

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Šircelj, J., 2013. Površinska odpornost betonov na zmrzovanje in tajanje ob prisotnosti talilnih soli. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentorica Prinčič, T.): 56 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Šircelj, J., 2013. Površinska odpornost betonov na zmrzovanje in tajanje ob prisotnosti talilnih soli. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Prinčič, T.): 56 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
gradbeništvo in  
geodezijo



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

PRVOSTOPENJSKI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM \h-k` u@V\  
8k`)"-V@uf\ (tq

Kandidat:

Diplomska naloga št.: 41/OG-MK

Graduation thesis No.: 41/OG-MK

Mentorica:

Predsednik komisije:

. dr. u #

Somentorica:

Ljubljana, 27. 09. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

---

**IZJAVE**

Podpisani Jan Šircelj izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Površinska odpornost betonov na zmrzovanje in tajanje ob prisotnosti talilnih soli«.

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

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

Ljubljana, 18. 9. 2013

Jan Šircelj

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

<b>UDK:</b>	<b>691.322(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Jan Šircelj</b>
<b>Mentorica:</b>	<b>izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Somentorica:</b>	<b>asist. Tina Prinčič, univ. dipl. inž. kem. inž.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Površinska odpornost betonov na zmrzovanje in tajanje ob prisotnosti talilnih soli</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>56 str., 22 pregl., 28 sl., 13 graf., 3 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>aeriran beton, zračne mikropore, mineralni dodatek (elektrofiltrski pepel), solne raztopine, zmrzovanje, tajanje, površinska odpornost, OPZT, luščenje</b>

### **Izvleček**

V diplomski nalogi je obravnavano področje odpornosti betona na zunanje vplive, predvsem na vplive zmrzovanja in tajanja ob prisotnosti talilnih soli. Preiskava se je nanašala na vpliv kloridnih soli na luščenje betona, pri čemer smo v preiskavo poleg etalonskega vzorca, betona s cementom CEM I, vključili tudi beton z mešanim vezivom iz cementa CEM I in elektrofiltrskega pepela. Za določitev odpornosti posamezne betonske mešanice ob uporabi različnih vrst kloridnih soli nam je služila standardna (SIST 1026) preiskava Odpornosti površine betona proti zmrzovanju in tajanju – OPZT. Uporabljenih je bilo več vrst aeriranega betona v kombinaciji z različnimi vrstami talilnih soli v različnih koncentracijah. V okviru naloge smo izvedli tudi nekaj pomožnih preiskav. Začetne preiskave na svežem betonu smo opravili predvsem z namenom zagotavljanja podobnih konsistenc vseh betonov, na koncu pa smo za lažjo interpretacijo dobljenih rezultatov OPZT na strjenih preskušancih opravili še preiskavo globine prodora kloridov ter linijsko mikroskopijo.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 691.322(043.2)  
**Author:** Jan Šircelj  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.  
**Cosupervisor:** Assist. Tina Prinčič, B.Sc.  
**Title:** Scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals  
**Document type:** Graduation Thesis – Higher professional studies  
**Scope and tools:** 56 p., 22 tab., 28 fig., 13 graph., 3 en.  
**Keywords:** aerated concrete, air micro pores, mineral additive (fly ash), saline solutions, freezing, thawing, surface resistance, salt scaling resistance, scaling

**Abstract**

This graduation thesis covers the area of concrete resistance to external influences, especially the effects of freezing and thawing in presence of deicing salts (resistance to salt frost scaling). We investigated the effect of chloride salts on scaling of concrete. In addition to etalon sample of concrete with cement CEM I, we also included mineral additive fly ash as a replacement of part of the cement in concrete. To determine the resistance of each concrete mixture to salt frost scaling by using different types of chloride salts we implemented standard test method according to the SIST 1026 standard. We investigated resistance of different types of aerated concrete in combination with various types of deicing salts in different concentrations. In the context of this thesis we also performed some additional tests. Initial tests on fresh concretes were carried out primarily to ensure approximately the same consistency of all concrete mixtures tested. On the hardened concrete we finally performed an investigation of penetration depth of chlorides and carried out linear microscopy for easier interpretation of the results obtained.

## ZAHVALA

Iskrena zahvala somentorici asist. Tini Prinčič za vso pomoč, vodenje ter spodbudo pri ustvarjanju te diplomske naloge, tako pri eksperimentalnem delu naloge kot tudi pri samem pisanju. Iskrena zahvala za strokovno pomoč in zaupanje gre tudi mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov.

Prav tako gredo zahvale asist. Petri Štukovnik, ki mi je kljub svojemu zapolnjenemu urniku uspela nameniti prepotrebne minute svojega časa in s svojimi nasveti prispevala k izvedbi te diplomske naloge. Hvala tudi g. Franciju Čeponu ter kolegoma Vitu Gromesu in Alenu Lešniku, ki so nam z veseljem priskočili na pomoč predvsem pri eksperimentalni izvedbi diplomske naloge.

Nenazadnje gredo zahvale tudi vsej laboratorijski ekipi bivšega Primorja, d. d., iz Ajdovščine, ki nam je s svojimi izkušnjami in znanjem pomagala predvsem pri začetni fazi eksperimentalnega dela projekta.

**KAZALO VSEBINE**

Izjave	II
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic – documentalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 BETON, ODPOREN PROTI ZMRZOVANJU IN TAJANJU</b>	<b>3</b>
2.1 Zračne mikropore v betonu	3
<b>3 TALILNE SOLI</b>	<b>5</b>
<b>4 LASTNE PREISKAVE</b>	<b>7</b>
4.1 Uporabljeni materiali	8
4.1.1 Agregat	8
4.1.2 Cement	9
4.1.3 Kemijski dodatki	10
4.1.4 Mineralni dodatek – elektrofiltrski pepel	10
4.1.5 Voda	11
4.2 Projektiranje betonskih mešanic	12
4.2.1 Zahteve po SIST 1026:2008	12
4.2.2 Recepture betonskih mešanic	12
4.3 Lastnosti ter preskusi na svežem betonu	15
4.3.1 Določanje prostorninske mase svežega betona	15
4.3.2 Preskušanje konsistence sveže betonske mešanice z metodo poseda	17
4.3.3 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu	20
4.4 Vgradnja ter nega betona	22
4.5 Tlačna trdnost in odpornost proti prodoru vode za strjen beton	24
4.5.1 Tlačna trdnost betona	24
4.5.2 Odpornost betona proti prodoru vode	28
<b>5 PREISKAVA ODPORNOSTI POVRŠINE BETONA NA ZMRZOVANJE IN TAJANJE</b>	<b>29</b>



5.1	O preiskavi OPZT	29
5.2	Priprava betonskih preskušancev na preiskavo OPZT	30
5.3	Izvedba preiskave OPZT	33
5.4	Rezultati preiskave OPZT	35
5.4.1	Rezultati po 25 ciklih	36
5.4.2	Rezultati po 50 ciklih	41
5.4.3	Grafični prikazi rezultatov	45
<b>6</b>	<b>POMOŽNE PREISKAVE</b>	<b>49</b>
6.1	Prodor kloridov	49
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>54</b>
	<b>VIRI</b>	<b>55</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Najpogosteje uporabljene talilne soli ter TOU	5
Preglednica 2: Raztopine uporabljene pri preskusu OPZT	6
Preglednica 3: Zrnavostna sestava uporabljenega agregata	8
Preglednica 4: Vodovpojnost uporabljenega agregata	9
Preglednica 5: Kemijske lastnosti uporabljenega cementa	9
Preglednica 6: Kemijska sestava uporabljenih EFP v primerjavi z uporabljenim cementom (Prinčič, 2011)	10
Preglednica 7: Sestava betonskih mešanic	13
Preglednica 8: Sestava uporabljenega agregata po frakcijah	14
Preglednica 9: Dejanske zamesne količine materialov	14
Preglednica 10: Povprečna gostota svežega betona	16
Preglednica 11: Razredi poseda	18
Preglednica 12: Rezultati preskusa s posedom	19
Preglednica 13: Vsebnost zraka v svežih betonskih mešanicah	21
Preglednica 14: Dejanska povprečna izmerjena tlačna trdnost preskušancev	26
Preglednica 15: Merila za ocenjevanje OPZT: količina odlučenega materiala [ $\text{mg}/\text{mm}^2$ ]	33
Preglednica 16: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M1 po 25 ciklih	36
Preglednica 17: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M2 po 25 ciklih	38
Preglednica 18: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M3 po 25 ciklih	39
Preglednica 19: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M5 po 25 ciklih	40
Preglednica 20: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M1 po 50 ciklih	41
Preglednica 21: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M2 po 50 ciklih	43
Preglednica 22: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M5 po 50 ciklih	44

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Zrnavostna krivulja agregata po dani recepturi	8
Grafikon 2: Porazdelitev velikosti delcev EFP in cementa	11
Grafikon 3: Povprečna gostota svežega betona	17
Grafikon 4: Grafični prikaz rezultatov preskusa s posedom	19
Grafikon 5: Naraščanje tlačne trdnosti preskušancev	27
Grafikon 6: Odlušček mešanice M1 pod vplivom različnih talilnih soli	45
Grafikon 7: Odlušček mešanice M2 pod vplivom različnih talilnih soli	46
Grafikon 8: Odlušček vseh različnih mešanic pod vplivom raztopine A	47
Grafikon 9: Primerjava dveh različnih EFP	48
Grafikon 10: Globina prodora kloridov za mešanico M1 po 50 ciklih	51
Grafikon 11: Globina prodora kloridov za mešanico M2 po 50 ciklih	51
Grafikon 12: Globina prodora kloridov za mešanico M3 po 25 ciklih	52
Grafikon 13: Globina prodora kloridov za mešanico M5 po 50 ciklih	52

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Primer poškodovanega armiranobetonskega stebra zaradi zunanjih vplivov	2
Slika 2: Shematičen prikaz zračnih mikropor ujetih med zrnja cementa (Valenza II in Scherer, 2007)	3
Slika 3	5
Slika 4: Priprava betonske mešanice v laboratorijskem mešalcu	14
Slika 5: Tehtanje vzorcev v kalupu v laboratoriju	16
Slika 6: Metoda s posedom (Žarnić et al., 2009)	18
Slika 7: Merjenje konsistenc z metodo poseda	20
Slika 8: Porozimeter (Žarnić et al., 2009)	20
Slika 9: Slika mešalca, vibracijske igle ter zajemalke za beton po končani vgradnji v kalupe	22
Slika 10: Odvisnost trdnosti betona od vodocementnega količnika (Žarnić, 2003)	25
Slika 11: Merodajne dimenzije tlačnih preskušancev in kontrola pravokotnih ploskev (Žarnić et al., 2009)	25
Slika 12: Primer porušitve pri preskusu tlačne trdnosti (Lešnik, 2012)	26
Slika 13: Primer naprave za preverjanje vodotesnosti betonskih preskušancev	28
Slika 14: Robni venec ceste, izpostavljen stopnji vplivov okolja XF4 (Prinčič et al., 2012)	29
Slika 15: Razrezani betonski preskušanci	30
Slika 16: Razrez preskušancev	30
Slika 17: Okvirjanje preskušancev	30
Slika 18: Slika preskušanca pred začetkom ciklanja	31
Slika 19: Preskušanci med 7-dnevnim mirovanjem pred ciklanjem	31
Slika 20: Shematski model preskušanca	32
Slika 21: Ciklus zmrzovanja/tajanja pri laboratorijskem preskušanju (Žnidaršič, 2007)	34
Slika 22: Najbolj poškodovani preskušanec v okviru preiskav	37
Slika 23: Močno poškodovana površina betona mešanice M3	39
Slika 24: Skoraj nedotaknjena površina preskušanca M1 po 50 ciklih (A)	42
Slika 25: Močno poškodovana površina preskušanca M1 po 50 ciklih (D)	42
Slika 26: Primerjava poškodb površine mešanic M2 ter M5	44
Slika 27: Prelomljeni preskušanci	49
Slika 28: Preskušani prerez z belo oborino AgCl	50

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

$A_c$	Površina vodoravnega prereza preskušanca
AER	Kemijski dodatek aerant
AgCl	Srebrov klorid
AgNO <sub>3</sub>	Srebrov nitrat
CaCl <sub>2</sub>	Kalcijev klorid
Ca(ClO) <sub>2</sub>	Kalcijev oxy-klorid
$D_{max}$	Maksimalen premer agregata
E	Modul elastičnosti betona
EFP	Elektrofiltrski pepel
F	Tlačna sila
$f_c$	Tlačna trdnost betona
$f_{cf}$	Upogibna natezna trdnost
$f_{ck, cyl}/f_{ck, cube}$	Razred tlačne trdnosti
$f_{ct}$	Cepilna natezna trdnost
KD	Kemijski dodatki
MgCl <sub>2</sub>	Magnezijev klorid
NaCl	Kalcijev klorid
OPZT	Preskus odpornosti površine betona na zmrzovanje in tajanje
PV	Prodor vode
SP	Kemijski dodatek superplastifikator
TOU	Temperaturno območje uporabnosti
v/c	Vodocementno razmerje
v/v	Vodovezivno razmerje

»Ta stran je namenoma prazna.«

## 1 UVOD

Živimo v podnebjju s štirimi letnimi časi, od katerih nam vsaj eno obdobje, tj. zimsko obdobje, postreže z ekstremnimi temperaturnimi ter ostalimi neugodnimi zimskimi razmerami. Pred temi agresivnimi razmerami se je potrebno dobro zaščititi, obuti in obleči, da ne načnejo našega zdravja, prav tako pa je potrebno pred ekstremnimi vremenskimi vplivi zaščititi naše stavbe ter inženirske objekte. Čeprav so nam lahko raznolikost letnih časov in razne zimske radosti v veliko veselje, pa za naše zgradbe to ne velja v enaki meri, saj je čez zimo naše okolje podvrženo ekstremno nizkim temperaturam z zmrzaljo, obenem pa tudi kemijsko agresivnim snovem, ki jih morajo vsi uporabljeni gradbeni materiali tudi vzdržati.

Materiali, ki so pri nas v večini uporabljeni za gradnjo, so predvsem beton, jeklo in les. Prav jeklo in beton sta v kombinaciji uporabljena kar v največji meri pri gradnji na naših tleh, saj zaradi različnih si lastnosti, kot npr. sposobnost prenašanja sil v nategu in tlaku, zelo dobro dopolnjujeta drug drugega. Predvsem v cestogradnji je v navadi, da je zadnji oz. krovni material različnih konstrukcij kar »surov beton«. S posebnimi ukrepi, kot so aeriranje, vodoneprepustnost, razni premazi in podobno, lahko beton zelo dobro vzdrži vse mogoče zunanje vplive brez pretirano visokih podražitev končnega produkta ter zagotavlja varno uporabo skozi celotno življenjsko dobo konstrukcije. Z napredkom kemijske tehnologije lahko že s preprostimi ukrepi, kot je npr. dodajanje aeranta v betonsko mešanico, odpornost ter obstojnost betona kot gradbenega materiala močno izboljšamo ter s tem podaljšamo življenjsko dobo naših zgradb, brez vidnih posledic delovanja agresivnega okolja.

Problematika, katere se je ta diplomska naloga dotaknila, je obsegala obširno tematiko površinske odpornosti vgrajenega betona na agresivne vplive zimskega okolja. Osredotočili smo se predvsem na preiskavo OPZT – Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju po standardu SIST 1026:2008 (sl). Preiskava je obsegala izdelavo betonskih preskušancev različnih sestav, preskušanje projektiranega betona v svežem stanju, nego betonskih preskušancev, preiskave na strjenem betonu, med njimi tudi preiskavo OPZT z različnimi vrstami in koncentracijami talilnih soli, ter na koncu še nekaj pomožnih preiskav, s katerimi smo lažje interpretirali rezultate preiskave OPZT.

Za zimsko okolje pri nas je značilno predvsem ciklično izmenjevanje zmrzovanja in tajanja, ki po navadi sledi dnevni ciklu noči ter svetlega dela dneva. Zaradi zagotavljanja varnosti vožnje po cestišču v zimskih razmerah moramo na večjem delu našega ozemlja cesto soliti, da ne pride do poledice, kar pa pomeni, da bo na vgrajeni beton v voziščni konstrukciji ali v njeni bližini delovalo eno najagresivnejših okolij, s katerimi se naše konstrukcije v splošnem lahko srečujejo, in sicer ciklično zmrzovanje in tajanje ob prisotnosti talilnih soli. Rezultat vpliva tega agresivnega okolja se na betonu vidi kot luščenje zgornjih plasti betona, ki so v neposrednem stiku z okoljem.

Kot vestni inženirji moramo vedno stremeti tudi k izdelavi čim bolj ekonomično sprejemljivega betona, torej smo razpeti med dve izključujoči si zahtevi – potrebujemo čim bolj cenovno sprejemljiv ter obenem čim bolj odporen in obstojen beton za širšo uporabo v gradnji. Predvsem v zadnjem času se morajo inženirji vedno bolj ukvarjati z ekonomično izgradnjo ob vedno višjih standardih, tako okoljevarstvenih kot tudi standardih za varno uporabo konstrukcij. Za doseganje bolj ekonomične izdelave betona je eden od ukrepov lahko tudi dodajanje različnih nadomestnih cementnih materialov v beton. Taki materiali so tudi pucolanski dodatki, s katerimi sicer lahko nekoliko znižamo samo kvaliteto betona, vendar z njihovo uporabo v betonski recepturi pridobimo tako na cenejši izdelavi betona kot tudi na razbremenitvi okolja, saj so tovrstni pucolanski materiali pogosto stranski oz. odpadni produkt v različnih industrijskih obratih. Kot rečeno, lahko z uporabo oz. zamenjavo dela cementa s pucolanskim dodatkom tudi negativno vplivamo na končne lastnosti betona, zato moramo biti pri projektiranju betona s takimi dodatki skrajno previdni ter se moramo o končnih vplivih že prej dobro informirati. Prav zato smo v tej preiskavi poleg različnih vrst ter koncentracij talilnih soli uporabili tudi različne vrste oz. kvalitete betonskih preskušancev, saj smo želeli ugotoviti, kako agresivno okolje vpliva na površinsko odpornost betonov, kjer je določen in nam znan delež cementa zamenjan s pucolanskim dodatkom, v našem primeru z elektrofiltrskim pepelom - EFP.



Slika 1: Primer poškodovanega armiranobetonskega stebra zaradi zunanjih vplivov



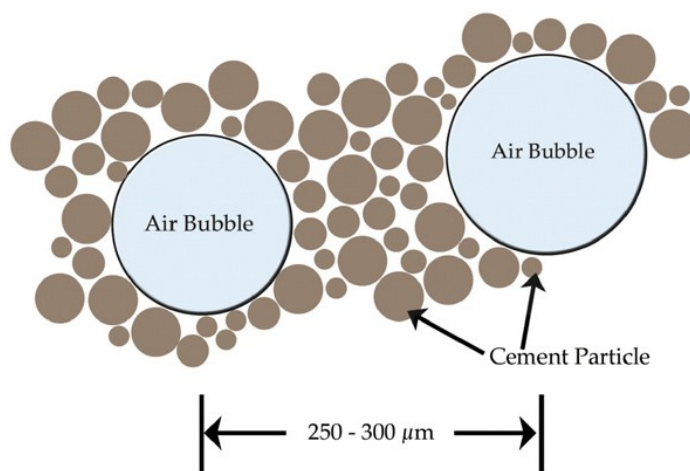
## 2 BETON, ODPOREN PROTI ZMRZOVANJU IN TAJANJU

Beton, odporen proti zmrzovanju in tajanju, se mora uporabiti povsod tam, kjer je betonska površina izpostavljena naravnim vremenskim vplivom in kjer obenem temperatura lahko pade pod ledišče (masivni mostovi, viadukti, fasadne konstrukcije, strehe, tunelski portali, najrazličnejša prometna infrastruktura, ...). Rezultati te diplomske naloge so predvsem uporabni za cestogradbene namene.

Med lažjimi ukrepi za povečanje odpornosti betona proti zmrzovanju ter tajanju je dodajanje kemijskega dodatka aeranta v betonsko mešanico, s čimer v samo svežo betonsko mešanico uvajamo okrogle mikropore, ki nam kasneje pri strjenem betonu zagotavljajo kvaliteten, zmrzlinsko obstojen beton.

### 2.1 ZRAČNE MIKROPORE V BETONU

Zračne mikropore, ki povečajo odpornosti betona proti zmrzovanju, dobimo v betonski mešanici z dodajanjem aeranta, ki ga med mešanjem počasi ulivamo v mešalec kot vodno disperzijo. Zračne pore v normalnem neaeriranem betonu so običajno večje od 0,3 mm, kar je preveč, da bi zagotovile zmrzlinško odpornost betona. Za doseganje ustrezne zmrzlinške obstojnosti učinkovite zračne pore ne smejo biti preveč oddaljene, njihovo oddaljenost pa ocenimo s faktorjem oddaljenosti  $L$ , ki ga določimo v skladu s standardom SIST EN 480-11:2005. Obstaja kritična meja oddaljenosti mikropor med seboj, in sicer velja, da oddaljenost mikropor pod 300  $\mu\text{m}$  praviloma zagotavlja odpornost betona na luščenje, ne glede na vrsto betona. Poleg tega je dokazano, da se luščenje betona med zmrzovanjem in tajanjem proporcionalno večja z večanjem medsebojne oddaljenosti zračnih mikropor v betonu, ko te presežejo kritično mejo 300  $\mu\text{m}$  (Valenza II in Scherer, 2007).



Slika 2: Shematičen prikaz zračnih mikropor ujetih med zrnji cementa (Valenza II in Scherer, 2007)

Čas mešanja betona mora biti za doseganje visoko zmrzljivo odpornega betona med pripravo večji kot običajno. Po dodatku aeranta se mešanje še nadaljuje, saj se s povečanjem časa mešanja s 60 na 90 sekund količina por poveča tudi do 100 %.

Za doseganje visoko zmrzljivo odpornega betona mora cementna matrica vsebovati okrog 15 % zračnih por. Standard SIST 1026:2008 priporoča mejno vrednost vsebnosti zraka v svežem betonu med 5 in 7 % za betonsko mešanico z maksimalnim zrnom  $D_{\max} = 16$  mm.

Ostali parametri, ki prav tako vplivajo na uvajanje zračnih mikropor v betonsko mešanico, so še zrnovostna sestava agregata, konsistenca betona ter temperatura. Zračne pore se namreč večinoma oblikujejo okrog zrn peska s premerom 0,25–0,5 mm. Večje frakcije nimajo vpliva na uvajanje zračnih por, zelo fine frakcije peska ali cementa pa lahko ovirajo uvajanje zračnih por. Optimalno uvajanje zračnih por dosežemo v plastični ali mehko plastični konsistenci. Sposobnost zadrževanja zračnih por v betonski masi je praviloma slabša, če ustrezno plastičnost betona dosežemo z dodajanjem vode, in boljša, če jo dosežemo na drug način, na primer z dodatkom superplastifikatorja. Zmožnost uvajanja zračnih por se z višanjem temperature veča in obratno (Žnidaršič, 2007).

### 3 TALILNE SOLI

Talilne soli se pri nas uporabljajo v zimskem času na vseh voznih ter pohodnih površinah, kjer lahko pride do zmrzovanja in posledično do poledice. Posledice poledenelega vozišča ali hodnikov so nam vsem dobro znane. Nesreče in nezgode v prometu ter materialne in fizične poškodbe ljudi v zimskem času so med najbolj znanimi posledicami slabo vzdrževanih cestnih teles. V izogib neprijetnostim smo razvili različne ukrepe preprečevanja poledice (pokrivanje površin z nadstreški ter strehami, soljenje cest, ogrevanje voznih ter pohodnih površin, ...), vendar je zdaleč najpreprosteje ter najbolj ekonomično ceste, pločnike ter ostale površine, namenjene uporabi, pozimi soliti ter s tem preprečiti kopičenje snega ter nastajanje ledu.



Slika 3

V praksi poznamo več različnih vrst soli ter njenih mešanic, ki se uporabljajo za soljenje poledenelih cest v različnih razmerjih. Izbira talilne soli je najpogosteje posledica njene učinkovitosti pri taljenju ledu ter temperaturnega območja uporabnosti - TOU (Preglednica 1).

Preglednica 1: Najpogosteje uporabljene talilne soli ter TOU

IME SPOJINE	FORMULA	TOU [°C]
Natrijev klorid	NaCl	-11
Magnezijev klorid	MgCl <sub>2</sub>	-24
Kalcijev klorid	CaCl <sub>2</sub>	-25

Kot omenjeno, so najpogosteje uporabljene soli natrijev klorid – NaCl, magnezijev klorid –  $MgCl_2$  ter kalcijev klorid –  $CaCl_2$ . Poznamo tudi druge, a jih za potrebe te naloge nismo uporabljali ter omenjali. Različne vrste in koncentracije kloridnih soli imajo različen kemijski vpliv na beton, ki pa se večinoma izraža kot luščenje le-tega. Kloridne soli so visoko korozivne za železo, tako za armaturno jeklo kot sestavne dele motornih vozil.

Natrijev klorid je najpogosteje uporabljena talilna sol in se lahko uporablja v trdnem stanju ali kot raztopina z vodo. Na beton nima močnejšega kemijskega učinka, ima pa vpliv na floro in favno ob cestišču. Lahko tudi bistveno prispeva k razpadu slabega, neaeriranega betona.

Magnezijev klorid se večinoma uporablja kot vodna raztopina – slanica. Praktično temperaturno območje je nekje do  $-15^{\circ}C$ . V okolje izpušča približno 40 % manj kloridov kot ostale vrste omenjenih soli in je prav tako korozivna za železo. Študije, ki so preiskovale uporabo te soli, so bile mnogokrat kontradiktorne. V praksi ima najvišje temperaturno območje uporabnosti kalcijev klorid, ki se prav tako kot magnezijeva sol uporablja kot slanica. Pri nižjih koncentracijah nima občutnega kemijskega vpliva na beton ali obcestno floro, škoduje lahko le betonom slabe kvalitete. Pri večjih koncentracijah lahko močno poškoduje beton zaradi tvorjenja kalcijevega oxy-klorida –  $Ca(ClO)_2$  (NCHRP Report 577, 2007).

Slovenski standard SIST 1026:2008 za preskus določanja odpornosti površine betona na zmrzovanje in tajanje predpisuje 3% raztopino NaCl. Preskus smo primerno razširili še na ostali dve soli, saj smo želeli preveriti tudi delovanje drugih soli na beton v primerjavi z NaCl. Določanje koncentracij uporabljenih solnih raztopin smo izračunali glede na molsko maso kloridnega iona, tako da so vse raztopine vsebovale natanko 0,0517 mol  $Cl^-$ , tako kot 3% raztopina NaCl. Te raztopine so nam služile kot paralelni vzorci 3% raztopini NaCl, kot je zahteva v standardu. Nadalje smo za primerjavo z raztopinami nizke koncentracije uporabili tudi raztopine z višjo koncentracijo kloridnih soli (Preglednica 2).

Preglednica 2: Raztopine uporabljene pri preskusu OPZT

OZNAKA RAZTOPINE	VRSTA RAZTOPINE
Raztopina A	<b>NaCl</b> – nizka koncentracija
Raztopina B	<b>CaCl<sub>2</sub></b> – nizka koncentracija
Raztopina C	<b>MgCl<sub>2</sub></b> – nizka koncentracija
Raztopina D	<b>CaCl<sub>2</sub></b> – visoka koncentracija
Raztopina E	<b>MgCl<sub>2</sub></b> – visoka koncentracija

Raztopine v nadaljevanju omenjamo z uporabljenimi oznakami s črkami od A do E.

#### 4 LASTNE PREISKAVE

Preiskave so potekale v laboratoriju podjetja Primorje, d. d., v Ajdovščini ter v laboratoriju Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, od februarja do junija 2012. V laboratoriju podjetja Primorje, d. d., smo pripravili betonske mešanice, vzorce negovali ter opravili preskuse na svežem in strjenem betonu. Recepture za mešanice so bile vnaprej pripravljene z določenimi masnimi deleži sestavin, ki smo jih nato med samim pripravljanjem betonskih mešanic le malenkostno korigirali, zato da smo dobili mešanice v okviru zahtevanih lastnosti. Skladno s standardom SIST 1026:2008 (sl) smo zamešali štiri različne mešanice. Vzorce smo transportirali v Ljubljano, v laboratorij Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij, kjer je bila opravljena preiskava OPZT, preiskava prodora kloridov ter merjenje dejanske poroznosti vzorcev z mikroskopijo.

S preskusom OPZT smo želeli odgovoriti na vrsto različnih vprašanj. Ali mineralni dodatek, tj. elektrofiltrski pepel, sploh vpliva na preiskavo OPZT, in če, kolikšen je delež zamenjave cementa z EFP, da bo preiskava še pozitivna? Prav tako nas je zanimalo, kolikšno je luščenje po 25 ciklih zmrzovanja in tajanja pri različnih zamrzovalnih medijih? Po opravljeni preiskavi OPZT smo izvedli tudi preiskavo globine prodora kloridov, da bi ugotovili razlike pri prodoru različnih kloridov v beton z in brez vsebnosti EFP.

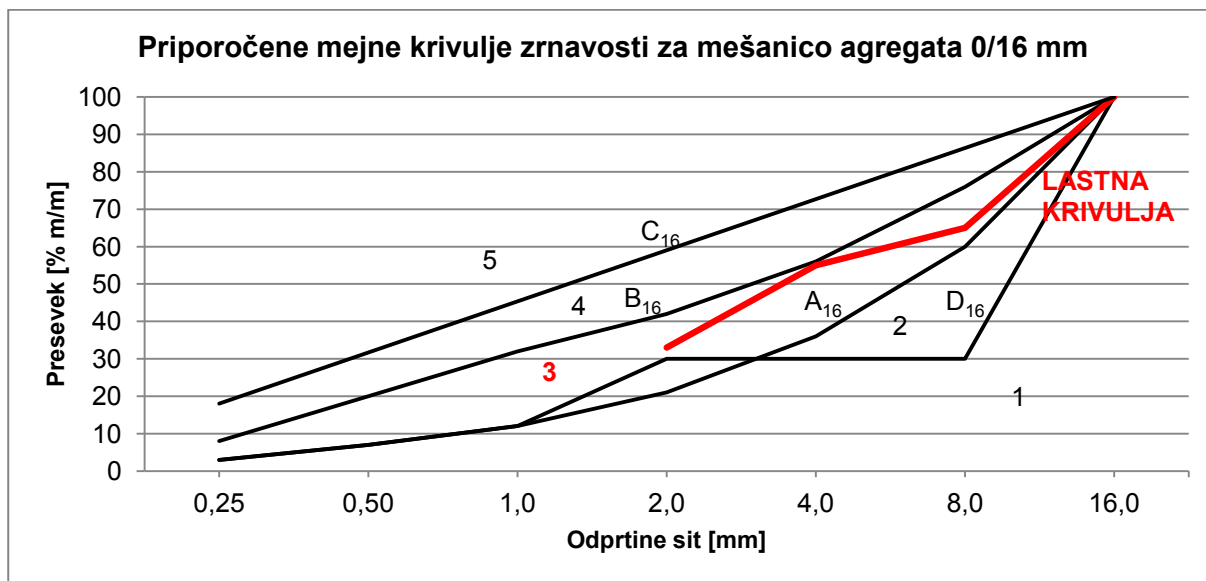
## 4.1 UPORABLJENI MATERIALI

### 4.1.1 AGREGAT

Za vse mešanice smo uporabili enak drobljen apnenčev agregat slovenskega porekla. Agregat je homogen apnenec, ki vsebuje 98 ut. % kalcita ter 2 ut. % dolomita. Izbrana zrnastostna sestava je podana v Preglednici 3, zrnastostna krivulja pa na Grafikonu 1. Zrnastostna krivulja je ustrezna in se nahaja v 3. območju po standardu SIST 1026:2008. Agregat je bil zelo suh, saj je k intenzivnemu izsuševanju pripomogla tudi nizka relativna vlaga prostora, kjer je bil agregat shranjen (v suhem prostoru), zato smo pri oceni dodatne potrebne količine vode upoštevali, da je agregat popolnoma suh in tako na podlagi podatkov o vodovpojnosti agregata (Preglednica 4) računsko ocenili količino potrebne dodatne vode. Maksimalno zrno v uporabljenem agregatu meri 16 mm.

Preglednica 3: Zrnastostna sestava uporabljenega agregata

FRAKCIJA	DELEŽ [%]
0/2	33
0/4	22
4/8	10
8/16	35
0/16	100



Grafikon 1: Zrnastostna krivulja agregata po dani recepturi

Preglednica 4: Vodovpojnost uporabljenega agregata

FRAKCIJA	VODOVPOJNOST [%]
0/2	0,9
0/4	0,8
4/8	0,6
8/16	0,4

#### 4.1.2 CEMENT

Za vse mešanice smo uporabili cement CEM I 42,5R. Gre za vrsto sivega Portland cementa, ki je v skladu z evropskimi standardi EN 197-1. Spada pod silikatne cemente in vsebuje večje količine minerala  $C_3S$ , zato je tudi njegova končna trdnost lahko zelo visoka. Je najbolj razširjen tip cementa pri izdelavi visoko odpornih betonov in za izgradnjo večnadstropnih stavb. Še posebej se uporablja pri izdelavi prednapetih prefabriciranih elementov, uporabljen pa je tudi v tunelogradnji ter pri izgradnji masivnih betonskih konstrukcij.

Vsebuje vsaj 95 % cementnega klinkerja, ki se mu med mletjem dodaja zgolj manjšo količino sadre (0–5 %), ki služi kot regulator vezanja cementa. Trdnostni razred uporabljenega cementa je 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo, ki jo označuje črka R (ang. "Rapid") (Pajk, 2009). Uporabljeni cement ima prostorninsko maso zrn  $3,09 \text{ g/cm}^3$  in specifično površino  $3760 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Njegova kemijska sestava je predstavljena v Preglednici 5.

Preglednica 5: Kemijske lastnosti uporabljenega cementa

LASTNOST	VSEBNOST [%]
$\text{SiO}_2$ čisti	19,33
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,62
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,70
CaO	62,06
$\text{SO}_3$	3,23
MgO	2,07
$\text{Na}_2\text{O}$	0,35
$\text{K}_2\text{O}$	0,75
Cl <sup>-</sup>	0,009
Netopni ostanek [%]	0,75

#### 4.1.3 KEMIJSKI DODATKI

Vsem mešanicom sta bila dodana tudi superplastifikator ter aerant. Uporabljeni superplastifikator je površinsko aktivni dodatek betonu na osnovi polikarboksilatov, primeren za proizvodnjo betona s podaljšanim časom vgradljivosti in obdelovalnosti. Dodajamo ga med mešanjem betona v količini od 0,2 do 1,2 % mase cementa zavoljo doseganja ustrezne konsistence betona.

Aerant, ki nam je služil kot ustrezni ukrep za doseganje zahtev po odpornosti betona, izpostavljenega zunanjim in kemijskim vplivom z oznako XF4, je namenjen za uvajanje zračnih mikro mehurčkov v svež beton, s čimer dosežemo visoko odpornost strjenega betona proti zmrzali in odjugi ter proti delovanju atmosferilij in korozivnih raztopin, zlasti solem, ki jih uporabljajo za posipavanje cest pozimi. Doziramo ga na maso cementa med 0,02 in 0,3 %, vedno razredčenega v zamesni vodi.

#### 4.1.4 MINERALNI DODATEK – ELEKTROFILTRSKI PEPEL

Za študijo vpliva mineralnega dodatka na zmrzlinško odpornost betona smo uporabili dve različni vrsti elektrofiltrskega pepela – EFP slovenskega porekla, ki sta služili kot mineralni dodatek oziroma nadomestek za določen delež cementa. V diplomskem delu jih označujemo kot EFP 1 ter EFP 2. Sestava obeh EFP je razvidna v Preglednici 6, kjer je za primerjavo dodana tudi sestava uporabljenega cementa.

Preglednica 6: Kemijska sestava uporabljenih EFP v primerjavi z uporabljenim cementom (Prinčič, 2011)

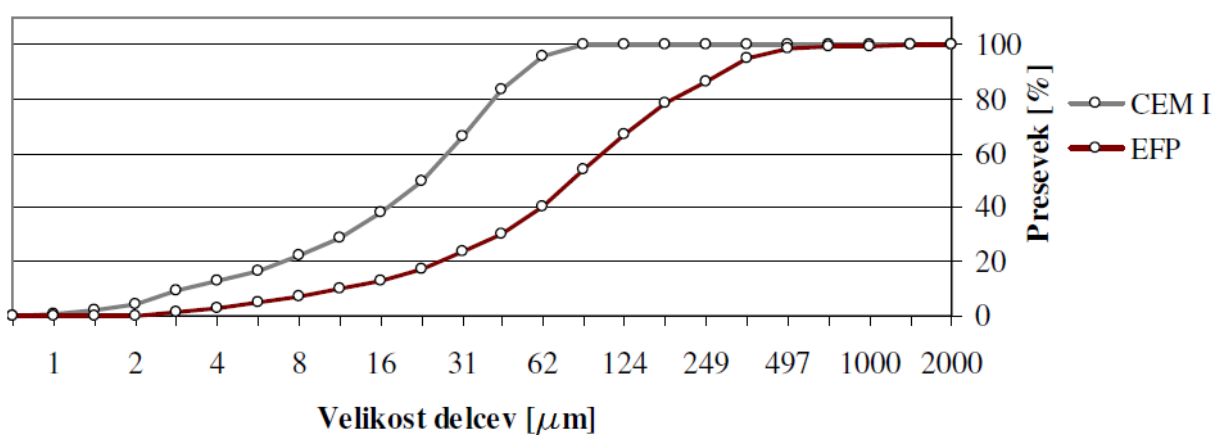
KOMPONENTA	VSEBNOST V EFP 1 [%]	VSEB. V EFP 2 [%]	VSEB. V CEMENTU[%]
SiO <sub>2</sub>	47,79	41,98	19,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,11	18,51	5,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,94	9,67	2,70
CaO	5,44	15,20	62,06
SO <sub>3</sub>	0,81	2,38	3,23
MgO	1,82	2,62	2,07
Na <sub>2</sub> O	1,05	1,06	0,35
K <sub>2</sub> O	2,15	1,91	0,75
Cl <sup>-</sup>	0,006	0,023	0,009
Neizgoreli delci	1,28	4,19	3,7



Kot je razvidno tudi iz tabele, smo v diplomskem delu uporabili dva različna EFP, in sicer silicijski in kalcijski EFP.

Za primer je na Grafikonu 2 vidna zrnavostna sestava EFP 2. Prav tako je za primerjavo na grafikonu vidna tudi zrnavostna krivulja uporabljenega cementa. Izkaže se, da razporeditev delcev EFP v primerjavi s cementom zajema širši granulacijski interval, saj premer delcev pri 50% presevku za cement znaša 22  $\mu\text{m}$ , za EFP pa 75  $\mu\text{m}$ .

Grafikon 2: Porazdelitev velikosti delcev EFP in cementa



#### 4.1.5 VODA

Vse betonske mešanice so bile pripravljene s čisto pitno vodo iz ajdovskega mestnega vodovoda po recepturi določenih deležev.

## 4.2 PROJEKTIRANJE BETONSKIH MEŠANIC

### 4.2.1 ZAHTEVE PO SIST 1026:2008

Betonske mešanice, ki smo jih preiskovali v nalogi, vsebujejo, tako kot vsak drug betonski proizvod, različne sestavine, ki morajo biti dodajane v natančnih razmerjih, da se kar najbolj približamo želenemu produktu, ki bo ustrezal zahtevam gradnje, odpornosti ter trajnosti. Te zahteve so podane v standardih za gradnjo, ki jih mora inženir dosledno upoštevati, in se določajo glede na končno rabo samega produkta.

Za naš beton so zahteve zaradi vplivov okolja, katerim mora beton kljubovati, postavljene precej visoko. Stopnjo izpostavljenosti smo ocenili na XF4, kar pomeni, da bo beton kljuboval močni nasičenosti z morsko vodo ali z vodo, ki vsebuje sredstva za tajanje. Informativni primeri okolja za to stopnjo, podani v standardu SIST 1026:2008, so sledeči:

- krovne plasti na cestah in mostne plošče, izpostavljene sredstvom za tajanje;
- betonske površine, izpostavljene neposrednemu pršču, ki vsebuje sredstva za tajanje, in zmrzovanju;
- območje pljuskanja na morskih zgradbah, ki so izpostavljene zmrzovanju;
- prometne površine, ki se pozimi solijo, npr. obrabne plasti vozišča, parkirne ploščadi, tlaki;
- navpični in vodoravni elementi, izpostavljeni neposrednemu delovanju (škropljenja) slane na premostitvenih objektih, predorih ter drugih zgradbah na cestah in vzdolž njih (do 3 m nad cestiščem) ter v odprtih parkirnih hišah.

Od tód sledijo mejne vrednosti za projektiranje betona, ki bo ustrezal stopnji izpostavljenosti. Beton smo projektirali na razred tlačne trdnosti C35/45. Beton mora biti aeriran, po standardu SIST 1026:2008 je priporočena vrednost vsebnosti zraka v svežem betonu z  $D_{\max} = 16$  mm med 5 in 7 %. Za beton pod tako stopnjo izpostavljenosti je zahtevano maksimalno vodocementno razmerje  $(v/c)_{\max} = 0,50$ . Prav tako pa mora biti beton odporen na prodor vode stopnje III (PV-III). Zahtevana konsistenca mora ustrezati razredu S4 (preskus s posedom), največje zrno agregata pa znaša  $D_{\max} = 16$  mm.

Sledi oznaka betona: C35/45 – XF4 (PV-III) – S4 –  $D_{\max}$  16

### 4.2.2 RECEPTURE BETONSKIH MEŠANIC

Končne recepture za preiskovane betonske mešanice smo dobili od podjetja Primorje, d. d. Recepture so bile projektirane za študijo vpliva različnih deležev mineralnega dodatka, s

katerim smo zamenjali del cementa v vezivu na luščenje površine betona na zmrzovanje/tajanje. Vse mešanice so bile projektirane na razred tlačne trdnosti vsaj C 30/37. Delo je potekalo s štirimi različnimi mešanici, ki smo jih za potrebe preskusa poimenovali M1, M2, M3 ter M5 (MIX1–MIX5 oz. Mešanica 1–Mešanica 5). V nadaljevanju se uporabljajo skrajšana imena. Vse mešanice so vsebovale čisti cement vrste CEM I, vendar je le mešanica M1 vsebovala cement brez mineralnih dodatkov in nam je zato služila kot kontrolna skupina preskušancev. Vse ostale mešanice so imele določen masni delež cementa zamenjan z mineralnim dodatkom – elektrofiltrskim pepelom, in sicer sta mešanici M2 ter M5 vsebovali 80 % cementa in 20 % EFP, mešanica M3 pa je vsebovala 50 % cementa ter 50 % EFP. Razlika med mešanico M2 in M5, kjer obe mešanici vsebujeta popolnoma enako recepturo masnih deležev sestavin, je v tem, da smo za vsako mešanico uporabili različen EFP slovenskega porekla dveh različnih dobaviteljev, saj smo želeli preveriti tudi vpliv EFP različnih dobaviteljev.

Receptura je za vse mešanice predpisala približno enake masne deleže agregata ter vode, kemijske dodatke pa smo dodajali glede na želeno konsistenco ter želen odstotek aeriranosti mešanice, ki smo ju preverjali sproti med mešanjem. Zaradi različnih sestav veziva (cement + EFP) se v nadaljevanju ne uporablja izraz vodocementno razmerje (v/c), temveč uporabljamo enotni izraz vodovezivno razmerje (v/v), saj je ta izraz bolj primeren za betonske mešanice, kjer mineralni dodatek nadomesti del cementa in sodeluje v procesu hidratacije.

Povzetek:

- M1 = vezivo (100 % CEM I) + agregat + voda + KD
- M2 = vezivo (80 % CEM I + 20 % EFP 1) + agregat + voda + KD
- M3 = vezivo (50 % CEM I + 50 % EFP 1) + agregat + voda + KD
- M5 = vezivo (80 % CEM I + 20 % EFP 2) + agregat + voda + KD

Preglednica 7: Sestava betonskih mešanic

Oznaka mešanice	Sestava betonske mešanice [kg/m <sup>3</sup> ]							v/v
	Agregat	Cement	EFP 1	EFP 2	SP	AER	Voda	
<b>M1</b>	1769	380	-	-	3,00	0,75	168	0,45
<b>M2</b>	1769	304	76	-	3,04	1,08	167	0,45
<b>M3</b>	1727	190	190	-	2,28	1,58	167	0,45
<b>M5</b>	1769	304	-	76	2,86	1,50	167	0,45

Preglednica 8: Sestava uporabljenega agregata po frakcijah

Oznake mešanice	Frakcije agregata [kg/m <sup>3</sup> ]			
	0/2 (33%)	0/4 (22%)	4/8 (10%)	8/16 (35%)
<b>M1</b>	584	389	177	619
<b>M2</b>	584	389	177	619
<b>M3</b>	570	380	173	604
<b>M5</b>	584	389	177	619

Ker smo imeli v laboratoriju na voljo popolnoma suh agregat za izdelavo betonov, smo morali računsko določiti količino dodatne vode, ki smo jo morali dodati mešanici, da smo prišli do želene konsistence betonskih mešanic. Vsem mešanici razen mešanici M3 je bilo potrebno na kubični meter betona dodati še 11,91 litra dodatne vode, mešanici M3 pa smo dodali 11,62 litra vode.

Po danih recepturah smo izdelali 70 l mešanice M1 (v dveh mešanjih po 45 l ter 25 l) ter po 35 l ostalih mešanic M2, M3 in M5 (Preglednica 9). Beton smo izdelovali v skladu s standardom na strojni način (Slika 4).

Preglednica 9: Dejanske zamesne količine materialov

Oznaka mešanice	Sestava betonske mešanice [kg]							Dejansko v/v
	Agregat	Cement	EFP 1	EFP 2	SP	AER	Voda	
<b>M1</b>	123,84	26,60	-	-	0,210	0,053	12,59	0,473
<b>M2</b>	61,90	10,60	2,70	-	0,106	0,038	6,32	0,475
<b>M3</b>	60,40	6,70	6,70	-	0,080	0,055	6,31	0,471
<b>M5</b>	61,90	10,60	-	2,70	0,106	0,052	6,32	0,475



Slika 4: Priprava betonske mešanice v laboratorijskem mešalcu

### 4.3 LASTNOSTI TER PRESKUSI NA SVEŽEM BETONU

Takoj po zaključku mešanja vsake mešanice smo preverjali različne lastnosti svežih betonskih mešanic, in sicer prostorninsko maso svežega betona, razred konsistence ter vsebnost zraka v svežem betonu oziroma aeriranost. Vzorce smo za potrebe preiskav iz mešalnega bobna odzeli v skladu s standardom SIST EN 12350-1 po opisanem postopku. Iz količine betona, ki jo preskušamo, odzemo količino betona, ki je vsaj 1,5-krat večja od količine, potrebne za izvedbo preiskave sveže mešanice, in ne manjša od  $0,02 \text{ m}^3$ . To količino imenujemo vzorec. Sestoji iz zahtevanega števila delov, ki so odvzeti na različnih mestih pripravljene količine betona, ki jo preiskujemo. V primerih sprotnega spremljanja izdelave betona ali naključne kontrole pripravljenega betona je lahko vzorec odzeta samo na enem mestu. Vzorec pred preiskavo hranimo na čisti površini ali v čisti posodi. Pred vgradnjo v naprave za preskušanje sveže mešanice betona moramo vzorec temeljito premešati. Čas med odvzemom in preskušanjem mora biti čim krajši. V vseh fazah odvzema, transporta in uporabe, moramo vzorce zaščititi pred izgubo vode, pred vplivi povišane temperature in segregacijo. Vsak vzorec mora biti opremljen z zapisom, ki med ostalimi vsebuje datum, čas in način odvzema vzorca (število in razporeditev deležev in časovnih intervalov odvzema). V zapisu mora biti podana tudi oznaka, opis betonske mešanice ter lokacija preskušane betona v konstrukciji (Žarnić et al., 2009).

#### 4.3.1 DOLOČANJE PROSTORNINSKE MASE SVEŽEGA BETONA

Prostorninska masa svežega betona, ki jo določimo neposredno pri proizvodnji betona ali na gradbišču tik pred vgrajevanjem, predstavlja zanesljiv kazatelj mnogih lastnosti strjenega betona. Betoni primerljive sestave in z večjo prostorninsko maso so bolj zgoščeni in imajo po strditvi praviloma tudi boljše mehanske lastnosti, vodoneprepustnost, zmrzlinsko obstojnost, odpornost na kemične vplive, itd. (Žarnić et al., 2009)

V skladu s standardom SIST EN 12350-6 smo v laboratoriju pred vgradnjo betona v kalupe stehali vsak kalup posebej z laboratorijsko tehtnico nosilnosti  $50 \text{ kg} \pm 0,02 \text{ kg}$ , s katero smo tehtali tudi vse ostale sestavine betona, z izjemo kemijskega dodatka. Po vgradnji betona v kalupe ter vibriranju smo stehali še vsak vzorec posebej (Slika 5) ter nato od dobljene mase odšteli maso samega kalupa. Kalupi so bili železni, standardnih dimenzij notranjosti  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  in so tehtali med  $7,64 \text{ kg}$  ter  $8,16 \text{ kg}$ . Za končni izračun gostote mešanic  $\rho_{b,sv}$  smo uporabili enačbo  $\rho_{b,sv} = (m_{p+b} - m_p) / V_p$ , kjer je  $m_{p+b}$  masa kalupa in vgrajenega betona,  $m_p$  pomeni maso praznega kalupa,  $V_p$  pa je prostornina kalupa.

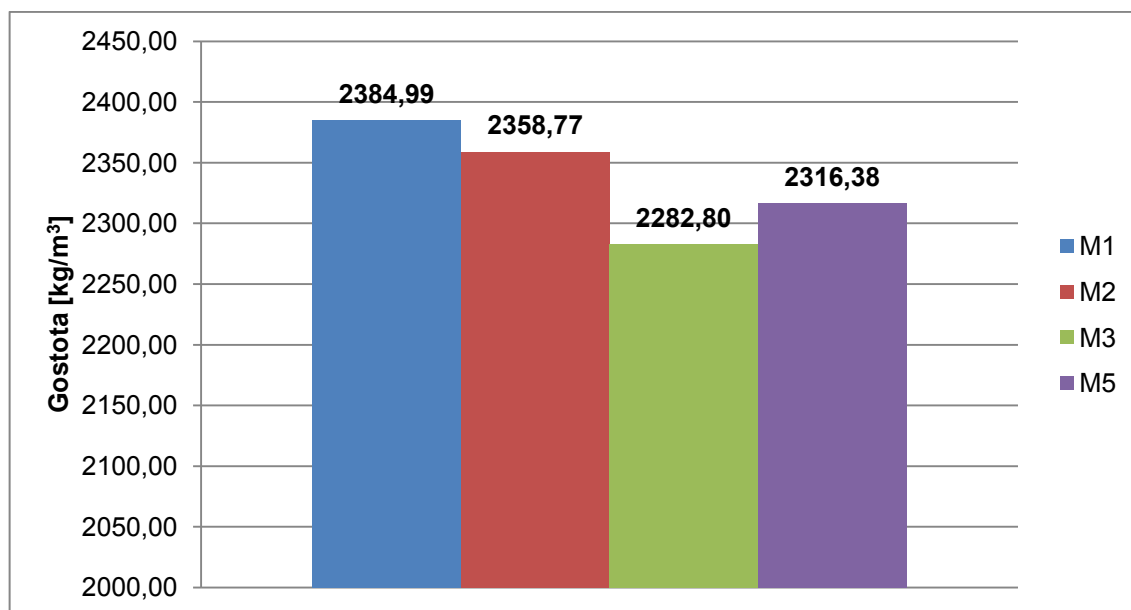


Slika 5: Tehtanje vzorcev v kalupu v laboratoriju

V Preglednici 10 ter na Grafikonu 3 so predstavljeni rezultati povprečnih vrednosti gostot svežih betonskih mešanic.

Preglednica 10: Povprečna gostota svežega betona

Mešanica	Gostota [ $\text{kg/m}^3$ ]
M1	2385,00
M2	2358,77
M3	2282,80
M4	2316,38



Grafikon 3: Povprečna gostota svežega betona

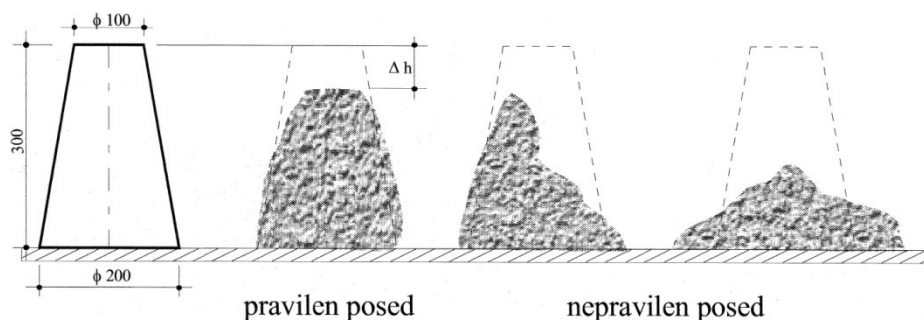
Iz Grafikona 3 je razvidno, da ima največjo gostoto beton, narejen iz čistega cementa, sledita mu mešanici M2 in M5 z 20% deležem EFP, za skoraj 5 % pa je od prve lažja najlažja mešanica, kjer smo uporabili 50 % EFP. Rezultat sovpada z dejstvom, da je EFP lažji od cementa. Na grafu vidimo tudi razliko v gostoti med dvema različnima EFP, vendar je razlika minimalna.

#### 4.3.2 PRESKUŠANJE KONSISTENCE SVEŽE BETONSKE MEŠANICE Z METODO POSEDA

Konsistenca betona je skupek lastnosti svežega betona, ki vplivajo na njegove transportne lastnosti (vgradljivost, obdelavnost, zgostitev). S preskušanjem konsistence na mestu proizvodnje betona in zlasti še na mestu vgradnje se lahko na posredni način zelo uspešno nadzira dejansko vodocementno razmerje v sveži betonski mešanici. Glede na veljavne standarde določamo konsistenco betona na štiri načine, in sicer z aparatom Vebe, s postopkom poseda, razleza ali zgoščevanja pri vibriranju (Žarnić et al., 2009). V našem primeru smo konsistenco preskušali z metodo s posedom v skladu s SIST EN 12350-2. Metoda s posedom je najbolj preprosta metoda, ki je dovolj zanesljiva za kvantitativno določanje konsistence tekočih in srednje ter mehko plastičnih svežih betonskih mešanic. Zelo pogosto se uporablja na gradbiščih.

Metoda je potekala po sledečem postopku v skladu s standardom. Na čisto podlago, železno mizico, smo postavili posodo v obliki konusa (prirezan stožec). Konus smo polnili z zajemalko v treh plasteh približno enake višine. Vsako plast smo zgostili s standardno kovinsko palico ( $\Phi 16$ , z zaobljenim vrhom dolžine 60 cm) s 25 udarci. Prvo plast smo

prebadali po celi višini, pri prebadanju naslednjih plasti pa je morala palica prodreti do spodnje plasti. Ko smo končali z zgoščevanjem zgornje plasti, smo odstranili presežek betona in zravnali površino z zidarsko žlico. Trideset sekund po napolnitvi kovinskega stožca smo ga dvignili in ga prestavili ob betonski stožec. Stožec smo dvigovali počasi (5–10 sekund). Standardno palico za prebadanje smo nato položili na zgornji rob konusa tako, da je segla nad betonski stožec, in izmerili razliko višin (Slika 7). Razlika višin ( $\Delta h$ ), zaokrožena na 10 mm, je mera za konsistenco po tej metodi.



Slika 6: Metoda s posedom (Žarnić et al., 2009)

Metoda s posedom je primerna za betone s konsistenco  $210 \text{ mm} \geq \Delta h \geq 10 \text{ mm}$ . Razredi poseda po SIST EN 206-1 so podani v Preglednici 11.

Preglednica 11: Razredi poseda

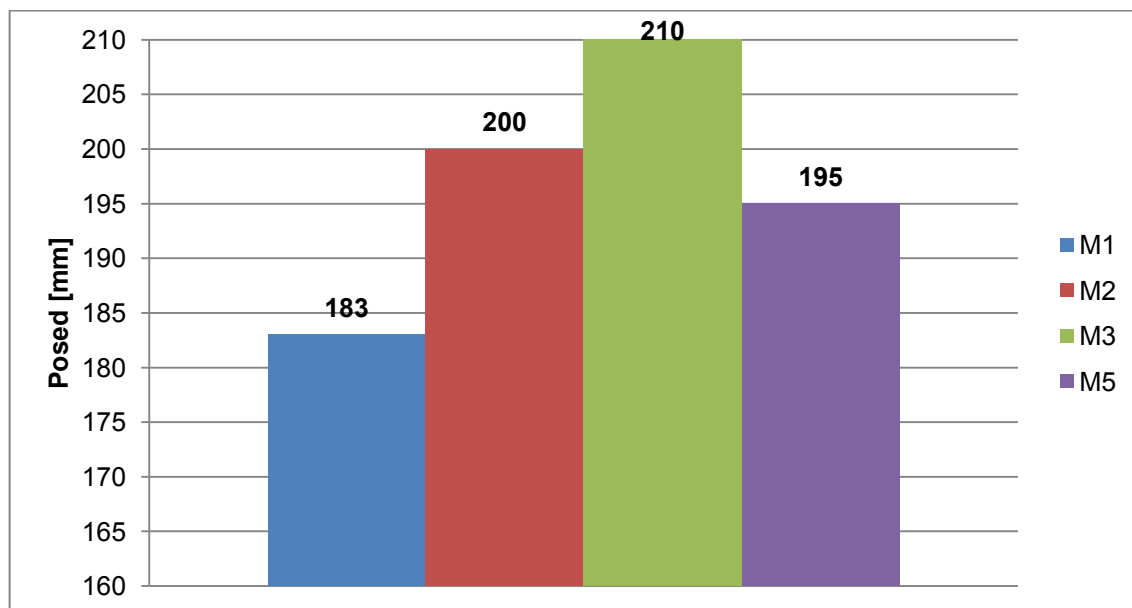
Razred	Posed [mm]
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	$\geq 220$

Betonske mešanice smo projektirali na razred konsistence s posedom S4, kar pomeni, da so morale mešanice imeti tekočo konsistenco, kjer mora posed znašati med 160 mm ter 210 mm. Rezultati preskusa, ki so podani v Preglednici 12, so nam potrdili, da so vse mešanice dosegle zelen razred konsistence.



Preglednica 12: Rezultati preskusa s posedom

Mešanica	Posed [mm]
M1	183
M2	200
M3	210
M5	195



Grafikon 4: Grafični prikaz rezultatov preskusa s posedom

Predvsem superplastifikator nam je omogočil, da smo dosegli želeno tekočo konsistenco betonskih mešanic ob še vedno dokaj nizkem vodovezivnem razmerju.

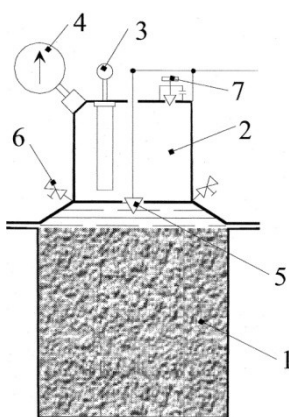
Iz Grafikona 4 je lepo razvidno, da se potrjujejo ugotovitve podobnih preiskav betonskih mešanic z dodatkom EFP (Lešnik, 2012), kjer je bilo ugotovljeno, da mineralni dodatek EFP pripomore k večji obdelavnosti betona, hkrati pa tak beton veže nekoliko počasneje, saj vsebuje manj Portland cementa, odgovornega za hitrejše vezanje.



Slika 7: Merjenje konsistenc z metodo poseda

#### 4.3.3 DOLOČANJE VSEBNOSTI ZRAKA V SVEŽEM BETONU

Zadnji preskus na svežem betonu pred vgradnjo v kalupe je bilo določanje vsebnosti zraka v svežem betonu, da bi zagotovili zahtevam po standardu SIST 1026:2008, ki predpisuje najmanjšo vrednost (spodnja meja) vsebnosti zraka pri aeriranih betonih pri stopnji izpostavljenosti XF4, ki znaša 5 %.

Slika 8: Porozimeter  
(Žarnić et al., 2009)

Na Sliki 8 je nazorno skiciran model inštrumenta, s katerim določamo vsebnost zračnih por v betonu, postopek, ki ga določa SIST EN 12350-7, pa je sledeč.

Osnovno posodo (1) s prostornino 8 litrov napolnimo s svežim betonom. Vgradimo ga v treh slojih po postopku, ki ga uporabljamo pri vgrajevanju svežega betona v kalupe. Višek materiala odstranimo s kovinskim ravnilom, in sicer tako, da ostane zgornja površina betona v posodi po odstranitvi odvečnega betona gladka. Nalegajoče površine osnovne posode in pokrova (2) pazljivo očistimo. Na osnovno posodo pritrdimo pokrov. Skozi odprtini z ventilom (6)

vlijemo vodo, s katero zapolnimo prostor med osnovno posodo in pokrovom. Ko prenehajo izhajati zračni mehurčki, ventila zapremo. Nato z ročno črpalko (3) vnesemo toliko zraka v predkomoro (pokrov), da kazalec na manometru (4) pokaže nulo (takrat je zračni pritisk v predkomori 98,066 kPa). V primeru, da je pritisk v komori previsok, odvečen zrak izpustimo skozi izpušni ventil (7). Nekaj sekund po izravnanju tlaka odpremo ventil (5) in na manometru

odčitamo »porozimetrijski indeks«. Če je porozimeter pravilno umerjen, predstavlja »porozimetrijski indeks« hkrati tudi delež zraka v odstotkih glede na celotno prostornino svežega betona v posodi (Žarnić et al., 2009).

V Preglednici 13 so podani rezultati preiskave.

Preglednica 13: Vsebnost zraka v svežih betonskih mešanica

<b>Mešanica</b>	<b>Vsebnost zraka [%]</b>
<b>M1</b>	5,3
<b>M2</b>	5,0
<b>M3</b>	5,7
<b>M5</b>	5,3

Iz rezultatov je razvidno, da smo pri vseh mešanica dosegli vsaj minimalno zahtevano količino por v betonu, kot določa standard.

Omeniti je potrebno še, da smo morali pri vseh mešanica z dodatkom EFP v vezivu (M2, M3, M5) dodati več aeranta, kot je bilo sprva predpisano v recepturi, da smo lahko dosegli želeno poroznost betona. Pri mešanici M1, ki vsebuje čisti cement, smo po recepturi takoj dodali ustrezno količino aeranta, pri mešanica M2 ter M3 pa smo morali za doseg cilja dodati celo dvojno količino aeranta. Vsekakor lahko zaključimo, da je prisotnost EFP v vezivu vplivala na doseganje želene količine por v betonu.

#### 4.4 VGRADNJA TER NEGA BETONA

Po končanem mešanju ter preskusih na sveži betonski mešanici smo ustrezno s standardom SIST EN 12390-2 vgradili naše mešanice v vnaprej pripravljene kalupe. Preskušance smo vgrajevali v kalupe standardnih dimenzij kocke s stranico 15 cm.

Kalupi za izdelavo preskušancev morajo biti vodotesni in narejeni iz materiala, ki ne vpija vode, ne reagira s cementom in omogoča zagotovitev predpisanih toleranc dimenzij standardnih preskušancev. V našem primeru smo uporabili jeklene kalupe, kar se v praksi izkaže kot najenostavnejše.

Beton, vgrajen v kalupe, smo, kot veleva standard, zgoščevali z vibracijsko iglo z minimalno frekvenco 120 Hz, kjer premer igle ni presegal četrte najmanjše dimenzije preskušancev. Pred polnjenjem smo notranje površine kalupa na tanko premazali z opažnim ločilnim sredstvom. Zgoščevanje betona je potekalo v dveh slojih, pri čemer posamezni sloj ni bil debelejši od 100 mm. Vibracijsko iglo smo hitro in navpično vtaknili v sredino kalupa do globine, ki je za približno 20 mm manjša od višine kalupa, ter vibrirali, dokler ni prenehal izhajati zrak v obliki mehurjev ter dokler se ni na površini pojavila tanka plast cementnega mleka, nato smo iglo počasi izvlekli. Ko je bil posamezni sloj zgoščen, smo nekajkrat previdno udarili z lesenim kladivom po vertikalnih ploskvah kalupa, da smo izločili morebitne žepe zajetega zraka. Po vgradnji betona v kalupe smo presežek betona odstranili in površino zravnali z zidarsko žlico.



Slika 9: Slika mešalca, vibracijske igle ter zajemalke za beton po končani vgradnji v kalupe

Po končani vgradnji betona v kalupe smo preskušance vidno ter trajno označili.

Do preskušanja je potrebno preskušance tudi primerno negovati v skladu s standardom, da zagotovimo enakovrednost ter primerljivost dobljenih rezultatov. Negujemo jih na sobni temperaturi ( $20 \pm 2$ ) °C. Preskušanec mora ostati v kalupu najmanj 16 ur ter največ 3 dni,

zaščiten pred udarci, vibracijami in izsušitvijo, kar je bilo tudi za naše preskušance zagotovljeno. Po razkalupljanju smo preskušance, potopljene v vodi, hranili vsaj 28 dni, razen tistih, ki smo jih preskušali na tlačno trdnost po 7 dneh ter na preskus prodora vode, ki je prav tako potekal na preskušancih starosti 7 in 28 dni. Slednji so bili iz nege odstranjeni približno 24 ur pred preskušanjem, da so se osušili ter da smo jih pripravili na preskuse.

## 4.5 TLAČNA TRDNOST IN ODPORNOST PROTI PRODORU VODE ZA STRJEN BETON

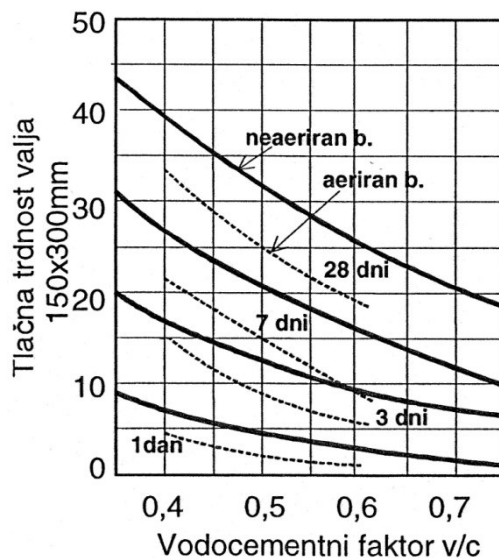
Mehanske lastnosti strjenega betona določajo njegovo kakovost in s tem tudi njegovo uporabnost v različnih konstrukcijah. Kakovost betona se odraža predvsem v njegovi trajnosti ter obstojnosti, ki jo zagotavlja dobro projektiran beton. Trajnost oziroma obstojnost betona pomeni odpornost betona na kakršnekoli vremenske pogoje, agresivne kemijske spojine, abrazijo ali katerekoli druge procese propadanja, ki lahko prizadenejo vgrajeni beton v času njegove življenjske dobe (Monteiro, 2013).

V osnovi poznamo porušne ter neporušne standardne metode preskušanja lastnosti strjenega betona. Med osnovne porušne metode spadajo predvsem preverjanje tlačne trdnosti  $f_c$ , upogibne natezne trdnosti  $f_{cf}$ , cepilne natezne trdnosti  $f_{ct}$  ter določanje modula elastičnosti  $E$ . Nekatero mehanske lastnosti določamo tudi z neporušnimi metodami, kot so metoda s sklerometrom in ultrazvočna metoda za posredno oceno trdnosti betona ter metoda resonančne frekvence za določanje dinamičnega modula elastičnosti (Žarnić et al., 2009).

Za lažjo orientacijo kakovosti naših preskušancev smo se poslužili predvsem razširjenega preskusa tlačne trdnosti ter preverili vodotesnost preskušancev po določenem času od izdelave, s čimer smo tudi nadzorovali skladnost preskušancev s standardom, ki predpisuje določeno mehansko odpornost betona pri izpostavljenosti betona vplivom okolja XF4.

### 4.5.1 TLAČNA TRDNOST BETONA

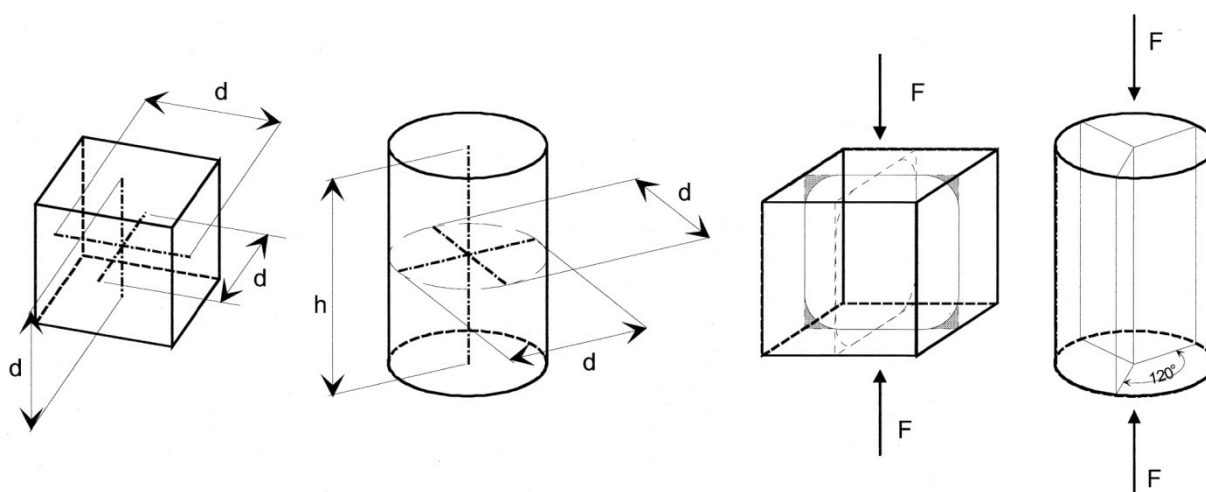
Tlačna trdnost betona  $f_c$  je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev pri starosti betona 28 dni. Preskuša se lahko na vzorcih v obliki kock ali valjev. Na trdnost betonov zelo vplivata vodocementno razmerje ( $v/c$ ) in stopnja dosežene hidratacije cementnega kamna, ki je v normalnih razmerah proporcionalna starosti betona. Z večanjem  $v/c$  trdnost pada, s starostjo pa raste. Na Sliki 10 sta prikazana primera vpliva vodocementnega razmerja na trdnost določenega betona normalne poroznosti ter aeriranega betona (Žarnić, 2003).



Slika 10: Odvisnost trdnosti betona od vodocementnega količnika (Žarnić, 2003)

Razred tlačne trdnosti  $f_{ck, cyl}/f_{ck, cube}$  je normirana tlačna trdnost betona, izražena v [MPa], ki izhaja iz karakteristične tlačne trdnosti pri starosti betona 28 dni. Karakteristična tlačna trdnost betona pa je vrednost, pod katero je za preiskani beton možno pričakovati največ 5 % vseh rezultatov preiskav tlačne trdnosti (Žarnić, 2003).

Po predhodni pripravi vzorcev smo s pomočjo preše določili porušno silo, s katero smo strli preskušanece. Na osnovi znanih dimenzij in ugotovljene porušne sile smo določili tlačno trdnost preskušanca.



Slika 11: Merodajne dimenzije tlačnih preskušancev in kontrola pravokotnih ploskev (Žarnić et al., 2009)

Tlačno trdnost smo v skladu s standardom SIST EN 12390-3 (2009) preverjali po 7 ter po 28 dneh po izdelavi vzorcev. Z rezultatom tlačne trdnosti po 7 dneh smo želeli predvsem ugotoviti primerjavo v naraščanju tlačne trdnosti betonskih preskušancev z različnim deležem

EFP v vezivu (0 %, 20 %, 50 %). Povprečje tlačnih trdnosti po 28 dneh nam je služilo za oceno karakteristične tlačne trdnosti preskušancev. Obenem smo s tem preskusom potrdili, da preskušanci ustrezajo standardu za preskus odpornosti na zmrzovanje/tavanje. Prav tako smo tudi po 28 dneh lahko primerjali tlačne trdnosti različnih preskušancev različnih sestav.



Slika 12: Primer porušitve pri preskusu tlačne trdnosti (Lešnik, 2012)

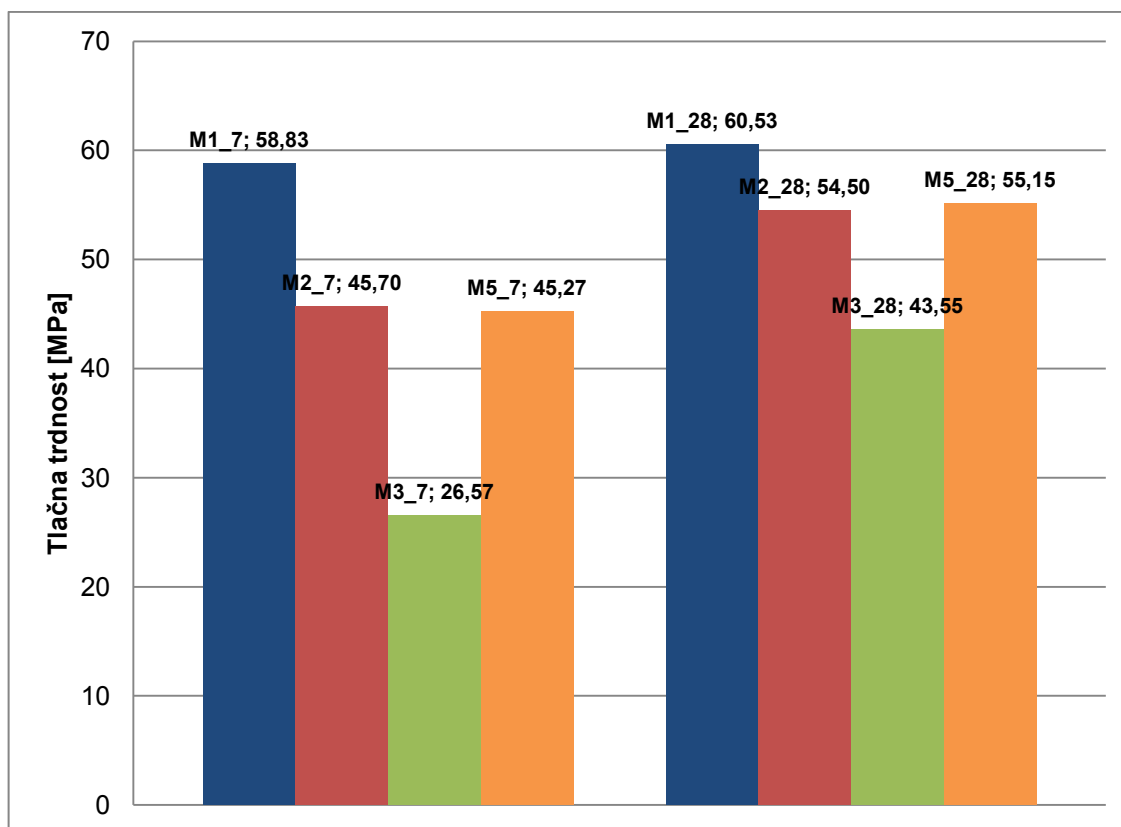
Rezultati preiskave so podani v Preglednici 14 in so povprečje treh preskušancev iste paralelke, izračunanih po formuli  $f_c = \frac{F}{A_c}$ , kjer je F porušna tlačna sila,  $A_c$  pa pomeni površino vodoravnega prereza preskušanca.

Preglednica 14: Dejanska povprečna izmerjena tlačna trdnost preskušancev

Mešanica	PO 7 DNEH [MPa]	PO 28 DNEH [MPa]
<b>M1</b> (0 % EFP)	58,83	60,53
<b>M2</b> (20 % EFP 1)	45,70	54,50*
<b>M3</b> (50 % EFP 1)	26,57	43,55*
<b>M5</b> (20 % EFP 2)	45,27	55,15*

Pri večini meritev smo imeli dokaj majhen raztros rezultatov, omeniti bi bilo potrebno le, da smo od 22 porušenih vzorcev imeli 3 neveljavne oziroma nepravilne porušitve, vse v vzorcih, ki smo jih porušili po 28 dneh od izdelave. Standard grafično predpisuje dovoljene porušitve vzorca, česar pa omenjeni preskušanci niso dosegli, zato smo jih izključili iz podanih rezultatov (označeno z \*). Razlogov za napačno porušitev nismo ugotovili. Kljub temu lahko zaključimo, da so bili preskušanci zelo dobro zamešani, vgrajeni in zgoščeni ter negovani skozi prvih 28 dni, saj so vsi rezultati, z izjemo mešanice M3 s 50% deležem EFP, močno presegli zahtevano karakteristično tlačno trdnost.





Grafikon 5: Naraščanje tlačne trdnosti preskušancev

Iz Grafikona 5 je razvidno, da je mešanica M1, kjer imamo v vezivu čisti cement, dosegla visoko tlačno trdnosti že pri starosti sedem dni, kar lahko pripisujemo predvsem dejstvu, da smo uporabili hitrovezoči cement (»Rapid«) za zgodnje doseganje visokih trdnosti. Ostale mešanice, kjer smo dodali delež EFP v vezivu, so pridobivale na trdnosti mnogo počasneje. Mešanici M2 ter M5, kjer smo imeli 20 % EFP v vezivu, sta bili po 28 dneh še nekako primerljivi s trdnostjo mešanice M1. Mešanica M3, kjer imamo v vezivu 50 % EFP, pa dosega po 7 dneh manj kot polovično trdnost mešanice M1, po 28 dneh pa je razlika še vedno zelo očitna, saj je mešanica M3 dosegla približno za tretjino nižjo tlačno trdnost kot mešanica M1. Različni viri (Prinčič, 2011, Lešnik, 2012) navajajo, da lahko s časom (po 90 dneh) tudi mešanice z 20% zamenjavo cementa z EFP v vezivu dosegajo enakovredne ali pa celo višje tlačne trdnosti od mešanic s čistim cementom, kar potrjujejo tudi različni eksperimenti. Razlog je v pucolanski reakciji EFP s produkti hidratacije cementa. Reakcija se prične, ko je bazičnost raztopine nad pH 13,2. Z višanjem pH se tudi reaktivnost EFP povečuje. Portland cement doseže na začetku hidratacije vrednost pH okrog 12, zato je hitrost začetne pucolanske reakcije zelo nizka in se s časom povečuje. To se izraža na prirastu poznejših tlačnih trdnosti (Lešnik, 2012).

#### 4.5.2 ODPORNOST BETONA PROTI PRODORU VODE

Voda ima v trdnem agregatnem stanju (led) kar 9 % večjo prostornino kot v tekočem stanju, zato je nujno potrebno za beton, ki bo izpostavljen zmrzovanju in tajanju, zagotoviti ustrezno vodoneprepustnost. Velike količine vode v betonu bi zanj pozimi lahko imele uničujoče posledice, s tem pa tudi za življenjsko dobo gradbenih objektov.

Vodotesnost oz. vodoprepustnost (tudi vodovpojnost) je tehnološka lastnost betona, ki jo morajo zagotavljati betoni, izpostavljeni atmosferskim in ostalim ekstremnim vplivom pri konstrukcijah, ki morajo zadrževati vodo brez vidnega prepuščanja. Vodotesnost se določa s količino pretoka vode skozi beton, ko le-ta deluje pod določenim pritiskom. Prepuščanje vode je odvisno od prepustnosti cementnega kamna in agregata ter razmerja med njima. Manj prepustni betoni so bolj odporni na vpliv kemikalij, ki se transportirajo kot vodne raztopine. S to lastnostjo je neposredno povezana tudi zmrzljinska odpornost betona. Cementni kamen je manj prepusten, če je cementna pasta bila pripravljena z manjšo količino vode (nižjim v/c razmerjem), če je stopnja hidratacije visoka in če je bil beton negovan med strjevanjem. Ti parametri vplivajo tudi na znižanje stopnje segregacije in izcejanja, kar še dodatno prispeva k vodotesnosti betona. Aeracija betona prispeva k tesnjenju, vendar ne vpliva veliko na vodoprepustnost. Največji vpliv na vodotesnost imata razpokanost in odprta poroznost betona (Žarnić, 2003).

Preskus za določanje odpornosti betona proti prodoru vode smo izvedli v skladu s standardom SIST EN 12390-8. Metoda poteka na strjenem betonu različnih starosti. Preskus smo izvedli le na betonu brez dodatka EFP v vezivu, torej mešanici M1. Preko ustrezne naprave smo za  $72 \pm 2$  uri na eno površino betonske kocke nanegli vodo pod pritiskom  $500 \pm 50$  kPa. Po končanem preskusu smo vzorce razcepili ter izmerili globino prodora vode v mm. Povprečni prodor vode na kockah, starih 7 dni, je znašal **5 mm**, pri starosti 28 dni pa **6,67 mm**, kar je tudi referenčna vrednost vodoprepustnosti za naš beton. V primerjavi z betoni podobne kvalitete lahko ocenimo, da smo zamešali kvaliteten ter vodoneprepusten beton (npr. Lešnik, 2012).



Slika 13: Primer naprave za preverjanje vodotesnosti betonskih preskušancev

## 5 PREISKAVA ODPORNOSTI POVRŠINE BETONA NA ZMRZOVANJE IN TAJANJE

### 5.1 O PREISKAVI OPZT

Zmrzljinska odpornost je pomembna lastnost, ki prispeva k trajnosti betona. Cikli zmrzovanja in tajanja znižujejo življenjsko dobo betona, prisotnost kemikalij (soli, kisline) pa dodatno pospešuje proces propadanja betona (prometnice, fasade).



Slika 14: Robni venec ceste, izpostavljen stopnji vplivov okolja XF4 (Prinčič et al., 2012)

Zmrzljinska odpornost se lahko zviša z aeracijo betona, saj sistem zaprtih por ovira pretok vode, istočasno pa predstavlja prostor, kjer lahko voda zmrzne, ne da bi povzročila pritiske v strukturi betona. Odprte pore v agregatu so bolj nevarne od por v cementnem kamnu, ker so praviloma tanjše. Zato lahko dodatne notranje obremenitve zaradi nabrekanja ledu povečajo notranjo razpokanost betona. Pri betonih višje kakovosti (z nižjim v/c razmerjem) je agregat manj prepojen z vodo in je zato učinek zmrzovanja manjši.

Preiskava odpornosti površine na zmrzovanje/tajanje je ena izmed pogostejših tehnoloških preiskav, ki jih izvajajo povsod po svetu, kjer se soočajo z zimskimi temperaturami pod 0 °C. Do pojava zmrzovanja pride le ob prisotnosti vode pri temperaturah pod 0 °C, pa še to samo pri poroznih in vodoprepustih materialih. Površinske sile ovirajo kristalizacijo vode (nastajanje ledu), zato v drobnih porah, kjer so te sile močnejše, voda zmrzuje kasneje kot v večjih porah (Žarnić, 2003).

Rezultat zmrzovanja in tajanja na betonski površini je luščenje betona. Luščenje betona je površinska poškodba, ki jo povzroča zmrzovanje solne raztopine na površini betona.

Poškodba se postopno povečuje in je s prostim očesom vidna kot odpadanje drobnih lusk oziroma koščkov s površine betona. Luščenje betona je le površinski pojav in ne ogroža notranje celovitosti betona ali kakorkoli vpliva na njegove mehanske lastnosti (Valenza II in Scherer, 2007).

## 5.2 PRIPRAVA BETONSKIH PRESKUŠANCEV NA PREISKAVO OPZT

Po 28-dnevni negi betonskih preskušancev ter končanih preliminarnih preskusih, ki so bili v celoti izvedeni v Ajdovščini v laboratoriju podjetja Primorje, d. d., smo preskušance pripravili na transport. Sprva je bilo potrebno standardne preskušance kockastih oblik s stranico 15 cm odpeljati na razrez, saj smo v skladu s standardom SIST 1026:2008 (Dodatek 5) določili, da lahko za preskus OPZT uporabimo kvadre z osnovno ploskvijo 15 cm X 15 cm (preiskovana ploskev) ter debelino 7,5 cm (po standardu vsaj 5 cm). Preskušance smo prerezali na polovico čez neopaženo (zgornjo) ploskev in tako dobili dva identična preskušanca kvadraste oblike (Sliki 15 ter 16).



Slika 16: Razrez preskušancev



Slika 15: Razrezani betonski preskušanci

Po razrezu smo preskušance prenesli v prostore Fakultete za gradbeništvo in geodezijo UL, kjer so morali v nadzorovanem okolju laboratorija pri temperaturi  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  in relativni vlažnosti zraka  $65 \pm 5 \%$  počivati 7 dni.



Slika 17: Okvirjanje preskušancev

Po 7-dnevni aklimatizaciji preskušancev smo na opaženo površino, ki bo preiskovana, namestili okvir, visok 15 mm, iz gibljivega plastičnega samolepljivega traku, ki smo ga po robovih, kjer se stika z betonom, vodotesno zatesnili z industrijsko silikonsko maso (Slika 17). Na Sliki 17 je prav tako vidna kartonska površina na preiskovani strani preskušanca, saj smo karton dimenzij 14 cm X 14 cm uporabili kot

šablono, da smo po odstranitvi kartona imeli popolnoma točne dimenzije površine, ki so pri vseh preskušancih znašale  $A = 140 \text{ mm} * 140 \text{ mm} = 19600 \text{ mm}^2$ . Standard zahteva, da je

preskušana površina velikosti  $7500\text{ mm}^2 < A < 25000\text{mm}^2$  pri vsakem od preskušancev posebej.

Po nekaj dneh, ko se je silikonska masa na preskušancih posušila in smo lahko odstranili kartonaste šablone, smo vse preskušance fotografirali pred začetkom ciklov zmrzovanja/tajanja, kot veleva standard (Slika 18). Na Sliki 18 se vidijo označbe preskušancev – mešanica M3, preskušanec št. 1, zmrzovalni medij 3 % NaCl.



Slika 18: Slika preskušanca pred začetkom ciklanja

Pripravili smo prve raztopine zmrzovalnega medija ter ga na vsakega od preskušancev nalili na preskušano ploskev v okviru do višine 3 do 5 mm. Tako so morali preskušanci do začetka preskusa mirovati 7 dni pri temperaturi  $(20\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$  in relativni vlažnosti zraka  $65 \pm 5\%$ , medtem pa je bilo potrebno nadzorovati in ohranjati višino zmrzovalnega medija na preskušani ploskvi. Za preprečevanje izhlapevanja bi lahko po standardu prekrili preskušance s folijo, kar se je zaradi nizkega robu izkazalo za zelo zapleteno rešitev. Veliko lažje je enkrat do dvakrat dnevno preveriti višino zmrzovalnega medija ter jo po potrebi dotočiti.



Slika 19: Preskušanci med 7-dnevnim mirovanjem pred ciklanjem

Medtem smo pripravili sosednjo sobo s temperirno komoro – zamrzovalnik za pričetek preskusa. Posamezni cikel v temperirni komori je sestavljen iz zmrzovanja pri temperaturi  $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , ki traja od 16 do 18 ur, ter tajanja pri temperaturi  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , ki traja od 6 do 8 ur. Temperirna komora je v standardu definirana kot naprava za zamrzovanje, ki mora v fazi zmrzovanja doseči zahtevano temperaturo  $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  v največ dveh urah, zrak pa mora ob tem stalno krožiti. Poleg mora biti temperiran prostor, ki izpolnjuje enake pogoje za fazo tajanja pri zahtevani temperaturi  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .



Slika 20: Shematski model preskušanca

### 5.3 IZVEDBA PREISKAVE OPZT

Preiskavo OPZT smo izvedli v skladu s standardom SIST 1026:2008. Preiskava OPZT se izvaja na betonskih preskušancih starosti najmanj 28 dni in največ 35 dni, če ni predpisano drugače, kar smo tudi upoštevali. Rezultat preiskave se ocenjuje s količino odluščenega materiala v  $\text{mg}/\text{mm}^2$ .

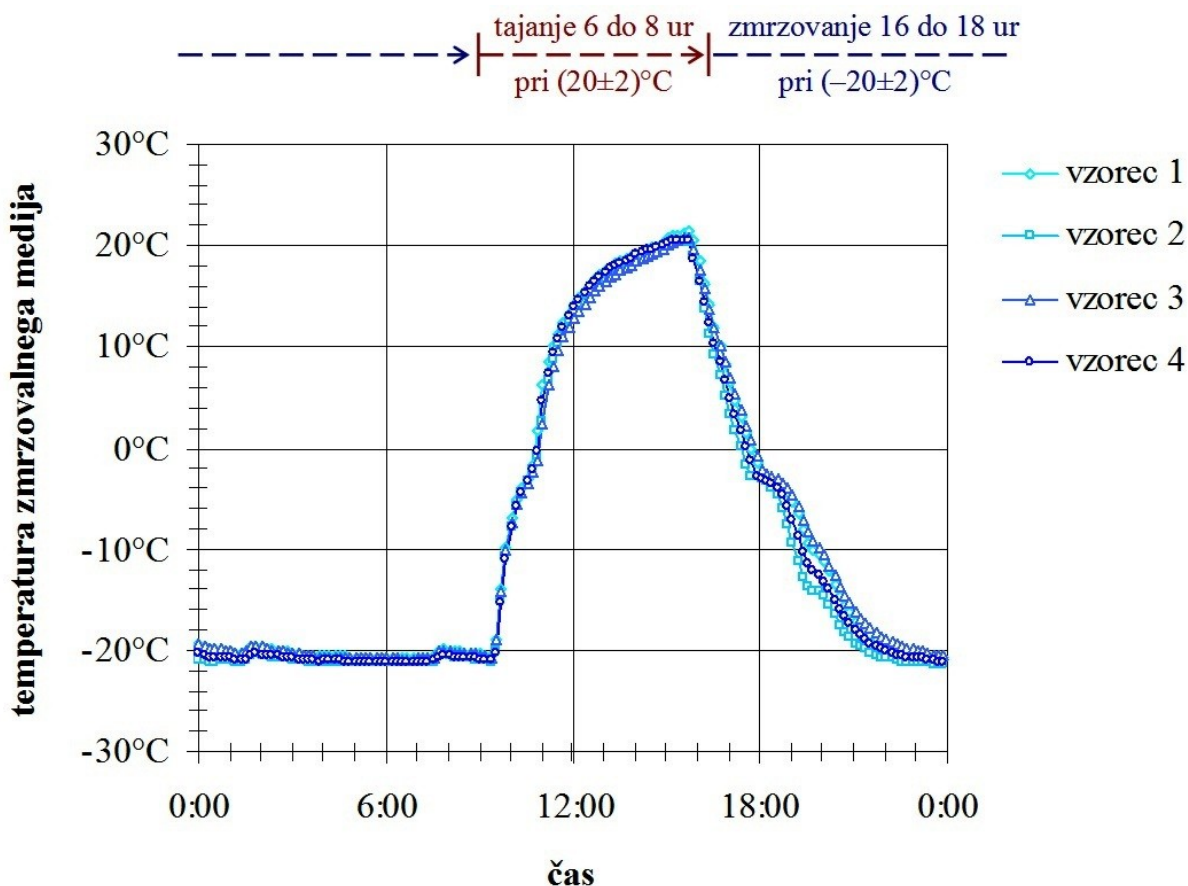
Pri stopnji izpostavljenosti XF4 standard zahteva, da beton vzdrži vsaj 25 ciklov zmrzovanja in tajanja. S preskušanci, ki po 25 ciklih prekoračijo osnovne mejne vrednosti odluščenega materiala, pa lahko nadaljujemo preskus do 50 ciklov, pod pogojem, da po 25 ciklih niso bile prekoračene skrajne mejne vrednosti iz Preglednice 15. Šteje se, da je opažena površina betona odporna proti zmrzovanju/tajanju, če po 50 ciklih niso prekoračene dovoljene mejne vrednosti iz Preglednice 15.

Preglednica 15: Merila za ocenjevanje OPZT: količina odluščenega materiala [ $\text{mg}/\text{mm}^2$ ]

<b>Rezultat preskusa</b>	<b>Osnovne mejne vrednosti po 25 ciklih</b>	<b>Skrajne mejne vrednosti po 25 ciklih</b>	<b>Dovoljene mejne vrednosti po 50 ciklih</b>
POVPREČJE	0,20	0,35	0,40
POSAMEZNA VREDNOST	0,25	0,40	0,50

Preskus smo izvajali vsak delovni dan. Čez vikende, praznike in dela proste dneve smo poskrbeli, da so preskušanci ostali v zamrzovalniku, kot narekuje standard. Običajno smo vsako dopoldne okoli 8. ure zložili preskušance iz zamrzovalnika na temperaturo tajanja ter jih nato popoldan okoli 15. ure zložili nazaj v zamrzovalnik v cikel zmrzovanja. Na Sliki 21 je prikazan tipičen cikel zmrzovanja in tajanja, povzet po viru, ki je opisoval enk postopek (Žnidaršič, 2007).

Med preskusom smo vodili natančno evidenco, označeno z datumom, uro, podpisom ter opombo. Po evidenci sodeč je preskus OPZT trajal od 9. 4. 2012 pa do 15. 6. 2012, pri čemer smo čez celotni preskus dosledno upoštevali 6–8 urni cikel tajanja. Med opombami je vredno omeniti le, da so nam med potekom preskusa večkrat spustili silikonski robovi, kar smo nemudoma popravili. V prvem delu preskusa (do 25 ciklov) se je to zgodilo le enkrat, najverjetneje zaradi slabe izvedbe robu, v drugem delu (med 25 in 50 cikli) pa se je to zgodilo trikrat. Vzrok je bil v dotrajanosti silikona (zaradi nenehnega premikanja preskušancev) ter dotrajanosti same preskušane površine, saj se je izpust robu zgodil le na preskušancih, ki so bili ob koncu preskusa močno poškodovani.



Slika 21: Ciklus zmrzovanja/tajanja pri laboratorijskem preskušanju (Žnidaršič, 2007)

Po vsakih 5 ciklih smo merili odlučen material s preskušancev. Organizirali smo se tako, da smo vsak petek popoldan zaključili 5 ciklov. Tako smo vsak petek popoldan po 5. Ciklu preko filtra za hitro filtracijo tajanja odlili talilno raztopino s preskušanca, nato sprali površino, da so se vsi odlučeni delci lepo ujeli na filter, pri tem pa smo si pomagali tudi s čopičem. Nato smo preskušance zložili nazaj v zamrzovalnik ter dolili novo predpisano količino talilne raztopine na površino preskušanca.



## 5.4 REZULTATI PREISKAVE OPZT

Rezultate preiskave OPZT lahko razdelimo na dva dela, in sicer na rezultat odluščenega materiala po 25 ciklih in na rezultate po 50 ciklih zmrzovanja in tajanja. Rezultati po 25 ciklih so po standardu merodajni rezultati, preskus smo podaljšali do 50 ciklov zgolj informativno, da smo lahko ugotavljali, kaj se dogaja s preskušanci tudi po tem, ko zadostijo pogojem standarda.

Preglednice posebej delimo glede na mešanice betona M1, M2, M3 ter M5. Vsaka preglednica na začetku vsebuje podatek, katera solna raztopina oz. zmrzovalni medij (ZMRZ. MEDIJ) je bil apliciran na določen preskušanec. V nadaljevanju sledijo podatki o dejanskih povprečnih odluščkih v  $\text{mg}/\text{mm}^2$  za vsake tri paralelke posebej na vsakih 5 ciklov, torej POVP.ODL. 5 pomeni povprečen odluščen material po 5 ciklih zmrzovanja/tajanja, POVP.ODL. 10 pomeni odluščen material po naslednjih 10 ciklih, itn. Na koncu so poudarjene merodajne vrednosti, katere preverjamo, če so v skladu s standardom. Gre za odluščke posameznega preskušanca po 25 ciklih (ODLUŠČEK 25) ter povprečne odluščke posamezne paralelne skupine po 25 ciklih (POVP.ODL. 25). V skladu s Preglednico 15 smo nato ugotavljali, če so naši preskušanci prestali preskus OPZT.

Analogno smo ugotavljali tudi, kako uspešni so bili preskušanci po 50 ciklih preskusa OPZT. V nadaljevanju so za lažjo predstavbo rezultati prikazani tudi na grafikonih s komentarji.

## 5.4.1 REZULTATI PO 25 CIKLIH

### Preskušanci M1

Preglednica 16: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M1 po 25 ciklih

ZMRZ.	POVP.ODL. 5	POVP.ODL. 10	POVP.ODL. 15	POVP.ODL. 20	ODLUŠČEK 25 POVP.ODL. 25	
MEDIJ	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]
A					0,00	
A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A					0,00	
B					0,01	
B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
B					0,01	
D					0,02	
D	0,01	0,01	0,02	0,12	0,85	0,81
D					1,47	
C					0,00	
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C					0,01	
E					0,00	
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
E					0,01	

### Komentar k Preglednici 16

V Preglednici 16 je prikazano stopnjevanje luščenja betonske površine mešanice M1 za vsak zmrzovalni medij posebej. Rezultatsko sta pomembna le zadnja poudarjena odluščka; prvi prikazuje, da so vsi preskušanci prestali preskus, le dva preskušanca, kjer smo uporabili višjo koncentracijo kloridne soli CaCl<sub>2</sub>, sta vplivu podlegla in ne ustrezata zahtevam standarda. Drugi poudarjen podatek v preglednici pa prikazuje, da so vse paralelne skupine ustrezno prestale preskus, le paralelna skupina, kjer smo uporabili visoko koncentracijo CaCl<sub>2</sub>, preskusa ni prestala – opažena površina tega betona ni odporna na zmrzovanje in tajanje. Med preskusom je bilo mogoče s prostim očesom opaziti, da CaCl<sub>2</sub> bolj poškoduje površino preskušancev, kar se je kasneje izkazalo tudi v večji količini odluščenega materiala. V nasprotju s še vedno dobro odpornostjo betona na nizke koncentracije kloridnih soli pa se je pokazalo zelo veliko luščenje v primeru bolj koncentrirane raztopine kloridne soli. Poudariti je potrebno, da tako koncentrirana raztopina CaCl<sub>2</sub> v temperaturni komori na (-20±2) °C v 16 do 18 urah ne zmrzne. To nakazuje, da na tako veliko luščenje že po 20-ih ciklih ne vplivajo hidravlični pritiski zaradi zmrznjene vode. Ocenjujemo, da je izmerjeno zelo veliko luščenje lahko posledica dveh dejavnikov ali njune kombinacije: kristalizacije soli, ki

povzroča notranje pritiske v betonu ali pa premaknjene meje zmrzovanja proti notranjosti preskušanca, kjer je koncentracija soli dovolj majhna, da lahko vodna raztopina zmrzne. Ta pojav se je pokazal pri dveh preizkušancih, medtem ko je bila pri tretjem preizkušancu površina betona relativno nepoškodovana, kar se kaže v velikem odstopanju rezultatov in visoki standardni deviaciji.

Rezultat sovпада tudi z drugimi viri o OPZT preskusu, kjer se kalcijev klorid običajno izkaže kot najbolj agresivna in destruktivna talilna sol, saj se predvsem pri višjih koncentracijah raztopin s  $\text{CaCl}_2$  v raztopini začne pojavljati bela snov, ki je po podatkih virov kalcijev oxy-klorid –  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$  (NCHRP Report 577, 2007).



Slika 22: Najbolj poškodovani preskušane v okviru preiskav

## Preskušanci M2

Preglednica 17: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M2 po 25 ciklih

ZMRZ.	POVP.ODL. 5	POVP.ODL. 10	POVP.ODL. 15	POVP.ODL. 20	ODLUŠČEK 25 POVP.ODL. 25	
MEDIJ	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]
A					0,03	
A	0,00	0,01	0,03	0,09	<del>0,33</del>	0,16
A					0,14	
B					0,05	
B	0,02	0,05	0,09	0,13	<del>0,41</del>	0,19
B					0,10	
D					0,01	
D	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03
D					0,06	
C					0,00	
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C					0,00	
E					0,01	
E	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
E					0,00	

### Komentar k Preglednici 17

V Preglednici 17 je prikazano stopnjevanje luščenja betonske površine mešanice M2 za vsak zmrzovalni medij posebej. Rezultatsko sta zopet pomembna le zadnja poudarjena odluščka; prvi prikazuje, da so vsi preskušanci prestali preskus, le dva preskušanca, tokrat en iz skupine z nizko koncentracijo NaCl ter en iz skupine z nizko koncentracijo CaCl<sub>2</sub>, nista prestala preskusa OPZT. Dejstvo, da ima mešanica M2 20 % cementa v vezivu zamenjanega z EFP, se je pokazalo kot le malenkost slabša odpornost betonske površine na zmrzovanje/tajanje.

Razlog za propad preskušanca pri raztopini A je težko ugotoviti zgolj iz informacij, ki so nam na voljo, saj so se drugače preskušanci z 20 % EFP v vezivu obnašali dobro pri raztopini A. Ena od možnih razlag je, da je bil preskušanec že predhodno šibkejši, brez vidnih zunanjih znakov.

Preskušanec, ki je propadel v skupini z raztopino B, ne preseneča, saj smo že pri betonih M1 opazili, da CaCl<sub>2</sub> močno poslabša odpornost površine betona. Omenjena skupina je komaj prestala test, paralelna skupina z višjo vsebnostjo CaCl<sub>2</sub> pa ga je prestala precej dobro.

Ponovno se je pokazalo, da betonu najmanj škoduje magnezijev klorid, ne glede na stopnjo koncentracije, kar potrjujejo tudi ostali preskušanci pri raztopini C in E.

## Preskušanci M3

Preglednica 18: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M3 po 25 ciklih

ZMRZ.	POVP.ODL. 5	POVP.ODL. 10	POVP.ODL. 15	POVP.ODL. 20	ODLUŠČEK 25 POVP.ODL. 25	
MEDJ	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]
A					0,69	
A	0,03	0,14	0,33	0,56	1,24	0,88
A					0,71	

## Komentar k Preglednici 18

V Preglednici 18 je prikazano stopnjevanje luščenja betonske površine mešanice M3 le pri raztopini A. Kot je razvidno iz preglednice, je paralelna skupina v popolnosti propadla in je daleč od zahtev standarda za odpornost na vplive okolja XF4. Ta skupina je imela 50 % cementa v vezivu zamenjanega z EFP in je, kot smo pričakovali, močno degradirala.



Slika 23: Močno poškodovana površina betona mešanice M3

Naše ugotovitve se ujemajo z ostalimi viri in potrjujejo, da zamenjava cementa z EFP nad 20 % izjemno negativno vpliva na samo odpornost in obstojnost betona, zato zamenjava ni primerna za okolja, kjer pride do izmenjevanja zmrzovanja in tajanja, še posebej, če je pri tem beton podvržen agresivnim kemičnim snovem.

Po 25 ciklih se je zaradi prehude poškodovanosti površine ter nedoseganja standarda za to skupino preskus končal.

## Preskušanci M5

Preglednica 19: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M5 po 25 ciklih

ZMRZ.	POVP.ODL. 5	POVP.ODL. 10	POVP.ODL. 15	POVP.ODL. 20	ODLUŠČEK 25 POVP.ODL. 25	
MEDIJ	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]
A					0,03	
A	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,03
A					0,03	

### Komentar k Preglednici 19

V Preglednici 19 je prikazano stopnjevanje luščenja betonske površine mešanice M5 le pri raztopini A. Opazimo, da je paralelna skupina zelo dobro prestala preskus. To skupino smo primerjali s skupino preskušancev M2, kjer imata paralelni skupini enak delež cementa v vezivu, zamenjanega z EFP (20 %), EFP je le drugega porekla.

Izkaže se, da so vsi preskušanci serije M5 boljše prestali preskus kot preskušanci serije M2. Različna OPZT odpornost teh betonov je lahko povezana s karakteristikami sistema vnesenih zračnih por v betonu. Pri enakem izmerjenem deležu zraka so lahko pore večje in jih je manj ali pa so manjše in jih je več. Slednje pomeni boljšo OPZT odpornost betona, ker je pripadajoč faktor oddaljenosti por manjši. Vsekakor pa je omenjena paralelna skupina zelo dobro prestala preskus in je konkurenčna skupini M1, ki še vedno velja za najmanj poškodovano.

## 5.4.2 REZULTATI PO 50 CIKLIH

### Preskušanci M1

Preglednica 20: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M1 po 50 ciklih

ZMRZ.	POVP.ODL. 30	POVP.ODL. 35	POVP.ODL. 40	POVP.ODL. 45	ODLUŠČEK 50 POVP.ODL. 50	
MEDIJ	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]
A					0,02	
A	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
A					0,01	
B					0,04	
B	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
B					0,02	
D					0,05	
D	0,75	0,84	0,87	0,87	0,52	0,88
D					2,06	
C					0,01	
C	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
C					0,02	
E					0,01	
E	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
E					0,01	

### Komentar k Preglednici 20

V Preglednici 20 je prikazano stopnjevanje luščenja betonske površine mešanice M1 za vsak zmrzovalni medij posebej od 25. pa do 50. cikla. Tudi v nadaljevanju se je izkazala mešanica M1 kot najbolj trpežna in odporna proti vplivom okolja, razen pri raztopini D, pri kateri se je luščenje sicer nekoliko zmanjšalo, vendar še vedno dosega visoke vrednosti. Morda je nenaden močnejši odlušček botroval temu, da se je v nadaljnjem postopku površina luščila dosti počasneje, vendar bi po 50 ciklih verjetno prišli do enakega odluščka, četudi bi se luščenje odvijalo bolj linearno. Ostale paralelke se obnašajo predvidljivo. Skupini z magnezijevo soljo sta najmanj poškodovani, kar le potrjuje navajanje različnih virov o najmanjšem učinku na beton pri uporabi te soli (Valenza II in Scherer, 2007, Šelih, 2009). V nasprotju z nekaterimi izmed virov pa je dejstvo, da je pri višji koncentraciji MgCl<sub>2</sub> prišlo do večjega luščenja betona kot pri nižji. Tudi standard je sestavljen na podlagi preskusov, ki so v večini pokazali, da ima največji degradacijski efekt na beton prav nizko-odstotna solna raztopina natrijevega in magnezijevega klorida.



Slika 24: Skoraj nedotaknjena površina preskušanca M1 po 50 ciklih (A)



Slika 25: Močno poškodovana površina preskušanca M1 po 50 ciklih (D)



## Preskušanci M2

Preglednica 21: Preglednica povprečnega odluščka mešanice M2 po 50 ciklih

ZMRZ. MEDIJ	POVP.ODL. 30	POVP.ODL. 35	POVP.ODL. 40	POVP.ODL. 45	ODLUŠČEK 50	
	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	POVP.ODL. 50 [mg/mm <sup>2</sup> ]	POVP.ODL. 50 [mg/mm <sup>2</sup> ]
A	<b>0,26</b>	<b>0,42</b>	<b>0,61</b>	<b>0,77</b>	0,22	<b>1,02</b>
A					2,87	
A					0,77	
B	<b>0,23</b>	<b>0,27</b>	<b>0,32</b>	<b>0,37</b>	0,16	<b>0,44</b>
B					0,82	
B					0,32	
D	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	0,04	<b>0,09</b>
D					0,06	
D					0,17	
C	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	0,02	<b>0,02</b>
C					0,03	
C					0,02	
E	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	0,02	<b>0,01</b>
E					0,02	
E					0,01	

### Komentar k Preglednici 21

V Preglednici 21 je prikazano stopnjevanje luščenja betonske površine mešanice M2 za vsak zmrzovalni medij posebej od 25. pa do 50. cikla. V nadaljevanju preskusa se pojavi močno povečanje odluščka pri prvih dveh paralelkah, ki sta kazali znake šibkosti že v prvem delu preskusa. Tu je rezultat precej pričakovan, saj sta se obe paralelki z visokokoncentriranima raztopinama odrezali bolje kot paralelke z nizko koncentracijo soli. Magnezijeva sol je zopet imela najmanjši vpliv na degradacijo betonske površine. Nepričakovano se močno poveča odlušček pri raztopini A, skoraj po pričakovanjih pa pri raztopini B. Zanimiva je primerjava med M1 ter M2 pri raztopini D, kjer je preskus, za razliko od mešanice M1, mešanica M2 pod isto raztopino prestala bolje in skoraj brez poškodb. Zaključimo lahko, da je mešanica M2 dobro prestala preskus, saj je večina preskušancev po 50 ciklih ostala le rahlo poškodovana.

## Preskušanci M5

Preglednica 22: Preglednica povprečnega odlučka mešanice M5 po 50 ciklih

ZMRZ.	POVP.ODL. 30	POVP.ODL. 35	POVP.ODL. 40	POVP.ODL. 45	ODLUŠČEK 50	POVP.ODL. 50
MEDIJ	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]
A					0,12	
A	0,04	0,06	0,08	0,10	0,18	0,14
A					0,13	

## Komentar k Preglednici 22

V Preglednici 22 je prikazano stopnjevanje luščenja betonske površine mešanice M5 le pri raztopini A, od 25. pa do 50. cikla. Kot pri prvem delu lahko mešanico M5 primerjamo z M2 in tudi tokrat se je izkazalo, da je mešanica M5 (EFP 2) bolje prestala test, torej je po odpornosti primerljiva z mešanico M1. Mešanica M2 bi bila vsekakor uporabna tudi v praksi, saj z dodatkom 20 % EFP 2 ne bi bistveno škodovali odpornosti ter trajnosti betona, kljub stopnji izpostavljenosti okolja XF4.

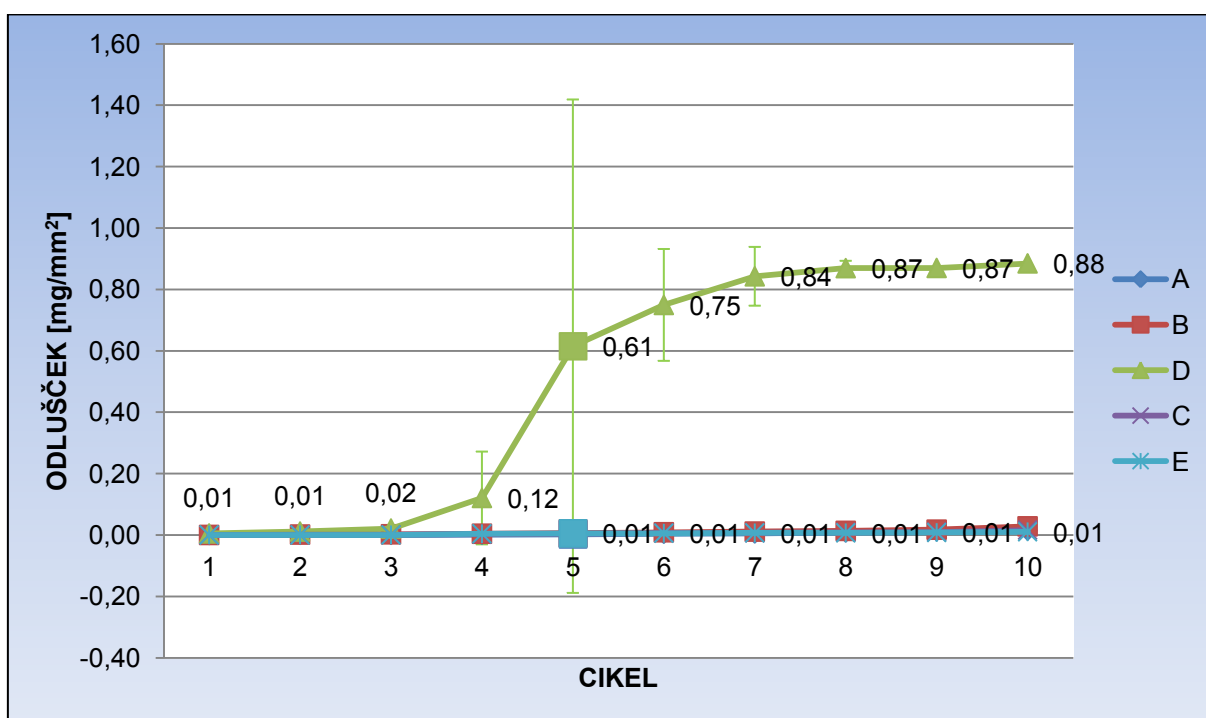


Slika 26: Primerjava poškodb površine mešanic M2 ter M5

### 5.4.3 GRAFIČNI PRIKAZI REZULTATOV

Za lažje razumevanje in hitrejšo obrazložitev smo izdelali tudi grafični prikaz rezultatov. Grafi so, poleg do sedaj znanih podatkov, opremljeni tudi s standardnim odklonom vsakega cikla merjenja odluščka, iz česar je lažje razvidno, ali so se posamezni preskušanci obnašali enakomerno ali so se pri luščenju tudi med seboj razlikovali.

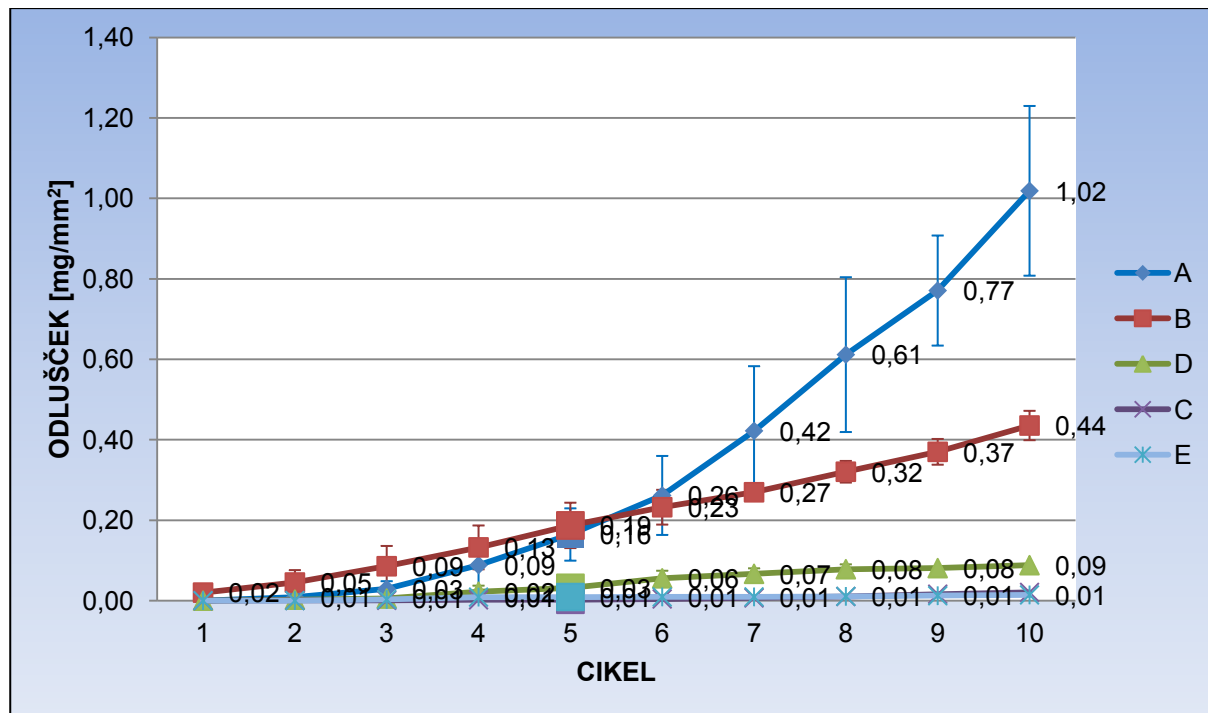
#### Mešanica M1



Grafikon 6: Odlušček mešanice M1 pod vplivom različnih talilnih soli

Na Grafikonu 6 je prikazan časovni potek luščenja betona, ki pri vseh paralelkah poteka povsem v skladu s pričakovanji, le pri raztopini D je prišlo do hujših poškodb materiala. Pri nizkih koncentracijah potrdimo dejstvo, da pri enakem številu molov kloridnih ionov v raztopini ( $0,0517 \text{ mol Cl}^-$ ) vrsta kationa ne vpliva znatno na količino luščenja betona za dano betonsko mešanico. Kot že omenjeno, opazimo, da je pri raztopini D prišlo do precej nenadnega odluščka, kar bi lahko bil indikator poškodovane ali slabo pripravljene površine že pred preskusom. Vsekakor preskus kaže, da je  $\text{CaCl}_2$  ena izmed bolj destruktivnih talilnih soli v uporabi.

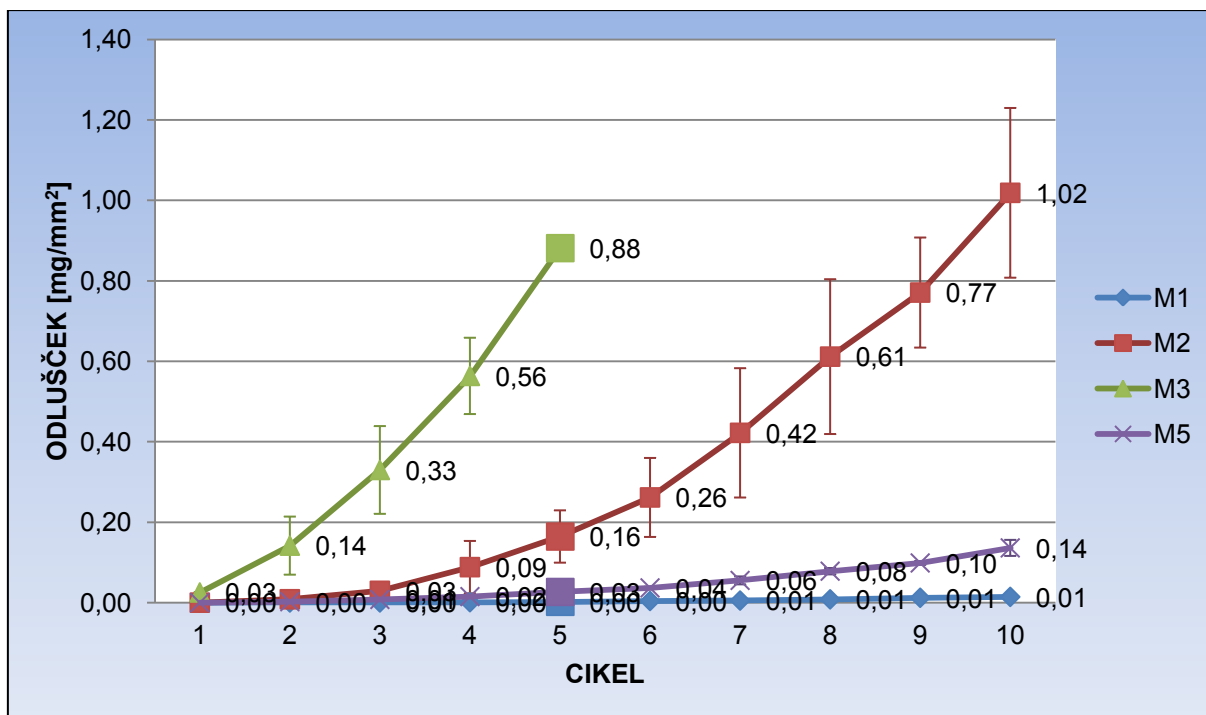
## Mešanica M2



Grafikon 7: Odlušček mešanice M2 pod vplivom različnih talilnih soli

Grafikon 7 prikazuje časovni potek luščenja betona, ki pri vseh paralelkah poteka dokaj v skladu s pričakovanji, le pri raztopini A pride do malo višjega odluščka, kot bi ga bili pričakovali. Nepredviden odlušček se je zgodil le pri paralelni skupini z raztopino D, saj bi izhajajoč iz rezultatov za mešanico M1 pričakovali, da bi raztopina D še destruktivneje vplivala na M2, kar pa se izkaže za neresnično. Ena od možnih razlag je tudi, da bi lahko EFP v mešanici vplival na sam potek luščenja pri raztopini D, vendar pa bi bilo potrebno trditev nadalje raziskati s primerljivimi preskusi.

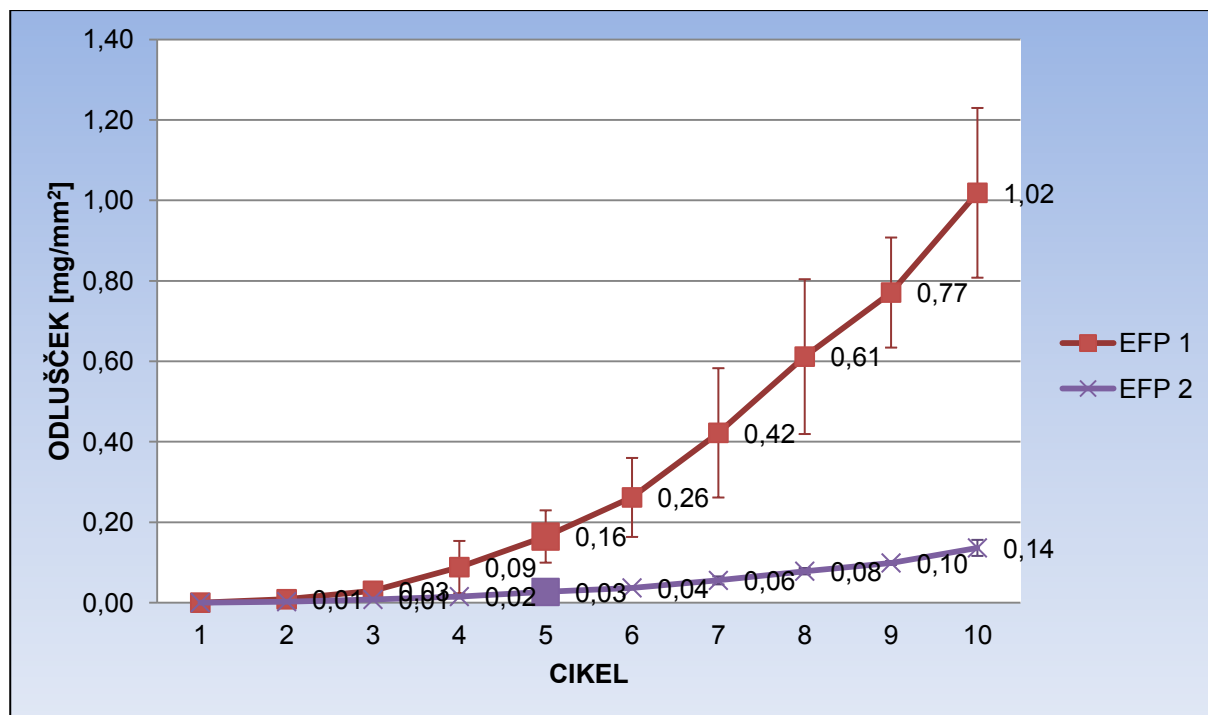
### Primerjava mešanic pri raztopini A



Grafikon 8: Odlušček vseh različnih mešanic pod vplivom raztopine A

Rezultat Grafikona 8 je povsem v skladu s pričakovanji in prikazuje, da je najbolj odporna proti zmrzovanju in tajanju mešanica s 100% cementom v vezivu M1, najslabše pa mešanica, kjer smo 50 % cementa zamenjali z EFP.

## Primerjava različnih EFP



Grafikon 9: Primerjava dveh različnih EFP

Za študijo vpliva različnih tipov EFP v vezivu smo uporabili dva EFP. Na Grafikonu 9 je prikazano, da se že v zgodnji fazi preskusa EFP 1 na izpostavljenost precej slabše odziva kot EFP 2. Razloge za to lahko iščemo v več dejstvih, ki bi jih bilo potrebno podkrepiti z nadaljnimi preskusi. Razlike so v različni sestavi EFP, v finosti ter v vsebnosti zračnih por v betonski mešanici. V našem primeru se je kalcijski EFP bolje odzival na preskus OPZT kot silicijski. Betonska mešanica s kalcijem EFP je imela tudi večjo vsebnost zračnih por že v sveži mešanici.

## 6 POMOŽNE PREISKAVE

V okviru diplomske naloge smo izvedli tudi dve pomožni preiskavi, ki sta nam služili za lažjo ugotovitev ter razlago obnašanja preskušancev v preskusu OPZT. Izvedli smo meritve globine prodora kloridov v betonske preskušance ter linijsko mikroskopijo, katere zaradi časovne stiske nismo uspeli končati, zato v nalogi ne bo opisana.

### 6.1 PRODOR KLORIDOV

Meritve prodora kloridov smo izvajali takoj po zaključeni preiskavi OPZT. Ko smo izmerili zadnji odlušček za preskus OPZT, smo kvadraste preskušance s prešo vertikalno cepilno prelomili, tako da smo dobili po 2 enaka prereza preskušanca, na katerih smo nato izvajali preskus.



Slika 27: Prelomljeni preskušanci

Preskus se izvaja s kemijsko raztopino srebrovega nitrata –  $\text{AgNO}_3$ , ki smo ga uporabili kot indikator kloridnih ionov.  $\text{AgNO}_3$  reagira s kloridnimi ioni, pri reakciji pa nastaja srebrov klorid –  $\text{AgCl}$ , ki je viden na površini prereza kot bela oborina. Mejo oborine nato očrtamo ter v milimetrih merimo globino prodora kloridnih ionov na vsak centimeter po širini preskušanca (16 meritev/preskušanec). Za preskus smo uporabili razredčeno raztopino 0,1 mol  $\text{AgNO}_3$ .

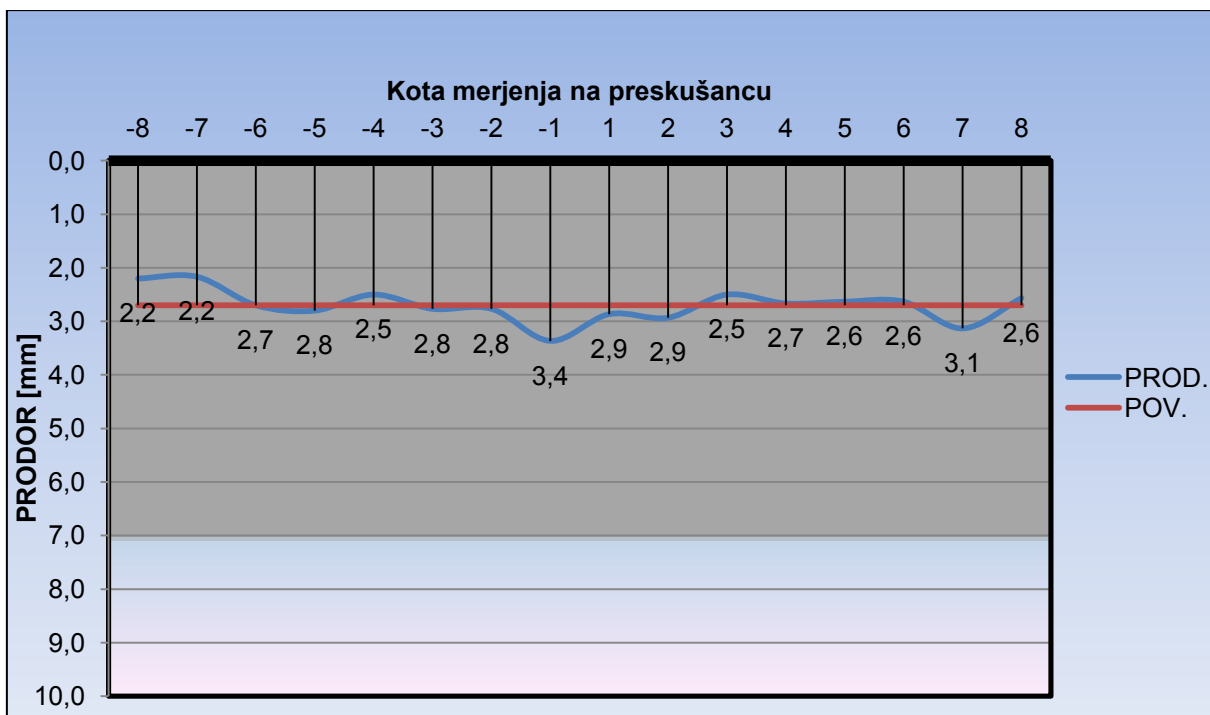


Slika 28: Preskušani prezek z belo oborino AgCl

Za rezultat smo zajeli povprečne vrednosti globine prodora kloridov za vsako od mešanic posebej. Spodnji grafikoni prikazujejo povprečne vrednosti posamezne kote vseh preskušancev iste mešanice ter nato še povprečje vseh vrednosti za posamezno betonsko mešanico.

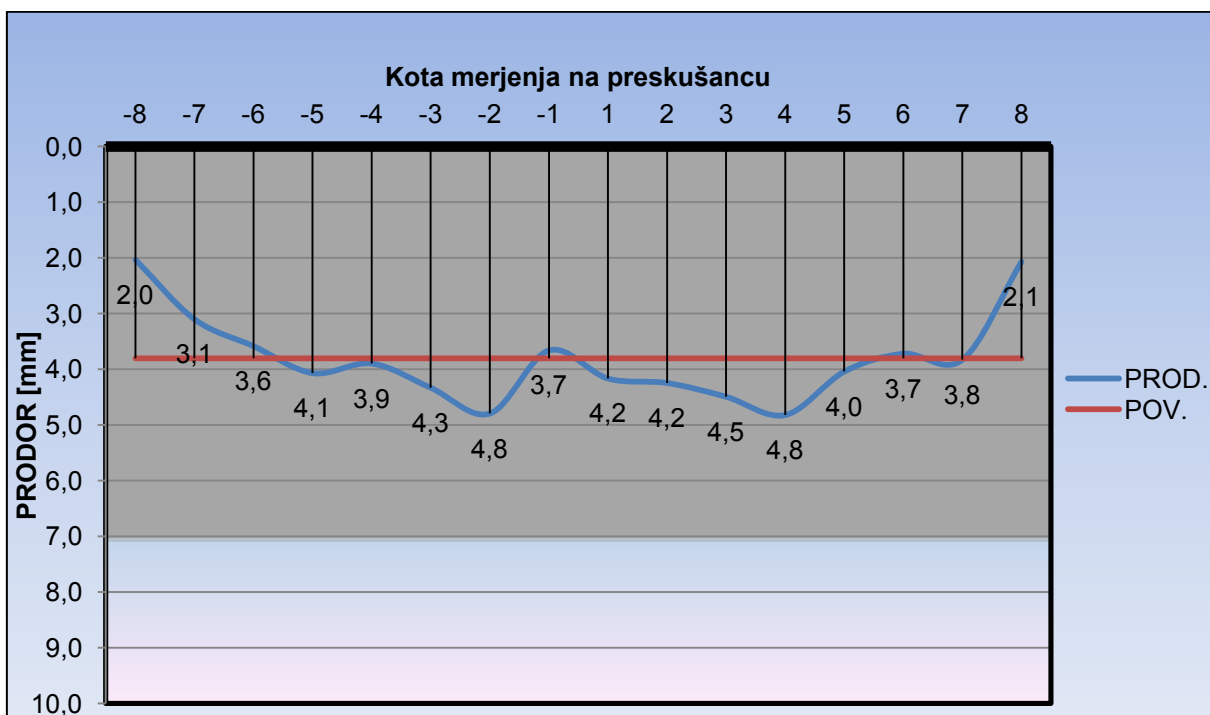


## Mešanica M1



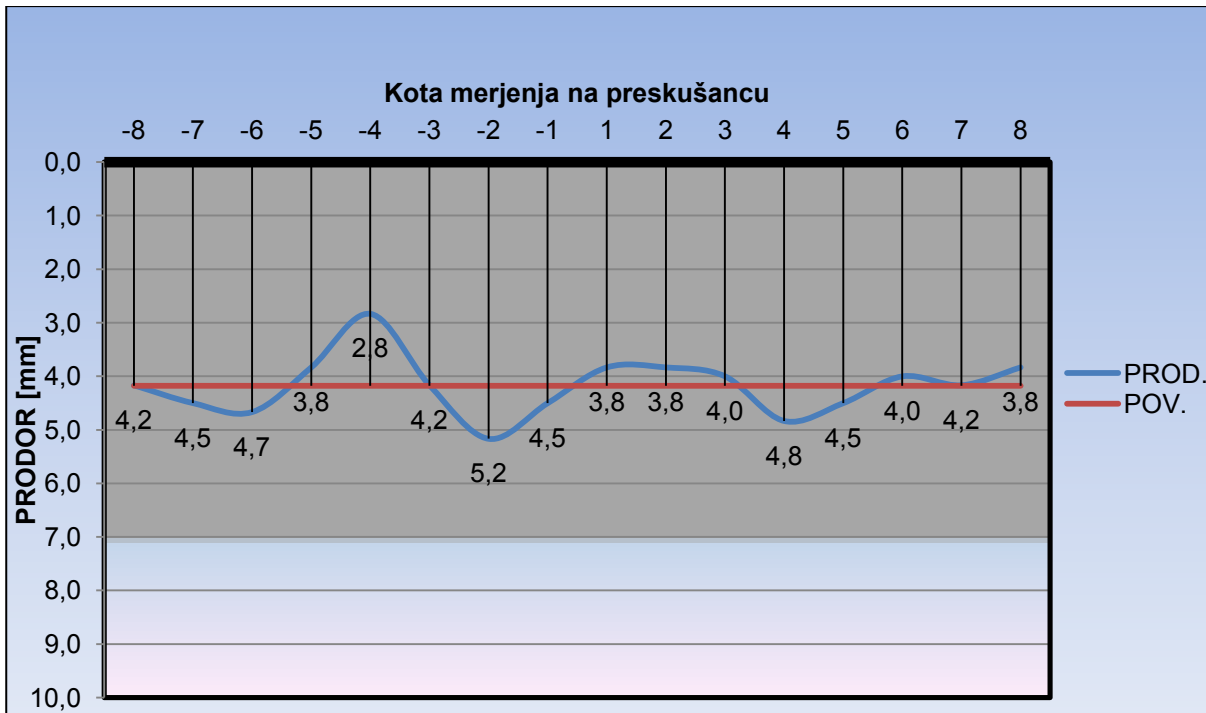
Grafikon 10: Globina prodora kloridov za mešanico M1 po 50 ciklih

## Mešanica M2



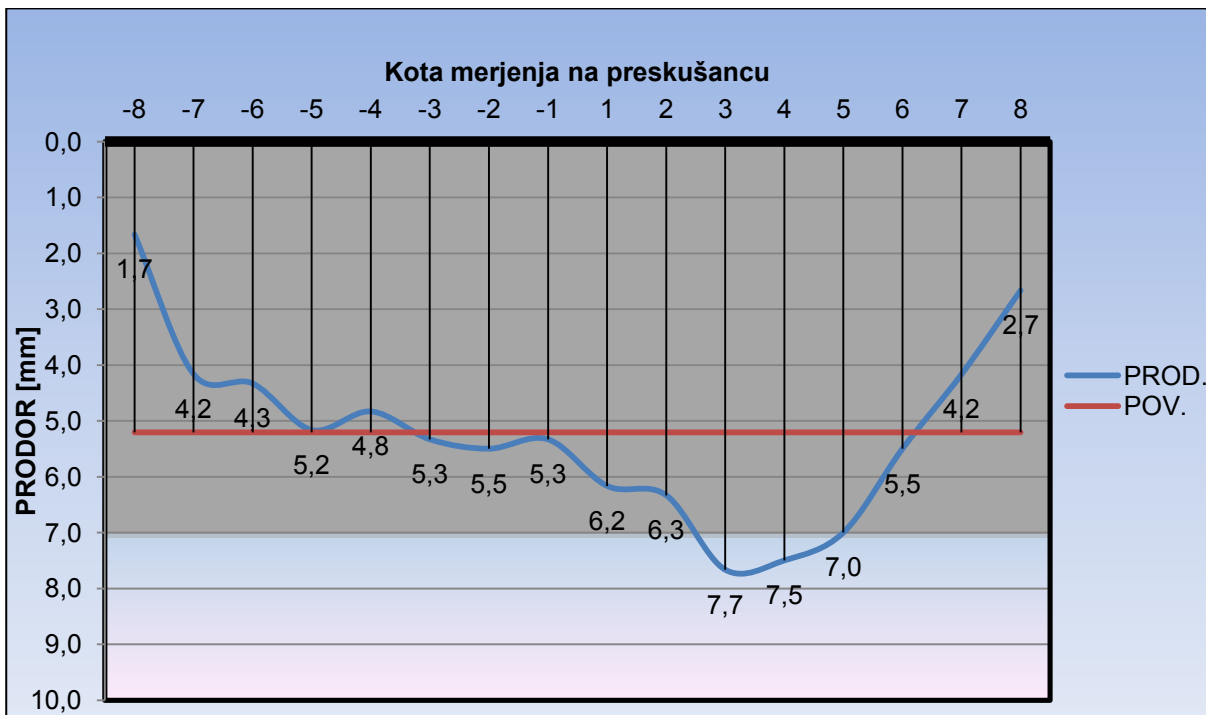
Grafikon 11: Globina prodora kloridov za mešanico M2 po 50 ciklih

**Mešanica M3**



Grafikon 12: Globina prodora kloridov za mešanico M3 po 25 ciklih

**Mešanica M5**



Grafikon 13: Globina prodora kloridov za mešanico M5 po 50 ciklih

V neposredni primerjavi vseh mešanic z različnim odstotkom EFP v vezivu (0, 20, 50 %) opazamo, da je bil prodor kloridov v beton najmanjši pri mešanici M1, s povprečno vrednostjo vseh M1 preskušancev 2,7 mm. Pri mešanici z 20 % EFP v vezivu smo dobili dva precej različna rezultata, in sicer so kloridi v mešanico M2 prodrli 3,8 mm globoko, v mešanico M5 pa kar 5,2 mm globoko. V mešanico M3, ki se je izkazala z najslabšim rezultatom OPZT, so kloridi prodrli 4,2 mm globoko, vendar je potrebno poudariti, da so bili preskušanci M3 kloridni raztopini izpostavljeni zgolj 25 ciklov (\*), ostali preskušanci pa 50 ciklov.

V primerjavi obeh mešanic z 20 % EFP v vezivu se je bolje izkazala mešanica M2 kljub slabšemu rezultatu preskusa OPZT. V našem primeru se je torej izkazalo, da ima vrsta EFP vidno vlogo pri prodoru kloridov, saj so v preskušance M5, ki vsebujejo EFP 2, kloridi prodrli globlje kljub boljšemu rezultatu OPZT.

Medsebojno lahko primerjamo tudi prodor kloridov v preskušance, ki so vsi vsebovali enak EFP 1, le v različnih deležih. Po rezultatih (0 % EFP – 2,7 mm, 20 % – 3,8 mm, 50 % – 4,2 mm\*) je vidno, da je prodor kloridov povezan tudi z vsebnostjo EFP v betonu. Zanimivo bi bilo meriti preskušance M3 tudi po 50 ciklih izpostavljenosti kloridov, saj bi kloridi zagotovo prodrli še globlje.

Iz grafikonov je razvidno, da so v preskušano skupino M1, ki je najbolje prestala preskus OPZT in preskus prodora kloridov, kloridi prodirali tudi najenakomerneje. Prodiranje je bilo najbolj neenakomerno pri mešanici M5, ki ima tudi najgloblji povprečni prodor.

## 7 ZAKLJUČEK

Zaključimo lahko, da smo preskus uspešno izpeljali. Prikazali smo zanimiv potek eksperimenta, ki nam je že med postopkom zastavljal vedno nove izzive in marsikatero neodgovorjeno »zakaj – zato« vprašanje.

Vpliv treh vrst talilnih soli, in sicer raztopine natrijevega, magnezijevega in kalcijevega klorida na osnovi enakega števila molov kloridnih ionov pri nizkih koncentracijah, ni pokazal razlik v luščenju betona M1, projektiranega za XF4 stopnjo izpostavljenosti po 50 ciklih zmrzovanja/tajanja. S stališča degradacije betona je raztopina NaCl najbolj primerna za uporabo pri soljenju cestne infrastrukture, kar se je, razen v enem primeru, tudi potrdilo. Problem natrijeve soli je temperatura uporabnosti, saj je NaCl praktično uporabna le do  $-10^{\circ}\text{C}$ . Ker je NaCl lahko dostopna snov, je verjetno ena boljših izbir za soljenje uporabnih površin v zimskem času. Raztopina  $\text{CaCl}_2$  se je izkazala za zelo močen agresor na beton. Skrb vzbujajoče je dejstvo, da že ob kratkem brskanju po medmrežju lahko zasledimo mnogo produktov za preprečevanje poledice, ki se reklamirajo kot najbolj uspešni in vsebujejo  $\text{CaCl}_2$ , vendar nikjer ni omenjeno, da ima prav ta spojina velik vpliv na gradbeni material v našem okolju. Magnezijeva sol se je izkazala za najvarnejši način odpravljanja poledice, vprašanje je le, če je dovolj dostopna ter kako je z ekonomičnostjo produkta. Pri preiskavi izbire veziva v betonu smo le potrdili že dokazano. Najbolj odporen beton na zmrzovanje/tajanje je iz čistega cementa. Vredni razmisleka so tudi mineralni dodatki v betonu, saj z nizkim deležem zamenjave cementa za EFP nismo bistveno vplivali na trajnost betona v ekstremnih razmerah, bi pa s takim betonom, z ekološkega gledišča, bistveno pripomogli k bolj »zeleni« gradnji. Zaključimo lahko, da mineralni dodatek nikakor ni izboljšal rezultatov preskusa. Zanimive so bile tudi velike razlike med različnimi dobavitelji EFP, kar pomeni, da EFP-ji med seboj niso enaki in da je pred uporabo določenega produkta potrebno izpeljati temeljite preiskave, saj posploševanje ne bi dalo realnih rezultatov. Za nadaljnje preskuse in raziskave je v prihodnosti še veliko možnosti, najrazličnejših kombinacij ter s tem še neodgovorjenih vprašanj, ki zadevajo uporabnost mineralnih dodatkov v betonu. Le dobro poznavanje uporabljenih materialov nam lahko zagotovi kakovostno in ekonomično gradnjo, h kateri stremi vsak pravi gradbenik.

## VIRI

Lešnik, A. 2012. Vpliv vrste agregata in mineralnega dodatka na reološke in mehanske lastnosti lahkogradljivega betona. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Lešnik): 71 str.

Monteiro, P. Durability of concrete, ppt. University of California Berkeley.  
<http://www.ce.berkeley.edu/~paulmont/CE60New/durability.pdf> (Pridobljeno september 2013)

NCHRP Report 577. Guidelines for the Selection of Snow and Ice Control Materials to Mitigate Environmental Impacts. Levelton Consultants Limited. Richmond, BC. 211 str.

Pajk, U. 2009. Vpliv različnih mlevnih dodatkov na lastnosti cementa CEM V/A (S-V-P) 42,5N LH. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Pajk): 80 str.

Prinčič, T. 2011. Chloride penetration in fly ash concrete. Magnel Laboratory for Concrete Research – Department of Structural Engineering. (osebna komunikacija)

Prinčič, T., Bokan-Bosiljkov, V., Cotič, Z. 2012. Vpliv vrste in koncentracije kloridnih soli na luščenje betonskih elementov premostitvenih objektov zaradi zmrzovanja in tajanja, <http://www.zabeton.si/pdf/5.pdf> (Pridobljeno julij 2013)

Valenza II, J.J., Scherer, G.W., 2007. A review of salt scaling: I. Phenomenology. Cement and Concrete Research 37: 1007-1021.

Žarnič, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

Žarnič, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V. 2009. Gradiva - Vaje. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 100 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. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Žnidaršič): 90 str.

## Uporabljeni standardi

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

SIST 1026:2008. Beton – 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206-1.

SIST EN 1992-1-1:2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij, 1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 12350-2:2009. Preskušanje svežega betona – 2. del: Preskus posedom stožca.

SIST EN 12350-7:2001. Preskušanje svežega betona – 7. del: Vsebnost zraka. Porozimeterske metode.

## Ostali viri

CIMSA. 2010.

<http://www.cimsa.com.tr/en-us/content.aspx?CtID=89> (Pridobljeno 16. 8. 2013)

SIKA. 2010.

<http://www.sika.ba/tehnicki-listovi/444/Sika-Viscocrete-5-NPL.pdf> (Pridobljeno 17. 8. 2013)

TKK. 2005.

<http://www.tkk.si/default.asp?id=2743> (Pridobljeno 17. 8. 2013)

INUM. 2013.

<http://www.inum-murn.si/img/vodotesnost2.jpg> (Pridobljeno 10. 9. 2013)

Solne raztopine. 2002

<http://www.saltinstitute.org/content/download/4264/23275> (Pridobljeno 11. 9. 2013)

Srebrov nitrat. 2009

[http://www2.pef.uni-lj.si/kemija/projekti/ionske\\_reakcije/reakcija\\_med\\_agno3aq\\_in\\_naclaq.html](http://www2.pef.uni-lj.si/kemija/projekti/ionske_reakcije/reakcija_med_agno3aq_in_naclaq.html)

(Pridobljeno 18. 9. 2013)