo, vzdolž katere bomo določali izbrane parametre. Potem vzorec osvetlimo s svetlobo od zgoraj tako, da je območje pregleda z mikroskopom enakomerno osvetljeno. Sledi namestitev stranske luči pod nizkim kotom poleg vzorca tako, da so pore označene s senco (v obliki luninega krajca na robu pore in nekoliko v notranjost pore je viden odsev svetlobe). Ne smemo uporabljati povečavo manjšo od 50x. Izbrano povečavo 200x tekem preiskave praviloma ne spreminjamo. Izjema so primeri večjih mehurčkov, ko določitev dolžine tetiv čez mehurček ni možna, ker mehurček pri tako veliki povečavi ni viden. Povečavo pa zmanjšamo na tudi do 50x tudi v primeru prestavitve vzorca v novo izhodiščno lego, zaradi omejene dolžine mikrometra, s pomočjo katerega določamo razdalje med zračnimi mehurčki. V tem primeru s posebno funkcijo dveh vertikalnih oken zamrznemo sliko zadnje pore, prestavimo vzorec za določeno razdaljo in poiščemo sliko zadnje pore. Okence odmrzujemo, nastavimo povečavo na 200x in nadaljujemo s preiskavo. Preiskavo začnemo na levem robu vzorca tako, da se pomikamo nad prvo narisano pomožno črto na vzorcu iz leve proti desni in gledamo, kdaj bomo naleteli na prvi zračni mehurček. Ko ga opazimo se ustavimo na njegovem levem robu, ter označimo začetek in konec, kjer tetiva seka mehurček. Tako dobimo dolžino tetive čez en mehurček. Potem se pomikamo do naslednje pore in postopek ponovimo. V točki, kjer se začne posamezna tetiva, odčitamo tudi razdaljo na mikrometru (pomičnem merilu). S pomočjo teh podatkov določimo dolžino horizontalnih linij med zračnimi mehurčki. Ta postopek ponavljamo, dokler ne dosežemo desnega roba vzorca. Moramo omeniti, da smo pri vsakem merjenju označili oziroma odčitali tudi levi in desni rob

vzorca. Na vsakem vzorcu je bilo narisanih devet črt, kar pomeni, da smo na posameznem vzorcu odčitali željene parametre vzdolž 9-ih horizontalnih linij. Ta postopek se je ponavljal ves čas mojega laboratorijskega dela. Med posameznimi horizontalnimi linijami smo se pomikali s pomočjo mikrometra/pomičnega merila na levi strani podlage/ mizice za vzorec.

*Minimalna skupna dolžina linij za preiskavo z metodo linijske mikroskopske analize (ASTM C 457-98).*

<b>Celotno področje, ki mora biti pregledano za ugotovitev <math>\alpha</math> ali <math>\bar{L}</math>, min, cm<sup>2</sup> temelječe na direktni meritvi:</b>	
<b>Nominalno oziroma opazovano maksimalno zrno agregata v betonu (mm)</b>	<b>Dolžina prečne linije za določitev <math>\alpha</math> ali L min, mm</b>
150	4064
75	3048
37.5	2540
25	2413
19	2286
12.5	2032
9.5	1905
4.75	1397

### **Izračun po SIST EN 480-11:2005**

Kot direkten rezultat opravljene analize dobimo naslednje podatke:

N...skupno število prestreženih zračnih mehurčkov

$T_{tot}$ ... skupna dolžina horizontalnih linij – dobimo jo tako, da za posamezno horizontalno linijo seštejemo razdalje: od levega roba vzorca do začetka prvega mehurčka, vse razdalje med začetki zračnih mehurčkov in razdaljo med začetkom zadnjega zračnega mehurčka in desnim robom vzorca. To ponovimo za vsako linijo in na koncu seštejemo. Skupna dolžina linij mora biti vsaj 2400 mm.

$T_a$ ...skupna dolžina tetiv čez zračne mehurčke – dobimo jo tako, da seštejemo dolžine vseh izmerjenih tetiv

$T_s$ ...skupna dolžina linij čez trdno fazo;  $T_s = T_{tot} - T_a$

Iz teh podatkov in števila vseh tetiv N potem izračunamo:

- Celoten delež zraka:  $A = \frac{T_a * 100}{T_{tot}} [\%]$  (4)

- Specifična površina:  $\alpha = \frac{4N}{T_a}$  v  $\text{mm}^{-1}$  (5)

- Razmerje pasta-zrak:  $R = \frac{P}{A}$  (6)

- Faktor oddaljenosti... ( $\bar{L}$ ): način izračuna je odvisen od vrednosti za R

- ko je  $R \leq 4,342 \rightarrow \bar{L} = \frac{P * T_{tot}}{400N}$  [mm] (7)

- ko je  $R \geq 4,342 \rightarrow \bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[ 1,4(1 + R)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]$  [mm] (8)

Delež mikropor  $A_{300}$  se odčita iz preglednice, ki podaja porazdelitev zračnih por po velikosti.

## 8.5 Inerpretacija rezultatov

### 8.5.1 Preiskave in rezultati mešanice LA

Gre za aerirani samozgoščevalni beton, ki vsebuje apnenčevo moko pridobljeno z odpraševanjem drobljenega kamenega agregata (moka L). Vzorci so vsebovali različne stopnje vnešenega zraka in sicer: LA5 z 8%, LA6 z 10%, LA8 z 12%, LA10 s 4% in mešanica LA11 s 6% vnešenega zraka. Bolj natančni podatki o sestavi mešanic so prikazani v spodnji tabeli.

**Preglednica 4:** Sestava mešanic LA in količina odlučenega materiala pri OSMO preiskavi.

	LA10 s 4% kg/m <sup>3</sup>	LA11 s 6% kg/m <sup>3</sup>	LA5 z 8% kg/m <sup>3</sup>	LA6 z 10% kg/m <sup>3</sup>	LA8 z 12% kg/m <sup>3</sup>
cement	424	415	407	404	398
moka	257	251	246	245	241
voda	166	162	159	158	155
kontrola (v/c)	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
agregat	1507	1474	1444	1436	1414
Vpaste [dm3]	427	418	410	407	401
p [%]	4,5	6,6	8,5	9	10,4
<b>količina odlučenega materiala [mg/mm<sup>2</sup>]:</b>	<b>[mg/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>[mg/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>[mg/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>[mg/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>[mg/mm<sup>2</sup>]</b>
po 25 ciklih	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
po 50 ciklih	0,05	0,08	0,06	0,02	0,06

## Preiskava zmrzilske odpornosti

Vse vzorce smo pregledali oziroma preiskali z metodo linijske mikroskopske analize. Rezultati so podani v spodnjih tabelah in grafih. Moram še omeniti, da so bili za vsako mešanico preiskani po trije vzorci, da smo zadostili zahtevam standarda glede najmanjše skupne dolžine horizontalnih linij.

## Mešanica LA5

Dobljeni rezultati pri mešanici LA5 z 8% deležem vnešenega zraka.

*Preglednica 5: Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA5.*

<b>Pridobljeni podatki</b>	
$P = 41$ %	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
$T_s = 2484$ mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
$T_a = 210$ mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>	
$T_{tot} = 2694$ mm	...skupna dolžina čez vzorec
<b>Skupna vsebnost zraka</b>	
$A = 7,80$ %	
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>	
$N = 627$	...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>	
$\alpha = 11,94$ mm <sup>-1</sup>	
<b>Razmerje pasta-zrak</b>	
$R = 5,260$	
<b>Faktor oddaljenosti</b>	
$\bar{L} = 0,397$ mm	
<b>Vsebnost mikro zraka</b>	
$A_{300} = 1,41$ %	

Pri vsakem vzorcu opazujemo predvsem tri pomembne faktorje. To so:

- razmerje  $R = P/A$ , ki naj bi se gibal med 4 – 10,
- specifična površina zraka  $\alpha$ , ki naj bi se gibala med 24 – 43 mm<sup>-1</sup>
- in faktor oddaljenosti  $\bar{L}$ , ki naj bi bil med 0,1 – 0,2 mm

Treba je omeniti, da so te vrednosti le priporočene vrednosti vzete iz ameriškega standarda in veljajo za vibrirane betone, v katerih je delež paste bistveno manjši kot pri samozgoščevanih betonih, ki so bili predmet analize. Po mojem mnenju ne moremo vzeti te vrednosti kot

merodajne, ampak gre le za neke okvirne/izhodiščne vrednosti. Namen moje diplomske naloge pa je, da ocenim, ali so te vrednosti primerne tudi za SCC betone. Ocena bo temeljila na primerjavi z rezultati OSMO preiskav, ki so bile opravljene na istih vzorcih v okviru prejšnjih diplom. OSMO preiskava je sprejeta kot referenčna metoda za oceno zmrzlinke odpornosti površine betona v prisotnosti soli. Če bomo ugotovili, da vzorci, ki so bili zmrzlinško odporni pri preiskavi OSMO odpornosti, v mojih raziskavah ne dosegajo priporočenih vrednosti, potem lahko sklepamo, da so priporočene vrednosti, preoster kriterij za obravnavane SCC betone.

Kot vidimo iz rezultatov za mešanico LA5 z 8% vnešenega zraka je faktor  $R = 5,260$  znotraj priporočenih meja, specifična površina  $\alpha = 11,94 \text{ mm}^{-1}$  je pod spodnjo priporočeno mejo  $24 \text{ mm}^{-1}$  in tudi faktor oddaljenosti  $\bar{L} = 0,397 \text{ mm}$  je večji od priporočene zgornje meje.

## **SIST EN 480-11:2005, poglavje 8.9 – Porazdelitev zračnih por**

### **Osnove izračuna**

Porazdelitev zračnih por je izračunana iz porazdelitve dolžin tetiv izmerjenih med linijsko mikroskopsko analizo. Izračunana porazdelitev temelji na modelu, ki predpostavlja samo nominalno vrednost premerov zračnih odprtin. Nominalni premeri so tisti, ki se nanašajo na največjo dolžino tetive v vsakem razredu.

Potrebni podatki za ta izračun so: skupna dolžina linij  $T_{\text{tot}}$  in porazdelitev dolžine tetiv.

### **Izračun frekvence tetiv**

Izmerjene tetive so razporejene v posamezne razrede v *Preglednici 5a*, glede na dolžino, izmerjeno na  $5 \mu\text{m}$  natančno. Številke razredov predstavljajo meje in so podane v stolpcih 1 in 2. Glede na te meje, je vsaka tetiva postavljena v ustrezen razred, naprimer dolžina linije  $150 \mu\text{m}$  je postavljena v razred 11. Skupno število tetiv v vsakem razredu je prikazano v stolpcu 3. Število tetiv glede na skupno dolžino testne linije je izračunano tako, da delimo vrednosti v stolpcu 3 s  $T_{\text{tot}}$ , rezultati pa so izpisani v stolpcu 4.

### **Izračun frekvence zračnih por**

Vsaka zračna pora v cementni pasti med linijsko mikroskopsko analizo ne bo prestrežena, ker z linijo ne moremo zajeti celotnega volumna vzorca betona. Zato je nujno potrebno izračunati število zračnih por na kubični milimeter betona, da bomo lahko ocenili njihovo porazdelitev.

Možno je izračunati delež vseh zračnih mehurčkov, ki lahko vsebujejo tetivo izmerjene dolžine.

Vrednost tega deleža za vsak razred z dolžino tetive je prikazano v stolpcu 5. Če delimo stolpec 4 z stolpcem 5 dobimo skupno število zračnih por v kubičnem milimetru betona, ki bi lahko vsebovali tetive posameznega razreda. Ta vrednost je podana v stolpcu 6.

Opomba: Vrednosti v stolpcu 5 so konstantne za vse razrede in so dobljene iz enačbe:

$$\text{Delež pričakovanih zračnih por} = \frac{\pi * (5 + l_{\max} - l_{\min}) * (l_{\max} - l_{\min})}{4 * 10^6} \quad [\text{mm}^2] \quad (9)$$

Faktor 5 v zgornji enačbi je prisoten zaradi zaokrožitve vseh tetiv na 5  $\mu\text{m}$  natančno. Sama enačba temelji na statističnem izračunu populacije zračnih por.

### **Izračun porazdelitve zračnih por**

Tetiva katerekoli dolžine je lahko vsebovana v katerikoli zračni pori premera večjega od tetive. Potemtakem vrednosti v stolpcu 6 vsebujejo vse zračne pore, katerih premer je večji kot zgornja meja razreda, hkrati pa tudi zračne pore premera, ki so v mejah razreda. Za določitev števila zračnih por premera glede na zgornjo mejo posameznega razreda vsako vrednost stolpca 6 za naslednji velikostni razred odštejemo z vrednostjo trenutnega razreda. Rezultat je zapisan v stolpec 7.

Opomba: V nekaterih primerih je možno, da bodo vrednosti v stolpcu 7 in vse nadaljne vrednosti, izračunane iz stolpca 7, negativne. To je zaradi razporeditve tetiv v izbrane velikostne razrede in njihovih meja. Negativnim vrednostim se lahko izognemo, če primerno priredimo meje velikostnih razredov. Sama priredba mej razreda ne vpliva na končno porazdelitev zračnih por. Zaradi namenov izračuna morajo biti negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.

### **Izračun vsebnosti zraka**

Skupna prostornina zraka, ki pripada posameznemu razredu zračnih por, je izračunana z množenjem stolpca 7 s stolpcem 8, ki vsebuje prostornino ene zračne pore premera enakega zgornji meji razreda. Rezultat v stolpcu 9 dobimo tako, da množimo vrednost v stolpcu 7 s priležno vrednostjo stolpca 8 in rezultat pomnožimo s 100, za izraz v procentih. Kumulativni delež zraka, ki je seštevek celotnega deleža zraka v stolpcu 9, je postavljen v zadnji stolpec 10.

Opomba: Končna vsota v razredu 28 v stolpcu 10 je nominalna vrednost celotnega deleža zraka v obravnavanem betonskem vzorcu. Ta vrednost bi morala biti podobna vrednosti celotnega deleža zraka, izračunanega po formuli  $A = \frac{T_a * 100}{T_{tot}} [\%]$ . Rezultata lahko med seboj nekoliko odstopata zaradi različnega načina izračuna.

### Predstavitev rezultatov

Porazdelitev zračnih por prikažemo na diagramu z nominalno vrednostjo premera zračne pore, za katero vzamemo zgornji premer vsakega razreda iz stolpca 2 in vrednosti v stolpcu 10. To je lahko prikazano kot kumulativni delež zraka, kot je prikazan v stolpcu 10 ali kot kumulativni delež celotnega deleža zraka v obravnavanem betonskem vzorcu, ki ga dobimo tako, da delimo vsako vrednost v stolpcu 10 s skupnim deležem zraka, ki je prikazan v stolpcu 10 v razredu 28.

### Razlaga imen stolpcev

<b>Stolpec 2:</b>	Zgornja in spodnja meja dolžine tetive za posamezni razred v [ $\mu\text{m}$ ].
<b>Stolpec 3:</b>	Izmerjeno število tetiv v posameznem razredu.
<b>Stolpec 4:</b>	Število tetiv v mm glede na celotno testno linijo.
<b>Stolpec 5:</b>	Delež verjetnih srečanih zračnih por pri realnem štetju. Ta faktor je izražen v $\text{mm}^2$ .
<b>Stolpec 6:</b>	Skupno verjetno št. zračnih por v $\text{mm}^3$ betona, ki vsebujejo značilno velikost tetive za posamezni razred.
<b>Stolpec 7:</b>	Ocenjeno celotno število zračnih por premera enakega zgornji meji razreda, v $\text{mm}^3$ betona.
<b>Stolpec 8:</b>	Pripisana prostornina vsaki zračni pori v razredu, v $\text{mm}^3$ .
<b>Stolpec 9:</b>	Ocenjen celoten delež zraka pripisan vsem zračnim poram v razredu, izražen v %.
<b>Stolpec 10:</b>	Ocenjen celotni kumulativni delež zraka, za zračne pore štete do trenutno obravnavanega razreda, izražen v %.

*Preglednica 5a: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico LA5 z 8% vnešenega zraka po SIST EN 480-11:2005, poglavje 8.9.*

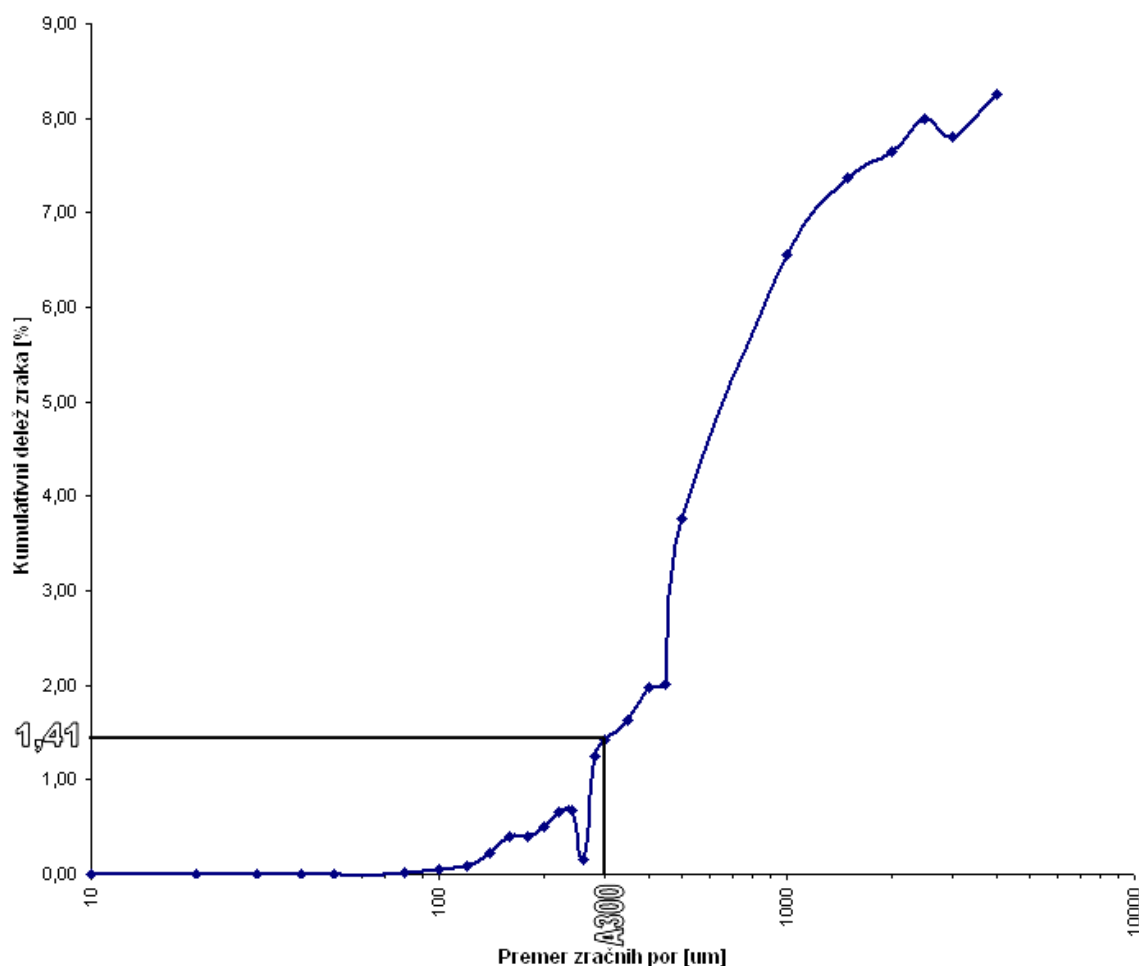
Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	µm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	0,0000	5,24E-07	0	0
2	15 to 20	0	0,00000	0,0002749	0,00000	-1,7187	4,19E-06	-0,001	0,00
3	25 to 30	2	0,00074	0,0004320	1,71869	-4,5841	1,41E-05	-0,006	-0,01
4	35 to 40	10	0,00371	0,0005890	6,30283	0,8296	3,35E-05	0,003	0,00
5	45 to 50	11	0,00408	0,0007461	5,47326	0,9520	6,54E-05	0,006	0,00
6	55 to 60	11	0,00408	0,0009032	4,52126	-1,0196	1,13E-04	-0,012	-0,01
7	65 to 80	34	0,01262	0,0022780	5,54084	1,1974	2,68E-04	0,032	0,02
8	85 to 100	34	0,01262	0,0029060	4,34344	0,6668	5,24E-04	0,035	0,06
9	105 to 120	35	0,01299	0,0035340	3,67665	0,2880	9,05E-04	0,026	0,08
10	125 to 140	38	0,01411	0,0041630	3,38866	0,9866	1,44E-03	0,142	0,23
11	145 to 160	31	0,01151	0,0047910	2,40207	0,8264	2,14E-03	0,177	0,40
12	165 to 180	23	0,00854	0,0054190	1,57565	-0,0204	3,05E-03	-0,006	0,40
13	185 to 200	26	0,00965	0,0060476	1,59603	0,2614	4,19E-03	0,110	0,51
14	205 to 220	24	0,00891	0,0066760	1,33458	0,2672	5,58E-03	0,149	0,65
15	225 to 240	21	0,00780	0,0073040	1,06736	0,0378	7,24E-03	0,027	0,68
16	245 to 260	22	0,00817	0,0079330	1,02952	-0,5749	9,20E-03	-0,529	0,15
17	265 to 280	37	0,01374	0,0085610	1,60446	0,9581	1,15E-02	1,102	1,25
18	285 to 300	16	0,00594	0,0091890	0,64640	0,1124	1,41E-02	0,158	1,41
19	305 to 350	37	0,01374	0,0257200	0,53405	0,0958	2,24E-02	0,215	1,63
20	355 to 400	35	0,01299	0,0296500	0,43822	0,1066	3,35E-02	0,357	1,99
21	405 to 450	30	0,01114	0,0335800	0,33166	0,0050	4,77E-02	0,024	2,01
22	455 to 500	33	0,01225	0,0375000	0,32669	0,2676	6,54E-02	1,750	3,76
23	505 to 1000	94	0,03490	0,5910000	0,05905	0,0534	5,24E-01	2,797	6,56
24	1005 to 1500	15	0,00557	0,9837000	0,00566	0,0046	1,77E+00	0,811	7,37
25	1505 to 2000	4	0,00148	1,3760000	0,00108	0,0007	4,19E+00	0,276	7,64
26	2005 to 2500	2	0,00074	1,7690000	0,00042	0,0004	8,18E+00	0,343	7,99
27	2505 to 3000	0	0,00000	2,1620000	0,00000	-0,0001	1,41E+01	-0,190	7,80
28	3005 to 4000	2	0,00074	5,5020000	0,00013	0,0001	3,35E+01	0,452	8,25

Komentar *Preglednice 5a*: Kot vidimo iz *Preglednice 5a*, v stolpcu 7 v resnici dobivamo negativne vrednosti za določene razrede. Če bi na primer združili razrede 1 – 4 in 5 – 6, bi imeli več podatkov za ta razširjena razreda. V tem primeru rezultati v stolpcu 7 praviloma ne bi bili negativni, ker bi imeli najbrž že dovolj meritev. Tako bi nadaljevali do razreda 28. Če podrobno pregledamo stolpec 7, ki nam predstavlja celotno število zračnih por, premera enakega zgornji meji razreda, v mm<sup>3</sup> betona, vidimo, da mešanica vsebuje velik delež zračnih mehurčkov razredov 7, 8, 10, 11, 17. Bolj ko se velikost zračnih por večja, manj jih je prisotnih v mešanici. Seveda pa večje kot so zračne pore, več doprinesejo k skupnemu deležu



zraka (na primer razred 27 v stolpcu 7 je kot delež majhna številka, v stolpcu 8, kjer je predstavljena prostornina zračne pore, pa doprinese veliko k celotni prostornini vseh zračnih por v betonskem vzorcu). Vrednost 1,41% v stolpcu 10, ki je obarvana zeleno, predstavlja delež mikropor  $A_{300}$ . Zadnja vrednost 8,25%, v razredu 28 v stolpcu 10, pa predstavlja celoten kumulativen delež zraka v obravnavanem betonskem vzorcu. Če ga primerjamo z vrednostjo  $A = 7,80\%$  (celoten delež zraka izračunan po formuli  $A = \frac{T_a * 100}{T_{tot}} [\%]$ ) iz Preglednice 5 vidimo, da sta rezultata zelo blizu. Razlika v vrednosti je posledica različnega načina izračuna.

Graf porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por [um] za mešanico LA5 z 8%



**Slika 1:** Graf porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por za mešanico LA5 z 8% deležem zraka.

Komentar *Slike 1:* Graf nam prikaže, kolikšen delež zraka prinesejo posamezni velikostni razredi zračnih por. Kot je razvidno iz slike, mikropore ne doprinesejo veliko k celotnemu

deležu zraka v obravnavanih betonskih vzorcih mešanice LA5, vendar pa to še ne pomeni, da ne odigrajo pomembno vlogo pri zmrzlini odpornosti betona.

### Mešanica LA6

Dobljeni rezultati pri mešanici LA6 z 10% vnešenega zraka so bili naslednji.

*Preglednica 6: Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA6.*

<b>Pridobljeni podatki</b>	
P = <b>40,7</b> %	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
$T_s$ = <b>2495</b> mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
$T_a$ = <b>206</b> mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>	
$T_{tot}$ = <b>2701</b> mm	...skupna dolžina čez vzorec
<b>Skupna vsebnost zraka</b>	
A = <b>7,62</b> %	
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>	
N = <b>688</b>	...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>	
$\alpha$ = <b>13,38</b> mm <sup>-1</sup>	
<b>Razmerje pasta-zrak</b>	
R = <b>5,344</b>	
<b>Faktor oddaljenosti</b>	
$\bar{L}$ = <b>0,357</b> mm	
<b>Vsebnost mikro zraka</b>	
$A_{300}$ = <b>1,60</b> %	

Kot vidimo iz rezultatov dobljenih pri mešanici LA6 z 10% vnešenega zraka, je faktor  $R = 5,344$  znotraj priporočenih meja, specifična površina  $\alpha = 13,38 \text{ mm}^{-1}$  je pod spodnjo priporočeno mejo  $24 \text{ mm}^{-1}$  in tudi faktor oddaljenosti  $\bar{L} = 0,357 \text{ mm}$  je večji od priporočene zgornje meje.

### Mešanica LA8

Dobljeni rezultati pri mešanici LA8 z 12% vnešenega zraka so bili naslednji.

*Preglednica 7: Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA8.*

<b>Pridobljeni podatki</b>	
P = <b>40,1</b> %	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
$T_s$ = <b>2460</b> mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
$T_a$ = <b>234</b> mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>	
$T_{tot}$ = <b>2694</b> mm	...skupna dolžina čez vzorec

<b>Skupna vsebnost zraka</b>	
A =	8,70 %
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>	
N =	780 ...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>	
$\alpha$ =	13,31 mm <sup>-1</sup>
<b>Razmerje pasta-zrak</b>	
R =	4,611
<b>Faktor oddaljenosti</b>	
$\bar{L}$ =	0,335 mm
<b>Vsebnost mikro zraka</b>	
A <sub>300</sub> =	1,47 %

Kot vidimo iz rezultatov dobljenih pri mešanici LA8 z 12% vnešenega zraka, je faktor R = 4,611 znotraj priporočenih meja, specifična površina  $\alpha = 13,31 \text{ mm}^{-1}$  je pod spodnjo priporočeno mejo  $24 \text{ mm}^{-1}$  in tudi faktor oddaljenosti  $\bar{L} = 0,335 \text{ mm}$  je večji od priporočene zgornje meje.

### Mešanica LA10

Dobljeni rezultati pri mešanici LA10 s 4% vnešenega zraka so bili naslednji.

*Preglednica 8: Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA10.*

<b>Pridobljeni podatki</b>		
P =	42,7 %	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
T <sub>s</sub> =	2547 mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
T <sub>a</sub> =	137 mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>		
T <sub>tot</sub> =	2684 mm	...skupna dolžina čez vzorec
<b>Skupna vsebnost zraka</b>		
A =	5,10 %	
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>		
N =	400	...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>		
$\alpha$ =	11,69 mm <sup>-1</sup>	
<b>Razmerje pasta-zrak</b>		
R =	8,376	
<b>Faktor oddaljenosti</b>		
$\bar{L}$ =	0,501 mm	
<b>Vsebnost mikro zraka</b>		
A <sub>300</sub> =	0,96 %	

Kot vidimo iz rezultatov dobljenih pri mešanici LA10 s 4% vnešenega zraka, je faktor  $R = 8,376$  še znotraj priporočenih meja. To razmerje je vidno naraslo v primerjavi s prejšnjimi mešanicami, kar je logično, saj je % skupnega zraka veliko manjši. Večja pa je vsebnost cementne paste in posledično seveda tudi faktor  $R = P/A$ . Specifična površina  $\alpha = 11,69 \text{ mm}^{-1}$  je pod spodnjo priporočeno mejo  $24 \text{ mm}^{-1}$  in je ponovno posledica le 4 % vnešenega deleža zraka v mešanico. Faktor oddaljenosti  $\bar{L} = 0,501 \text{ mm}$  je večji od zgornje priporočene meje. Iz tega lahko sklepamo, da se je v primerjavi s prej naštetimi mešanicami faktor oddaljenosti  $\bar{L}$  občutno povečal, kar pomeni, da imamo še manj zračnih mehurčkov, posledično pa se razdalje med njimi povečujejo. Zmanjšala se je tudi vsebnost mikropor, vnešenih zračnih mehurčkov do velikosti 0,3 mm. Omeniti velja še parameter N, ki znaša 400 izmerjenih tetiv. Tudi ta podatek nam nazorno pove, da je v betonu LA10 manj zračnih mehurčkov kot pri betonih z večjim deležem zraka.

### Mešanica LA11

Dobljeni rezultati pri mešanici LA11 s 6% vnešenega zraka so bili naslednji.

*Preglednica 9: Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LA11.*

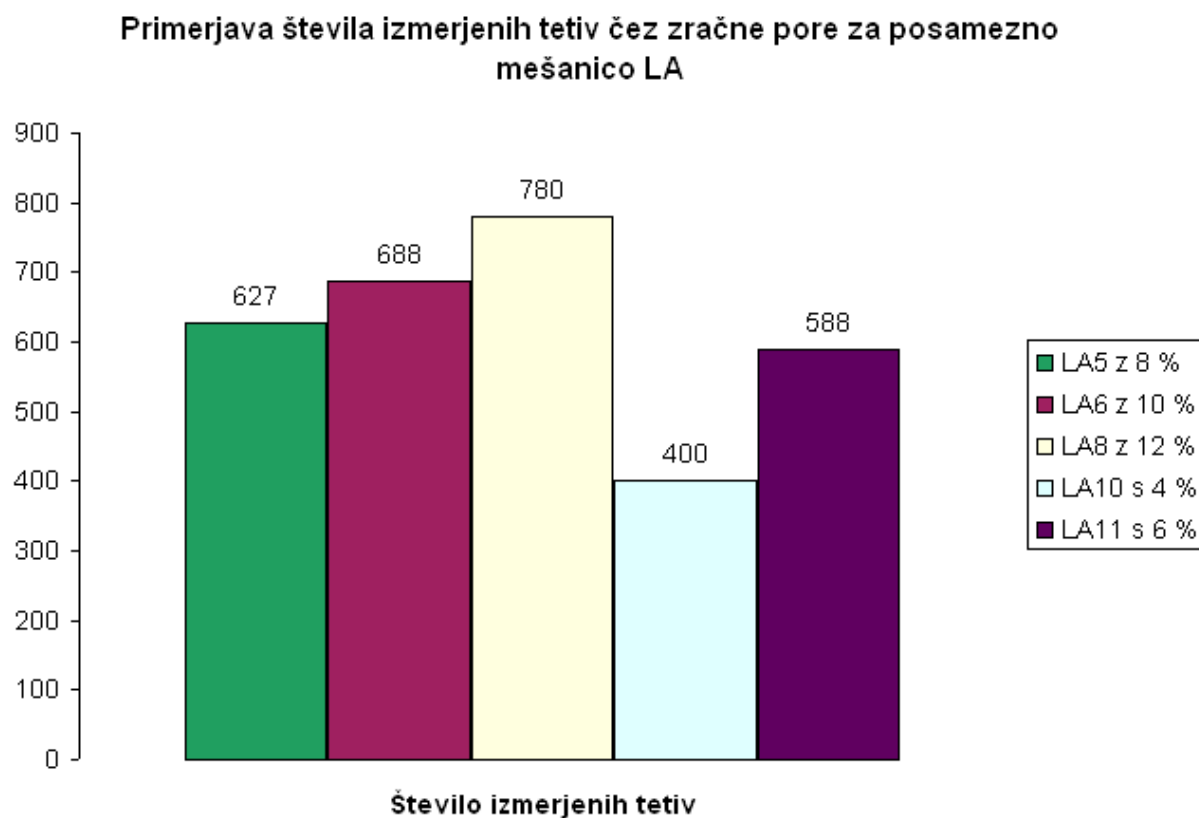
<b>Pridobljeni podatki</b>		
P =	<b>41,8</b>	% ...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
$T_s =$	<b>2490</b>	mm ...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
$T_a =$	<b>197</b>	mm ...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>		
$T_{tot} =$	<b>2687</b>	mm ...skupna dolžina čez vzorec
<b>Skupna vsebnost zraka</b>		
A =	<b>7,35</b>	%
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>		
N =	<b>588</b>	...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>		
$\alpha =$	<b>11,91</b>	$\text{mm}^{-1}$
<b>Razmerje pasta-zrak</b>		
R =	<b>5,688</b>	
<b>Faktor oddaljenosti</b>		
$\bar{L} =$	<b>0,413</b>	mm
<b>Vsebnost mikro zraka</b>		
$A_{300} =$	<b>0,97</b>	%

Kot vidimo iz rezultatov dobljenih pri mešanici LA11 s 6% vnešenega zraka, je faktor  $R = 5,688$  znotraj meja. To razmerje je vidno padlo v primerjavi z mešanico LA10 s 4% zraka, kar je razumljivo, saj je % skupnega zraka za 2% višji kot pri LA10 in zato pade tudi vsebnost

cementne paste in s tem faktor  $R = P/A$ . Specifična površina  $\alpha = 11,91 \text{ mm}^{-1}$  je pod spodnjo dovoljeno mejo  $24 \text{ mm}^{-1}$  in je ponovno posledica le 6% vnešenega zraka v mešanico. Faktor oddaljenosti  $\bar{L} = 0,413 \text{ mm}$  je ponovno večji od zgornje priporočene meje.

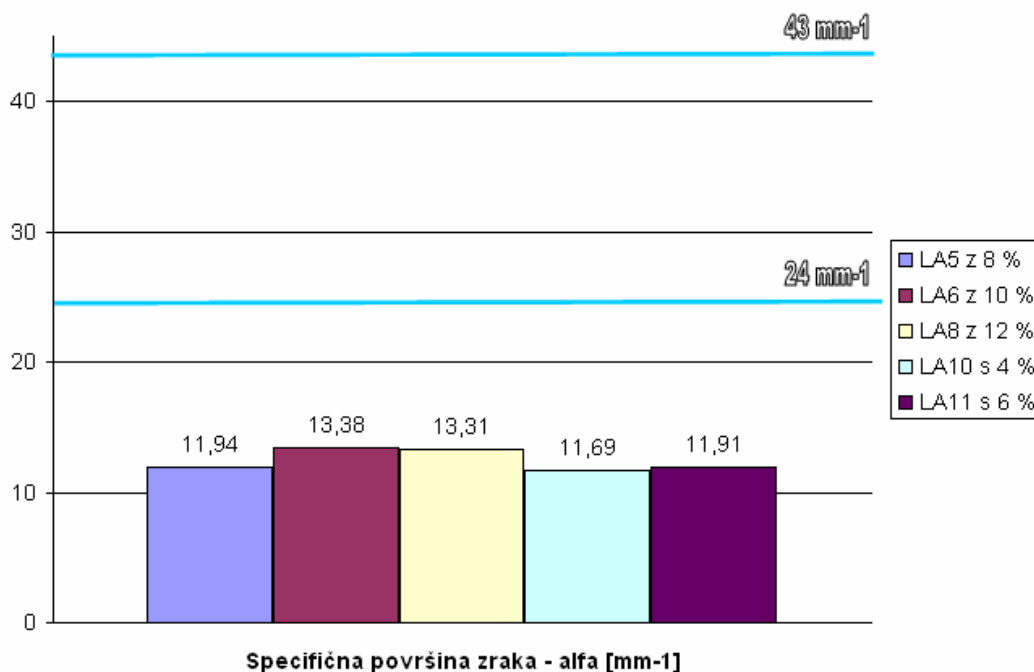
### Primerjava mešanic LA

Za bolj nazoren prikaz razlik med posameznimi mešanicami LA bom prikazal rezultate na skupnih grafih, kjer bodo razlike bolj očitno vidne.



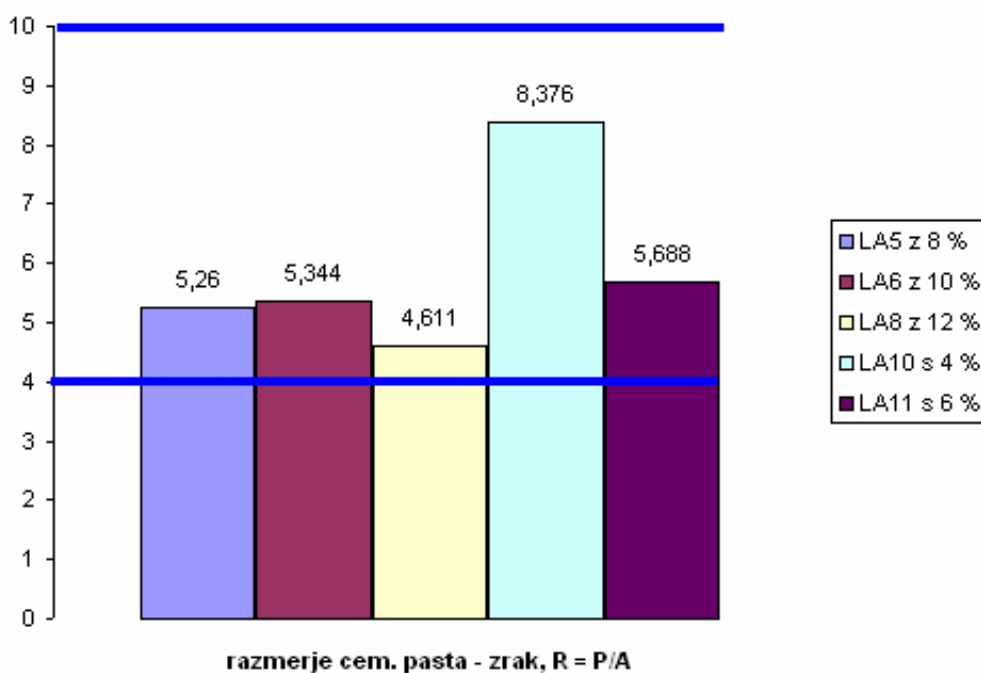
*Slika 2: Primerjava števila tetiv N čez zračne mehurčke za posamezne mešanice LA.*

### Primerjava specifičnih površin zraka (alfa) za posamezne mešanice LA



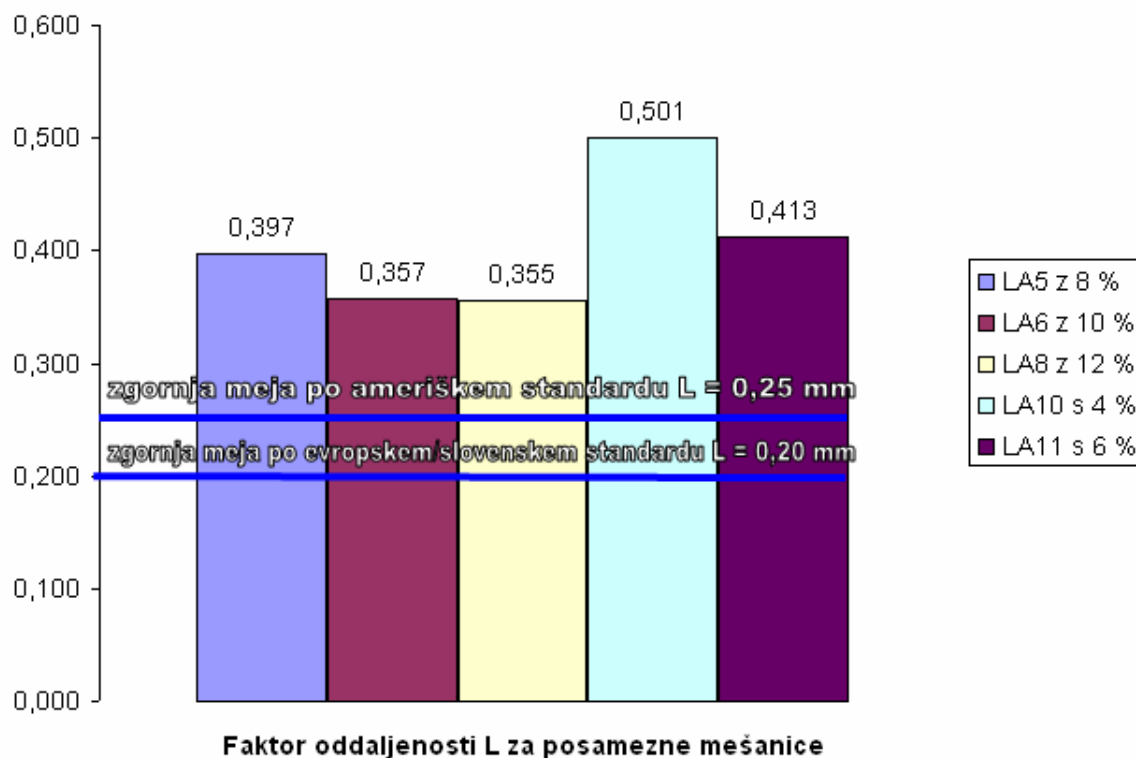
Slika 3: Primerjava specifičnih površin zraka ( $\alpha$ ) za posamezne mešanice LA.

### Primerjava razmerja cem. pasta - zrak za posamezne mešanice LA, $R = P/A$



Slika 4: Primerjava razmerja cementna pasta ( $P$ ) – zrak ( $A$ ) med posameznimi mešanici LA (modri črti predstavljata priporočeni meji).

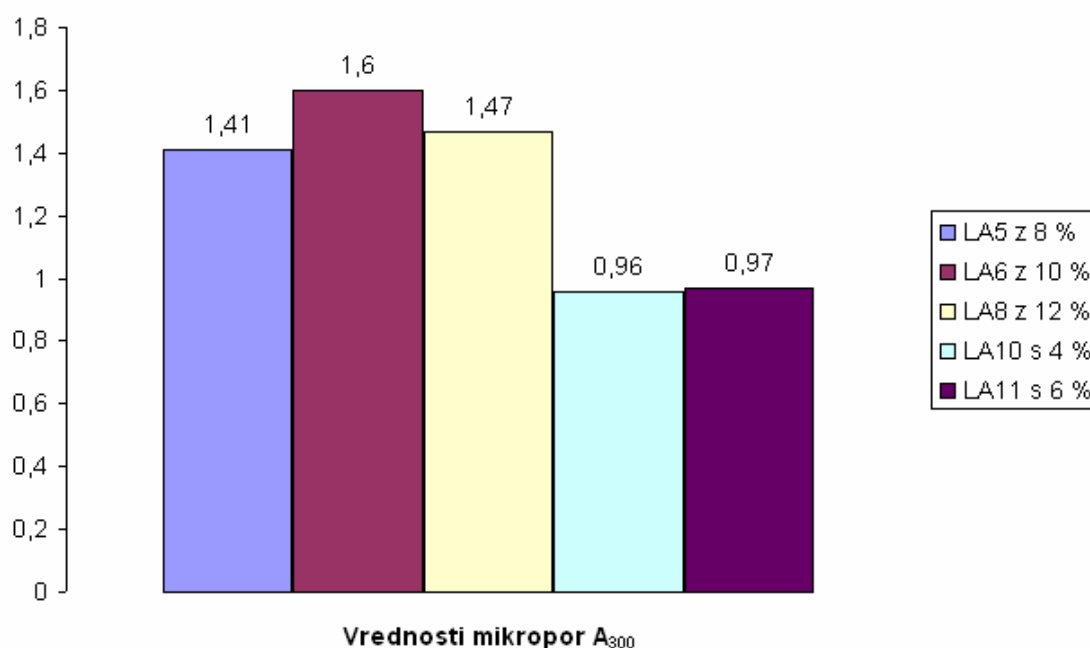
### Primerjava faktorja oddaljenosti L za posamezne mešanice



Slika 5: Primerjava faktorjev oddaljenost  $\bar{L}$  med posameznimi mešanici LA.

### Primerjava vsebnosti mikropor med posameznimi mešanici

LA - A<sub>300</sub>



Slika 6: Primerjava vsebnosti mikropor med posameznimi mešanici LA - A<sub>300</sub>.

### Primerjava z OSMO odpornostjo LA mešanic

OSMO preiskus je bil pozitiven za vse LA betonske mešanice (Pezdirc, 2005). Sklepamo lahko torej, da so priporočene meje za specifično površino zraka  $\alpha$  in faktor oddaljenosti  $\bar{L}$ , ki veljajo za vibrirane betone, preostre v primeru obravnavanih SCC betonov. Pri SCC betonih namreč pri nobeni mešanici specifična površina zraka  $\alpha$  in faktor oddaljenosti  $\bar{L}$  nista izpolnila kriterijev, ki veljajo za običajne vibrirane betone. Menim, da bi za obravnavane mešanice bila ustrezna zgornja meja faktorja oddaljenosti  $\bar{L} = 0,5$  mm.

*Preglednica 10: Primerjava kumulativnih deležev zraka za mešanice LA.*

zg. meja razreda $\mu\text{m}$	LA10 s 4% %	LA11 s 6% %	LA5 z 8% %	LA6 z 10% %	LA8 z 12% %
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	-0,01	-0,01	0,00	-0,02
40	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	-0,04
50	-0,01	0,00	0,00	-0,03	-0,01
60	0,00	0,00	-0,01	-0,03	0,04
80	0,03	0,06	0,02	0,05	0,12
100	0,08	0,24	0,06	0,08	0,22
120	0,12	0,18	0,08	0,14	0,29
140	0,24	0,22	0,23	0,37	0,60
160	0,25	0,35	0,40	0,54	0,65
180	0,25	0,42	0,40	0,54	0,77
200	0,46	0,46	0,51	0,69	0,88
220	0,59	0,87	0,65	1,23	0,82
240	0,48	0,80	0,68	0,94	1,00
260	0,61	1,01	0,15	1,26	0,92
280	0,80	0,68	1,25	1,37	1,39
300( $A_{300}$ )	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>1,41</b>	<b>1,60</b>	<b>1,47</b>
350	1,24	1,17	1,63	2,03	1,92
400	1,12	2,23	1,99	2,23	2,69
450	1,60	2,05	2,01	2,92	3,37
500	2,01	3,27	3,76	3,93	4,11
1000	3,66	5,61	6,56	6,43	7,15
1500	4,13	6,46	7,37	7,11	8,13
2000	4,66	7,14	7,64	7,47	8,18
2500	5,03	7,00	7,99	7,65	8,10
3000	5,28	6,95	7,80	7,46	8,63
4000	<b>5,28</b>	<b>7,63</b>	<b>8,25</b>	<b>7,91</b>	<b>9,09</b>

Komentar *Preglednice 10*: Če gledamo delež mikropor  $A_{300}$  za posamezne mešanice lahko ugotovimo, da med mešanico LA11 s 6% zraka in LA5 z 8% zraka pride do kar velikega



skoka pri deležu mikropor. Ker naj bi mikropore odigrale pomembno vlogo pri odpornosti betona proti zmrzovanju/tajanju lahko trdimo, da je mešanica LA5 z 8% vnešenega zraka bolj primerna odpornosti proti zmrzovanju/tajanju kot mešanici LA11 in LA10. Nadalje je zanimivo, da je pri mešanici LA8 z 12% vnešenega zraka celo manj mikropor kot pri mešanici LA6 z 10% zraka in le za malenkost več, kot pri mešanici LA5 z 8% zraka. Po moji presoji bi bila optimalna izbira za beton odporen proti zmrzovanju/tajanju mešanica LA5 z 8% zraka. Tudi če gledamo celotno vsebnost zraka v zadnji vrstici *Preglednice 10* vidimo, da pri mešanici LA5 z 8% zraka dobimo najbolj primerljiv rezultat glede na % vnešenega zraka. Kumulativni delež zraka je 8,25%, delež vnesenega zraka pa 8%. Pri mešanici LA6 z 10% zraka je celotni kumulativni delež zraka 7,91% celo manjši kot pri mešanici LA5 z 8% zraka in že preveč odstopa od % vnešenega zraka v mešanico. Nadalje podobna zgodba velja za mešanico LA8 z 12% zraka. Iz tega sledi, da nima smisla večati % vnešenega zraka preko 8%. Ker smo vzorce preiskovali ob površini vidimo, da je pri deležih zraka, večjih od 8%, prišlo do odzračanja – t.j. zmanjšanje deleža zraka ob površini vzorca. Naj še enkrat poudarim, da to velja za vzorce, vzete iz površine betonske kocke.

### 8.5.2 Preiskave in rezultati za mešanico CA

Gre za aeriran samozgoščevalni betoni, ki vsebujejo prvo apnenčevo moko pridobljeno z mletjem (moka C). Preiskal sem tri vzorce iz te mešanice, sicer pa je bilo v mešanici CA 4% zraka.

*Preglednica 11: Sestava mešanice CA.*

MATERIAL	CA4 s 4% kg/m <sup>3</sup>
cement	424
moka	257
voda	166
kontrola (v/c)	0,39
agregat	1507
Vpaste [dm <sup>3</sup> ]	427
p [%]	4,5
količina odluščenega materiala [mg/mm <sup>2</sup> ]:	[mg/mm <sup>2</sup> ]
po 25 ciklih	0,03
po 50 ciklih	0,21

**Preglednica 12:** Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico CA.

<b>Pridobljeni podatki</b>			
P =	<b>42,7</b>	%	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
T <sub>s</sub> =	<b>2548</b>	mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
T <sub>a</sub> =	<b>140</b>	mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>			
T <sub>tot</sub> =	<b>2689</b>	mm	...skupna dolžina čez vzorec
<b>Skupna vsebnost zraka</b>			
A =	<b>5,22</b>	%	
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>			
N =	<b>419</b>		...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>			
α =	<b>11,93</b>	mm <sup>-1</sup>	
<b>Razmerje pasta-zrak</b>			
R =	<b>8,173</b>		
<b>Faktor oddaljenosti</b>			
$\bar{L}$ =	<b>0,485</b>	mm	
<b>Vsebnost mikro zraka</b>			
A <sub>300</sub> =	<b>0,94</b>	%	

Kot je razvidno iz rezultatov v *Preglednici 12* je specifična površina zraka  $\alpha$  ponovno pod priporočeno mejo 24 mm<sup>-1</sup>, razmerje med cementno pasto in zrakom, ki ga ponazarja faktor R, je visoko in v priporočenih mejah, kar je normalno, saj smo v beton vnesli le 4% zraka, faktor oddaljenosti  $\bar{L}$  pa je ponovno nad priporočeno zgornjo mejo.

### **Primerjava z OSMO odpornostjo CA mešanice**

OSMO preizkus je bil pozitiven za CA mešanico, kot je razvidno iz rezultatov količine odluščenega materiala po 25. (0,03 mg/mm<sup>2</sup>) in 50. ciklih (0,21 mg/mm<sup>2</sup>) iz *Preglednice 11* (Pezdirč, 2005). Če primerjamo količine odluščenega materiala z mešanico LA10 s 4% vnešenega zraka iz *Preglednice 4* (po 25. (0,02 mg/mm<sup>2</sup>) in 50. ciklih (0,05 mg/mm<sup>2</sup>)) vidimo, da pri mešanici CA količina odluščenega materiala drastično naraste po 50. ciklih zmrzovanja/tajanja. Če primerjamo faktorja R in  $\alpha$  iz *Preglednice 12* za mešanico CA z rezultati v *Preglednici 8* za mešanico LA10 vidimo, da so vrednosti med seboj zelo podobne. To je smiseln rezultat, saj smo v obeh primerih vnesli enako količino zraka v mešanico. Zato menim, da je treba iskati razloge v veliki količini odluščenega materiala po 50. ciklih zmrzovanja/tajanja v karakteristikah apnenčeve moke C. Kot so ugotovili že moji predhodniki (Duh, Žarnič, Bokan-Bosiljkov, 2006) so po vsej verjetnosti, eni izmed glavnih razlogov za

dobljene rezultate površinske lastnosti moka C, ki je mnogo bolj hidrofobna kot apnenčeva moka L. Bolj podrobno je problem opisan v poglavju 8.2.1.

### 8.5.3 Preiskave in rezultati za mešanico TA

Gre za aeriran samozgoščevalni beton, ki vsebuje drugo apnenčevo moko pridobljeno z mletjem (moka T). Ponovno smo preiskali le 3 vzorce. Rezultati in sestava mešanice so podani v spodnjih tabelah.

*Preglednica 13: Sestava mešanice TA.*

MATERIAL	TA2 s 4%
	kg/m <sup>3</sup>
cement	424
moka	257
voda	166
kontrola (v/c)	0,39
agregat	1507
Vpaste [dm <sup>3</sup> ]	427
p [%]	4,5
<b>količina odluščenega materiala [mg/mm<sup>2</sup>]:</b>	<b>[mg/mm<sup>2</sup>]</b>
po 25 ciklih	0,01
po 50 ciklih	0,04

*Preglednica 14: Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico TA.*

Pridobljeni podatki			
P =	<b>42,7</b>	%	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
T <sub>s</sub> =	<b>2563</b>	mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
T <sub>a</sub> =	<b>135</b>	mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
Skupna dolžina prečnih linij			
T <sub>tot</sub> =	<b>2698</b>	mm	...skupna dolžina čez vzorec
Skupna vsebnost zraka			
A =	<b>4,99</b>	%	
Skupno število izmerjenih tetiv			
N =	<b>363</b>		...izračunan iz meritev
Specifična površina zraka			
α =	<b>10,79</b>	mm <sup>-1</sup>	
Razmerje pasta-zrak			
R =	<b>8,563</b>		
Faktor oddaljenosti			
$\bar{L}$ =	<b>0,548</b>	mm	

Vsebnost mikro zraka		
$A_{300} =$	<b>0,67</b>	%

Ker smo ponovno vnesli v beton le 4% zraka, sta vrednosti za  $\bar{L}$  in R visoki, nizki pa za N,  $\alpha$  in  $A_{300}$ . Če primerjamo vrednosti faktorjev  $\bar{L}$ , R in  $\alpha$  za mešanico TA2 v *Preglednici 14* z vrednostmi teh faktorjev za mešanico LA10 v *Preglednici 8*, vidimo, da sicer obstajajo manjše razlike med vrednostmi, vendar so vrednosti med seboj primerljive, glede na enak % vnešenega zraka.

#### Primerjava z OSMO odpornostjo TA mešanice

OSMO preizkus je bil pozitiven za TA mešanico, kot je razvidno iz rezultatov za količino odluščenega materiala po 25. (0,01 mg/mm<sup>2</sup>) in 50. ciklih (0,04 mg/mm<sup>2</sup>) iz *Preglednice 13* (Pezdirč, 2005). Če primerjamo te rezultate z rezultati za mešanico LA10 s 4% vnešenega zraka iz *Preglednice 4* (po 25. (0,02 mg/mm<sup>2</sup>) in 50. ciklih (0,05 mg/mm<sup>2</sup>)) vidimo, da so tudi količine odluščenega materiala med obema mešanicama zelo primerljive.

#### 8.5.4 Preiskave in rezultati za mešanico EF

V primeru vzorcev EF smo dosegli 4% delež zraka brez dodajanja aeranta. Rezultati in sestava so v spodnjih preglednicah.

*Preglednica 15: Sestava mešanice EF.*

MATERIAL	EF6 z 0% kg/m <sup>3</sup>
cement	398
moka	215
voda	189
kontrola (v/c)	0,48
kontrola (v/vez)	0,39
agregat	1478
Vpaste [dm <sup>3</sup> ]	438
<b>količina odluščenega materiala [mg/mm<sup>2</sup>]:</b>	
po 25 ciklih	0,04
po 50 ciklih	0,31

**Preglednica 16:** Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico EF.

<b>Pridobljeni podatki</b>			
P =	<b>43,8</b>	%	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
$T_s$ =	<b>2555</b>	mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
$T_a$ =	<b>115</b>	mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>			
$T_{tot}$ =	<b>2670</b>	mm	...skupna dolžina čez vzorec
<b>Skupna vsebnost zraka</b>			
A =	<b>4,31</b>	%	
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>			
N =	<b>450</b>		...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>			
$\alpha$ =	<b>15,65</b>	mm <sup>-1</sup>	
<b>Razmerje pasta-zrak</b>			
R =	<b>10,168</b>		
<b>Faktor oddaljenosti</b>			
$\bar{L}$ =	<b>0,408</b>	mm	
<b>Vsebnost mikro zraka</b>			
$A_{300}$ =	<b>1,03</b>	%	

Z vključitvijo elektrofiltskega pepela v betonsko mešanico smo dobili delež zraka v svežem in strjenem betonu enak okrog 4%, ne da bi uporabili aerant. Uporabljen elektrofiltrski je očitno povzročil vnos zračnih mehurčkov v betonsko mešanico, katerih karakteristike se bistveno ne razlikujejo od karakteristik sistema zračnih por vnešenih z aerantom v primerljive betonske mešanice: LA10, CA in TA. Še več, faktor oddaljenosti  $\bar{L}$  je pri tem betonu najmanjši. Kljub temu pa so bili rezultati OSMO preiskave negativni, iz česar lahko sklepamo, da je EF pepel tisti, ki poslabša OSMO odpornost obravnavanega SCC. Pri EF pepelu pa ne smemo zanemariti še enega vidika, to je potencialne radioaktivnosti. Zato je za uporabo v betonih potrebno uporabiti izključno EF pepel, ki ima ustrezen certifikat.

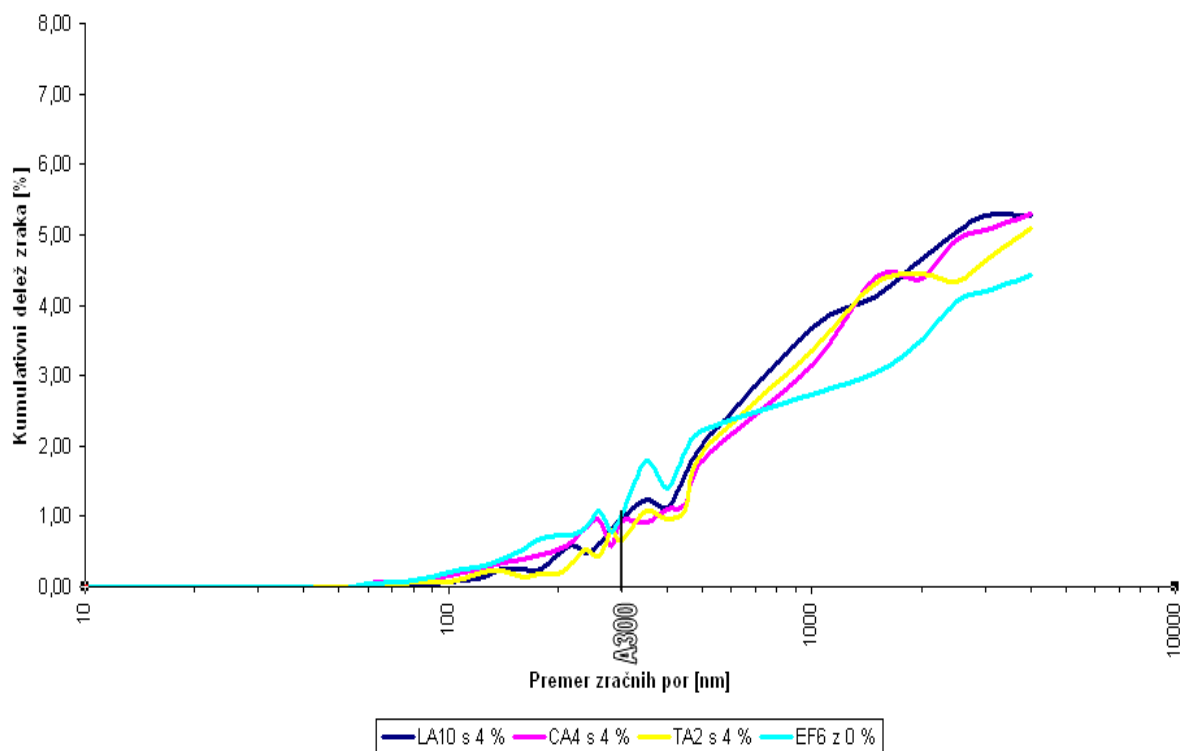
**Preglednica 17:** Primerjava kumulativnih deležev zraka za mešanice LA10, CA4, TA2 s 4% vnešenega zraka in EF6 z 0% vnešenega zraka.

zg. meja razreda $\mu\text{m}$	LA10 s 4% %	CA4 s 4% %	EF6 z 0% %	TA2 s 4% %
10	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	-0,01	-0,01	0,00
40	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
50	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01
60	0,00	0,04	0,04	0,00
80	0,03	0,09	0,10	0,06
100	0,08	0,17	0,21	0,07
120	0,12	0,25	0,27	0,19
140	0,24	0,35	0,38	0,23
160	0,25	0,40	0,52	0,13
180	0,25	0,47	0,69	0,19
200	0,46	0,52	0,73	0,18
220	0,59	0,64	0,73	0,34
240	0,48	0,84	0,84	0,52
260	0,61	0,94	1,08	0,43
280	0,80	0,58	0,78	0,80
<b>300(A<sub>300</sub>)</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>1,03</b>	<b>0,67</b>
350	1,24	0,91	1,80	1,08
400	1,12	1,10	1,40	0,95
450	1,60	1,17	1,92	1,09
500	2,01	1,80	2,22	1,91
1000	3,66	3,13	2,72	3,34
1500	4,13	4,39	3,06	4,31
2000	4,66	4,38	3,50	4,45
2500	5,03	4,93	4,05	4,34
3000	5,28	5,07	4,20	4,63
<b>4000</b>	<b>5,28</b>	<b>5,30</b>	<b>4,43</b>	<b>5,08</b>

Komentar *Preglednice 17*: Če primerjamo delež mikropor  $A_{300}$  posameznih mešanic med seboj, vidimo, da so vrednosti primerljive, razen v primeru mešanice TA2 ( $A_{300} = 0,67\%$ ). Mogoče je ta vrednost posledica slabših karakteristik moko v mešanici TA2. Če nadalje primerjamo celotne kumulativne deleže zraka, so vrednosti za LA10, CA4 in TA2 med seboj primerljive, izjema pa je mešanica EF6 z elektrofiltrskim pepelom, kjer je delež zraka enak 4,43% in tako nekoliko manjši kot pri betonih z apnenčevo moko. Še enkrat je potrebno poudariti, da v mešanico z elektrofiltrskim pepelom nismo vnesli aeranta. Doseganje vrednosti celotne vsebnosti zraka 4,43% in deleža mikropor 1,03% v primeru mešanice EF6 je po vsej verjetnosti potrebno pripisati sami sestavi elektrofiltrskega pepela. Le ta je sestavljen

iz delcev, ki imajo očitno podobne lastnosti kot površinsko aktivne snovi (v našem primeru aerant).

Graf primerjave kumulativnih deležev zraka med mešanici LA10, CA4, TA2 s 4% vnešenim zrakom ter EF6 z 0% vnešenega zraka



*Slika 7: Primerjave porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por za mešanice LA10, CA4, TA2 s 4% vnešenega zraka in mešanico EF6 z 0 % vnešenega zraka.*

Komentar *Slike 7*: Iz tega grafa lahko vidimo, da mešanica EF6 z 0% vnešenega zraka vsebuje največji delež mikropor. Spet lahko iščemo razloge v sestavi elektrofiltrskega pepela. Zelo mogoče je, da so bile zračne pore, ki smo jih šteli z LMA v primeru mešanice EF6, pravzaprav delci elektrofiltrskega pepela, ki imajo sferično obliko, prav tako kot zračne pore, ki so posledica vnosa aeranta pri vseh ostalih mešanicah.

### 8.5.5 Preiskave in rezultati za mešanico LVA

V primeru vibriranega aeriranega betona smo preiskali 6 vzorcev. In sicer 3 vzorce tako, da je bila referenčna ploskev blizu površine betona na kateri je potekala OSMO preiskava, in 3 vzorce, pri katerih je bila referenčna ploskev iz sredine standardne kocke. Željena stopnja vsebnosti zraka je bila 8%. Naj omenim še, da smo v primeru teh vzorcev apnenčevo moko

nadomestili z agregatom, istočasno pa smo zmanjšali delež superplastifikatorja, da smo dobili primerjalno mešanico, ki se vgrajuje z vibriranjem in ima tekočo konsistenco. Sestava in rezultati so podani v spodnjih preglednicah.

**Preglednica 18: Sestava mešanice LVA4.**

<b>MATERIAL</b>	<b>LVA4 z 8% kg/m<sup>3</sup></b>
cement	409
moka	0
voda	160
kontrola (v/c)	0,39
kontrola (v/vez)	0,39
agregat	1697
Vpaste [dm <sup>3</sup> ]	327
p [%]	7,9
<b>količina odluščenega materiala [mg/mm<sup>2</sup>]:</b>	
po 25 ciklih	0,22
po 50 ciklih	0,97

**Preglednica 19: Rezultati dobjeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LVA4 – površina.**

<b>Pridobljeni podatki</b>			
P =	<b>32,7</b>	%	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
T <sub>s</sub> =	<b>2495</b>	mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
T <sub>a</sub> =	<b>235</b>	mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>			
T <sub>tot</sub> =	<b>2730</b>	mm	...skupna dolžina čez vzorec
<b>Skupna vsebnost zraka</b>			
A =	<b>8,60</b>	%	
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>			
N =	<b>1139</b>		...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>			
α =	<b>19,40</b>	mm <sup>-1</sup>	
<b>Razmerje pasta-zrak</b>			
R =	<b>3,800</b>		
<b>Faktor oddaljenosti</b>			
$\bar{L}$ =	<b>0,196</b>	mm	
<b>Vsebnost mikro zraka</b>			
A <sub>300</sub> =	<b>2,99</b>	%	



**Preglednica 20:** Rezultati dobljeni z linijsko mikroskopsko analizo za mešanico LVA4 – sredina.

<b>Pridobljeni podatki</b>			
P =	<b>32,7</b>	%	...vsebnost paste izračunana iz razmerij mešanice
$T_s$ =	<b>2478</b>	mm	...skupna dolžina linije čez trdni del vzorca
$T_a$ =	<b>216</b>	mm	...skupna dolžina linije čez zračne pore
<b>Skupna dolžina prečnih linij</b>			
$T_{tot}$ =	<b>2695</b>	mm	...skupna dolžina čez vzorec
<b>Skupna vsebnost zraka</b>			
A =	<b>8,02</b>	%	
<b>Skupno število izmerjenih tetiv</b>			
N =	<b>1062</b>		...izračunan iz meritev
<b>Specifična površina zraka</b>			
$\alpha$ =	<b>19,66</b>	mm <sup>-1</sup>	
<b>Razmerje pasta-zrak</b>			
R =	<b>4,078</b>		
<b>Faktor oddaljenosti</b>			
$\bar{L}$ =	<b>0,207</b>	mm	
<b>Vsebnost mikro zraka</b>			
$A_{300}$ =	<b>2,77</b>	%	

Kot vidimo, je pri vibriranih vzorcih faktor oddaljenosti prvič pod ali v okviru priporočenih mej. Torej pod 0,25 mm glede na slovenski standard in blizu oziroma pod 0,20 mm glede na ameriška priporočila. Razmerje pasta-zrak je v predvidenih mejah, poveča se tudi vsebnost mikropor in to kar veliko, v primerjavi z SCC mešanico z enakim deležem zraka. Specifična površina zraka pa še vedno ne doseže priporočene spodnje mejne vrednosti 24 mm<sup>-1</sup>. V končni fazi pa to ne pomeni nič, saj je bila OSMO preiskava na vibriranem betonu negativna. Že po 25. ciklih zmrzovanja/tajanja je bila količina odluščenega materiala prekoračena. To pomeni, da izpolnjevanje priporočenih mejnih vrednosti s strani parametrov dobljenih z Linijsko mikroskopsko analizo (LMA) še ni garancija za zmrzlinško odpornost površine betona v prisotnosti soli. To je razlog, zakaj je referenčna metoda OSMO preiskava in ne LMA.

Lahko pa rečemo, da dajeta vzorca glede na izbrano referenčno površino preiskave podobne rezultate parametrov, dobljenih z linijsko mikroskopsko analizo. Torej lahko predpostavimo, da je razporeditev por po velikosti podobna tako na površini kot v sredini vzorca. To pomeni, da dobimo v primeru, ko LMA opravimo v celoti v skladu z zahtevami SIST EN 480-11

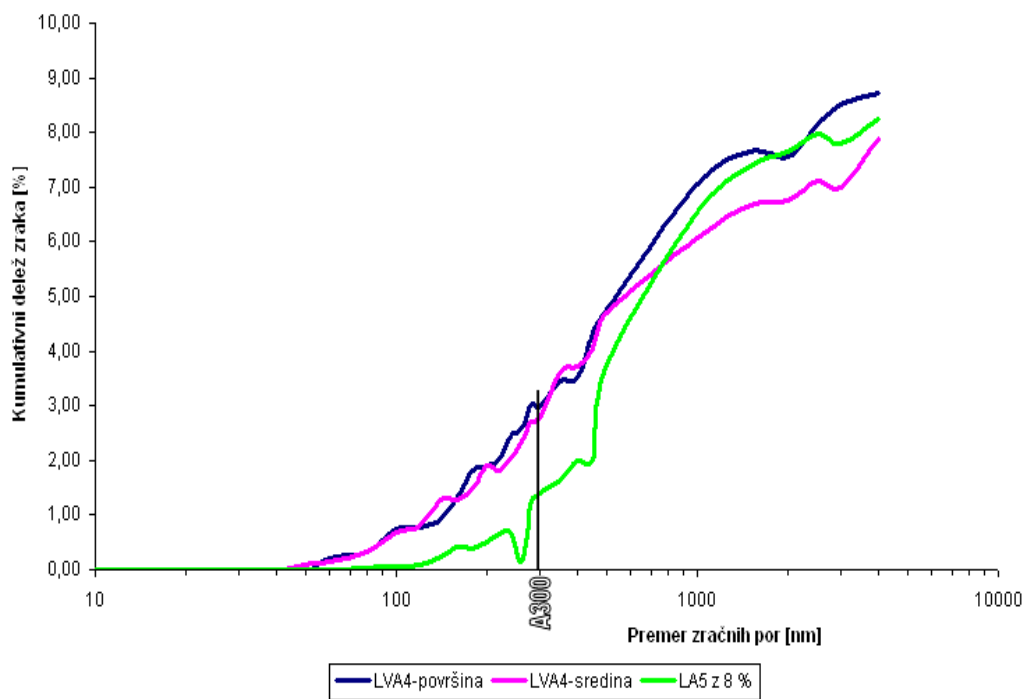
(vzorec odvezamemo iz sredine betonske kocke), relevantne rezultate tudi za oceno OSMO odpornosti, čeprav poteka ta preiskava na površini betonskih kock.

**Preglednica 21:** Primerjava kumulativnih deležev zraka za mešanice LVA4 z 8% vnešenega zraka, na površini in sredini vzorca, z rezultati za mešanico LA5 z 8% vnešenega zraka.

zg. meja razreda	LV4-površina z 8%	LV4-sredina z 8%	LA5 z 8%
$\mu\text{m}$	%	%	%
10	0,00	0,00	0,00
20	-0,01	-0,01	0,00
30	-0,03	-0,05	-0,01
40	-0,01	-0,02	0,00
50	-0,03	0,08	0,00
60	0,21	0,14	-0,01
80	0,32	0,33	0,02
100	0,73	0,68	0,06
120	0,77	0,79	0,08
140	0,93	1,28	0,23
160	1,34	1,27	0,40
180	1,81	1,48	0,40
200	1,91	1,91	0,51
220	2,03	1,81	0,65
240	2,45	2,04	0,68
260	2,60	2,36	0,15
280	3,03	2,72	1,25
300 ( $A_{300}$ )	<b>2,99</b>	<b>2,77</b>	<b>1,41</b>
350	3,44	3,63	1,63
400	3,53	3,71	1,99
450	4,32	4,05	2,01
500	4,77	4,69	3,76
1000	7,06	6,09	6,56
1500	7,65	6,68	7,37
2000	7,55	6,75	7,64
2500	8,12	7,13	7,99
3000	8,50	6,99	7,80
4000	<b>8,72</b>	<b>7,89</b>	<b>8,25</b>

Komentar *Preglednice 21*: Kot vidimo, sta rezultata tako v primeru mikropor kot v primeru celotnega deleža kumulativnega zraka med seboj primerljiva za vibrirani mešanici. To pomeni, da bi mogoče lahko odvzeli vzorce iz površine betonske kocke. Če pa primerjamo delež mikropor za LVA4 z 8% zraka (2,99% in 2,77%) z LA5 z 8% zraka (1,41%) vidimo, da je vrednost  $A_{300}$  v primeru vibriranega betona večja skoraj za 100%.

Graf primerjave porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por za mešanico LVA4 z 8% zraka (vzorci vzeti iz sredine in površine betonske kocke) z mešanico LA5 z 8% zraka



**Slika 8:** Primerjave porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por za mešanice LVA4 z 8% zraka (vzorci vzeti iz sredine in površine betonske kocke) z mešanico LA5 z 8% zraka.

Komentar *Slike 8*: Na grafu je več kot očitno vidna razlika v količini zračnih por do velikosti 0,3 mm ( $A_{300}$ ).

## 9 SKLEPI

Linijska mikroskopska analiza je zelo eleganten in hiter način, da pridemo do ocene zmrzlinke odpornosti betona. To pomeni, da je z ekonomskega ali vsaj časovnega vidika še kako zanimiva. Seveda je vedno in v prvi fazi potrebno oceniti, ali analiza daje primerljive in verodostojne rezultate. Na podlagi opravljenih preiskav lahko ugotovimo, da so priporočene meje, ki jih podajata evropski in ameriški standard, za obravnavane samozgoščevalne mešanice zelo konzervativne. Za faktor  $\bar{L}$ , ki se jemlje kot odločilni faktor oziroma indikator, ali je nek vzorec zmrzlinško odporen ali ne, je po mojih ugotovitvah meja postavljena prenizko, saj noben izmed 30 pregledanih SCC vzorcev ni izpolnil splošno veljavnih zahtev. Edini vzorci, ki so se približali meji so bili vzorci iz vibriranega aeriranega betona, ki pa so dosegli negativen rezultat pri OSMO odpornosti. Se pravi, da je pomembno ali gre za vibriran ali samozgoščevalni beton. Menim, da bi morala biti meja za faktor  $\bar{L}$ , za ti dve vrsti betonov postavljena ločeno.

Glede na rezultate preiskav opravljenih na enakih betonskih mešanicah, ki so vsebovale različne apnenčeve moke, se postavlja vprašanje, kako velik vpliv ima lahko apnenčeva moka na OSMO odpornost betona. Ker sprememba v vrsti moke pri istem deležu vnešenega zraka sistema zračnih por ni bistveno spremenila lahko zaključim, da ima moka lahko direkten vpliv na OSMO odpornost betona. Katere so lastnosti moke, ki OSMO odpornost nadzorujejo? Na to vprašanje težko odgovorim. Lahko bi bila to zrnavostna sestava moke, njena mineraloška sestava, lastnosti površine zrn ali kaj drugega. Kar lahko rečem je, da je vpliv hidrofilnosti oziroma hidrofobnosti moke definitivno prisoten in igra po mojem mnenju veliko vlogo pri obstojnosti betona.

Treba pa je vseeno reči, da je OSMO odpornost metoda na katero se lahko vedno naslonimo, saj se z njo praktično simulirajo dejanske razmere pri zmrzovanja/tajanja v prisotnosti soli na terenu.

## **VIRI**

3D Video-Microscope Solutions.

<http://www.hirox.com> (27.12.2007).

ASTM C 457-98. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete: 13 str.

Bokan, V. 1991. Vpliv nivoja napetosti in kemijskih dodatkov na reologijo betona.

Magistrsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 117 str.

Duh, D., Žarnič, R., Bokan-Bosiljkov, V., 2006. Odpornost površine aeriranih samozgoščevalnih betonov proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli – študija vpliva deleža vnesenega zraka in vrste mineralnega dodatka. Gradb. vestn. 55, 9: 238-244.

Hočvar, A. 2007. Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 75 str.

Kumar Mehta, P., J.M. Monteiro, 2006. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. Berkley University of California, McGraw-Hill: Inc: 659 str.

Mehle, J. 2004. Trajnost betonov z mineralnim dodatkom v obliki apnenčeve moke.

Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 115 str.

Petan, S. 2002. Uporaba kamene moke kot dodatnega praškastega materiala za izdelavo samozgoščevalnih betonov iz drobljenega kamenega agregata. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 109 str.

Pezdirč, B. 2005. Vpliv poroznosti in vrste kamene moke na odpornost površine

samozgoščevalnega betona proti zmrzovanju/tajanju. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 87 str.

RILEM, 2000. Self-Compacting Concrete, Sate-of-the-Art report of Rilem Technical Committee 174-SCC Self Compacting Concrete: 154 str.

SIST EN 197-1:2002. Cement - 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente: 26 str.

SIST EN 480-11:2005. Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso – Preskusne metode – 11.del: Ugotavljanje značilnosti zračnih por v strjenem betonu: 19 str.

St John, D.A., Poole, A.W., Sims, I., 1998. Concrete Petrography: A handbook of investigative techniques, London, Arnold: 474 str.

Trtnik, J. 2004. Uporaba elektrofiltrskega pepela kot mineralnega dodatka vibriranim in samozgoščevalnim betonom. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 65 str.

Zajc, A. 1990. Vpliv kapilarne poroznosti na zmrzlinsko odpornost betonov. Univerza E. Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo VTO Kemija in Kemijska tehnologija: 84 str.

Zukanovič, L. 2000. Zmrzlinška odpornost betona ob prisotnosti različnih vrst soli. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 60 str.

Žarnič, R. 2003. Lastnosti gradiv, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij. Učbeniki za visoke šole, Ljubljana: 349 str.

Žnidaršič, M. 2007. Vpliv konsistence, aeriranja in trajanja mokre nege na odpornost betona z večjim deležem kamene moke proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 92 str.

## PRILOGE

### PRILOGA 1: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico LA6 z 10% vnešenega zraka

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	µm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	0,0000	5,24E-07	0	0
2	15 to 20	0	0,00000	0,0002749	0,00000	-0,8571	4,19E-06	0,000	0,00
3	25 to 30	1	0,00037	0,0004320	0,85712	-2,9148	1,41E-05	-0,004	0,00
4	35 to 40	6	0,00222	0,0005890	3,77190	-2,1835	3,35E-05	-0,007	-0,01
5	45 to 50	12	0,00444	0,0007461	5,95536	-2,2438	6,54E-05	-0,015	-0,03
6	55 to 60	20	0,00741	0,0009032	8,19917	-0,5782	1,13E-04	-0,007	-0,03
7	65 to 80	54	0,01999	0,0022780	8,77736	2,9162	2,68E-04	0,078	0,05
8	85 to 100	46	0,01703	0,0029060	5,86119	0,7272	5,24E-04	0,038	0,08
9	105 to 120	49	0,01814	0,0035340	5,13397	0,5978	9,05E-04	0,054	0,14
10	125 to 140	51	0,01888	0,0041630	4,53615	1,5993	1,44E-03	0,230	0,37
11	145 to 160	38	0,01407	0,0047910	2,93685	0,8186	2,14E-03	0,175	0,54
12	165 to 180	31	0,01148	0,0054190	2,11820	-0,0247	3,05E-03	-0,008	0,54
13	185 to 200	35	0,01296	0,0060476	2,14293	0,3681	4,19E-03	0,154	0,69
14	205 to 220	32	0,01185	0,0066760	1,77483	0,9637	5,58E-03	0,538	1,23
15	225 to 240	16	0,00592	0,0073040	0,81112	-0,4024	7,24E-03	-0,291	0,94
16	245 to 260	26	0,00963	0,0079330	1,21356	0,3485	9,20E-03	0,321	1,26
17	265 to 280	20	0,00741	0,0085610	0,86503	0,0994	1,15E-02	0,114	1,37
18	285 to 300	19	0,00704	0,0091890	0,76561	0,1610	1,41E-02	0,227	1,60
19	305 to 350	42	0,01555	0,0257200	0,60465	0,1925	2,24E-02	0,431	2,03
20	355 to 400	33	0,01222	0,0296500	0,41211	0,0593	3,35E-02	0,199	2,23
21	405 to 450	32	0,01185	0,0335800	0,35285	0,1455	4,77E-02	0,694	2,92
22	455 to 500	21	0,00778	0,0375000	0,20735	0,1547	6,54E-02	1,012	3,93
23	505 to 1000	84	0,03110	0,5910000	0,05263	0,0477	5,24E-01	2,501	6,43
24	1005 to 1500	13	0,00481	0,9837000	0,00489	0,0038	1,77E+00	0,676	7,11
25	1505 to 2000	4	0,00148	1,3760000	0,00108	0,0009	4,19E+00	0,363	7,47
26	2005 to 2500	1	0,00037	1,7690000	0,00021	0,0002	8,18E+00	0,171	7,65
27	2505 to 3000	0	0,00000	2,1620000	0,00000	-0,0001	1,41E+01	-0,190	7,46
28	3005 to 4000	2	0,00074	5,5020000	0,00013	0,0001	3,35E+01	0,451	7,91

OPOMBA: Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.

**PRILOGA 2: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico LA8 z 12% vnešenega zraka**

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanij zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	µm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	0,0000	5,24E-07	0	0
2	15 to 20	0	0,00000	0,0002749	0,00000	-1,7182	4,19E-06	-0,001	0,00
3	25 to 30	2	0,00074	0,0004320	1,71824	10,8841	1,41E-05	-0,015	-0,02
4	35 to 40	20	0,00742	0,0005890	12,60238	-5,8029	3,35E-05	-0,019	-0,04
5	45 to 50	37	0,01373	0,0007461	18,40529	3,6123	6,54E-05	0,024	-0,01
6	55 to 60	36	0,01336	0,0009032	14,79301	4,8547	1,13E-04	0,055	0,04
7	65 to 80	61	0,02264	0,0022780	9,93834	3,0417	2,68E-04	0,082	0,12
8	85 to 100	54	0,02004	0,0029060	6,89662	1,7506	5,24E-04	0,092	0,22
9	105 to 120	49	0,01819	0,0035340	5,14597	0,8667	9,05E-04	0,078	0,29
10	125 to 140	48	0,01781	0,0041630	4,27930	2,1102	1,44E-03	0,304	0,60
11	145 to 160	28	0,01039	0,0047910	2,16905	0,2514	2,14E-03	0,054	0,65
12	165 to 180	28	0,01039	0,0054190	1,91768	0,3834	3,05E-03	0,117	0,77
13	185 to 200	25	0,00928	0,0060476	1,53425	0,2556	4,19E-03	0,107	0,88
14	205 to 220	23	0,00854	0,0066760	1,27864	-0,0933	5,58E-03	-0,052	0,82
15	225 to 240	27	0,01002	0,0073040	1,37196	0,2491	7,24E-03	0,180	1,00
16	245 to 260	24	0,00891	0,0079330	1,12282	-0,0910	9,20E-03	-0,084	0,92
17	265 to 280	28	0,01039	0,0085610	1,21387	0,4061	1,15E-02	0,467	1,39
18	285 to 300	20	0,00742	0,0091890	0,80779	0,0574	1,41E-02	0,081	1,47
19	305 to 350	52	0,01930	0,0257200	0,75036	0,1996	2,24E-02	0,447	1,92
20	355 to 400	44	0,01633	0,0296500	0,55076	0,2302	3,35E-02	0,771	2,69
21	405 to 450	29	0,01076	0,0335800	0,32052	0,1424	4,77E-02	0,679	3,37
22	455 to 500	18	0,00668	0,0375000	0,17815	0,1141	6,54E-02	0,746	4,11
23	505 to 1000	102	0,03786	0,5910000	0,06405	0,0580	5,24E-01	3,040	7,15
24	1005 to 1500	16	0,00594	0,9837000	0,00604	0,0055	1,77E+00	0,973	8,13
25	1505 to 2000	2	0,00074	1,3760000	0,00054	0,0001	4,19E+00	0,050	8,18
26	2005 to 2500	2	0,00074	1,7690000	0,00042	-0,0001	8,18E+00	-0,078	8,10
27	2505 to 3000	3	0,00111	2,1620000	0,00051	0,0004	1,41E+01	0,536	8,63
28	3005 to 4000	2	0,00074	5,5020000	0,00013	0,0001	3,35E+01	0,452	9,09

OPOMBA: Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.



**PRILOGA 3: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico LA10 s 4% vnešenega zraka**

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	µm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	0,0000	5,24E-07	0	0
2	15 to 20	0	0,00000	0,0002749	0,00000	-2,5871	4,19E-06	-0,001	0,00
3	25 to 30	3	0,00112	0,0004320	2,58706	-1,8404	1,41E-05	-0,003	0,00
4	35 to 40	7	0,00261	0,0005890	4,42743	-0,5657	3,35E-05	-0,002	-0,01
5	45 to 50	10	0,00373	0,0007461	4,99312	-0,3689	6,54E-05	-0,002	-0,01
6	55 to 60	13	0,00484	0,0009032	5,36202	0,6195	1,13E-04	0,007	0,00
7	65 to 80	29	0,01080	0,0022780	4,74256	1,1531	2,68E-04	0,031	0,03
8	85 to 100	28	0,01043	0,0029060	3,58948	0,9541	5,24E-04	0,050	0,08
9	105 to 120	25	0,00931	0,0035340	2,63537	0,4877	9,05E-04	0,044	0,12
10	125 to 140	24	0,00894	0,0041630	2,14770	0,8258	1,44E-03	0,119	0,24
11	145 to 160	17	0,00633	0,0047910	1,32188	0,0157	2,14E-03	0,003	0,25
12	165 to 180	19	0,00708	0,0054190	1,30618	0,0126	3,05E-03	0,004	0,25
13	185 to 200	21	0,00782	0,0060476	1,29362	0,5124	4,19E-03	0,215	0,46
14	205 to 220	14	0,00522	0,0066760	0,78123	0,2202	5,58E-03	0,123	0,59
15	225 to 240	11	0,00410	0,0073040	0,56105	-0,1434	7,24E-03	-0,104	0,48
16	245 to 260	15	0,00559	0,0079330	0,70441	0,1387	9,20E-03	0,128	0,61
17	265 to 280	13	0,00484	0,0085610	0,56570	0,1603	1,15E-02	0,184	0,80
18	285 to 300	10	0,00373	0,0091890	0,40542	0,1157	1,41E-02	0,163	<b>0,96</b>
19	305 to 350	20	0,00745	0,0257200	0,28969	0,1263	2,24E-02	0,283	1,24
20	355 to 400	13	0,00484	0,0296500	0,16334	-0,0364	3,35E-02	-0,122	1,12
21	405 to 450	18	0,00671	0,0335800	0,19969	0,1003	4,77E-02	0,479	1,60
22	455 to 500	10	0,00373	0,0375000	0,09934	0,0634	6,54E-02	0,415	2,01
23	505 to 1000	57	0,02123	0,5910000	0,03593	0,0314	5,24E-01	1,645	3,66
24	1005 to 1500	12	0,00447	0,9837000	0,00454	0,0026	1,77E+00	0,469	4,13
25	1505 to 2000	7	0,00261	1,3760000	0,00190	0,0013	4,19E+00	0,529	4,66
26	2005 to 2500	3	0,00112	1,7690000	0,00063	0,0005	8,18E+00	0,376	5,03
27	2505 to 3000	1	0,00037	2,1620000	0,00017	0,0002	1,41E+01	0,243	5,28
28	3005 to 4000	0	0,00000	5,5020000	0,00000	0,0000	3,35E+01	0,000	<b>5,28</b>

OPOMBA: Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.

**PRILOGA 4: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico LA11 s 6% vnešenega zraka**

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	µm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	0,0000	5,24E-07	0	0
2	15 to 20	0	0,00000	0,0002749	0,00000	-2,5841	4,19E-06	-0,001	0,00
3	25 to 30	3	0,00112	0,0004320	2,58408	-6,2606	1,41E-05	-0,009	-0,01
4	35 to 40	14	0,00521	0,0005890	8,84465	0,3661	3,35E-05	0,001	-0,01
5	45 to 50	17	0,00633	0,0007461	8,47851	0,6508	6,54E-05	0,004	0,00
6	55 to 60	19	0,00707	0,0009032	7,82776	-0,0129	1,13E-04	0,000	0,00
7	65 to 80	48	0,01786	0,0022780	7,84071	2,4627	2,68E-04	0,066	0,06
8	85 to 100	42	0,01563	0,0029060	5,37801	3,4827	5,24E-04	0,182	0,24
9	105 to 120	18	0,00670	0,0035340	1,89528	-0,6969	9,05E-04	-0,063	0,18
10	125 to 140	29	0,01079	0,0041630	2,59214	0,2621	1,44E-03	0,038	0,22
11	145 to 160	30	0,01116	0,0047910	2,33004	0,6134	2,14E-03	0,131	0,35
12	165 to 180	25	0,00930	0,0054190	1,71668	0,2400	3,05E-03	0,073	0,42
13	185 to 200	24	0,00893	0,0060476	1,47671	0,0833	4,19E-03	0,035	0,46
14	205 to 220	25	0,00930	0,0066760	1,39345	0,7312	5,58E-03	0,408	0,87
15	225 to 240	13	0,00484	0,0073040	0,66229	-0,0882	7,24E-03	-0,064	0,80
16	245 to 260	16	0,00595	0,0079330	0,75050	0,2289	9,20E-03	0,211	1,01
17	265 to 280	12	0,00447	0,0085610	0,52158	-0,2883	1,15E-02	-0,332	0,68
18	285 to 300	20	0,00744	0,0091890	0,80990	0,2023	1,41E-02	0,285	0,97
19	305 to 350	42	0,01563	0,0257200	0,60764	0,0931	2,24E-02	0,209	1,17
20	355 to 400	41	0,01526	0,0296500	0,51455	0,3151	3,35E-02	1,056	2,23
21	405 to 450	18	0,00670	0,0335800	0,19946	-0,0387	4,77E-02	-0,185	2,05
22	455 to 500	24	0,00893	0,0375000	0,23815	0,1871	6,54E-02	1,224	3,27
23	505 to 1000	81	0,03014	0,5910000	0,05100	0,0446	5,24E-01	2,335	5,61
24	1005 to 1500	17	0,00633	0,9837000	0,00643	0,0048	1,77E+00	0,851	6,46
25	1505 to 2000	6	0,00223	1,3760000	0,00162	0,0016	4,19E+00	0,680	7,14
26	2005 to 2500	0	0,00000	1,7690000	0,00000	-0,0002	8,18E+00	-0,141	7,00
27	2505 to 3000	1	0,00037	2,1620000	0,00017	0,0000	1,41E+01	-0,043	6,95
28	3005 to 4000	3	0,00112	5,5020000	0,00020	0,0002	3,35E+01	0,680	7,63

OPOMBA: Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.

**PRILOGA 5: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico CA4 s 4% vnešenega zraka**

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	µm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	-1,3529	5,24E-07	0,000	0,00
2	15 to 20	1	0,00037	0,0002749	1,35285	-2,9515	4,19E-06	-0,001	0,00
3	25 to 30	5	0,00186	0,0004320	4,30439	-5,1667	1,41E-05	-0,007	-0,01
4	35 to 40	15	0,00558	0,0005890	9,47112	-0,9965	3,35E-05	-0,003	-0,01
5	45 to 50	21	0,00781	0,0007461	10,46761	-0,6498	6,54E-05	-0,004	-0,02
6	55 to 60	27	0,01004	0,0009032	11,11745	4,9137	1,13E-04	0,056	0,04
7	65 to 80	38	0,01413	0,0022780	6,20376	1,7246	2,68E-04	0,046	0,09
8	85 to 100	35	0,01302	0,0029060	4,47917	1,5326	5,24E-04	0,080	0,17
9	105 to 120	28	0,01041	0,0035340	2,94657	0,9812	9,05E-04	0,089	0,25
10	125 to 140	22	0,00818	0,0041630	1,96536	0,6457	1,44E-03	0,093	0,35
11	145 to 160	17	0,00632	0,0047910	1,31962	0,2216	2,14E-03	0,047	0,40
12	165 to 180	16	0,00595	0,0054190	1,09806	0,2371	3,05E-03	0,072	0,47
13	185 to 200	14	0,00521	0,0060476	0,86093	0,1367	4,19E-03	0,057	0,52
14	205 to 220	13	0,00483	0,0066760	0,72419	0,2150	5,58E-03	0,120	0,64
15	225 to 240	10	0,00372	0,0073040	0,50917	0,2748	7,24E-03	0,199	0,84
16	245 to 260	5	0,00186	0,0079330	0,23440	0,1041	9,20E-03	0,096	0,94
17	265 to 280	3	0,00112	0,0085610	0,13032	-0,3149	1,15E-02	-0,362	0,58
18	285 to 300	11	0,00409	0,0091890	0,44519	0,2572	1,41E-02	0,363	0,94
19	305 to 350	13	0,00483	0,0257200	0,18797	-0,0127	2,24E-02	-0,028	0,91
20	355 to 400	16	0,00595	0,0296500	0,20069	0,0567	3,35E-02	0,190	1,10
21	405 to 450	13	0,00483	0,0335800	0,14398	0,0151	4,77E-02	0,072	1,17
22	455 to 500	13	0,00483	0,0375000	0,12893	0,0956	6,54E-02	0,625	1,80
23	505 to 1000	53	0,01971	0,5910000	0,03335	0,0254	5,24E-01	1,332	3,13
24	1005 to 1500	21	0,00781	0,9837000	0,00794	0,0071	1,77E+00	1,262	4,39
25	1505 to 2000	3	0,00112	1,3760000	0,00081	0,0000	4,19E+00	-0,013	4,38
26	2005 to 2500	4	0,00149	1,7690000	0,00084	0,0007	8,18E+00	0,547	4,93
27	2505 to 3000	1	0,00037	2,1620000	0,00017	0,0001	1,41E+01	0,147	5,07
28	3005 to 4000	1	0,00037	5,5020000	0,00007	0,0001	3,35E+01	0,226	5,30

OPOMBA: Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.

**PRILOGA 6: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico EF6 z 0 % vnešenega zraka**

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	µm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	-2,7247	5,24E-07	0,000	0,00
2	15 to 20	2	0,00075	0,0002749	2,72465	-3,3437	4,19E-06	-0,001	0,00
3	25 to 30	7	0,00262	0,0004320	6,06835	-5,3766	1,41E-05	-0,008	-0,01
4	35 to 40	18	0,00674	0,0005890	11,44494	-0,0999	3,35E-05	0,000	-0,01
5	45 to 50	23	0,00861	0,0007461	11,54482	-0,8944	6,54E-05	-0,006	-0,02
6	55 to 60	30	0,01124	0,0009032	12,43923	4,5480	1,13E-04	0,051	0,04
7	65 to 80	48	0,01798	0,0022780	7,89121	2,3497	2,68E-04	0,063	0,10
8	85 to 100	43	0,01610	0,0029060	5,54152	2,0445	5,24E-04	0,107	0,21
9	105 to 120	33	0,01236	0,0035340	3,49706	0,7083	9,05E-04	0,064	0,27
10	125 to 140	31	0,01161	0,0041630	2,78876	0,7564	1,44E-03	0,109	0,38
11	145 to 160	26	0,00974	0,0047910	2,03237	0,6502	2,14E-03	0,139	0,52
12	165 to 180	20	0,00749	0,0054190	1,38219	0,5771	3,05E-03	0,176	0,69
13	185 to 200	13	0,00487	0,0060476	0,80504	0,0758	4,19E-03	0,032	0,73
14	205 to 220	13	0,00487	0,0066760	0,72926	0,0114	5,58E-03	0,006	0,73
15	225 to 240	14	0,00524	0,0073040	0,71783	0,1513	7,24E-03	0,110	0,84
16	245 to 260	12	0,00449	0,0079330	0,56650	0,2603	9,20E-03	0,239	1,08
17	265 to 280	7	0,00262	0,0085610	0,30622	-0,2644	1,15E-02	-0,304	0,78
18	285 to 300	14	0,00524	0,0091890	0,57058	0,1774	1,41E-02	0,250	<b>1,03</b>
19	305 to 350	27	0,01011	0,0257200	0,39314	0,3426	2,24E-02	0,767	1,80
20	355 to 400	4	0,00150	0,0296500	0,05052	-0,1168	3,35E-02	-0,391	1,40
21	405 to 450	15	0,00562	0,0335800	0,16729	0,1074	4,77E-02	0,512	1,92
22	455 to 500	6	0,00225	0,0375000	0,05992	0,0466	6,54E-02	0,305	2,22
23	505 to 1000	21	0,00786	0,5910000	0,01331	0,0095	5,24E-01	0,498	2,72
24	1005 to 1500	10	0,00375	0,9837000	0,00381	0,0019	1,77E+00	0,337	3,06
25	1505 to 2000	7	0,00262	1,3760000	0,00191	0,0011	4,19E+00	0,443	3,50
26	2005 to 2500	4	0,00150	1,7690000	0,00085	0,0007	8,18E+00	0,551	4,05
27	2505 to 3000	1	0,00037	2,1620000	0,00017	0,0001	1,41E+01	0,148	4,20
28	3005 to 4000	1	0,00037	5,5020000	0,00007	0,0001	3,35E+01	0,228	<b>4,43</b>

OPOMBA: Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.

**PRILOGA 7: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico TA2 s 4% vnešenega zraka**

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	µm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	0,0000	5,24E-07	0	0
2	15 to 20	0	0,00000	0,0002749	0,00000	-2,5744	4,19E-06	-0,001	0,00
3	25 to 30	3	0,00111	0,0004320	2,57440	-1,8314	1,41E-05	-0,003	0,00
4	35 to 40	7	0,00259	0,0005890	4,40576	-1,0598	3,35E-05	-0,004	-0,01
5	45 to 50	11	0,00408	0,0007461	5,46555	-0,2807	6,54E-05	-0,002	-0,01
6	55 to 60	14	0,00519	0,0009032	5,74623	1,0269	1,13E-04	0,012	0,00
7	65 to 80	29	0,01075	0,0022780	4,71936	2,2956	2,68E-04	0,062	0,06
8	85 to 100	19	0,00704	0,0029060	2,42380	0,1160	5,24E-04	0,006	0,07
9	105 to 120	22	0,00816	0,0035340	2,30778	1,3282	9,05E-04	0,120	0,19
10	125 to 140	11	0,00408	0,0041630	0,97955	0,2832	1,44E-03	0,041	0,23
11	145 to 160	9	0,00334	0,0047910	0,69639	-0,4666	2,14E-03	-0,100	0,13
12	165 to 180	17	0,00630	0,0054190	1,16297	0,1822	3,05E-03	0,056	0,19
13	185 to 200	16	0,00593	0,0060476	0,98079	-0,0187	4,19E-03	-0,008	0,18
14	205 to 220	18	0,00667	0,0066760	0,99953	0,2890	5,58E-03	0,161	0,34
15	225 to 240	14	0,00519	0,0073040	0,71057	0,2433	7,24E-03	0,176	0,52
16	245 to 260	10	0,00371	0,0079330	0,46731	-0,0956	9,20E-03	-0,088	0,43
17	265 to 280	13	0,00482	0,0085610	0,56293	0,3209	1,15E-02	0,369	0,80
18	285 to 300	6	0,00222	0,0091890	0,24206	-0,0894	1,41E-02	-0,126	<b>0,67</b>
19	305 to 350	23	0,00853	0,0257200	0,33151	0,1815	2,24E-02	0,406	1,08
20	355 to 400	12	0,00445	0,0296500	0,15004	-0,0376	3,35E-02	-0,126	0,95
21	405 to 450	17	0,00630	0,0335800	0,18768	0,0295	4,77E-02	0,141	1,09
22	455 to 500	16	0,00593	0,0375000	0,15817	0,1249	6,54E-02	0,817	1,91
23	505 to 1000	53	0,01965	0,5910000	0,03325	0,0272	5,24E-01	1,426	3,34
24	1005 to 1500	16	0,00593	0,9837000	0,00603	0,0055	1,77E+00	0,972	4,31
25	1505 to 2000	2	0,00074	1,3760000	0,00054	0,0003	4,19E+00	0,138	4,45
26	2005 to 2500	1	0,00037	1,7690000	0,00021	-0,0001	8,18E+00	-0,109	4,34
27	2505 to 3000	2	0,00074	2,1620000	0,00034	0,0002	1,41E+01	0,294	4,63
28	3005 to 4000	2	0,00074	5,5020000	0,00013	0,0001	3,35E+01	0,451	<b>5,08</b>

**OPOMBA:** Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.

**PRILOGA 8: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico LVA4 z 8% (vzorec vzet s površine betonske kocke) vnešenega zraka**

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	μm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	-3,9982	5,24E-07	0,000	0,00
2	15 to 20	3	0,00110	0,0002749	3,99819	-24,8363	4,19E-06	-0,010	-0,01
3	25 to 30	34	0,01246	0,0004320	28,83448	-16,5727	1,41E-05	-0,023	-0,03
4	35 to 40	73	0,02674	0,0005890	45,40717	8,5789	3,35E-05	0,029	-0,01
5	45 to 50	75	0,02748	0,0007461	36,82825	-3,3294	6,54E-05	-0,022	-0,03
6	55 to 60	99	0,03627	0,0009032	40,15764	21,1799	1,13E-04	0,239	0,21
7	65 to 80	118	0,04323	0,0022780	18,97777	4,1012	2,68E-04	0,110	0,32
8	85 to 100	118	0,04323	0,0029060	14,87659	7,8271	5,24E-04	0,410	0,73
9	105 to 120	68	0,02491	0,0035340	7,04952	0,4491	9,05E-04	0,041	0,77
10	125 to 140	75	0,02748	0,0041630	6,60042	1,0946	1,44E-03	0,158	0,93
11	145 to 160	72	0,02638	0,0047910	5,50584	1,9226	2,14E-03	0,411	1,34
12	165 to 180	53	0,01942	0,0054190	3,58322	1,5235	3,05E-03	0,465	1,81
13	185 to 200	34	0,01246	0,0060476	2,05974	0,2488	4,19E-03	0,104	1,91
14	205 to 220	33	0,01209	0,0066760	1,81098	0,2059	5,58E-03	0,115	2,03
15	225 to 240	32	0,01172	0,0073040	1,60511	0,5891	7,24E-03	0,427	2,45
16	245 to 260	22	0,00806	0,0079330	1,01602	0,1601	9,20E-03	0,147	2,60
17	265 to 280	20	0,00733	0,0085610	0,85590	0,3775	1,15E-02	0,434	3,03
18	285 to 300	12	0,00440	0,0091890	0,47844	-0,0344	1,41E-02	-0,048	<b>2,99</b>
19	305 to 350	36	0,01319	0,0257200	0,51280	0,2039	2,24E-02	0,457	3,44
20	355 to 400	25	0,00916	0,0296500	0,30891	0,0252	3,35E-02	0,085	3,53
21	405 to 450	26	0,00953	0,0335800	0,28367	0,1664	4,77E-02	0,794	4,32
22	455 to 500	12	0,00440	0,0375000	0,11724	0,0695	6,54E-02	0,455	4,77
23	505 to 1000	77	0,02821	0,5910000	0,04773	0,0436	5,24E-01	2,287	7,06
24	1005 to 1500	11	0,00403	0,9837000	0,00410	0,0033	1,77E+00	0,584	7,65
25	1505 to 2000	3	0,00110	1,3760000	0,00080	-0,0002	4,19E+00	-0,099	7,55
26	2005 to 2500	5	0,00183	1,7690000	0,00104	0,0007	8,18E+00	0,570	8,12
27	2505 to 3000	2	0,00073	2,1620000	0,00034	0,0003	1,41E+01	0,384	8,50
28	3005 to 4000	1	0,00037	5,5020000	0,00007	0,0001	3,35E+01	0,223	<b>8,72</b>

OPOMBA: Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.

**PRILOGA 9: Porazdelitev zračnih mehurčkov za mešanico LVA4 z 8% (vzorec vzet iz sredine betonske kocke) vnešenega zraka**

Razred (1)	Širina razreda (2)	Zabeleženo število tetiv v razredu (3)	Frekvenca tetive (4)	Delež verjetnih srečanih zračnih por (5)	Skupno verjetno št. zračnih por v mm <sup>3</sup> (6)	Ocenjeno št. zračnih por (7)	Prostornina zračne pore v razredu (8)	Delež zraka (9)	Kumulativni delež zraka (10)
	μm		mm <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>-3</sup>	mm <sup>3</sup>	%	%
1	0 to 10	0	0,00000	0,0001178	0,00000	-2,7001	5,24E-07	0,000	0,00
2	15 to 20	2	0,00074	0,0002749	2,70008	-19,6362	4,19E-06	-0,008	-0,01
3	25 to 30	26	0,00965	0,0004320	22,33631	-27,4413	1,41E-05	-0,039	-0,05
4	35 to 40	79	0,02932	0,0005890	49,77756	6,9993	3,35E-05	0,023	-0,02
5	45 to 50	86	0,03192	0,0007461	42,77827	15,6588	6,54E-05	0,102	0,08
6	55 to 60	66	0,02449	0,0009032	27,11951	5,7773	1,13E-04	0,065	0,14
7	65 to 80	131	0,04862	0,0022780	21,34221	6,9109	2,68E-04	0,185	0,33
8	85 to 100	113	0,04194	0,0029060	14,43127	6,6601	5,24E-04	0,349	0,68
9	105 to 120	74	0,02746	0,0035340	7,77118	1,2633	9,05E-04	0,114	0,79
10	125 to 140	73	0,02709	0,0041630	6,50786	3,4093	1,44E-03	0,491	1,28
11	145 to 160	40	0,01485	0,0047910	3,09853	-0,0518	2,14E-03	-0,011	1,27
12	165 to 180	46	0,01707	0,0054190	3,15036	0,6957	3,05E-03	0,212	1,48
13	185 to 200	40	0,01485	0,0060476	2,45470	1,0093	4,19E-03	0,423	1,91
14	205 to 220	26	0,00965	0,0066760	1,44537	-0,1806	5,58E-03	-0,101	1,81
15	225 to 240	32	0,01188	0,0073040	1,62596	0,3161	7,24E-03	0,229	2,04
16	245 to 260	28	0,01039	0,0079330	1,30991	0,3562	9,20E-03	0,328	2,36
17	265 to 280	22	0,00816	0,0085610	0,95372	0,3075	1,15E-02	0,354	2,72
18	285 to 300	16	0,00594	0,0091890	0,64621	0,0402	1,41E-02	0,057	2,77
19	305 to 350	42	0,01559	0,0257200	0,60604	0,3807	2,24E-02	0,853	3,63
20	355 to 400	18	0,00668	0,0296500	0,22530	0,0264	3,35E-02	0,088	3,71
21	405 to 450	18	0,00668	0,0335800	0,19894	0,0703	4,77E-02	0,335	4,05
22	455 to 500	13	0,00482	0,0375000	0,12866	0,0979	6,54E-02	0,640	4,69
23	505 to 1000	49	0,01819	0,5910000	0,03077	0,0266	5,24E-01	1,395	6,09
24	1005 to 1500	11	0,00408	0,9837000	0,00415	0,0033	1,77E+00	0,591	6,68
25	1505 to 2000	3	0,00111	1,3760000	0,00081	0,0002	4,19E+00	0,075	6,75
26	2005 to 2500	3	0,00111	1,7690000	0,00063	0,0005	8,18E+00	0,374	7,13
27	2505 to 3000	1	0,00037	2,1620000	0,00017	-0,0001	1,41E+01	-0,138	6,99
28	3005 to 4000	4	0,00148	5,5020000	0,00027	0,0003	3,35E+01	0,904	7,89

OPOMBA: Za potrebe izračuna morajo biti izračunane negativne vrednosti obdržane in ne ignorirane.