

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:

Končina, B., 2013. Raba elektrofiltrskega pepela za izdelavo hidravlično vezanih plasti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Petkovšek, A.): 49 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:

Končina, B., 2013. Raba elektrofiltrskega pepela za izdelavo hidravlično vezanih plasti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Petkovšek, A.): 49 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



**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJ  
PRVE STOPNJE  
OPERATIVNEGA  
GRADBENIŠTVA**

Kandidat:

**BOŠTJAN KONČINA**

**RABA ELEKTROFILTRSKEGA PEPELA ZA  
IZDELAVO HIDRAVLIČNO VEZANIH PLASTI**

Diplomska naloga št.: 47/OG-MK

**THE USE OF THE FLY ASH FOR HYDRAULICALLY  
BOUND MIXTURES**

Graduation thesis No.: 47/OG-MK

**Mentorica:**  
doc. dr. Ana Petkovšek

**Predsednik komisije:**  
doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 19. 12. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## **IZJAVE**

Podpisani Boštjan Končina izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Raba elektrofiltrskega pepela za izdelavo hidravlično vezanih plasti.«

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

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

Ljubljana, 2. 12. 2013

Boštjan Končina

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

<b>UDK:</b>	624.131(043.2)
<b>Avtor:</b>	Boštjan Končina
<b>Mentorica:</b>	doc. dr. Ana Petkovšek
<b>Naslov:</b>	Raba elektrofiltrskega pepela za izdelavo hidravlično vezanih plasti
<b>Tip dokumenta:</b>	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
<b>Obseg in oprema:</b>	49 str., 14 tabel, 51 sl., 2 en., 5 pril.
<b>Ključne besede:</b>	elektrofiltrski pepel, hidravlično vezane plasti, vezanje, zmrzljinska odpornost, namakanje, izsuševanje

### **Izvleček**

V diplomski nalogi smo skušali ovrednotiti vpliv količine elektrofiltrskega pepela na trdnost hidravlično vezanih plasti. Znano je, da nekateri pepeli ob primernem dodatku vode po nabijanju vežejo. Zaradi te lastnosti so uporabni tudi kot stabilizacijsko sredstvo pri izdelavi hidravlično vezanih plasti. Elektrofiltrski pepeli nastajajo kot stranski produkti pri proizvodnji električne energije, zato je njihova uporaba primerna iz ekološkega, kot tudi ekonomskega vidika.

V okviru raziskav smo skušali ugotoviti, kako na mehanske lastnosti mešanic, z elektrofiltrskim pepelom vezanega kamenega agregata, vplivajo količina pepela, različni načini staranja ter nega vzorcev. Poleg tega smo s testi zmrzljinske odpornosti in odpornosti proti namakanju in sušenju skušali posnemati različne spremenljive klimatske pogoje, ki so jim v naravi izpostavljene hidravlično vezane plasti cest.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDK:</b>	624.131(043.2)
<b>Author:</b>	Boštjan Končina
<b>Supervisor:</b>	Assist. Professor Ana Petkovšek, PhD
<b>Title:</b>	The use of fly ash for hydraulically bound mixtures
<b>Document type:</b>	Graduation thesis - Higher education professional study
<b>Notes:</b>	49 p., 14 tab., 51 fig., 2 eq., 5 anexes.
<b>Keywords:</b>	fly ash, hydraulically bound mixtures, hardening, frost resistance, drying

### **Abstract**

The aim of my diploma paper is to evaluate the influence of amount of fly ash to the strength of the hydraulically bound mixtures. It is well known that the calcareous fly ashes express hydraulic and pozzolanic properties and can be used as hydraulic binder instead of cement for hydraulically bound mixtures for roads and other trafficked areas. Fly ashes are fine powder produced as by-products by the combustion of pulverized coal or lignite in energy generating plants and captured by mechanical or electrostatic precipitators. Its use as a binder is welcome from the environmental and economical point of view.

With the laboratory investigation we tried to find out how the amount of the added fly ash influences to the strength of the hydraulically bound dolomite aggregate. Our special attention was paid to the investigation with which we try to define, how different ways of ageing and maintenance of samples during ageing influence to the mechanical characteristics of laboratory mixtures.

## **ZAHVALA**

Za vodenje, nasvete in strokovno pomoč pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorici doc. dr. Ani Petkovšek. Hkrati se za pomoč pri eksperimentalnem delu diplome zahvaljujem kolektivu Katedre za mehaniko tal z laboratorijem.

Svoji družini in dekletu se zahvaljujem za spodbudo v času mojega študija in nastajanja diplomske naloge.

## KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO TABEL	X
KRATICE	XI
POMEN SIMBOLOV	XII
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 OZADJE NALOGE</b>	<b>2</b>
<b>3 VELJAVNI PREDPISI IN STANDARDI</b>	<b>3</b>
<b>4 EKSPERIMENTALNI PROGRAM</b>	<b>5</b>
4.1 Opis	5
4.1.1 Priprava vzorcev	5
4.1.2 Načini staranja in negovanja vzorcev	5
4.1.2.1 Načini staranja in negovanja vzorcev iz mešanice MIX1 s 6 % masnim deležem EFP	5
4.1.2.2 Načini staranja in negovanja vzorcev iz mešanice MIX2 z 10 % masnim deležem EFP	6
4.2 Uporabljeni materiali	8
4.2.1 Agregat	8
4.2.1.1 Naravna vlažnost agregata	8
4.2.1.2 Gostota zrn	8
4.2.1.3 Zrnava sestava	9
4.2.2 Elektrofiltrski pepel	10
4.2.2.1 Gostota zrn	10
4.2.2.2 Zrnava sestava	10
4.2.2.3 Vežanje EFP	10
4.2.2.4 Zgoščanje EFP	11
4.2.2.5 Strižna trdnost EFP	11
4.2.2.6 Deformabilnost in prepustnost EFP	12
4.2.3 Voda	12
4.3 Postopki	12
4.3.1 Proctorjev preskus za določitev optimalne vlage mešanice (SIST EN 13286-2:2005)	12



4.3.2	Priprava vzorcev po Proctorjevem postopku	14
4.3.3	Tlačni preskus hidravlično vezanih zmesi (SIST EN 13286-41:2004)	14
4.3.4	Razcepna natezna trdnost (SIST EN 13286-42:2004)	15
4.3.5	Preizkus zmrzljinske odpornosti vzorcev	16
4.3.6	Preizkus namakanja in sušenja vzorcev	16
<b>5</b>	<b>ANALIZA REZULTATOV</b>	<b>17</b>
5.1	Rezultati mešanice MIX1 s 6 % masnim deležem EFP	17
5.1.1	Rezultati modificiranega Proctorjevega preizkusa	17
5.1.2	Rezultati enoosne tlačne trdnosti	17
5.1.2.1	Rezultati preiskav, izvedenih na vzorcih, staranih v foliji in postavljenih v vlažno komoro	18
5.1.2.2	Rezultati preiskav vzorcev, ki so bili neoviti starani v vlažni komori tako, da niso bili v neposrednem stiku z vodo	20
5.1.3	Preiskave razcepne natezne trdnosti	22
5.2	Rezultati mešanice MIX2 z 10 % masnim deležem EFP	23
5.2.1	Rezultati modificiranega Proctorjevega preizkusa	23
5.2.2	Rezultati enoosne tlačne trdnosti	24
5.2.2.1	Rezultati preiskav, izvedenih na vzorcih, staranih v foliji in postavljenih v vlažno komoro	24
5.2.2.2	Rezultati preiskav vzorca, ki je bil neovit staran v vlažni komori tako, da ni bil v neposrednem stiku z vodo	26
5.2.2.3	Rezultati vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom zmrzovanja in tajanja	27
5.2.2.4	Rezultati vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom namakanja in sušenja	36
5.2.3	Rezultati razcepne natezne trdnosti	41
<b>6</b>	<b>RAZPRAVA</b>	<b>42</b>
6.1	Uvodne ugotovitve	42
6.2	Prirast tlačne trdnosti glede na način staranja oziroma namakanja vzorcev	42
6.3	Enoosna tlačna trdnost vzorcev iz mešanice MIX1 s 6 % pepela in mešanice MIX2 z 10 % pepela	43
6.4	Rezultati razcepne natezne trdnosti (RNT) vzorcev, pripravljenih iz mešanice MIX1 s 6 % in MIX2 z 10 % EFP	44
6.5	Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja	44
6.6	Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja	45
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>47</b>
	<b>VIRI</b>	<b>48</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Vzorci, zaviti v folijo in položeni v zatesnjeno komoro	5
Slika 2: Vlažna komora, v kateri so se starali neoviti vzorci	6
Slika 3: Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja	7
Slika 4: Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja	8
Slika 5: Krivulja zrnastostne sestave dolomitnega drobljenca iz kamnoloma Lukovica	9
Slika 6: Krivulja zrnastosti uporabljenega EFP iz Termoelektrarne Trbovlje (Petkovšek s sod., 2013)	10
Slika 7: Naraščanje trdnosti uporabljenega EFP iz Termoelektrarne Trbovlje s časom (Petkovšek s sod., 2013)	11
Slika 8: Proctorjeva krivulja za uporabljeni EFP iz Termoelektrarne Trbovlje (Petkovšek s sod., 2013)	11
Slika 9: Odvisnost suhe gostote od vlage in energije zgoščanja (Vaje, 2010/2011)	13
Slika 10: Naprava za izvedbo MPP	13
Slika 11: Naprava za preiskavo ETT	15
Slika 12: Naprava za preiskavo RNT	16
Slika 13: Proctorjeva krivulja za mešanico MIX1, pripravljeno iz gramoza in s 6 % masnim deležem EFP	17
Slika 14: ETT vzorcev, staranih v foliji (postavljenih v vlažno komoro), ki so bili pred preiskavo za 4 ure preplavljeni z vodo	19
Slika 15: ETT vzorcev, staranih v foliji (postavljenih v vlažno komoro)	20
Slika 16: ETT vzorcev, ki so bili neoviti starani v vlažni komori in pred preiskavo za 4 ure potopljeni v vodo	21
Slika 17: ETT vzorcev, staranih neovito, v vlažni komori, ki pred preiskavo niso bili namočeni	22
Slika 18: RNT valjastih vzorcev, pripravljenih iz mešanice MIX1	23
Slika 19: Proctorjeva krivulja za mešanico MIX2, pripravljeno iz gramoza in z 10 % masnim deležem EFP	23
Slika 20: ETT vzorcev, staranih v foliji (postavljenih v vlažno komoro), ki so bili pred preiskavo za 4 ure preplavljeni z vodo	24
Slika 21: ETT vzorcev, staranih v foliji, ki niso bili namočeni	25
Slika 22: ETT vzorca mešanice MIX2, ki je bil neovit staran v vlažni komori	26
Slika 23: ETT vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom zmrzovanja in tajanja v vodi, po 26 dneh	27
Slika 24: Spreminjanje mase vzorca MIX2-13 med preizkusom zmrzlinke odpornosti	28
Slika 25: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-13 med preizkusom zmrzlinke odpornosti	28
Slika 26: Spreminjanje mase vzorca MIX2-14 med preizkusom zmrzlinke odpornosti	29
Slika 27: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-14 med preizkusom zmrzlinke odpornosti	29
Slika 28: ETT vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom zmrzovanja in tajanja na zraku, po 26 dneh	30

Slika 29: Spreminjanje mase vzorca MIX2-9 med preizkusom zmrzljinske odpornosti	31
Slika 30: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-9 med preizkusom zmrzljinske odpornosti	31
Slika 31: Spreminjanje mase vzorca MIX2-10 med preizkusom zmrzljinske odpornosti	32
Slika 32: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-10 med preizkusom zmrzljinske odpornosti	32
Slika 33: ETT vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom zmrzovanja in tajanja na filcu, zasičenem z vodo, po 26 dneh	33
Slika 34: Spreminjanje mase vzorca MIX2-11 med preizkusom zmrzljinske odpornosti	34
Slika 35: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-11 med preizkusom zmrzljinske odpornosti	34
Slika 36: Spreminjanje mase vzorca MIX2-12 med preizkusom zmrzljinske odpornosti	35
Slika 37: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-12 med preizkusom zmrzljinske odpornosti	35
Slika 38: ETT vzorcev iz mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja	36
Slika 39: Sprememba mase vzorca MIX2-5, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja v foliji	37
Slika 40: Sprememba volumna vzorca MIX2-5, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja v foliji	37
Slika 41: Sprememba mase vzorca MIX2-6, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja v foliji	38
Slika 42: Sprememba volumna vzorca MIX2-6, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja v foliji	38
Slika 43: Sprememba mase vzorca MIX2-7, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja na zraku	39
Slika 44: Sprememba volumna vzorca MIX2-7, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja na zraku	39
Slika 45: Sprememba mase vzorca MIX2-8, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja na zraku	40
Slika 46: Sprememba volumna vzorca MIX2-8, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja na zraku	40
Slika 47: RNT valjastih vzorcev, pripravljenih iz mešanice MIX2	41
Slika 48: Primerjava rezultatov ETT vzorcev iz mešanice MIX1	42
Slika 49: Primerjava rezultatov ETT glede na različne mešanice in načine staranja	43
Slika 50: Primerjava rezultatov RNT glede na različno sestavljene mešanice	44
Slika 51: Primerjava ETT vzorcev, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja	45

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Primerjava zahtev iz TSC 06.320 in SIST EN 14227-3	3
Tabela 2: Podatki o vzorcih mešanice MIX1, ki so bili starani zaviti v folijo in položeni v vlažno komoro ter pred preiskavo za 4 ure namočeni v vodo	18
Tabela 3: Podatki o vzorcih mešanice MIX1, ki so bili starani zaviti v folijo in položeni v vlažno komoro ter pred preiskavo niso bili namočeni	19
Tabela 4: Podatki o vzorcih, staranih v vlažni komori, mešanice MIX1, ki so bili pred preiskavo za 4 ure potopljeni v vodo	20
Tabela 5: Podatki o vzorcih, neovito staranih v vlažni komori, ki pred preiskavo niso bili namočeni	21
Tabela 6: Podatki o vzorcih, pripravljenih iz mešanice MIX1, na katerih je bila izvedena RNT	22
Tabela 7: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili pred preiskavo za 4 ure preplavljeni z vodo	24
Tabela 8: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, staranih v foliji (položenih v vlažno komoro), ki niso bili namočeni	25
Tabela 9: Podatki o vzorcu mešanice MIX2, ki je bil neovit staran v vlažni komori	26
Tabela 10: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja v vodi	27
Tabela 11: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja na zraku	30
Tabela 12: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja na filcu, zasičenem z vodo	33
Tabela 13: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja	36
Tabela 14: Vzorca mešanice MIX2, starana v foliji	41

## KRATICE

EFP	Elektrofiltrski pepel
ETT	Enosna tlačna trdnost
M1	Delovna oznaka za predhodno laboratorijsko mešanico
MIX	Delovna oznaka za laboratorijski mešanici
RNT	Razcepna natezna trdnost
TSC	Tehnična specifikacija za javne ceste TSC 06.320:2001

## POMEN SIMBOLOV

$m$	masa (g)
$m_{po\ nabijanju}$	masa vzorca ob pripravi (g)
$m_{po\ namakanju}$	masa staranega vzorca po namakanju (g)
$m_{pred\ namakanjem}$	masa staranega vzorca tik pred namakanjem (g)
$m_{pred\ preiskavo}$	masa staranega vzorca pred preiskavo (g)
$w$	vlaga (%)
$w_{po\ namakanju}$	vlaga vzorca po namakanju (%)
$w_{pred\ namakanjem}$	vlaga vzorca tik pred namakanjem (%)
$\rho$	gostota (g/cm <sup>3</sup> , t/m <sup>3</sup> )
$\rho_d$	suha gostota (g/cm <sup>3</sup> , t/m <sup>3</sup> )
$F$	maksimalna porušna sila vzorca (N)
$A_c$	površina prereza vzorca (mm <sup>2</sup> )
$D$	premer vzorca (mm)
$H$	višina vzorca (mm)
$R_c$	enoosna tlačna trdnost vzorca (kPa)
$R_{it}$	razcepna natezna trdnost (kPa)
$S_r$	stopnja saturacije (%)
$S_{r_{po\ namakanju}}$	stopnja zasičenosti vzorca po namakanju (%)
$S_{r_{pred\ namakanjem}}$	stopnja zasičenosti vzorca tik pred namakanjem (%)

## 1 UVOD

Elektrofiltrski pepel (EFP), ki ima hidravlične in pucolanske lastnosti, je lahko hidravlično vezivo, ki ob stiku z vodo veže in se strdi. V raziskavah, na katerih je temeljila diplomska naloga, smo ugotavljali, kako količina dodanega pepela in način staranja vzorcev vplivata na trdnost hidravlično vezanih plasti. Primerjavo časovnega prirasta tlačne in razcepne natezne trdnosti smo izvedli na različno negovanih serijah vzorcev, pripravljenih iz dveh različnih mešanic. Osnovni material je v obeh mešanicah predstavljal tamponski drobljenec, ki se običajno uporablja v cestogradnji, kot vezivo pa je bil uporabljen EFP iz Termoelektrarne Trbovlje.

V nalogi smo poleg vpliva količine pepela na vezanje skušali analizirati tudi vpliv spremenljivih vremenskih razmer, katerim so v naravi izpostavljene hidravlično vezane plasti cest. Zaradi različnih klimatskih pojavov lahko pride v nosilnih plasteh cest do zmrzovanja, tajanja, namakanja in izsuševanja, kar pa lahko povzroči nastanek ledenih leč, razpad, nabrekanje in krčenje vgrajenega materiala. Posledično lahko pride do zmanjšanja trdnosti z EFP vezane plasti. Da bi ovrednotili vpliv neugodnih vremenskih pogojev, smo preverili odpornost valjastih vzorcev na zmrzlinško odpornost in odpornost proti namakanju in sušenju.

## 2 OZADJE NALOGE

V voziščnih konstrukcijah se takoj po izgradnji prične proces utrujanja oz. staranja. Poškodbe materialov v konstrukciji so posledica istočasnega delovanja prometnih obremenitev in obremenitev, ki izvirajo iz okolja. Značilne oblike obremenitev okolja so predvsem vplivi padavin (poleti dež, pozimi sneg), vplivi temperaturnih sprememb ter vplivi podzemne vode (Žmavc, 2010).

Stanje slovenskih cest je iz leta v leto slabše. Ceste razpadajo in po vsaki zimi so bolj dotrajane. To potrjujejo tudi podatki, ki jih objavlja Direkcija Republike Slovenije za ceste. Iz njihovih ocen stanja po metodi modificiranega švicarskega indeksa (MSI), je moč razbrati, da je več kot 40 % cest iz omrežja, s katerim opravljajo, v zelo slabem stanju. V zelo slabem, slabem in mejnem stanju, pa jih je kar okoli 65 % (Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, 2013). To nazorno priča o tem, da so številne slovenske ceste potrebne obnove.

Pri obnovitvah in sanacijah obstoječih cest se uporabljajo metode, kot so lokalne sanacije, preplastitve in ojačitve ali pa zamenjave celotne voziščne konstrukcije. Predvsem zadnje omenjena metoda je najbolj neugodna, saj je draga in zamudna. Zato so zanimivi tudi drugi načini, primerni za obnovitve cest. Ena izmed rešitev je stabilizacija posameznih plasti voziščne konstrukcije ter reciklaža obstoječih slojev voziščne konstrukcije z uporabo EFP. Z njim lahko spremenimo in izboljšamo trdnostne in deformacijske lastnosti ter kvaliteto osnovnih materialov (Svetličič, 2010).

Znano je, da nekateri EFP ob primernem dodatku vode po nabijanju vežejo. Zaradi te lastnosti lahko to surovino uporabimo tudi kot stabilizacijsko sredstvo pri izdelavi hidravlično vezanih plasti. V Sloveniji je sicer v dosednji praksi kot hidravlično vezivo najbolj uveljavljen cement, vendar pa ga lahko uspešno nadomestimo z EFP.

Raba EFP je tudi v skladu s usmeritvami Evropske unije o »zelenem javnem naročanju«. EFP namreč nastaja kot stranski produkt pri izgorevanju premoga za proizvodnjo električne energije. Njegove količine so zelo velike, zato predstavljajo velik ekološki problem. Z uporabo EFP zmanjšamo količino toplogrednega plina, ki nastaja pri proizvodnji cementa in uhaja v ozračje. Proizvodnja cementa namreč za vsako tono proizvedenega produkta v ozračje izpusti okoli eno tono CO<sub>2</sub> (ACCA, 2008). EFP je cenejši od cementa, ker nastaja kot stranski produkt in predstavlja odpadno surovino.



### 3 VELJAVNI PREDPISI IN STANDARDI

Zahteve, kriteriji in postopki testiranja za s hidravličnimi vezivi vezan kameni agregat so podani v:

- Slovenski tehnični specifikaciji TSC 06.320 : 2001 – Vezane spodnje nosilne plasti s hidravličnimi vezivi;
- standardu SIST EN 14227-3 : 2005 – Z elektrofiltrskim pepelom vezane zmesi.

Primerjavo zahtev iz obeh predpisov prikazuje tabela 1. Oba predpisa se med seboj močno razlikujeta. To nazorno kaže na potrebo po njihovi uskladitvi. Tehnična specifikacija za javne ceste (TSC) kot hidravlično vezivo obravnava le cement, medtem ko SIST EN 14227-3 podaja zahteve in postopke za stabilizacijo z EFP. Zaradi velikih razlik je nemogoče zadostiti obema predpisoma hkrati in ju je praktično nemogoče primerjati.

Tabela 1: Primerjava zahtev iz TSC 06.320 in SIST EN 14227-3

Predpis	TSC 06.320 : 2001	SIST EN 14227-3 : 2005
Vezivo	Obravnava le cement. Uporabo EFP omenja samo kot možen dodatek pri sestavljenem vezivu s cementom.	Obravnava EFP. Njegove lastnosti morajo biti v skladu s standardom EN 14227-4.
Kameni agregat	Podaja mejne vrednosti presejkov zmesi kamnitih zrn. Kamnita zrna morajo zadostiti zahtevam glede na: <ul style="list-style-type: none"><li>– tlačno trdnost zrn kamnine,</li><li>– odpornost zrn proti drobljenju po metodi Los Angeles,</li><li>– odpornost zrn proti učinkom zmrzovanja, določena s 5 cikli kristalizacijskega preskusa z natrijevim sulfatom,</li><li>– delež zrn, manjših od 0,063 mm.</li></ul>	Standard podaja 8 različnih zrnavostnih ovojnic, znotraj 5 možnih mešanic. Kameni agregat mora izpolnjevati zahteve, podane v standardu EN 13242.
Voda	Uporabna je vsaka pitna voda. Poleg pitne vode je uporabna tudi voda, ki zadosti zahtevanim vrednostim glede na: <ul style="list-style-type: none"><li>– vrednost PH,</li><li>– vsebnost sulfatov (SO<sub>4</sub>),</li><li>– vsebnost klorovih ionov,</li><li>– vsebnost soli.</li></ul>	Voda ne sme vsebovati snovi, ki bi vplivale na vezanje in lastnosti mešanice.
Vlažnost mešanice	Optimalno vlažnost je treba določiti po modificiranem postopku po Proctorju.	Vsebnost vode v mešanici mora biti taka, da so zagotovljene optimalne mehanske lastnosti mešanice. Določi se jo lahko s pomočjo Proctorjevega testa ali pa s kakšno izmed drugih metod po standardu EN 13286-1.

Priprava vzorcev	Vzorci morajo imeti obliko valja s premerom 15 cm in višino 15 cm. Pripravljene morajo biti po standardnem Proctorjevem postopku, z optimalno vlago, do povprečno 100 % in ne manj kot 97 % zgoščenosti.	Vzorci so v obliki valja ali kocke. Standard za hidravlično vezane zmesi za pripravo vzorcev dovoljuje štiri različne načine priprave vzorcev: <ul style="list-style-type: none"> <li>– nabijanje preizkušancev po Proctorju v skladu s standardom EN 13286-50,</li> <li>– izdelavo preizkušancev s pomočjo vibracijskega kladiva skladno z EN 13286-51,</li> <li>– pripravo preizkušancev z vibracijskim zgoščanjem po EN 13286-52,</li> <li>– pripravo preizkušancev z uporabo osnega zgoščevanja po standardu EN13286-53 (SIST EN 14227-3, 2004).</li> </ul>
Način staranja vzorcev	Vzorci morajo biti starani 7 dni v vlažni komori s 100 % vlago.	Starost in negovanje vzorcev morata biti določena v skladu z izkušnjami glede na namen uporabe.
Vrste mešanic z EF pepelom vezanih zmesi	Tega ne obravnava.	Standard določa 5 tipov mešanic z EFP vezanih zmesi: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. z EFP vezana zmes 1: Mešanica mora biti zrnivosti 0/31,5 mm, določena v skladu s standardom EN 993-1 ter tabelo, podano v standardu.</li> <li>2. z EFP vezana zmes 2: Mešanica se loči na tri podtipe, ki so odvisni od velikosti agregata. EFP je del veziva.</li> <li>3. z EFP vezana zmes 3: Mešanica mora biti sestavljena iz agregata z zrni manjšimi od 12,5 mm. Več kot 85 % zrn mora biti manjših od 6,3 mm, delež finih zrn pa ne sme biti manjši od 35 %. EFP je del veziva.</li> <li>4. z EFP vezana zmes 4: Mešanica se naredi po volji dobavitelja.</li> <li>5. z EFP vezana zmes 5: EFP je glavna sestavina in del veziva.</li> </ol>
Določitev mehanskih lastnosti vzorcev	Zahteva določitev enoosne tlačne trdnosti. Za vzorce podaja največjo priporočljivo in najmanjšo dovoljeno trdnost po 7 dneh. Določiti jo je treba na treh vzorcih, ki so 4 ure pred preiskavo namočeni v vodo.	Mehanske lastnosti morajo biti določene glede na eno izmed naslednjih metod: <ul style="list-style-type: none"> <li>– enoosna tlačna trdnost <math>R_c</math>,</li> <li>– kombinacija natezne trdnosti <math>R_t</math> in modula elastičnosti <math>E</math>.</li> </ul>
Odpornost mešanice proti zmrzovanju in tajanju	Zahteva preskus stabilizacijske mešanice proti zmrzovanju in tajanju, v primeru: <ul style="list-style-type: none"> <li>– ko je več kot 15 % zrn, manjših od 0,063 mm,</li> <li>– ko je več kot 10 % zrn krhkih,</li> <li>– ko ugotovimo, da je potrebna količina hidravličnega veziva manj kot 2 % (glede na suho gostoto zrn).</li> </ul>	Standard tega ne obravnava.

## 4 EKSPERIMENTALNI PROGRAM

### 4.1 Opis

V nalogi smo raziskovali, kako na trdost zbranega kamenega agregata vplivajo vsebnost EFP, način staranja in način negovanja pripravljenih valjastih vzorcev z različno vsebnostjo veziva.

V okviru raziskave sta bili pripravljene dve mešanici. Prva (MIX1) s 6 % masnim deležem in druga (MIX2) z 10 % masnim deležem EF pepela glede na suho maso uporabljenega gramoza.

#### 4.1.1 Priprava vzorcev

Vzorci so bili pripravljene po Proctorjevem postopku, opisanem v 4.3.2. Po iztiskanju iz kalupov smo jim za zagotovitev boljšega stika pri preiskavi tlačne trdnosti izravnali zgornjo površino.

#### 4.1.2 Načini staranja in negovanja vzorcev

##### 4.1.2.1 Načini staranja in negovanja vzorcev iz mešanice MIX1 s 6 % masnim deležem EFP

Mešanica MIX1 je bila pripravljena iz gramoza (GW-GM) zrnivosti frakcije 0/31,5 mm in 6 % masnim deležem EFP. Serija valjastih vzorcev je bila nabita po MPP. Vzorce smo pripravili pri 4,5 % vlagi, kljub temu da je Proctorjeva krivulja pokazala nekoliko višjo optimalno vlažnost. Tako smo se odločili, ker se je iz vzorcev z višjim odstotkom vlage izcejala voda, pri iztiskanju iz kalupov pa so se vzorci poškodovali ali porušili.

Vzorci mešanice MIX1 so bili starani in negovani na dva načina:

1. vzorci, zaviti v folijo, starani v vlažni komori

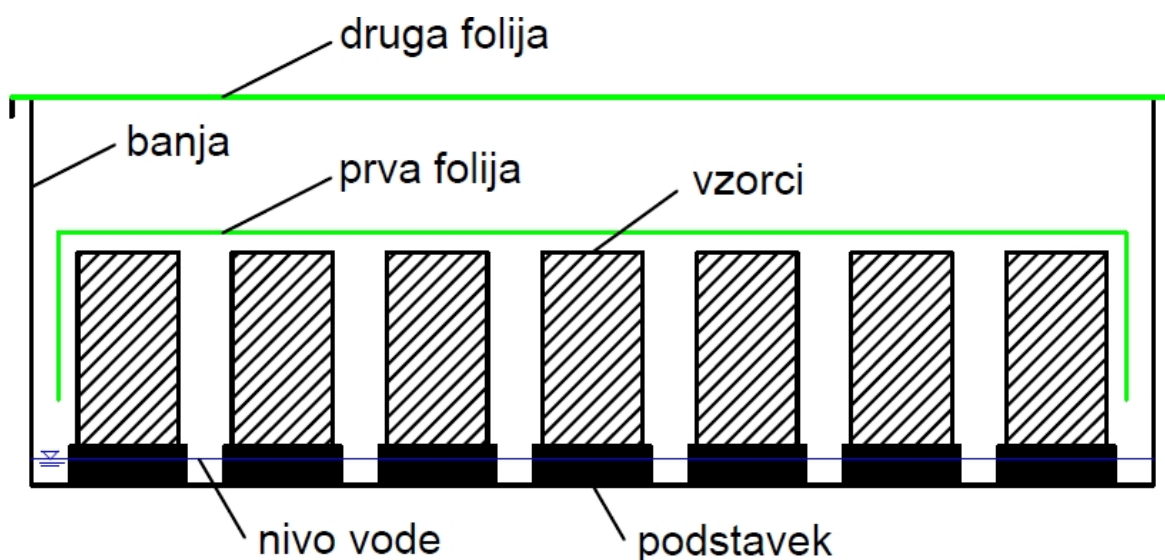
Vzorci so bili zaviti v plastično vrečko in dobro zatesnjeni z lepilnim trakom. Starani so bili pri sobni temperaturi, postavljeni v vlažno komoro (slika 1).



Slika 1: Vzorce, zaviti v folijo in položeni v zatesnjeno komoro

## 2. Neoviti vzorci, starani v vlažni komori

Valjasti vzorci, starani v vlažni komori, so bili prvi dan zaviti v plastično vrečko. Nato smo jih vzeli iz vrečke in položili v banjo na okrogle plastične podstavke, tako da so bili približno 3 cm dvignjeni od dna komore, kjer je bila ves čas staranja voda. Vzorci so bili prekriti s prvo folijo, kot prikazuje slika 2, druga folija pa je bila prilepljena po obodu banje. Tako so bili vzorci izpostavljeni 100 % vlagi. Starani so bili na sobni temperaturi.



Slika 2: Vlažna komora, v kateri so se starali neoviti vzorci

### 4.1.2.2 Načini staranja in negovanja vzorcev iz mešanice MIX2 z 10 % masnim deležem EFP

Mešanica MIX2 je bila pripravljena iz dolomitnega drobljenca (GW-GM) z 10 % masnim deležem EFP. Serija valjastih vzorcev je bila nabita po MPP pri 5,0 % vlažnosti. Tudi pri tej mešanici je Proctorjeva krivulja pokazala višjo optimalno vlažnost za doseg maksimalne suhe gostote, kot je bila izbrana vlaga, pri kateri smo pripravili vzorce. Tako smo se odločili zaradi enakih razlogov kot pri mešanici MIX1 (glej točko 4.1.2.1).

Valjasti vzorci iz serije MIX2 so bili starani in negovani na več različnih načinov:

1. vzorci, zaviti v folijo, postavljeni v vlažno komoro (način staranja je že opisan v točki 4.1.2.1 pod točko 1)
2. neoviti vzorci, starani v vlažni komori (način staranja je opisan v točki 4.1.2.1 pod točko 2)
3. vzorci, izpostavljeni 12. ciklom zmrzovanja in tajanja

Vzorce, ovite v folijo, smo starali 8 dni v vlažni komori, nato pa smo jih izpostavili 12. ciklom zmrzovanja in tajanja. Cikel zmrzovanja in tajanja je potekal tako, da so bili vzorci 16 ur zmrznjeni, 8 ur pa so se tajali na sobni temperaturi. Izjema so bili dneva prosti dnevi, ko je laboratorij zaprt in so bili vzorci zmrznjeni 65 ur, na temperaturi od  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Postopek zmrzovanja in tajanja smo izvajali na 3 različne načine (Slika 3):

- **1. način:** zmrzovanje – vzorec postavljen v zamrzovalno omaro na pladnju, tajanje – vzorec potopljen v vodo;
- **2. način:** zmrzovanje – vzorec postavljen v zamrzovalno omaro, tajanje – na sobni temperaturi;
- **3. način:** zmrzovanje in tajanje vzorcev, postavljenih na filc, zasičen z vodo. Po vsakem ciklu smo vzorca obrnili. Vzorca sta bila preizkušena primerljivo z JUS U.BI.050 VII-1969. Razlika je le, da ta zahteva 14 ciklov zmrzovanja in tajanja, izvedli pa smo jih le 12.

Vzorca, ki sta bila odtajana v vodi, sta bila za razliko od ostalih pred prvim ciklom zmrzovanja in tajanja za 8 ur namočena v vodo.



Slika 3: Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja

#### 4. Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja

Po sedemdnevem staranju vzorcev (trije so bili postavljeni v vlažno komoro zaviti v folijo, eden pa neovit) so bili ti izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja na sobni temperaturi. Namočeni so bili 16 ur, sušeni pa 8 ur, razen ob koncih tedna, ko so bili namočeni 65 ur. Vzorca so bili sušeni na dva načina. Dva vzorca sta bila sušena na zraku, dva pa zavita v folijo (slika 4).



Slika 4: Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja

## 4.2 Uporabljeni materiali

### 4.2.1 Agregat

Za kameni agregat je bil uporabljen dolomitni drobljenec iz kamnoloma Lukovica frakcije 0/31,5. Krivulja zrnastostne sestave je pokazala, da spada med dobro granulirane zameljene gramoze GW-GM.

Odvzeti material je bil na licu mesta dobro premešan s pomočjo bagerja in zaprt v plastične vreče. Tako je bilo poskrbljeno, da je material ohranjal svojo naravno vlažnost.

V laboratoriju so bile kasneje opravljene osnovne preiskave fizikalnih lastnosti, pomembne za identifikacijo agregata in pripravo mešanic z EFP. Rezultati so podani v točkah 4.2.1.1, 4.2.1.2 in 4.2.1.3.

#### 4.2.1.1 Naravna vlažnost agregata

Naravna vlažnost dolomitnega drobljenca je bila določena po standardu SIST/ISO/TS 17892-1:2004. Laboratorijsko določena naravna vlažnost znaša 3,12 %.

#### 4.2.1.2 Gostota zrn

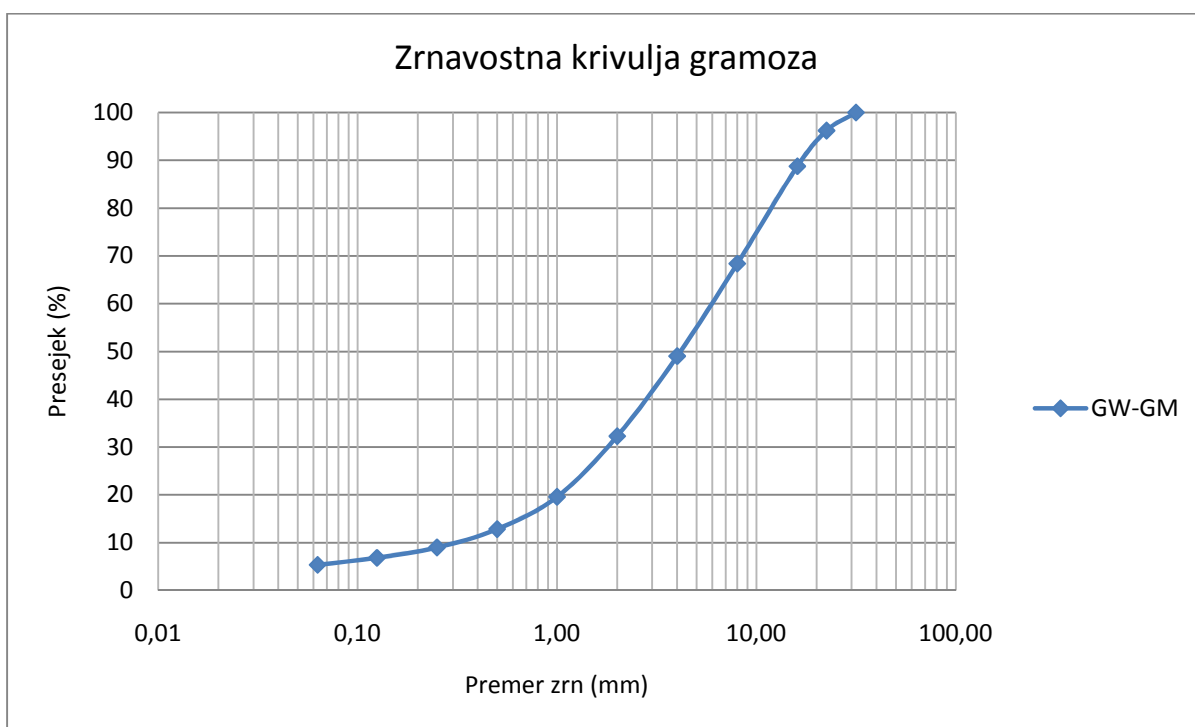
Gostota zrn dolomita je bila v laboratoriju določena s pomočjo piknometra po standardu SIST/ISO/TS 17892-3:2004. Uporabljena so bila fina zrna, manjša od 0,063 mm, ki so bila pridobljena pri analizi zrnastostne sestave kamenega agregata. Zrna so bila odsejana po mokrem postopku in posušena v peči. Izmerjena suha gostota znaša 2,80 t/m<sup>3</sup>.

#### 4.2.1.3 Zrnavostna sestava

Preiskava je bila opravljena v skladu s standardom SIST/ISO/TS 17892-4:2004.

Zrnavostno sestavo kamenega agregata smo določili tako, da smo iz večje količine homogenega vzorca odvzeli reprezentativni preizkušaneč mase 10 kg. Preizkušaneču smo najprej določili vlago, nato pa opravili sejhalno preiskavo.

Sejhalno analizo smo opravili po mokrem in suhem postopku. Najprej smo sejali po mokrem postopku na sitih nazivnih odprtih 31,5, 22,4, 16, 8, 1 in 0,063 mm. Ostanke na sitih ter presejek skozi sito 0,063 mm smo posušili v sušilniku in jim določili maso. Za določitev zrnivosti med 8 in 0,063 mm pa je bila uporabljena suha sejhalna analiza. Najprej smo ročno, na sitih odprtine 4, 2 in 1 mm, določili zrnivost med 4 in 1 mm. Ostanke na sitih med 0,5 in 0,063 mm pa smo določili s pomočjo vibracijske naprave s standardnim sestavkom sit 0,5, 0,25, 0,125, in 0,063 mm. Rezultati preiskave so razvidni iz slike 5.



Slika 5: Krivulja zrnivostne sestave dolomitnega drobljenca iz kamnoloma Lukovica

Po USCS (Unified Soil Classification System) spada agregat med meljaste gramoze GW-GM.

## 4.2.2 Elektrofiltrski pepel

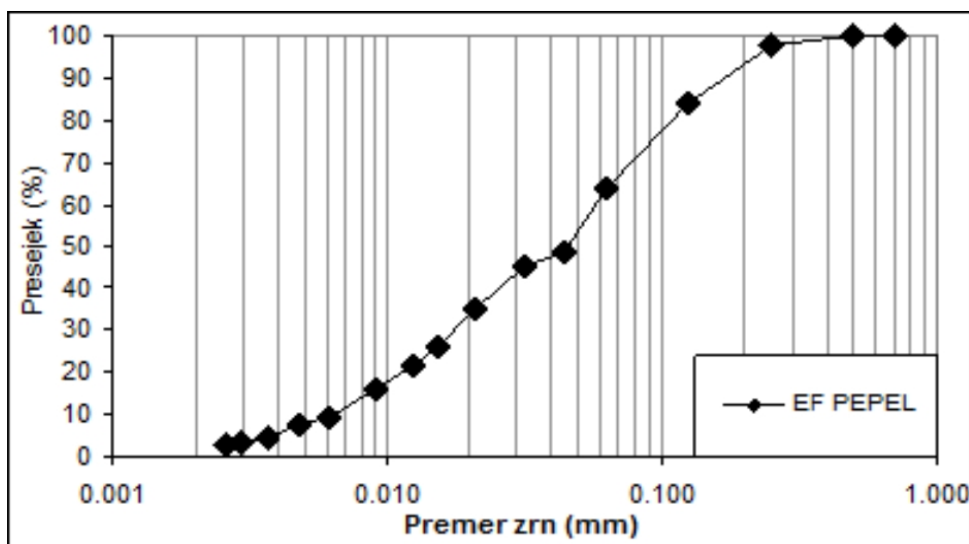
Uporabljen je bil EFP iz Termoelektrarne Trbovlje. Njegove osnovne fizikalne lastnosti so v nadaljevanju povzete iz elaborata (Petkovšek s sod., 2013).

### 4.2.2.1 Gostota zrn

EFP ima glede na zemljine nižjo gostoto zrn. Običajno se giblje med  $2,20 \pm 10 \text{ t/m}^3$ . Za uporabljeni pepel znaša  $2,15 \text{ t/m}^3$  (Petkovšek s sod., 2013).

### 4.2.2.2 Zrnastostna sestava

EFP je drobno zrnat material. Sestavljajo ga drobne porozne kroglice, ki so lahko velikostnega reda pod  $1 \mu\text{m}$  pa tja do  $200 \mu\text{m}$  (Petkovšek s sod., 2013). Krivuljo zrnastostne sestave uporabljenega pepela prikazuje slika 6.

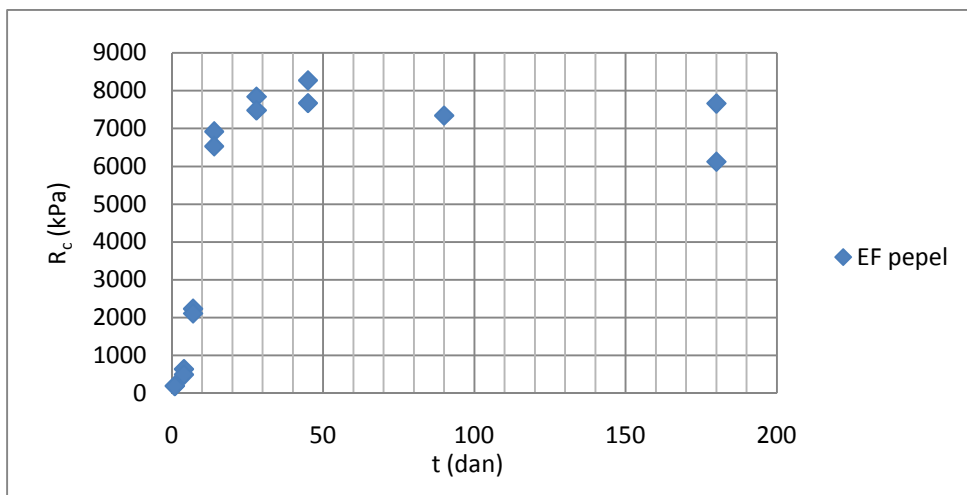


Slika 6: Krivulja zrnastosti uporabljenega EFP iz Termoelektrarne Trbovlje (Petkovšek s sod., 2013)

### 4.2.2.3 Vezanje EFP

Različni pepeli različno vežejo, zato se njihove trdnosti po določenem času zelo razlikujejo. Uporabljeni EFP ima pucolanske in hidravlične lastnosti, zato ob zgoščanju ob primerni vlagi veže in otrdi. Na sliki 7 je prikazan prirastek trdnosti nabitega EFP s časom. S slike je razvidno, da svojo največjo trdnost doseže po 45 dneh. EFP spada med kalcitne pepete (Petkovšek s sod., 2013).

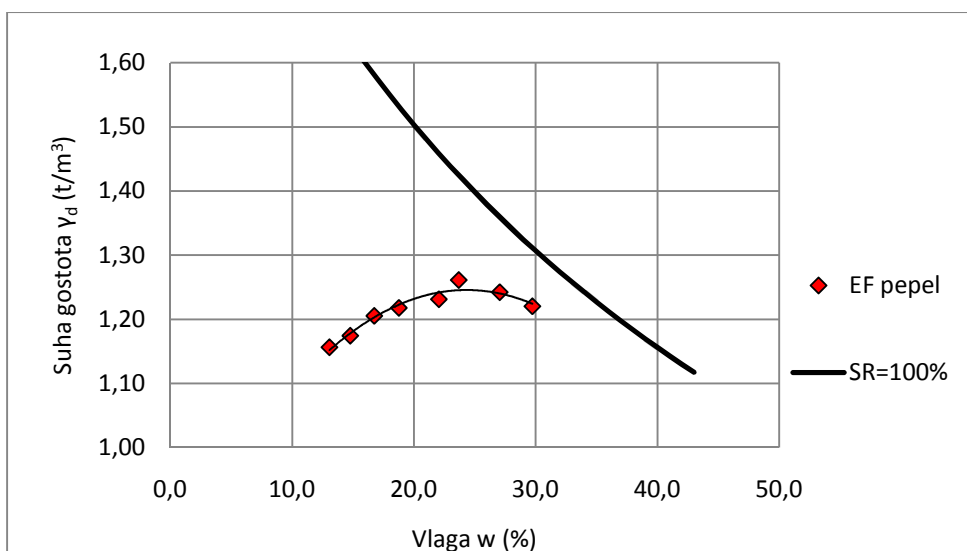




Slika 7: Naraščanje trdnosti uporabljenega EFP iz Termoelektrarne Trbovlje s časom (Petkovšek s sod., 2013)

#### 4.2.2.4 Zgoščanje EFP

Proctorjeva krivulja na sliki 8 prikazuje zgoščanje uporabljenega EFP. Vidimo, da je z vidika vgradljivosti EFP podoben drobnozrnatim zemljinam, le da je pri pepelu optimalna vlaga bistveno višja (Petkovšek s sod., 2013).



Slika 8: Proctorjeva krivulja za uporabljeni EFP iz Termoelektrarne Trbovlje (Petkovšek s sod., 2013)

#### 4.2.2.5 Strižna trdnost EFP

Strižna trdnost EFP je odvisna od stopnje zgoščenosti in vezanja. Pepeli imajo zaradi odsotnosti mineralov glin in sposobnosti cementacije med zrnji v primerjavi z zemljinami podobne zrnastostne sestave veliko višjo strižno trdnost (Petkovšek s sod., 2013).

#### 4.2.2.6 Deformabilnost in prepustnost EFP

Ti fizikalni lastnosti sta prav tako odvisni od stopnje zgoščenosti in stopnje vezanja EFP. Pri homogeno nabitih pepelih se lahko privzame orientacijska vrednost koeficienta prepustnosti v mejah od  $10^{-7}$  do  $10^{-8}$  m/s (Petkovšek s sod., 2013).

#### 4.2.3 Voda

Za pripravo mešanic je bila uporabljena pitna voda iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

### 4.3 Postopki

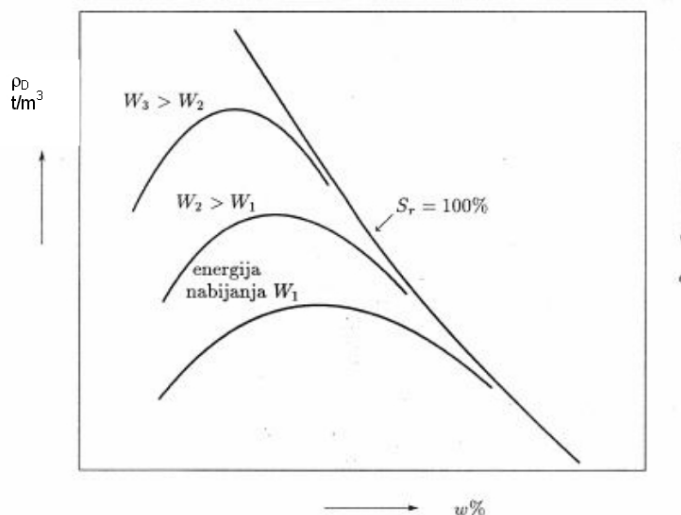
V eksperimentu so bili uporabljeni različni standardni in nestandardni postopki:

- Proctorjev preskus za določitev optimalne vlage mešanice (SIST EN 13286-2:2005),
- priprava vzorcev po Proctorjevem postopku,
- tlačni preskus hidravlično vezanih zmesi (SIST EN 13286-41:2004),
- razcepna natezna trdnost (SIST EN 13286-42:2004),
- preskus zmrzlinke odpornosti vzorcev,
- preskus namakanja in sušenja vzorcev.

#### 4.3.1 Proctorjev preskus za določitev optimalne vlage mešanice (SIST EN 13286-2:2005)

S pomočjo modificiranega Proctorjevega preskusa (MPP) smo določili optimalno vlago, pri kateri je možno mešanico zgostiti do maksimalne suhe gostote. Pri MPP vzorec zbijamo v standardni kalup v petih plasteh enake debeline z 59 udarci bata. Bat mora biti mase 4,5 kg in padati z višine 450 mm. Pri tem je energija zgoščanja  $2672 \text{ J/m}^3$ . Postopek je opredeljen v standardu SIST EN 1328-2 (Vaje, 2010/2011).

Sposobnost zgoščanja je odvisna od vlage mešanice in energije nabijanja (glej sliko 9). Zato za vsako mešanico obstaja neka optimalna vlažnost, pri kateri jo je možno z izbrano energijo zgoščanja najbolje zgostiti (Vaje, 2010/2011).



Slika 9: Odvisnost suhe gostote od vlage in energije zgoščanja (Vaje, 2010/2011)

MPP smo izvedli s pomočjo naprave, prikazane na sliki 10. Vzorce z različnim odstotkom vlage smo zgoščali v kalupih znanih dimenzij. Vsakemu vzorcu smo po zgoščanju določili gostoto, vlago ter suho gostoto (s sušenjem v sušilniku). Rezultate smo podali grafu Dosežena suha gostota v odvisnosti od vlage, v katerem maksimum krivulje predstavlja optimalno vlago in maksimalno suho gostoto mešanice.



Slika 10: Naprava za izvedbo MPP

### 4.3.2 Priprava vzorcev po Proctorjevem postopku

Odločili smo se, da vzorce izdelamo v skladu s tehnično specifikacijo TSC 06.320. Ta zahteva izdelavo vzorcev valjastih oblik, višine 150 mm in premera 150 mm. Pripravljeni morajo biti z optimalno količino vode in zgoščeni po Proctorjevem postopku do povprečno 100 % in ne manj kot 97 % zgoščenosti (TSC 06.320, 2001). Izdelani so bili v kalupu v šestih plasteh z 59 udarci bata mase 4,5 kg. Naprava za nabijanje vzorcev je prikazana na sliki 10.

### 4.3.3 Tlačni preskus hidravlično vezanih zmesi (SIST EN 13286-41:2004)

Zahteve za določitev enoosne tlačne trdnosti (ETT) podaja SIST EN 13286-41. Standard dovoljuje vzorce v obliki valja ali kocke. Pred preizkusom ETT je treba vzorcu določiti dimenzije in ga stehtati. Izguba na masi ne sme biti večja od 2 % glede na maso po pripravi vzorcev. ETT vzorcev valjastih oblik smo določili s pomočjo naprave, prikazane na sliki 11. Stiskanje mora potekati s konstantnim naraščanjem sile do porušitve vzorca, pri čemer se zabeleži maksimalna dosežena sila. Porušenemu vzorcu se določi tudi vlaga.

Tlačna trdnost se določi po enačbi:

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

pri čemer je:

$R_c$  – enoosna tlačna trdnost vzorca (kPa)

$F$  – maksimalna porušna sila vzorca (N)

$A_c$  – površina prereza vzorca (mm<sup>2</sup>)



*Slika 11: Naprava za preiskavo ETT*

#### **4.3.4 Razcepna natezna trdnost (SIST EN 13286-42:2004)**

Razcepna natezna trdnost (RNT) je bila določena s pomočjo naprave, prikazane na sliki 12. Preiskava je skladna s standardom SIST EN 13286-42. Izvedli smo jo tako, da smo predhodno merjene in stehtane valjaste vzorce obremenjevali z enakomerno naraščajočo silo do porušitve. Iz maksimalne zabeležene sile smo nato izračunali RNT po naslednji enačbi:

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD}$$

pri čemer je:

$R_{it}$  – razcepna natezna trdnost (kPa)

$F$  – maksimalna porušna sila vzorca (N)

$H$  – višina vzorca (mm)

$D$  – premer vzorca (mm)

Porušenim vzorcem smo po preiskavi s sušenjem v sušilniku do konstantne mase določili tudi vlago in suho gostoto.



*Slika 12: Naprava za preiskavo RNT*

#### **4.3.5 Preizkus zmrzlinke odpornosti vzorcev**

Vzorcem je bila po vsakem zmrzovanju in po vsakem tajanju izmerjena sprememba volumna in mase. Sprememba volumna je bila izračunana iz povprečnih vrednosti izmerjenih višin in premerov valja. Dimenzije so bile določene s pomočjo kljunastega merila tako, da smo merili dva med seboj pravokotna premera in tri višine, enakomerno razporejene po obodu. Teža vzorcev je bila določena s pomočjo elektronske tehtnice z natančnostjo  $\pm 1$  g. Po 26 dneh, ko je bilo zaključenih 12 ciklov zmrzovanja in tavanja, je bila narejena preiskava ETT (glej točko 4.3.3).

#### **4.3.6 Preizkus namakanja in sušenja vzorcev**

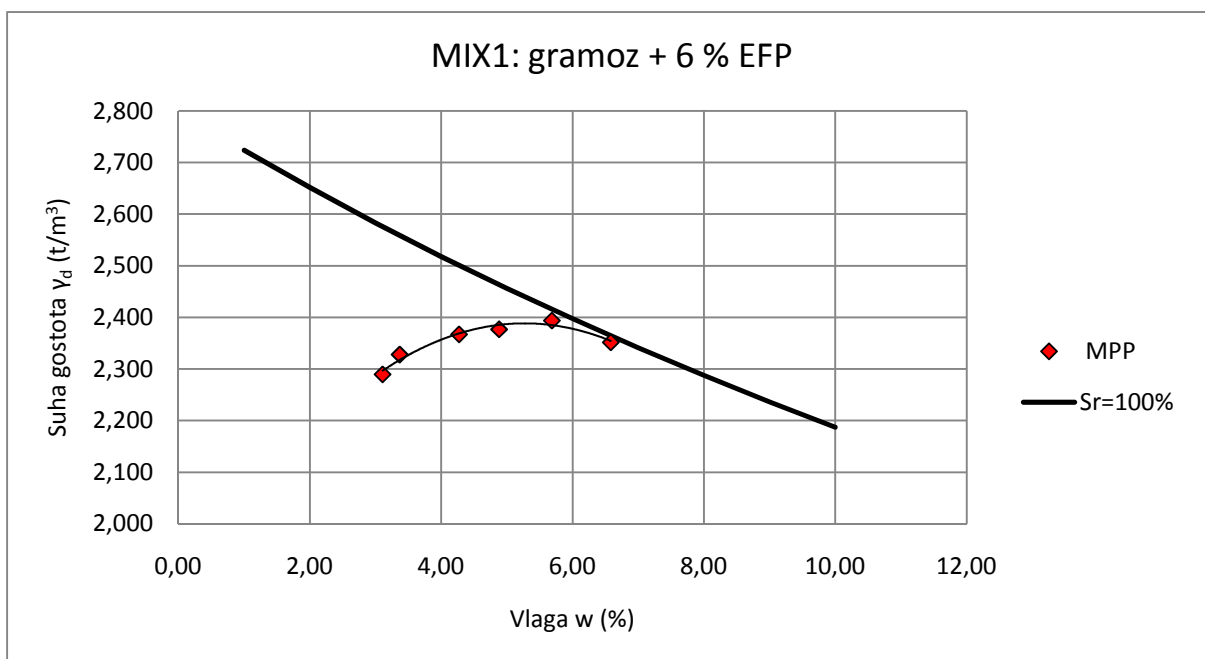
Vzorcem smo po vsakem namakanju in po vsakem sušenju določili dimenzije in maso. Dimenzije vzorcev smo določili s pomočjo kljunastega merila tako, da smo merili tri višine (na različnih mestih) in dva med seboj pravokotna premera. Tehtali smo jih s pomočjo elektronske tehtnice z natančnostjo  $\pm 1$  g. Po zadnjem, dvanajstem, ciklu je bila narejena preiskava ETT, opisana v točki 4.3.3.

## 5 ANALIZA REZULTATOV

### 5.1 Rezultati mešanice MIX1 s 6 % masnim deležem EFP

#### 5.1.1 Rezultati modificiranega Proctorjevega preizkusa

Za analizo zgoščanja mešanice MIX1, sestavljene iz gramoza GW-GM z zrni manjšimi od 31,5 mm in s 6 % masnim deležem EFP, je bilo nabitih šest vzorcev. Iz slike 13 lahko vidimo, da je optimalna vlažnost mešanice, določena po MPP, nekoliko višja od vlage, pri kateri je bila nabita serija vzorcev za staranje. Optimalna vlažnost mešanice MIX1 znaša 5,8 %, serije vzorcev, pa so bile nabite pri vlagi 4,5 %. Vzorci so bili pripravljeni pri vlagi, nižji od optimalne, zato ker se je pri optimalni vlagi iz vzorcev že izcejala voda (pomešana z EFP), ob iztiskanju iz kalibriranega cilindra pa so se deformirali.



Slika 13: Proctorjeva krivulja za mešanico MIX1, pripravljeno iz gramoza in s 6 % masnim deležem EFP

#### 5.1.2 Rezultati enoosne tlačne trdnosti

ETT vzorcev iz mešanice MIX1 je bila določena pri starosti 7, 14, 28 in 48 dni. Starost in način nege vzorca med staranjem podajamo za vsak vzorec posebej oz. za serijo vzorcev.

### 5.1.2.1 Rezultati preiskav, izvedenih na vzorcih, staranih v foliji in postavljenih v vlažno komoro

Vzorci so bili starani v foliji in postavljeni v vlažno komoro. Pred preiskavo so bili za 4 ure preplavljeni z vodo.

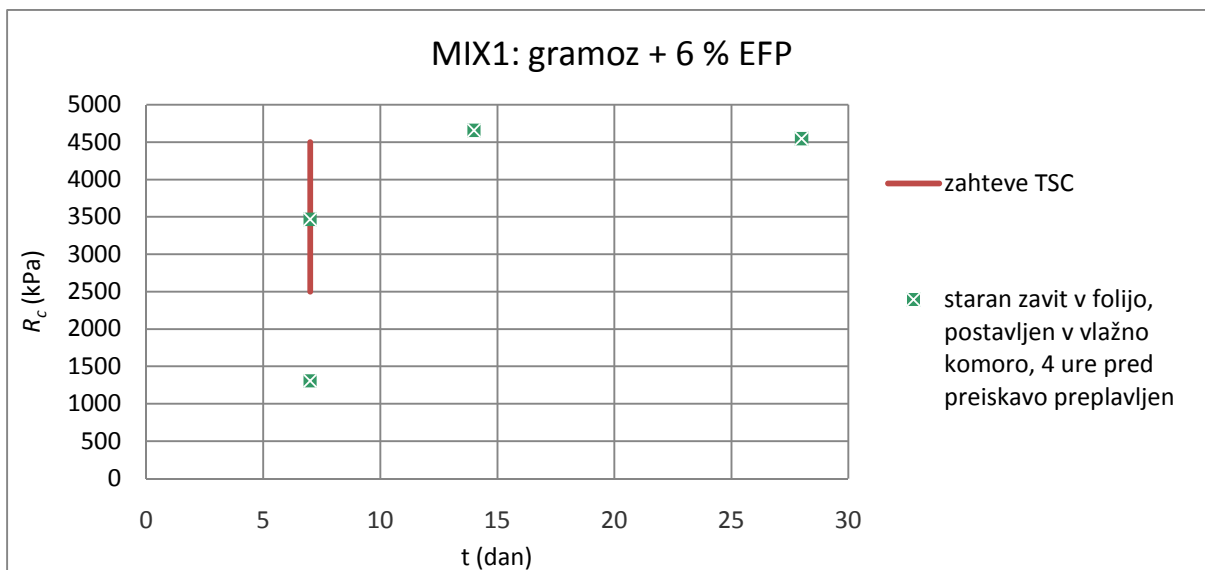
V tabeli 2 so zbrani rezultati ETT, dosežena zgoščenost vzorca in podatki o vlagi ter saturaciji pred in po namakanju. Poleg vzorcev iz serije MIX1 so v tabeli dodani tudi rezultati predhodnih (preliminarnih) preiskav mešanice M1, ker vsebujejo isti odstotek EFP kot mešanica MIX1 in so nabiti pri enaki vlagi.

*Tabela 2: Podatki o vzorcih mešanice MIX1, ki so bili starani zaviti v folijo in položeni v vlažno komoro ter pred preiskavo za 4 ure namočeni v vodo*

Vzorec	M1-2	MIX 1-16	MIX 1-3	MIX 1-6
Starost (dni)	7	7	14	28
Namočen	da	da	da	da
$m$ po nabijanju (g)	6453	6576	6573	6562
$m$ pred namakanjem (g)	6440	6567	6570	6550
$w$ pred namakanjem (%)	4,58	4,16	4,39	3,69
$Sr$ pred namakanjem (%)	60,52	61,90	61,34	48,30
$m$ po namakanju (g)	6500	6618	6636	6644
$w$ po namakanju (%)	5,6	5	5,4	5,2
$Sr$ po namakanju (%)	72,93	73,64	76,48	71,34
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,41	2,44	2,44	2,42
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,28	2,33	2,31	2,30
$R_c$ (kPa)	1306,70	3466,15	4659,22	4545,60

Grafični prikaz rezultatov ETT je podan na sliki 14, na kateri je z vertikalno črto prikazano območje tlačne trdnosti, ki ga ob starosti 7 dni zahteva TSC. Najmanjša dosežena vrednost skladno s TSC tako ne sme biti manjša od 2,5 MN/m<sup>2</sup>, najvišja vrednost pa naj ne bi preseгла 4,5 MN/m<sup>2</sup>.



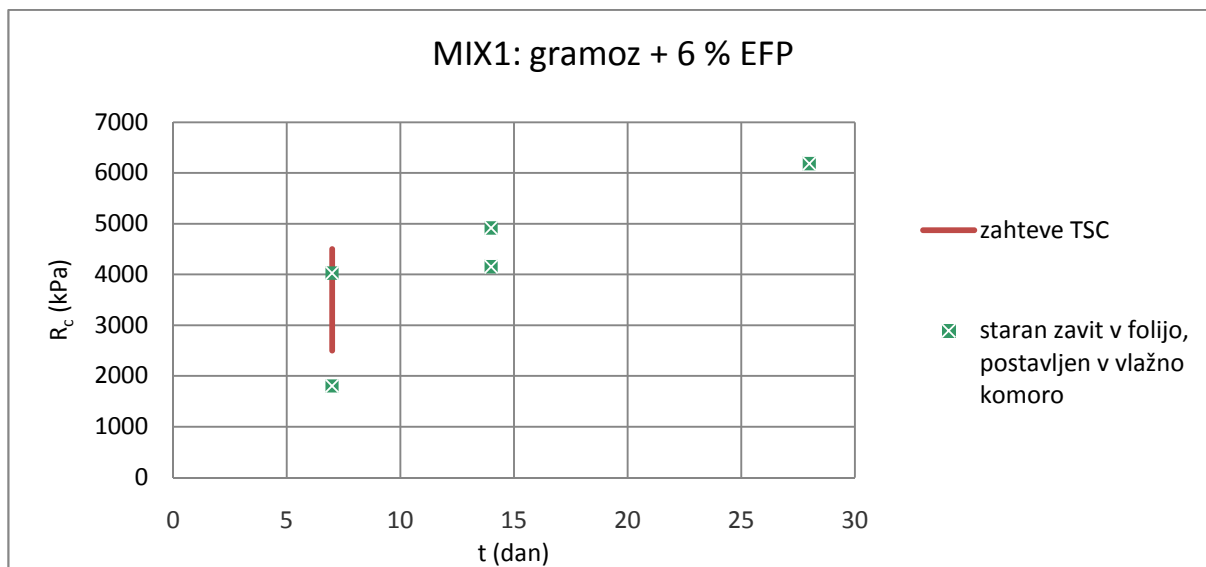


Slika 14: ETT vzorcev, staranih v foliji (postavljenih v vlažno komoro), ki so bili pred preiskavo za 4 ure preplavljeni z vodo

ETT smo določali tudi na seriji vzorcev, ki pred preiskavo niso bili preplavljeni z vodo. Rezultati so podani v tabeli 3 in grafično prikazani na sliki 15. Poleg mešanice MIX1 so v tabeli podani tudi rezultati preliminarnih raziskav mešanice M1 z istim deležem EFP in vode.

Tabela 3: Podatki o vzorcih mešanice MIX1, ki so bili starani zaviti v folijo in položeni v vlažno komoro ter pred preiskavo niso bili namočeni

Vzorec	M1-1	M1-3	MIX1-14	MIX1-1	MIX1-4
Starost (dni)	7	14	7	14	28
Namočen	ne	ne	ne	ne	ne
$m$ po nabijanju (g)	6480	6534	6568	6540	6529
$m$ pred preiskavo (g)	6461	6500	6562	6532	6518
$w$ (%)	4,1	4,5	4,4	4,3	4,2
$Sr$ (%)	55,25	60,08	63,56	60,03	59,88
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,39	2,39	2,42	2,41	2,41
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,29	2,29	2,32	2,31	2,31
$R_c$ (kPa)	1804,24	4153,43	4025,85	4915,40	6184,51



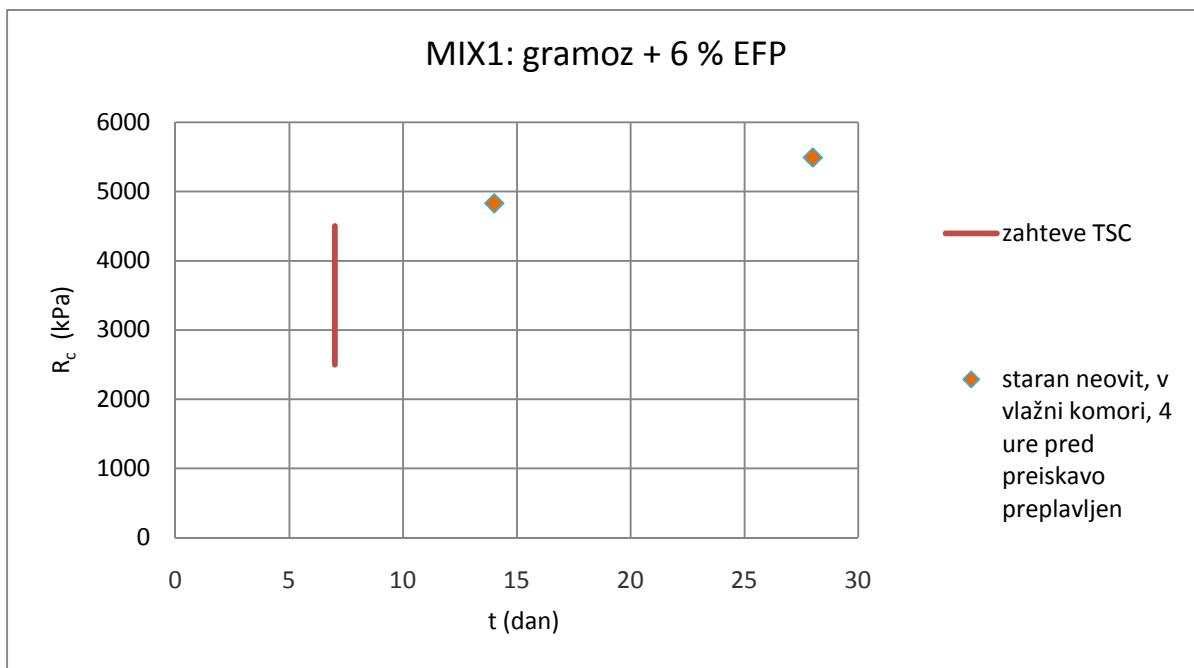
Slika 15: ETT vzorcev, staranih v foliji (postavljenih v vlažno komoro)

#### 5.1.2.2 Rezultati preiskav vzorcev, ki so bili neoviti starani v vlažni komori tako, da niso bili v neposrednem stiku z vodo

V tabeli 4 in na sliki 16 so podani rezultati časovnega prirasta tlačne trdnosti vzorcev, ki so bili starani neoviti, postavljeni v vlažno komoro, 4 ure pred preiskavo pa potopljene v vodo.

Tabela 4: Podatki o vzorcih, staranih v vlažni komori, mešanice MIX1, ki so bili pred preiskavo za 4 ure potopljene v vodo

Vzorec	MIX1-8	MIX1-11
Starost (dni)	14	28
Namočen	da	da
$m$ po nabijanju (g)	6547	6570
$m$ pred namakanjem (g)	6552	6568
$w$ pred namakanjem (%)	4,1	5,4
$Sr$ pred namakanjem (%)	56,32	60,12
$m$ po namakanju (g)	6625	6639
$w$ po namakanju (%)	5,2	5,4
$Sr$ po namakanju (%)	74,48	76,98
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,4	2,4
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,3	2,3
$R_c$ (kPa)	4830	5492



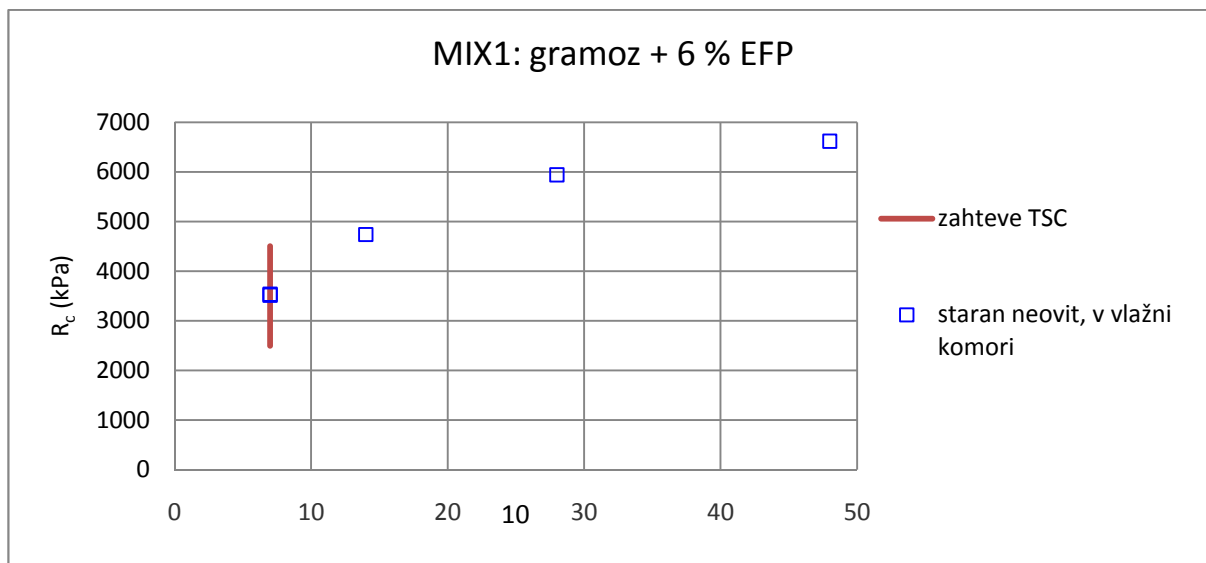
Slika 16: ETT vzorcev, ki so bili neoviti starani v vlažni komori in pred preiskavo za 4 ure potopljeni v vodo

Tabela 5 in slika 17 podajata rezultate ETT vzorcev, ki so bili neoviti starani v vlažni komori in pred preiskavo tlačne trdnosti niso bili potopljeni v vodo.

Vzorec MIX1-17 je bil rahlo poškodovan. Pri iztiskanju svežega vzorca iz kalupa se je okrušil rob. Kljub poškodbam je po 7 dneh dosegel primerljivo tlačno trdnost kot enako star vzorec MIX1-18.

Tabela 5: Podatki o vzorcih, neovito staranih v vlažni komori, ki pred preiskavo niso bili namočeni

Vzorec	MIX1-17	MIX1-18	MIX1-7	MIX1-9	MIX1-12
Starost (dni)	7	7	14	28	48
Namočen	ne	ne	ne	ne	ne
$m$ po nabijanju (g)	6561	6544	6561	6549	6552
$m$ pred preiskavo (g)	6485	6500	6566	6554	6549
$w$ (%)	4,3	4,1	4,3	4,6	4,5
$Sr$ (%)	60,30	56,82	58,14	65,10	61,52
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,41	2,40	2,39	2,42	2,40
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,31	2,31	2,29	2,31	2,30
$R_c$ (kPa)	3517,85	3537,06	4738,14	5940,63	6617,50



Slika 17: ETT vzorcev, staranih neovito, v vlažni komori, ki pred preiskavo niso bili namočeni

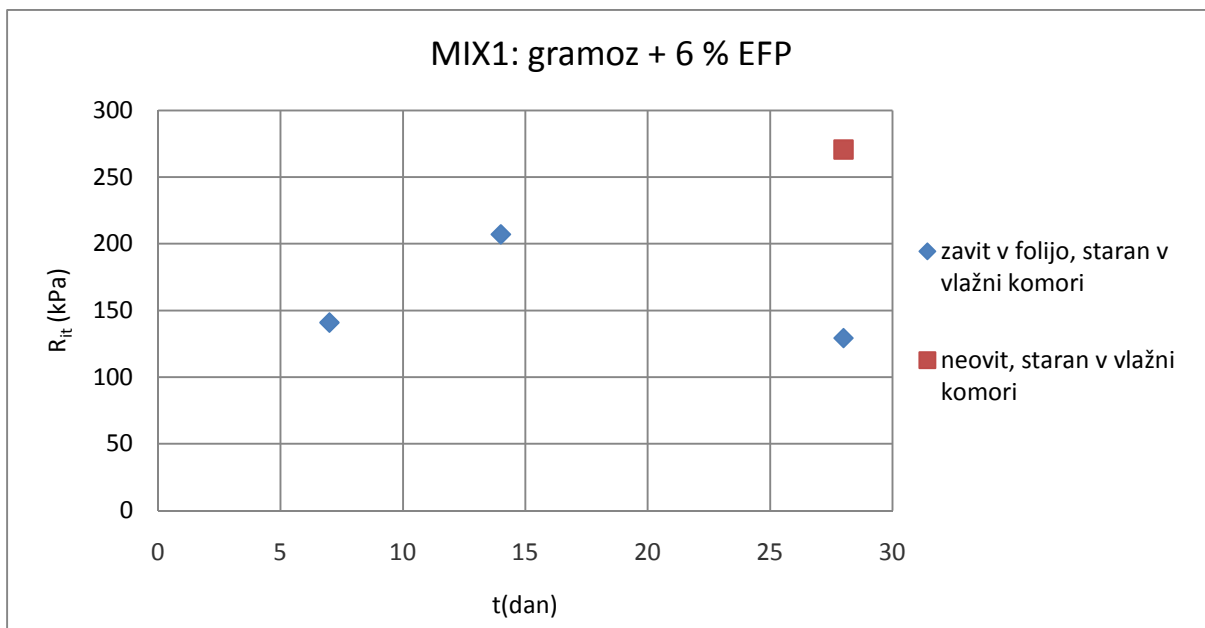
### 5.1.3 Preiskave razcepne natezne trdnosti

Preiskave RNT za mešanico MIX1 so bile izvedene na štirih vzorcih. Trije vzorci so bili med staranjem zaviti v folijo, en vzorec pa je bil neovit. Vsi so bili postavljeni v vlažno komoro tako, da niso bili v neposrednem stiku z vodo.

Rezultate podajamo v tabeli 6 in na sliki 18.

Tabela 6: Podatki o vzorcih, pripravljenih iz mešanice MIX1, na katerih je bila izvedena RNT

Vzorec	MIX1-15	MIX1-2	MIX1-5	MIX1-10
Starost (dni)	7	14	28	28
Način staranja	zavit v folijo, v vlažni komori	zavit v folijo, v vlažni komori	zavit v folijo, v vlažni komori	neovit, v vlažni komori
Namočen	ne	ne	ne	ne
$m$ po nabijanju (g)	6575	6553	6463	6569
$m$ pred preiskavo (g)	6568	6545	6447	6471
$w$ (%)	4,5	4,4	4,3	4,4
$S_r$ (%)	62,39	61,78	54,20	62,11
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,41	2,41	2,36	2,41
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,30	2,31	2,26	2,31
$R_{it}$ (kPa)	140,87	206,98	129,3	270,69

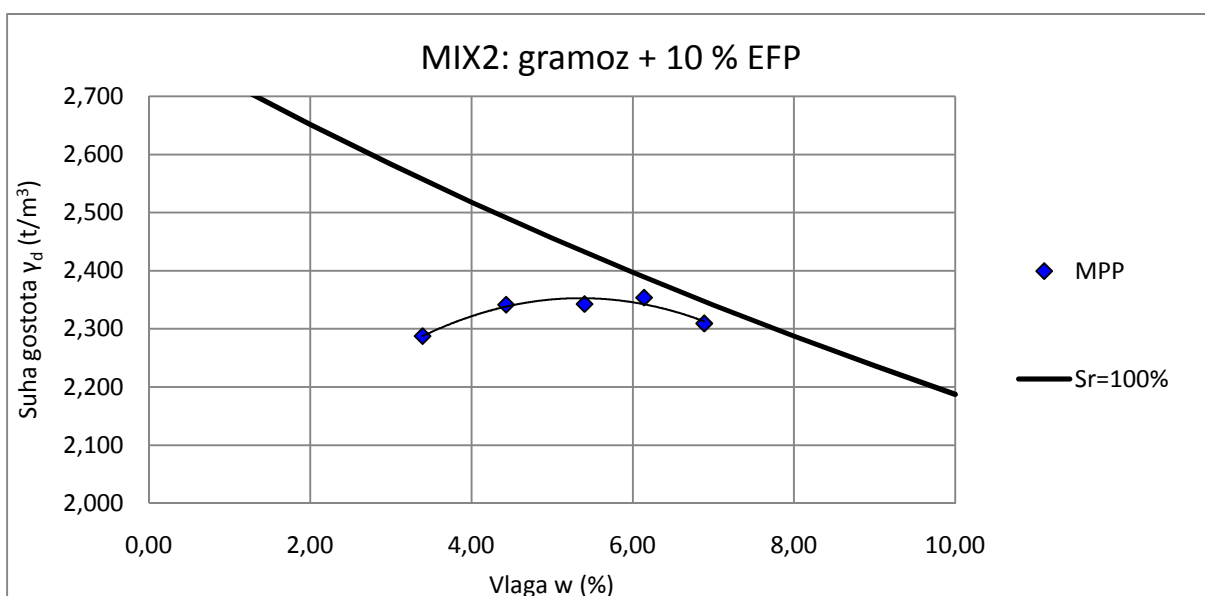


Slika 18: RNT valjastih vzorcev, pripravljenih iz mešanice MIX1

## 5.2 Rezultati mešanice MIX2 z 10 % masnim deležem EFP

### 5.2.1 Rezultati modificiranega Proctorjevega preizkusa

Mešanica je bila pripravljena iz dolomitnega drobljenca (GW-GM) z 10 % masnim deležem EFP. Iz slike 19 lahko vidimo, da je optimalna vlažnost, določena po MPP, za dosego največje suhe gostote mešanice 6,1 %. To je nekoliko višja vlaga od tiste, pri kateri je bila nabita serija vzorcev. Vzorce smo pripravili pri vlagi 5,0 %, zaradi enakih razlogov kot pri mešanici MIX1 (glej točko 5.1.1).



Slika 19: Proctorjeva krivulja za mešanico MIX2, pripravljeno iz gramoza in z 10 % masnim deležem EFP

## 5.2.2 Rezultati enoosne tlačne trdnosti

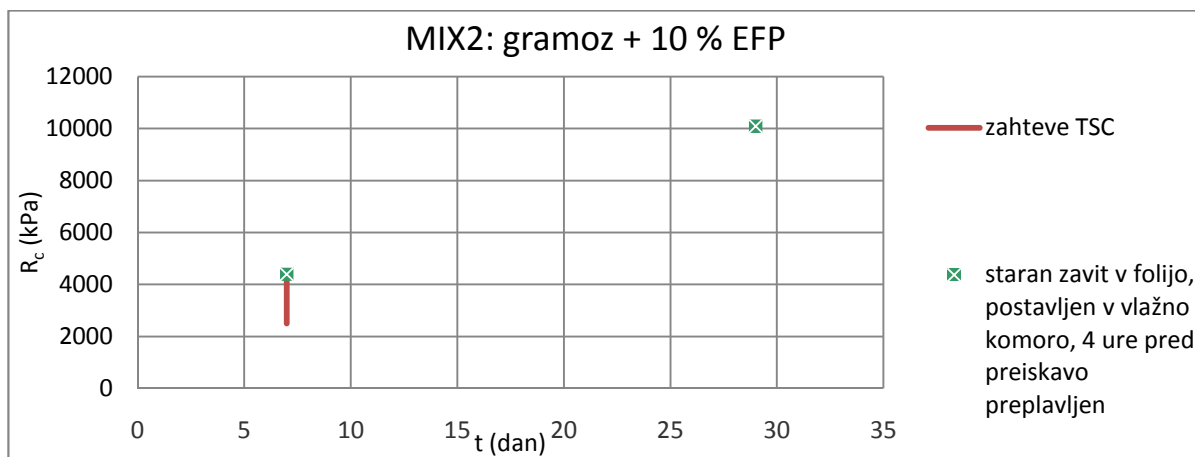
ETT valjastih vzorcev, pripravljenih iz mešanice MIX2, je bila narejena na vzorcih različnih starosti, staranj in nege. Enako kot pri mešanici MIX1 so bili vzorci starani oviti ali pa neoviti v vlažni komori. Poleg vzorcev, katerim smo tlačno trdnost določili takoj po staranju, je šest vzorcev prestalo še 12 ciklov zmrzovanja in tajanja, štirje vzorci pa so bili izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja.

### 5.2.2.1 Rezultati preiskav, izvedenih na vzorcih, staranih v foliji in postavljenih v vlažno komoro

Tabela 7 in slika 20 prikazujeta rezultate vzorcev mešanice MIX2 z 10 % masnim deležem EFP, ki smo jih zavili v folijo in starali v vlažni komori. Pred preiskavo ETT smo jih za 4 ure namočili v vodo.

Tabela 7: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili pred preiskavo za 4 ure preplavljeni z vodo

Vzorec	MIX2-16	MIX2-2
Starost (dni)	7	29
Namočen	da	da
$m$ po nabijanju (g)	6650	6626
$m$ pred namakanjem (g)	6644	6567
$w$ pred namakanjem (%)	4,6	4,3
$Sr$ pred namakanjem (%)	73,4	67,09
$m$ po namakanju (g)	6679	6666
$w$ po namakanju (%)	5,2	5,2
$Sr$ po namakanju (%)	82,15	80,8
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,45	2,45
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,33	2,33
$R_c$ (kPa)	4393,72	10091,32

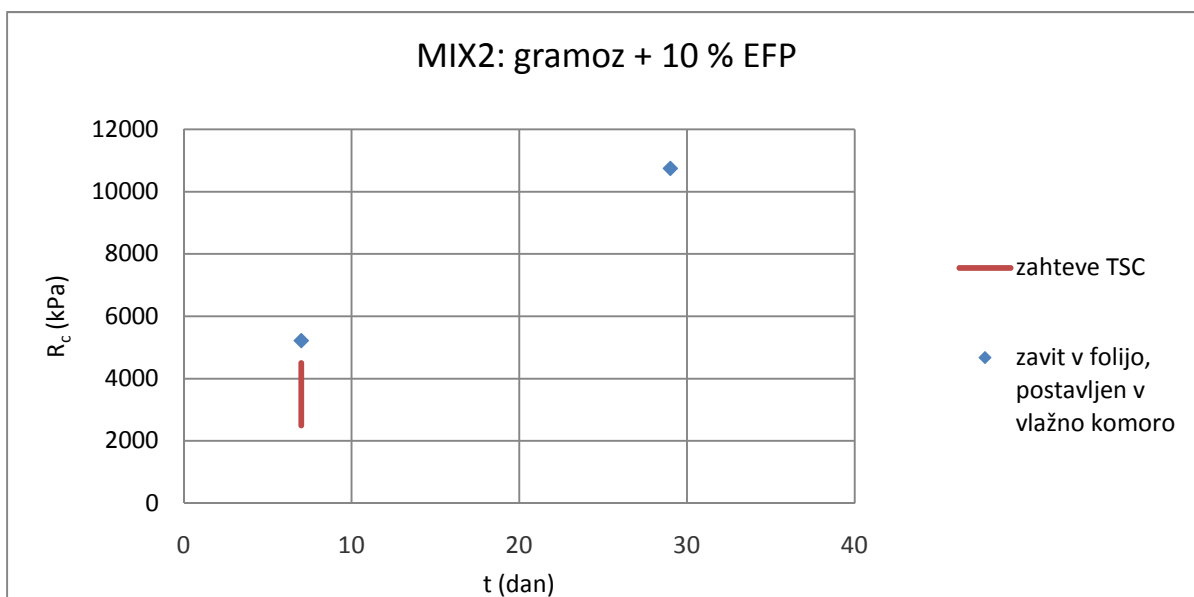


Slika 20: ETT vzorcev, staranih v foliji (postavljenih v vlažno komoro), ki so bili pred preiskavo za 4 ure preplavljeni z vodo

Rezultati vzorcev mešanice MIX2, na katerih smo določali tlačno trdnost takoj po staranju brez namakanja v vodo, so podani v tabeli 8 in sliki 21.

Tabela 8: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, staranih v foliji (položeni v vlažno komoro), ki niso bili namočeni

Vzorec	MIX2-15	MIX2-1
Starost (dni)	7	29
Namočen	ne	ne
$m$ po nabijanju (g)	6607	6599
$m$ pred preiskavo (g)	6603	6577
$w$ (%)	4,9	4,2
$Sr$ (%)	75,9	61,0
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,44	2,4
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,33	2,31
$R_c$ (kPa)	5223,88	10747,93



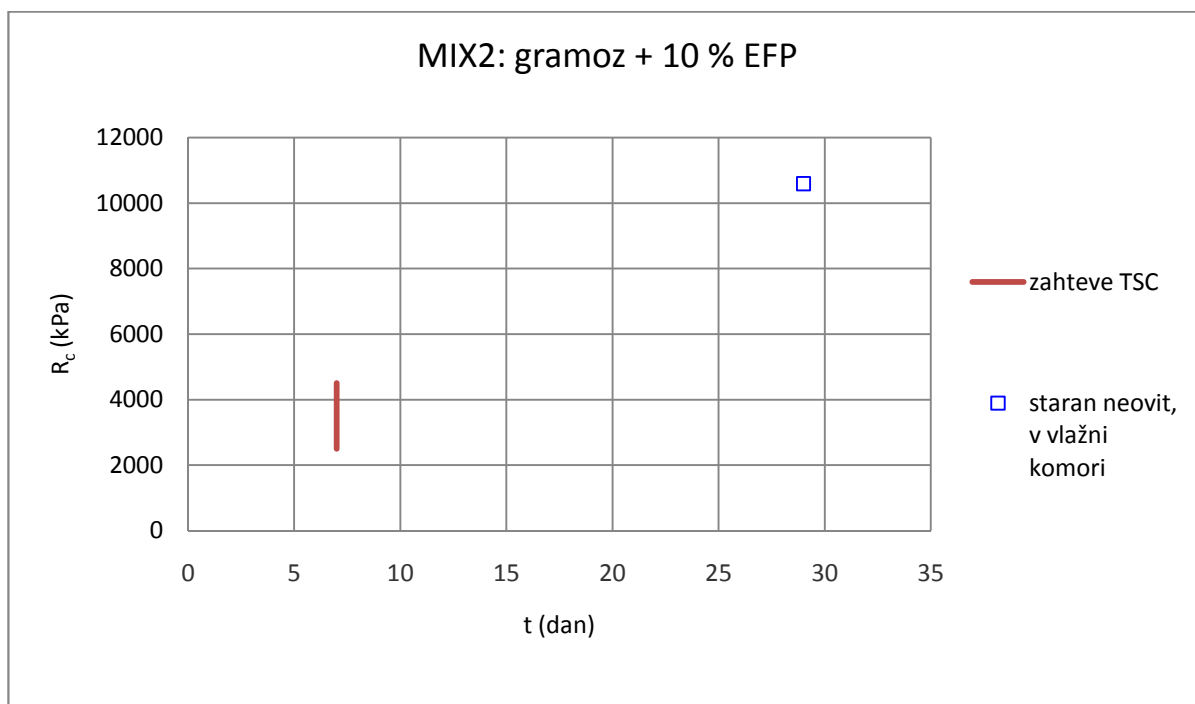
Slika 21: ETT vzorcev, staranih v foliji, ki niso bili namočeni

### 5.2.2.2 Rezultati preiskav vzorca, ki je bili neovit staran v vlažni komori tako, da ni bil v neposrednem stiku z vodo

Tabela 9 in slika 22 prikazujeta rezultate vzorca MIX2-4, ki je bil neovit staran v vlažni komori. ETT je bila opravljena po 29 dneh, brez predhodnega namakanja v vodi.

Tabela 9: Podatki o vzorcu mešanice MIX2, ki je bil neovit staran v vlažni komori

Vzorec	MIX2-4
Starost (dni)	29
Namočen	ne
$m$ po nabijanju (g)	6577
$m$ pred preiskavo (g)	6557
$w$ (%)	4,4
$Sr$ (%)	64,9
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,41
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,31
$R_c$ (kPa)	10596,16



Slika 22: ETT vzorca mešanice MIX2, ki je bil neovit staran v vlažni komori



### 5.2.2.3 Rezultati vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom zmrzovanja in tajanja

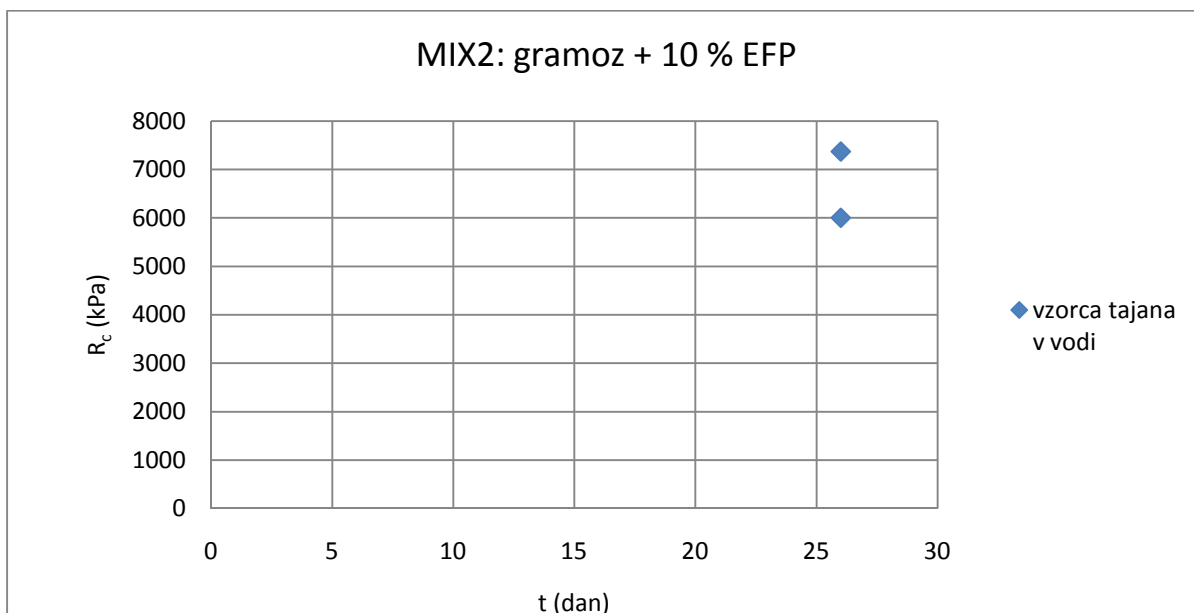
Zmrzljinska odpornost je bila preizkušena na šestih vzorcih.

#### 5.2.2.3.1 Vzorca, tajana v vodi

Tabela 10 in slika 23 prikazujeta rezultate ETT vzorcev, ki so prestali 12 ciklov zmrzovanja in tajanja v vodi.

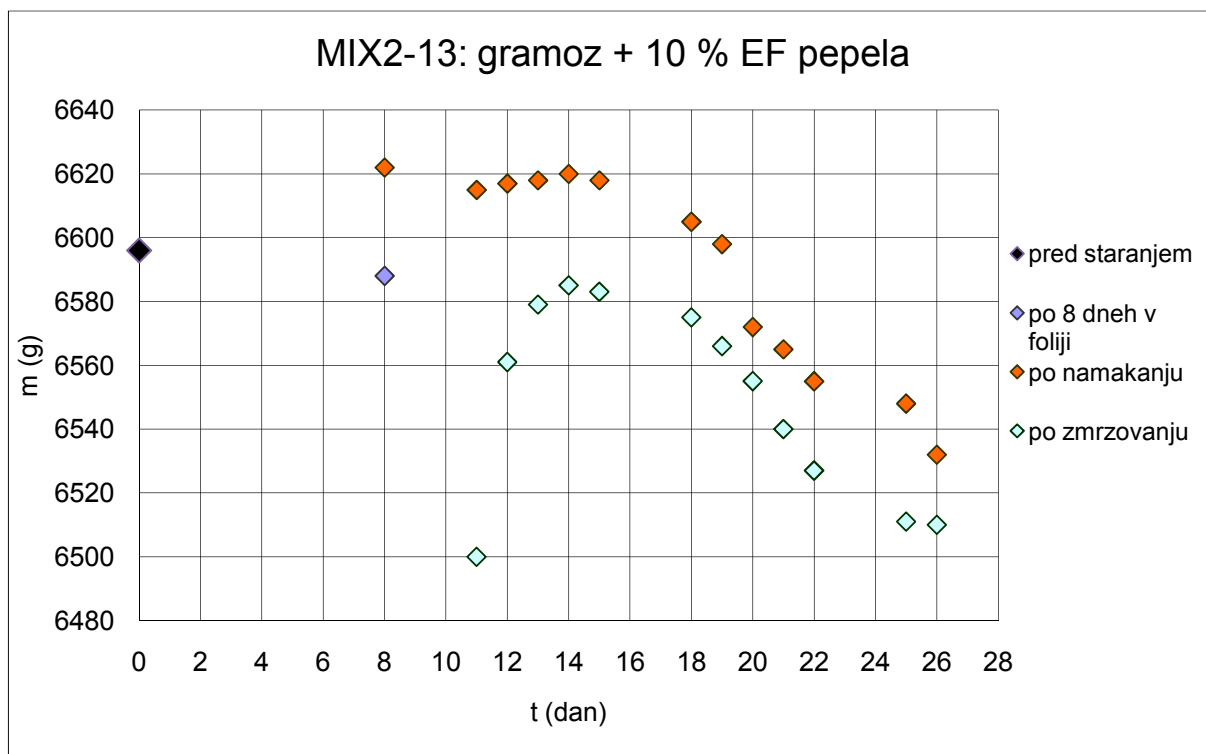
Tabela 10: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja v vodi

Vzorec	MIX2-13	MIX2-14
Starost (dni)	26	26
Namočen	da	da
$m$ po nabijanju (g)	6596	6579
$m$ pred preiskavo (g)	6532	6478
$w$ (%)	5,2	5,2
$Sr$ (%)	76,26	71,71
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,43	2,40
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,31	2,28
$R_c$ (kPa)	7368,80	6001,92

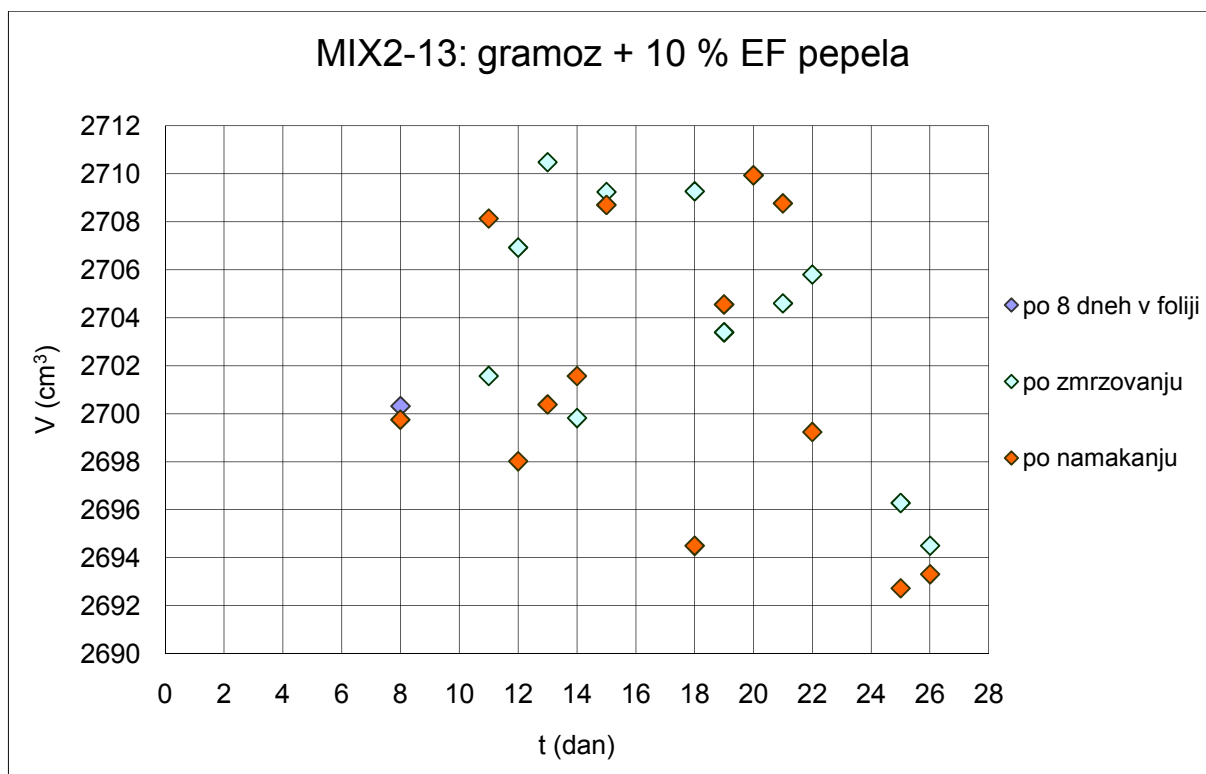


Slika 23: ETT vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom zmrzovanja in tajanja v vodi, po 26 dneh

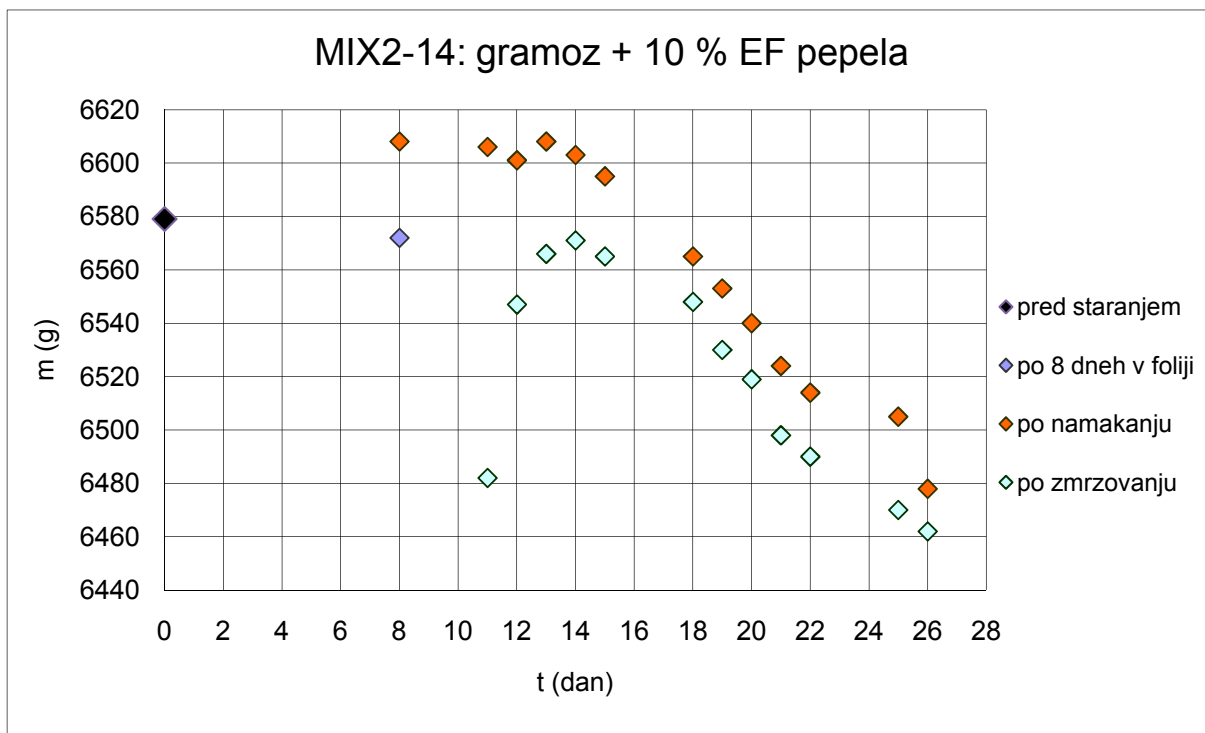
V nadaljevanju je prikazano spreminjanje mase in volumna vzorcev, ki so bili zmrznjeni ter odtajani v vodi, v odvisnosti od časa (slike 24, 25, 26, 27).



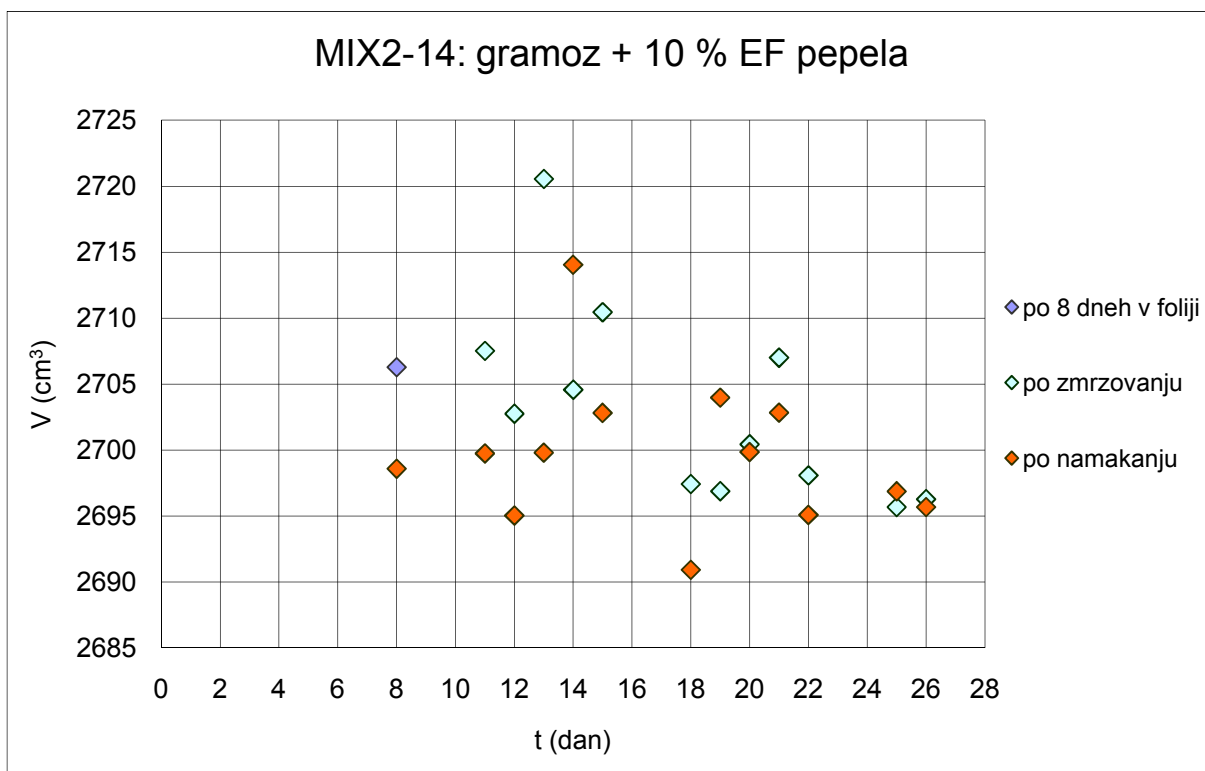
Slika 24: Spreminjanje mase vzorca MIX2-13 med preizkusom zmrzljinske odpornosti



Slika 25: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-13 med preizkusom zmrzljinske odpornosti



Slika 26: Spreminjanje mase vzorca MIX2-14 med preizkusom zmrzljinske odpornosti



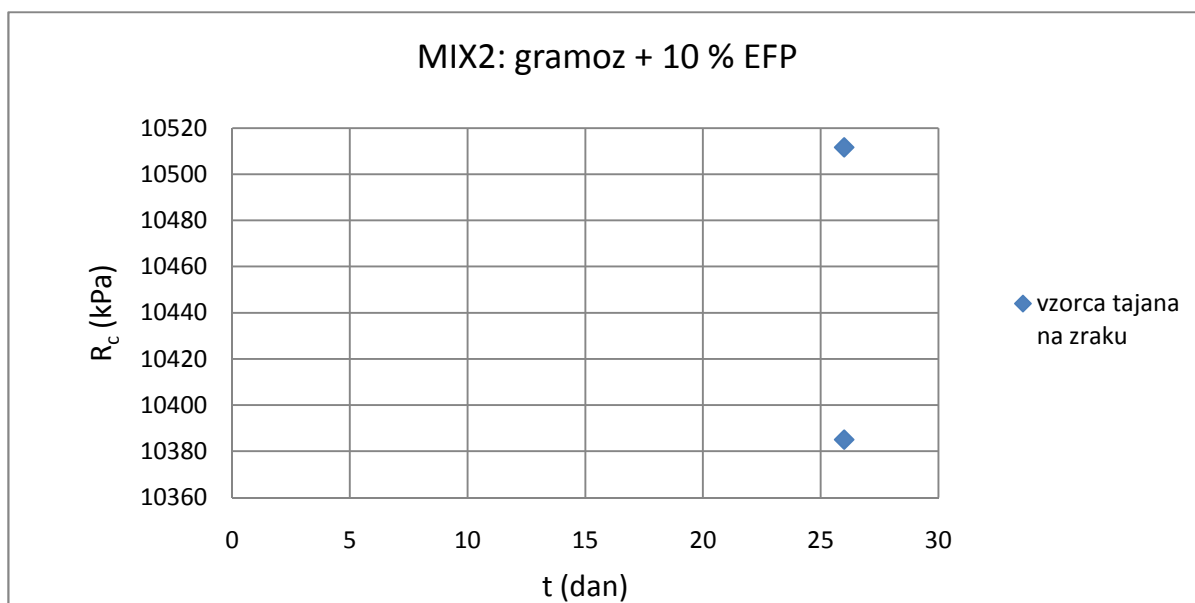
Slika 27: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-14 med preizkusom zmrzljinske odpornosti

### 5.2.2.3.2 Vzorca, odtajana na zraku

Vzorca sta bila odtajana na sobni temperaturi v zaprtem in nezračnem prostoru, v katerem so bile dve skrinji in ena peč, zato je bila sobna temperatura dokaj visoka. Da bi preprečili pretirano izsuševanje, smo vzorca pokrili z vrečko. Rezultate vzorcev prikazujeta tabela 11 in slika 28.

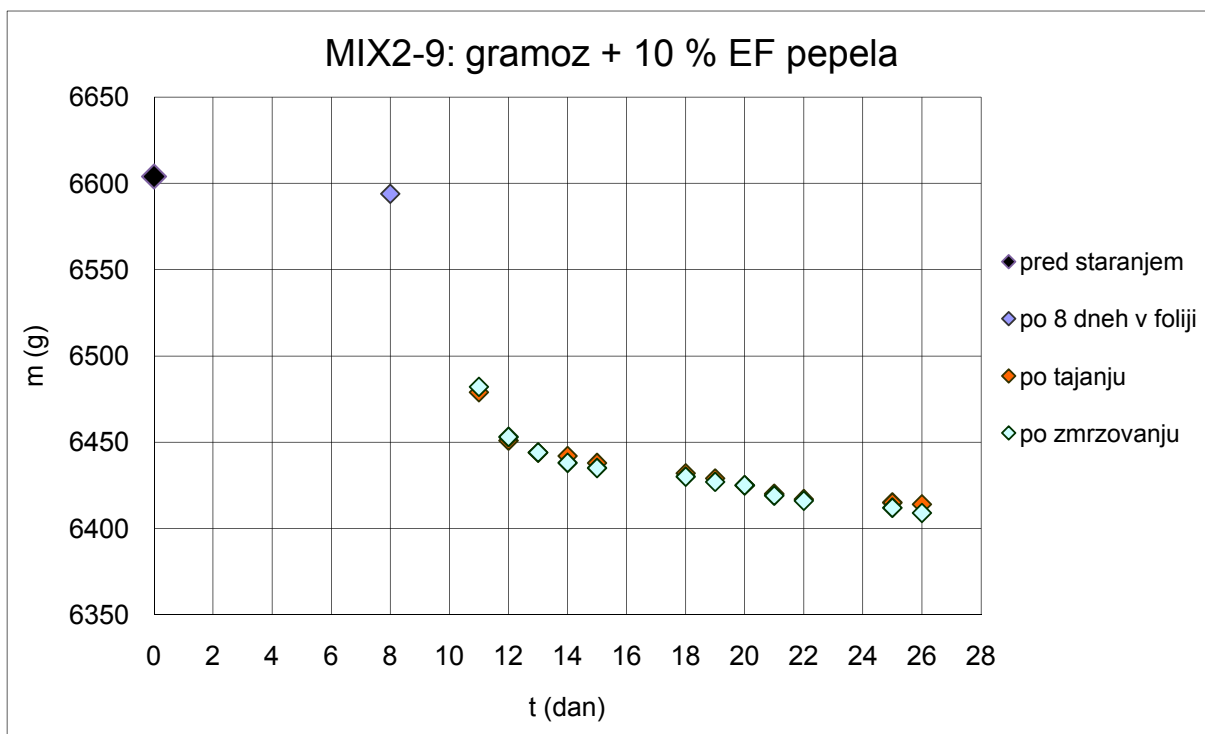
Tabela 11: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja na zraku

Vzorec	MIX2-9	MIX2-10
Starost (dni)	26	26
Namočen	ne	ne
$m$ po nabijanju (g)	6604	6599
$m$ pred preiskavo (g)	6414	6412
$w$ (%)	1,8	1,9
$Sr$ (%)	28,06	29,28
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,38	2,37
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,33	2,33
$R_c$ (kPa)	10511,65	10385,10

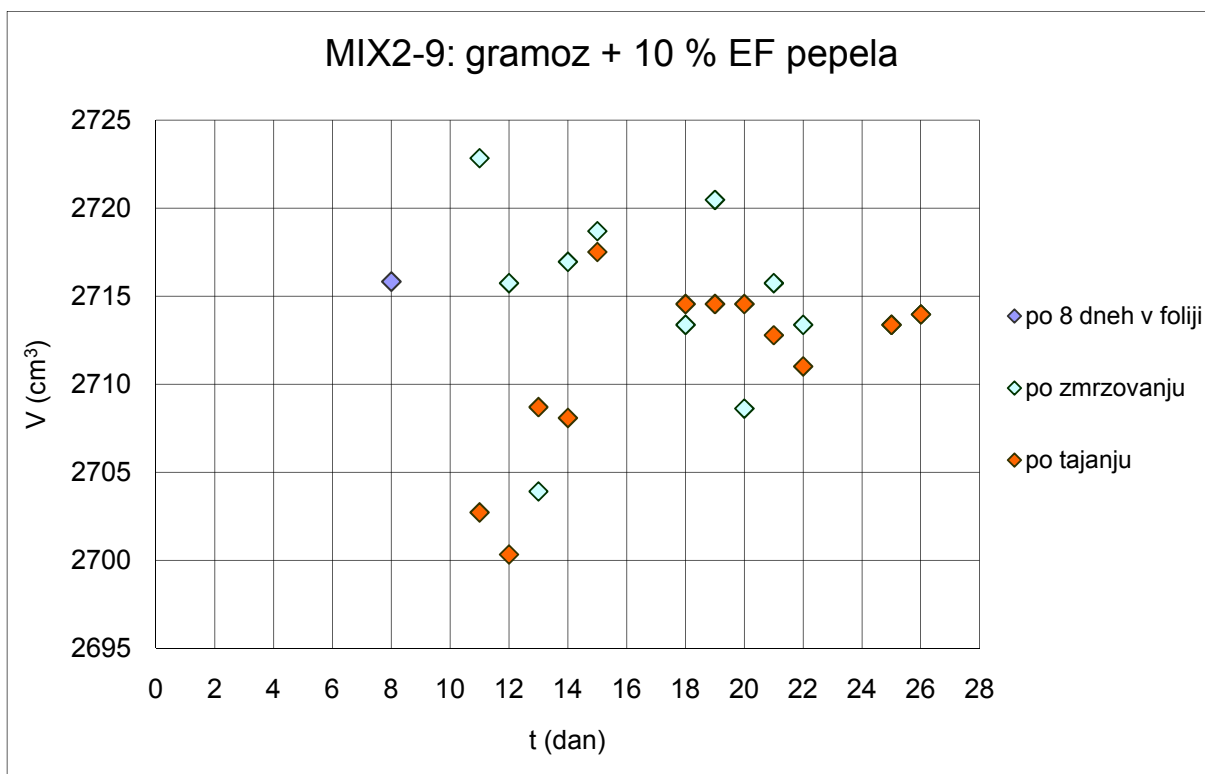


Slika 28: ETT vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom zmrzovanja in tajanja na zraku, po 26 dneh

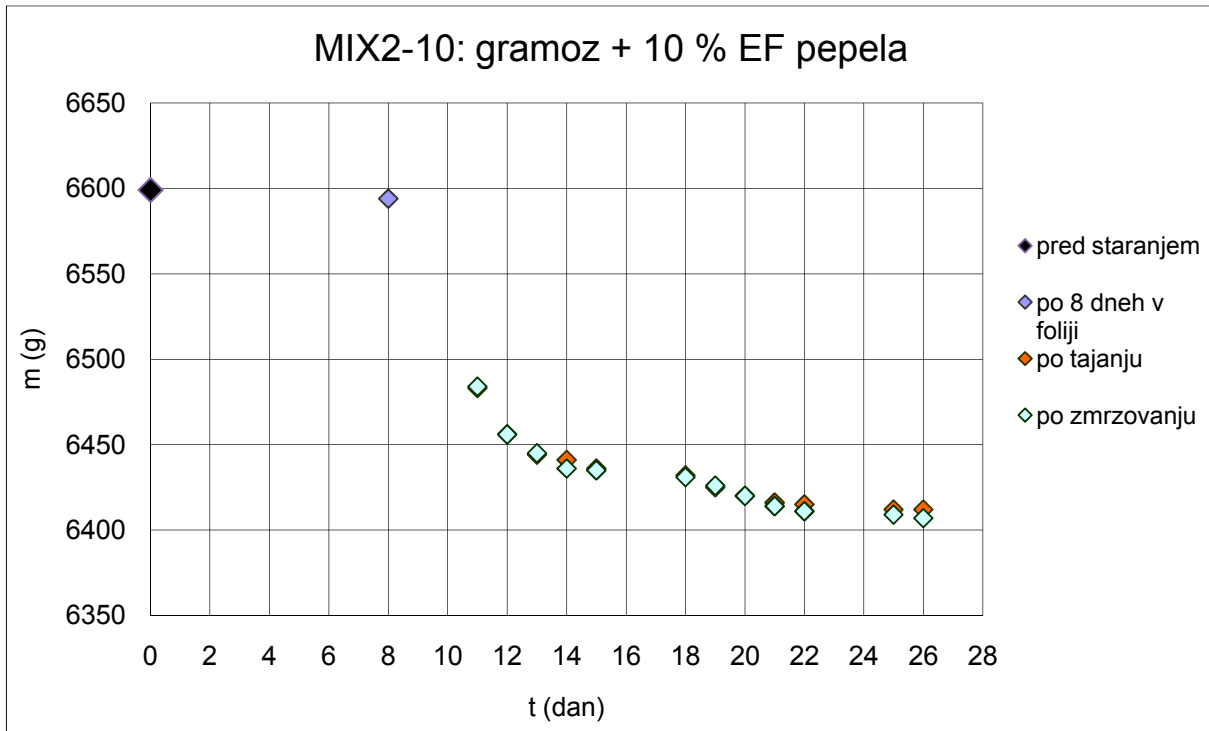
V nadaljevanju je prikazano spreminjanje mase in volumna v odvisnosti od časa za posamezen vzorec (glej slike 29, 30, 31, 32).



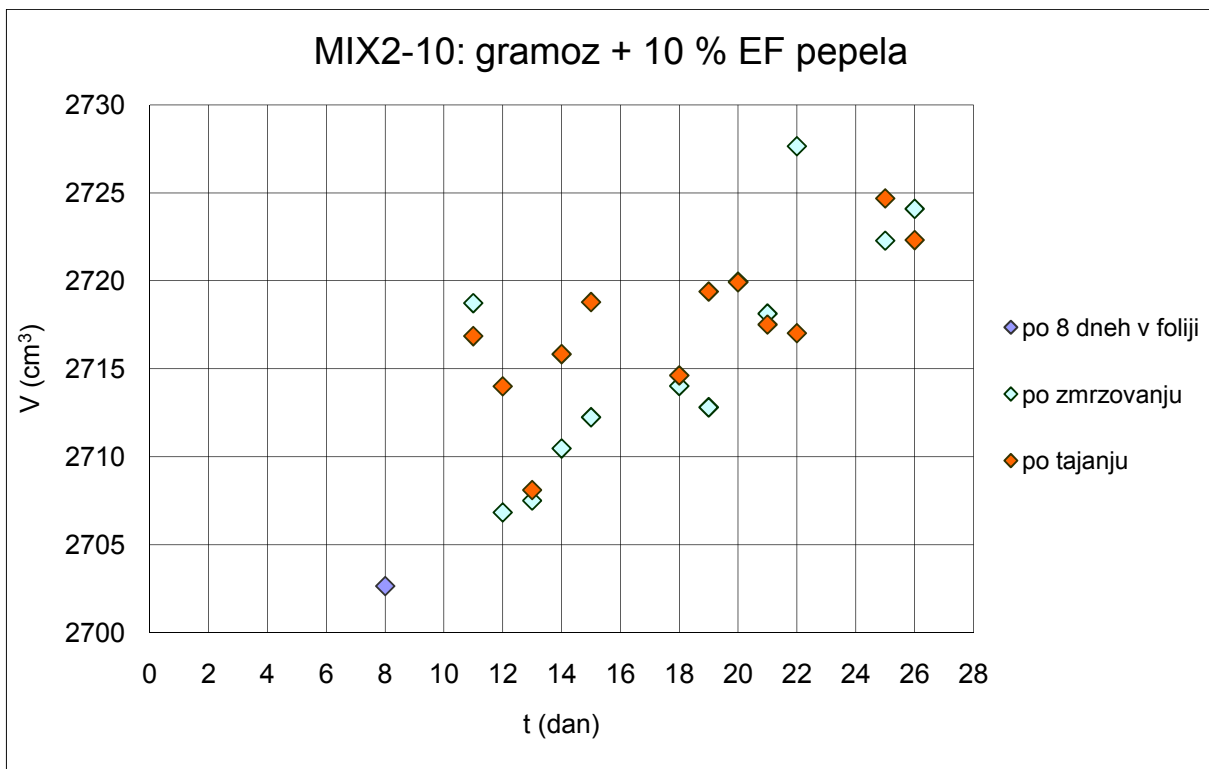
Slika 29: Spreminjanje mase vzorca MIX2-9 med preizkusom zmrzljinske odpornosti



Slika 30: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-9 med preizkusom zmrzljinske odpornosti



Slika 31: Spreminjanje mase vzorca MIX2-10 med preizkusom zmrzljinske odpornosti



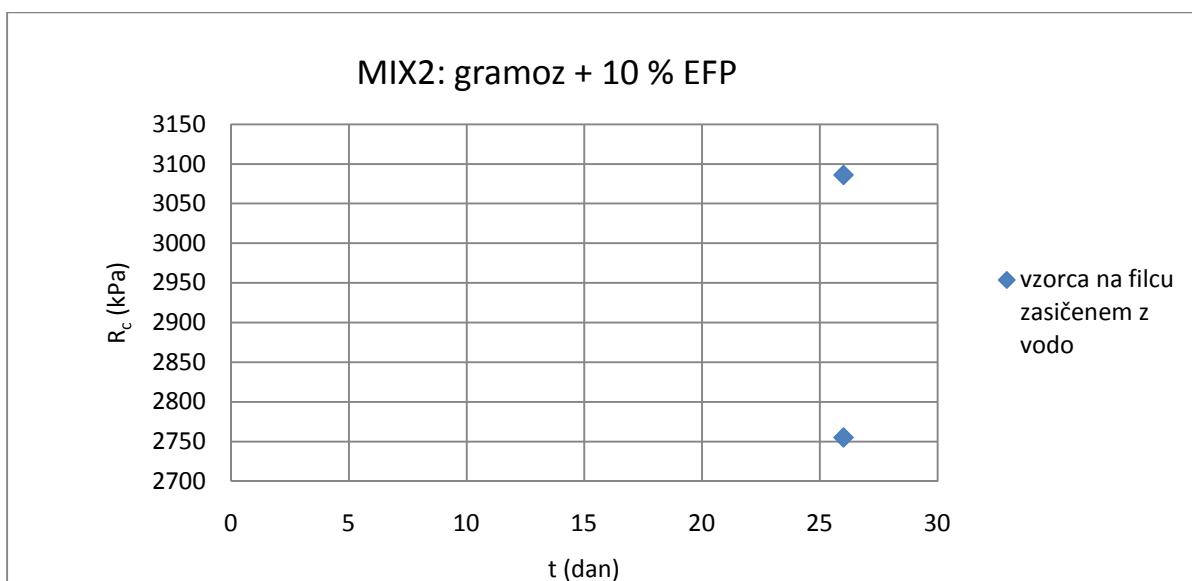
Slika 32: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-10 med preizkusom zmrzljinske odpornosti

### 5.2.2.3.3 Vzorca, zamrznjena in tajana na filcu

Vzorca sta bila postavljena na pladenj s filcem. Filc je bil nenehno zasičen z vodo, tako da sta vzorca lahko vpijala vodo preko kapilarnega dviga. Po koncu vsakega cikla je bil vzorec obrnjen. Rezultati vzorcev so podani v tabeli 12 in na sliki 33.

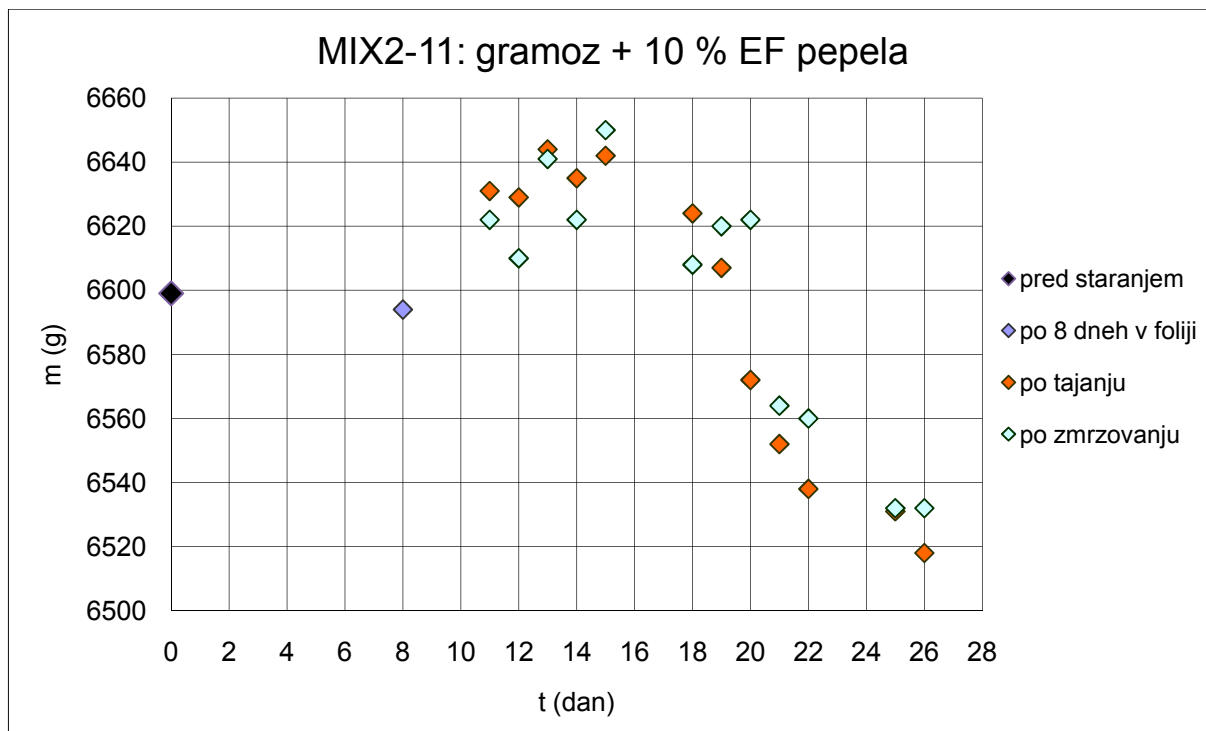
Tabela 12: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja na filcu, zasičenem z vodo

Vzorec	MIX2-11	MIX2-12
Starost (dni)	26	26
Namočen	ne	ne
$m$ po nabijanju (g)	6592	6594
$m$ pred preiskavo (g)	6518	6522
$w$ (%)	6,2	5,7
$Sr$ (%)	72,97	70,62
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,36	2,37
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,22	2,25
$R_c$ (kPa)	2755,14	3086,18

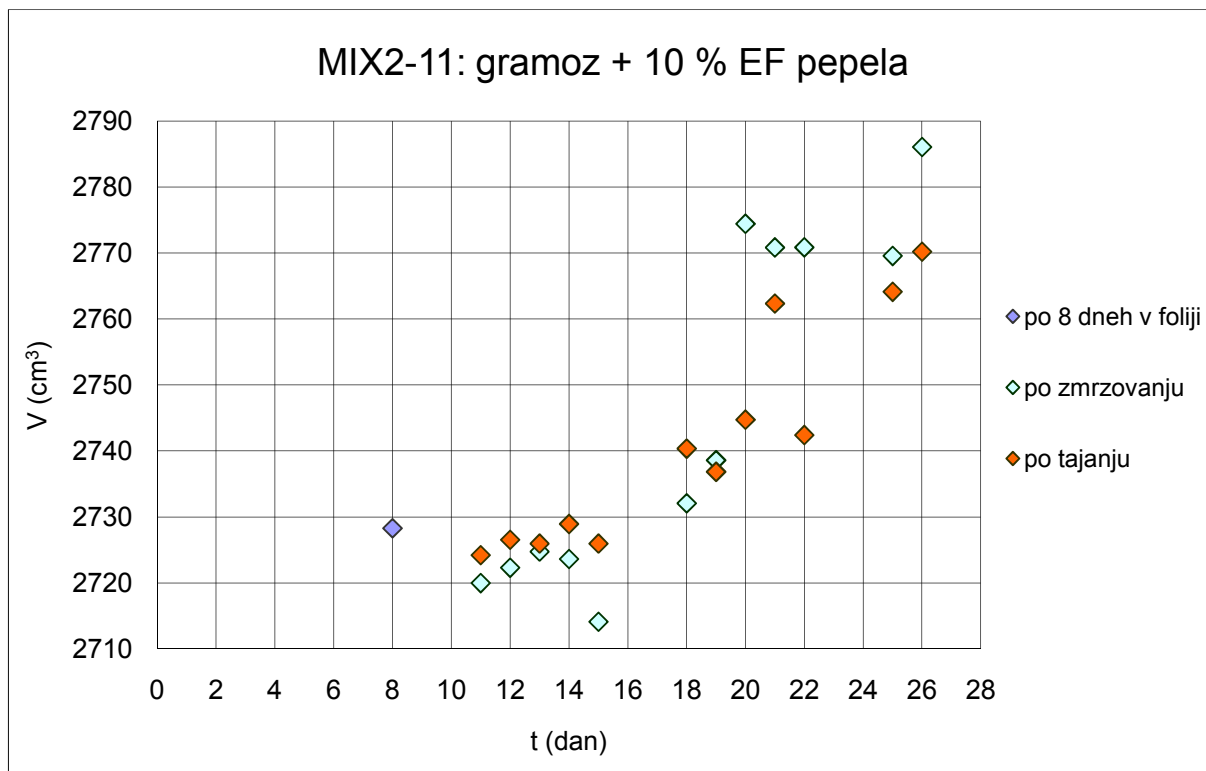


Slika 33: ETT vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom zmrzovanja in tajanja na filcu, zasičenem z vodo, po 26 dneh

Spreminjanje mase in volumna vzorcev v odvisnosti od časa je prikazano na slikah (34, 35, 36, 37).

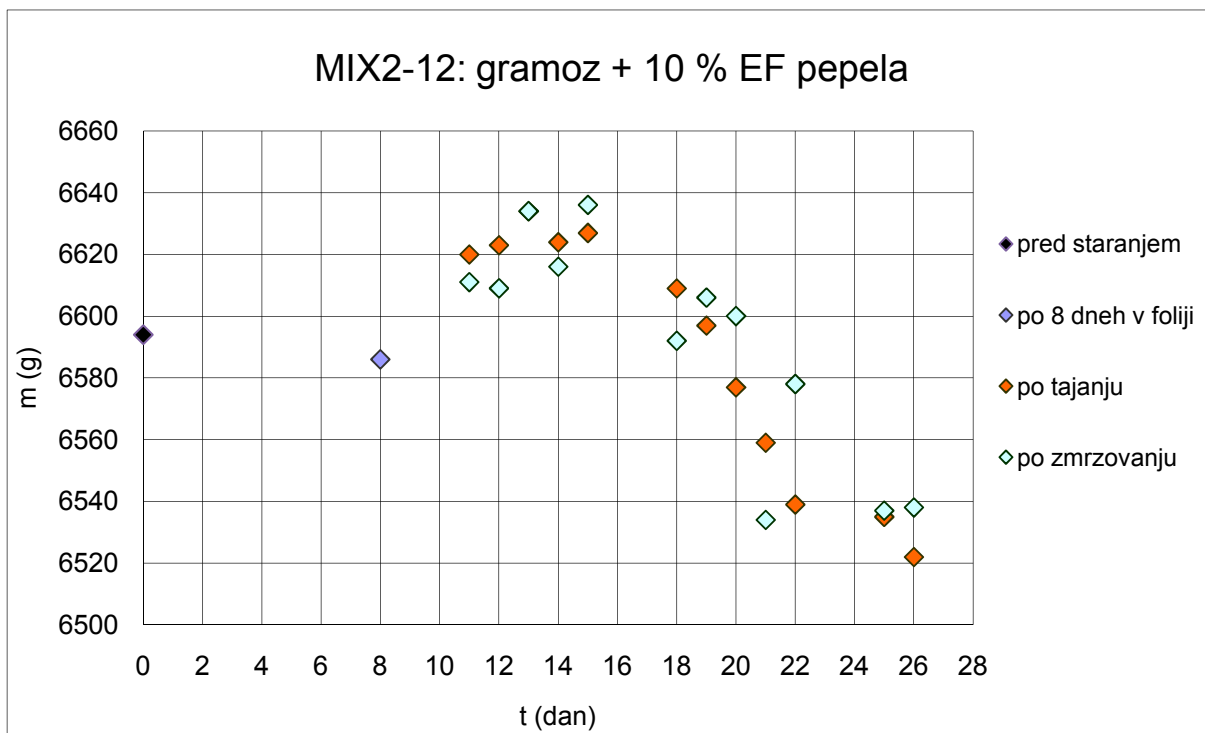


Slika 34: Spreminjanje mase vzorca MIX2-11 med preizkusom zmrzljinske odpornosti

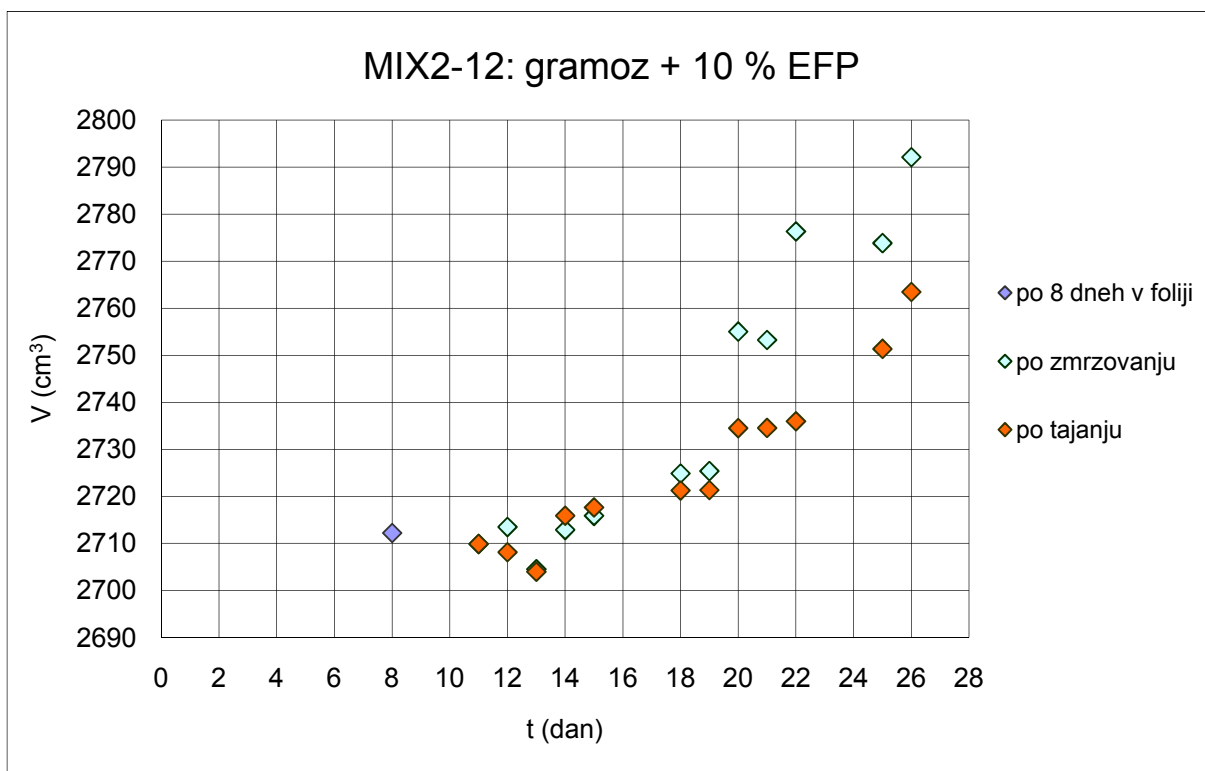


Slika 35: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-11 med preizkusom zmrzljinske odpornosti





Slika 36: Spreminjanje mase vzorca MIX2-12 med preizkusom zmrzljinske odpornosti



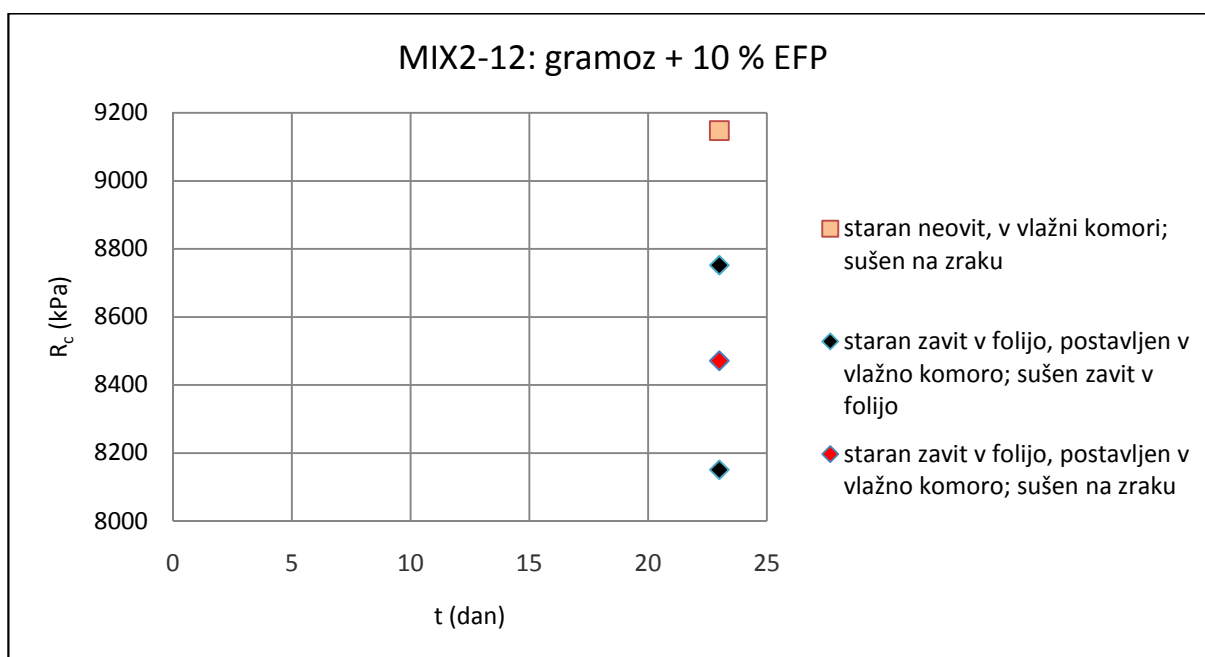
Slika 37: Spreminjanje volumna vzorca MIX2-12 med preizkusom zmrzljinske odpornosti

#### 5.2.2.4 Rezultati vzorcev, izpostavljenih 12 ciklom namakanja in sušenja

Preizkušeni so bili štiri vzorci in sicer na dva različna načina sušenja. Vsi vzorci, razen vzorca z oznako MIX2-8, so bili sedem dni starani v vlažni komori zaviti v folijo. Vzorec MIX2-8 pa je bil staran v vlažni komori neovit. Rezultate vzorcev prikazujeta tabela 13 in slika 38.

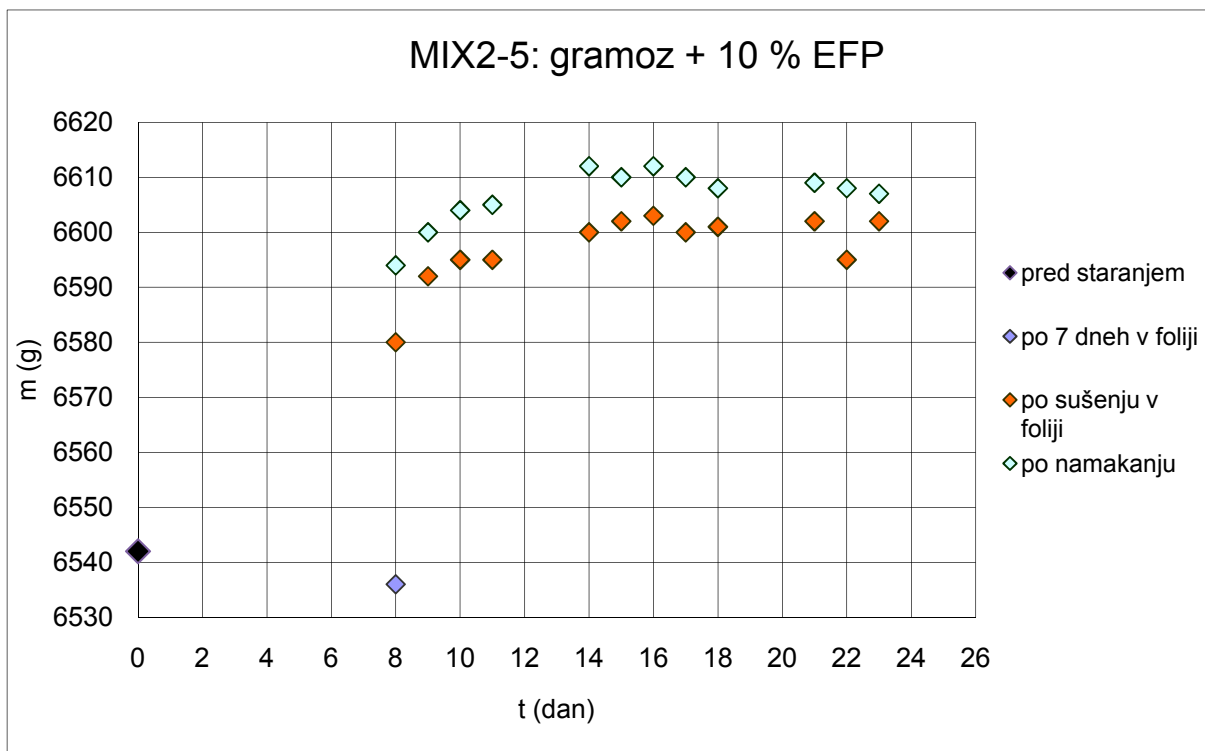
Tabela 13: Podatki o vzorcih mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja

Vzorec	MIX2-5	MIX2-6	MIX2-7	MIX2-8
Starost (dni)	23	23	23	23
Način staranja	zavit v folijo	zavit v folijo	zavit v folijo	v vlažni komori
Način sušenja	zavit v folijo	zavit v folijo	na zraku – neovit	na zraku – neovit
$m$ po nabijanju (g)	6542	6554	6614	6603
$m$ pred preiskavo (g)	6602	6609	6627	6630
$w$ (%)	6,1	6,0	5,4	5,4
$Sr$ (%)	86,55	87,07	85,64	85,07
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,44	2,44	2,46	2,46
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,30	2,31	2,34	2,34
$R_c$ (kPa)	8151,10	8751,98	8471,32	9147,67

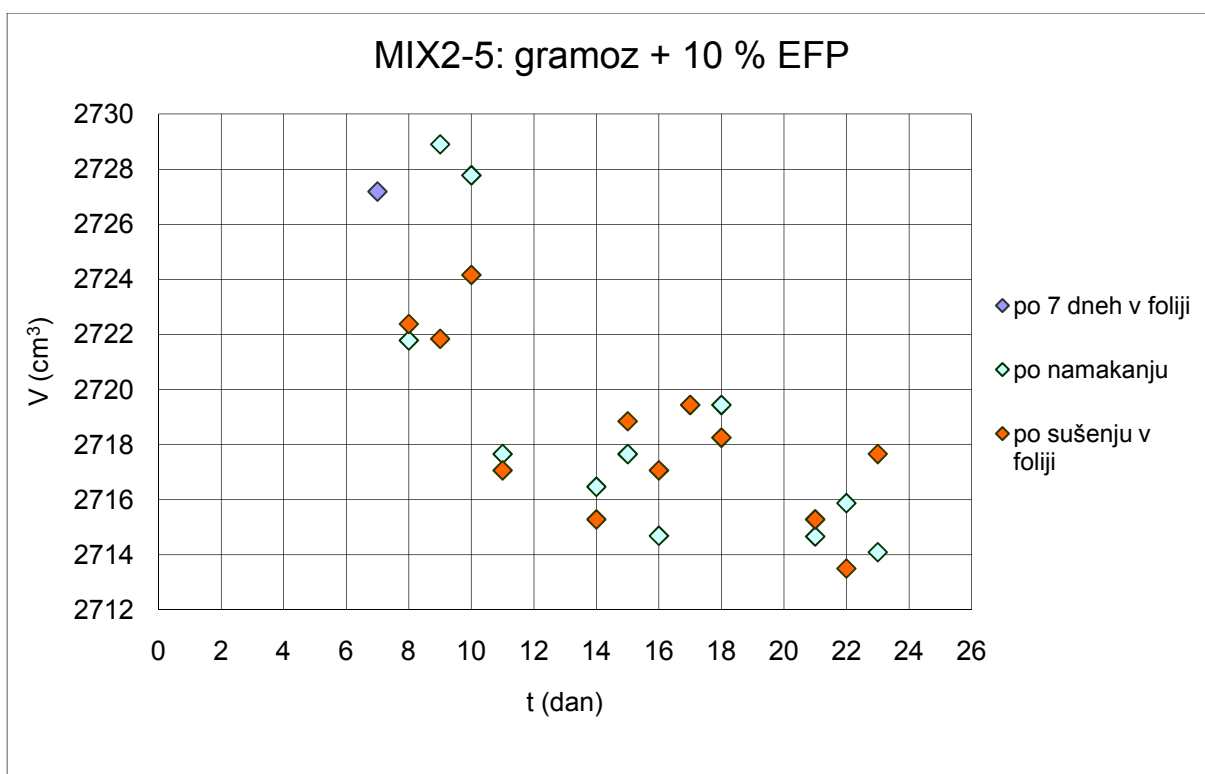


Slika 38: ETT vzorcev iz mešanice MIX2, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja

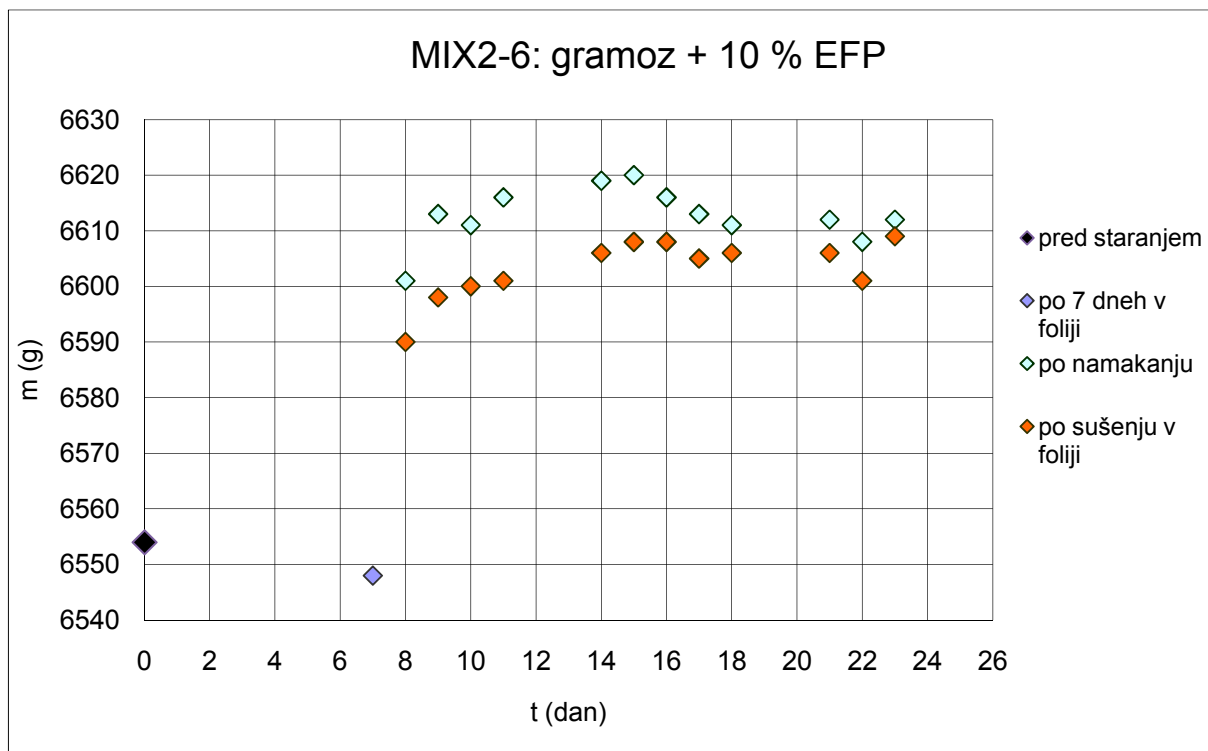
V nadaljevanju je prikazano spreminjanje mase in volumna vzorcev, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja, v odvisnosti od časa (slike 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46).



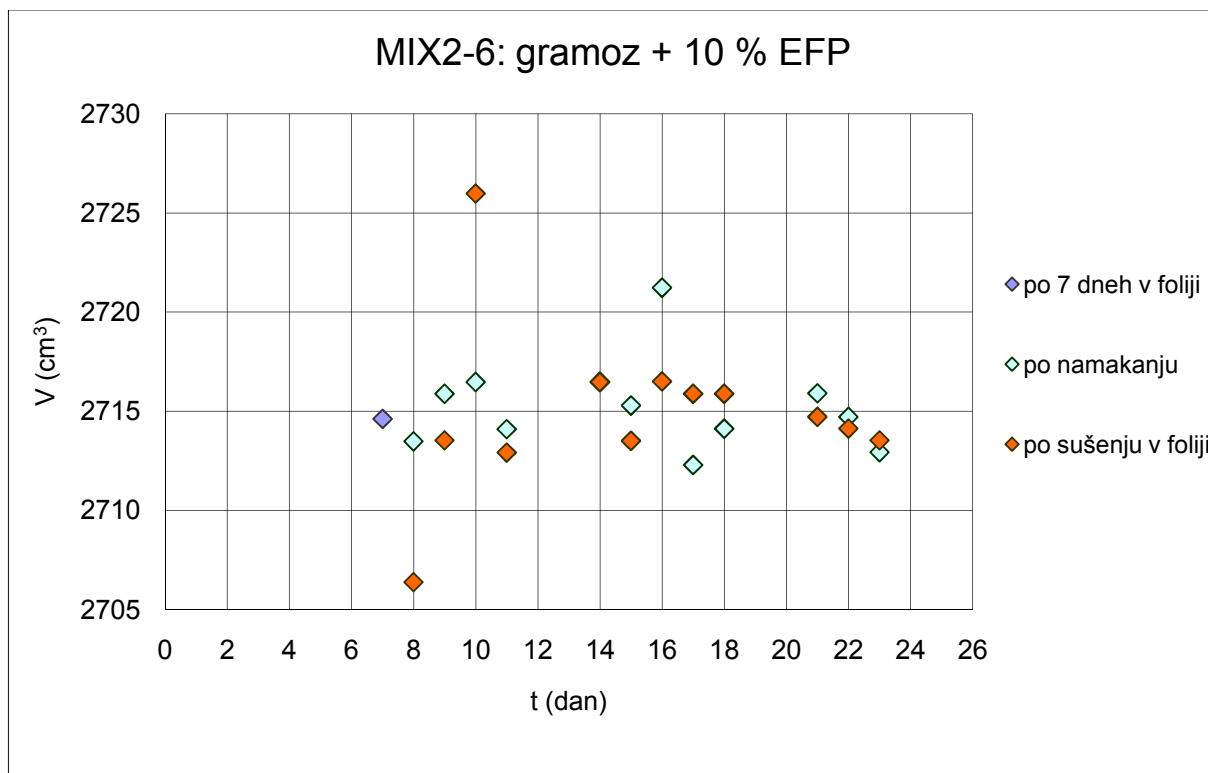
Slika 39: Sprememba mase vzorca MIX2-5, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja v foliji



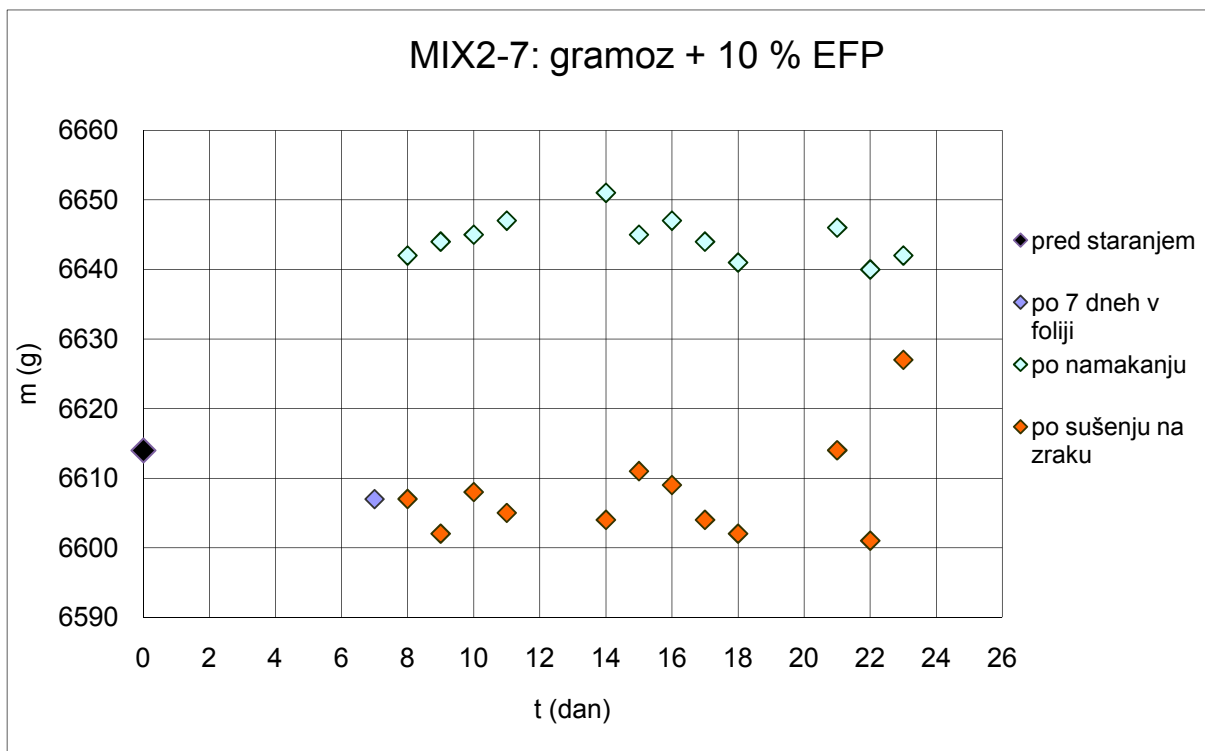
Slika 40: Sprememba volumna vzorca MIX2-5, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja v foliji



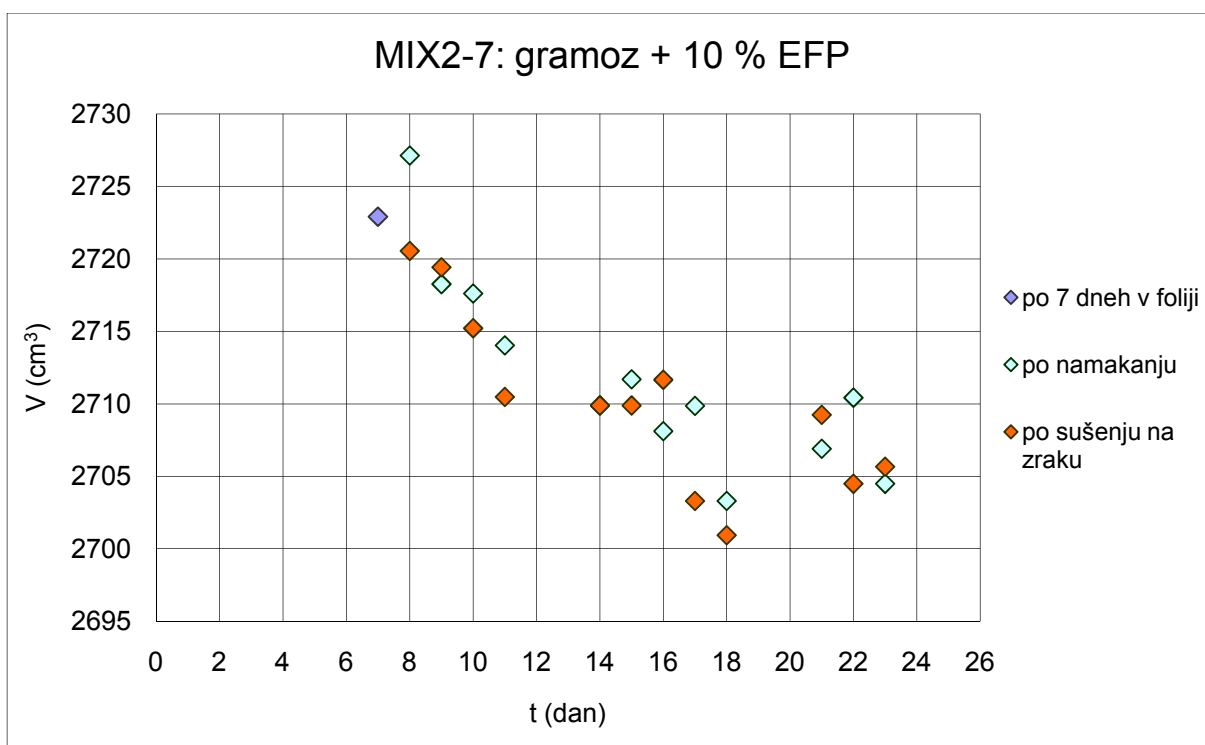
Slika 41: Sprememba mase vzorca MIX2-6, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja v foliji



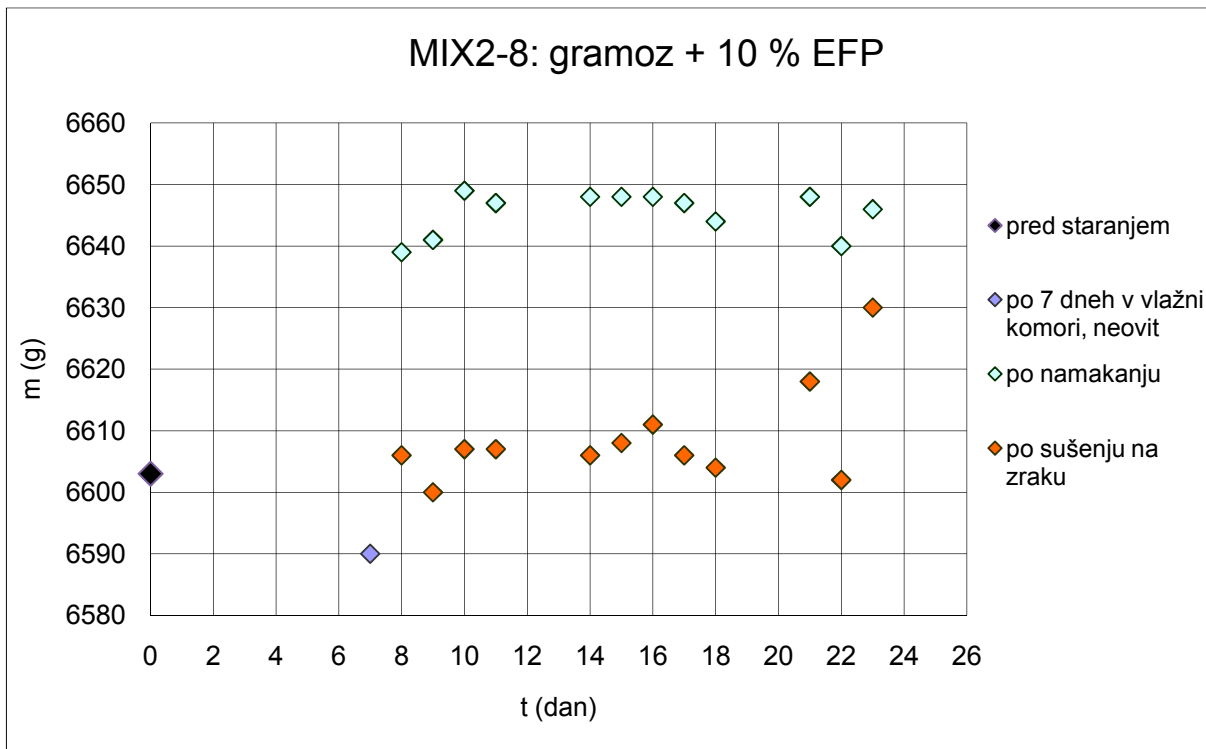
Slika 42: Sprememba volumna vzorca MIX2-6, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja v foliji



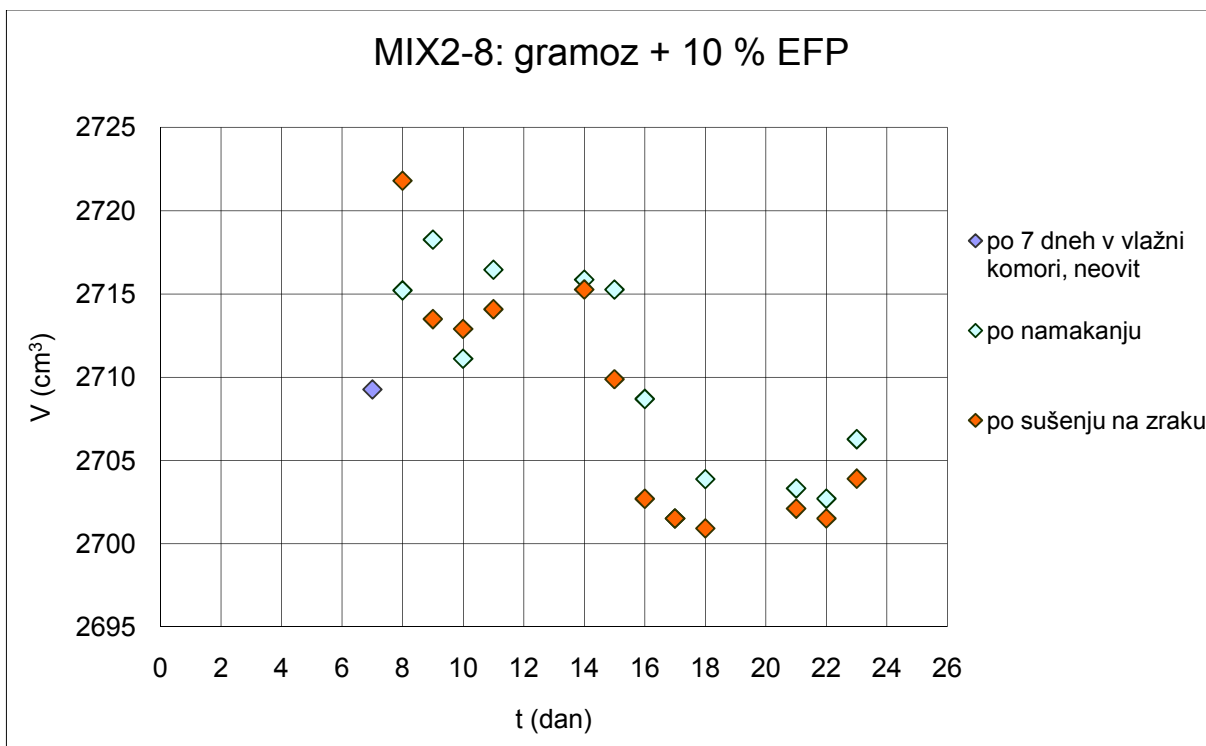
Slika 43: Sprememba mase vzorca MIX2-7, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja na zraku



Slika 44: Sprememba volumna vzorca MIX2-7, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja na zraku



Slika 45: Sprememba mase vzorca MIX2-8, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja na zraku



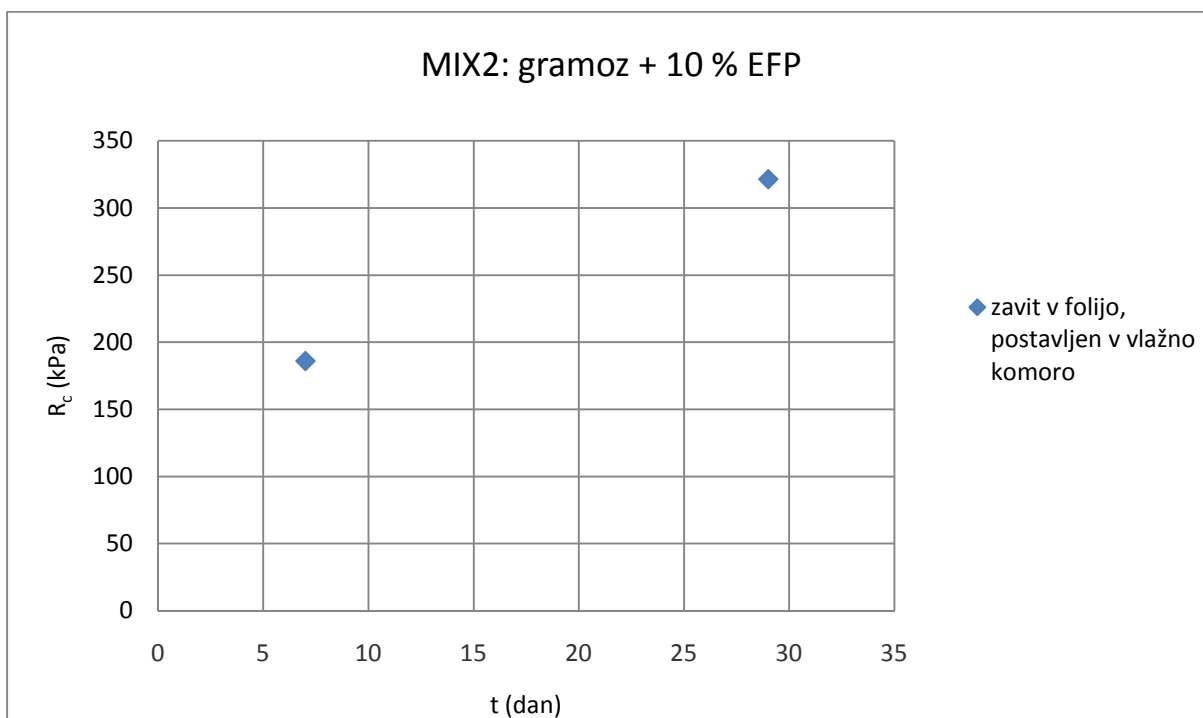
Slika 46: Sprememba volumna vzorca MIX2-8, izpostavljenega 12 ciklom namakanja in sušenja na zraku

### 5.2.3 Rezultati razcepne natezne trdnosti

RNT za mešanico MIX2 z 10 % deležem EFP je bila narejena na dveh vzorcih, starih 7 in 29 dni. Vzorca sta bila starana v foliji. Podatke o vzorcih podaja tabela 14. Rezultata razcepne natezne trdnosti sta prikazana na sliki 47.

Tabela 14: Vzorca mešanice MIX2, starana v foliji

Vzorec	MIX2-17	MIX2-3
Starost (dni)	7	29
Namočen	ne	ne
$m$ po nabijanju (g)	6584	6576
$m$ pred preiskavo (g)	6578	6559
$w$ (%)	4,6	4,3
$Sr$ (%)	68,9	64,4
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,42	2,41
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,31	2,31
$R_{it}$ (kPa)	186,02	322,83



Slika 47: RNT valjastih vzorcev, pripravljenih iz mešanice MIX2

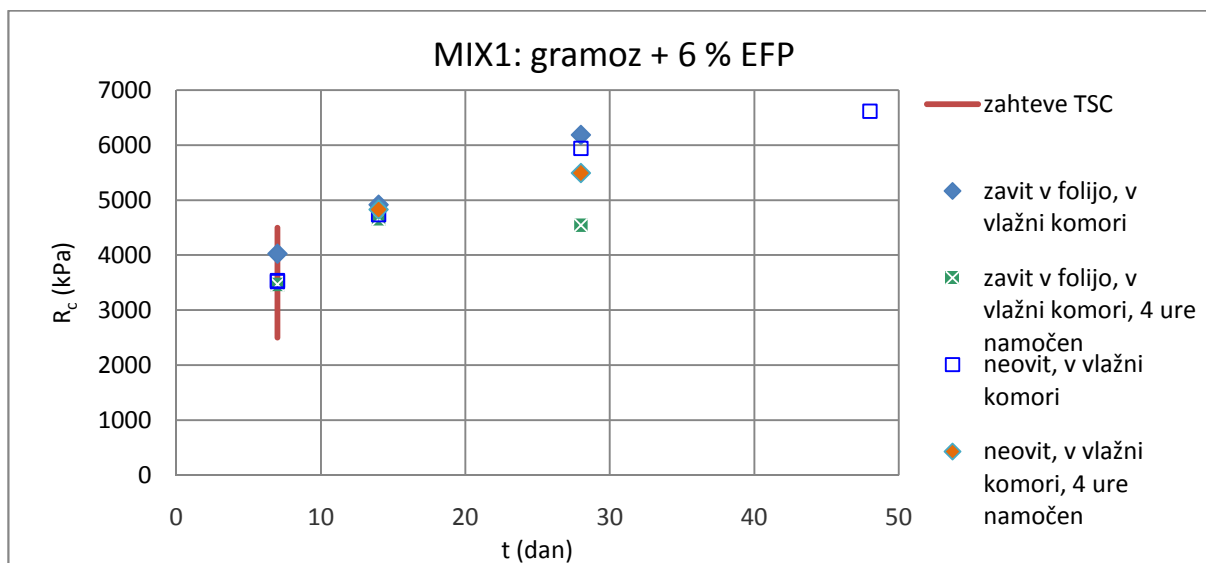
## 6 RAZPRAVA

### 6.1 Uvodne ugotovitve

Vzorci, na katerih je bila narejena preiskava ETT, smo primerjali z zahtevami TSC, ki podaja minimalno doseženo in največjo priporočeno vrednost tlačne trdnosti vzorcev po 7 dneh. Vzorci obeh mešanic, MIX1 s 6 % in MIX2 s 10 % EFP, so ne glede na uporabljen način staranja in nege vzorcev, zadostili temu kriteriju. Vzorci mešanice MIX2, ki so bili med staranjem zaviti v folijo in postavljeni v vlažno komoro, po 7 dneh presegajo najvišjo priporočljivo vrednost. Vzorci predhodnih preiskav iz mešanice M1, pa za razliko od ostalih ne dosegajo minimalne tlačne trdnosti po TSC. Kljub temu, da so pripravljani z enakim masnim odstotkom pepela in vlage kot vzorci iz mešanice MIX1, njihova tlačna trdnost po 7 dneh ne izpolni zahtev. Razlika v rezultatu je predvsem zaradi nevesčnosti pri pripravi prvih vzorcev. Iz tabele 2 in tabele 3 je razvidno, da vzorci M1 dosegajo nekoliko nižjo zbitost kot primerljivi vzorci MIX1.

### 6.2 Prirast tlačne trdnosti glede na način staranja oziroma namakanja vzorcev

Iz slike 48 je razvidno, da najvišjo trdnost iz mešanice MIX1 s 6 % deležem EFP dosegajo vzorci zaviti v folijo starani v vlažni komori, najmanjšo pa vzorci, ki so bili pred preiskavo ETT za 4 ure preplavljeni z vodo. Vidi se, da glede na način staranja in negovanja vzorcev, tlačna trdnost s časom narašča. Pri enem vzorcu, ki je bil zaviti v folijo, staran v vlažni komori ter pred preiskavo namočen v vodo, je šlo nekaj narobe in je po 28 dneh dosegel nižjo trdnost kot po 14 dneh. Največja razlika v prirastu ETT, ovitih in neovitih vzorcev, staranih v vlažni komori, je vidna po enem tednu. Po 14 in 28 dneh pa lahko vidimo, da so razlike zelo majhne in da način staranja ne vpliva bistveno na prirast tlačne trdnosti.



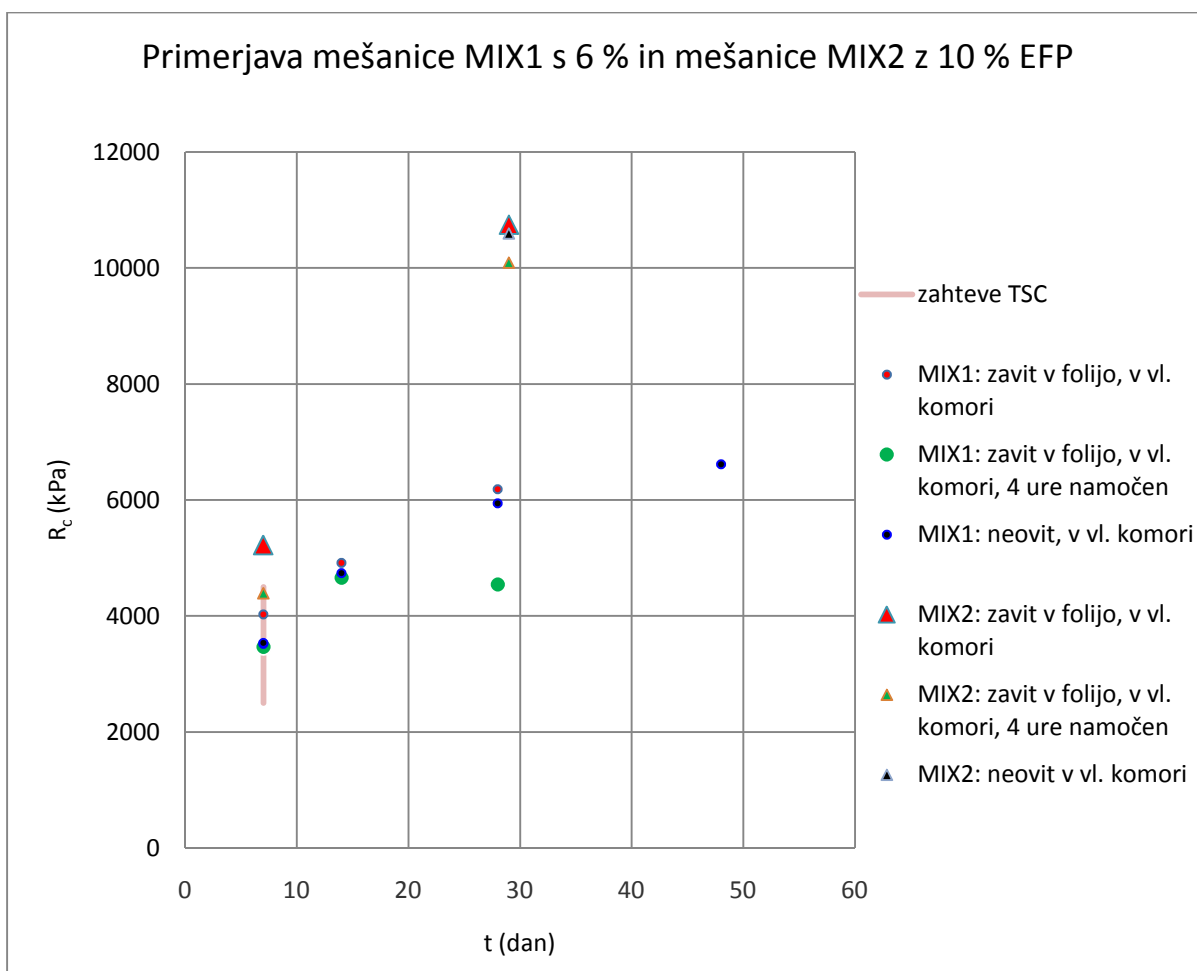
Slika 48: Primerjava rezultatov ETT vzorcev iz mešanice MIX1



Na vzorcih iz mešanice MIX2 z 10 % deležem EFP lahko vidimo, da je prirast tlačne trdnosti po 28 dneh za ovite in neovite vzorce (starane v vlažni komori) praktično enak. Nekoliko nižjo trdnost je dosegel namočen vzorec, vendar tudi ta ne odstopa bistveno (slika 49).

### 6.3 Enoosna tlačna trdnost vzorcev iz mešanice MIX1 s 6 % pepela in mešanice MIX2 z 10 % pepela

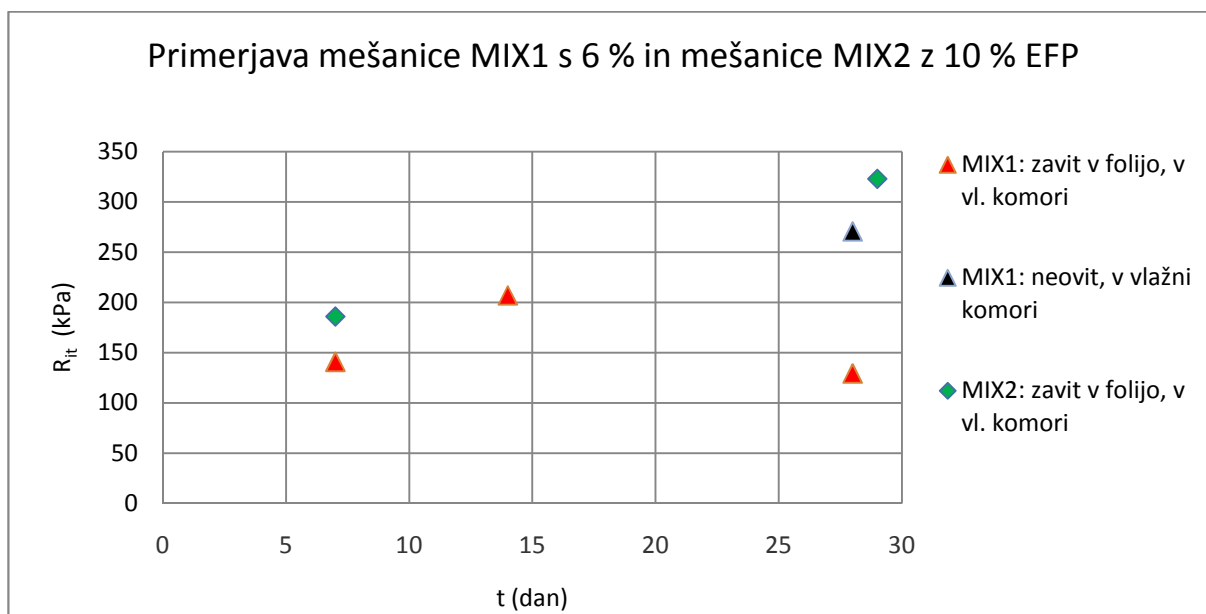
Vzorci, pripravljene iz mešanice MIX2 z večjim deležem veziva, dosegajo višje tlačne trdnosti kot vzorci iz mešanice MIX1. S slike 49 je razvidno, da so tlačne trdnosti vzorcev MIX2 po 28 oz. 29 dneh za približno 40 % višje glede na vzorce MIX1. Če primerjamo obe mešanici, se dobro vidi, da delež EFP pomembno vpliva na trdnost zmesi.



Slika 49: Primerjava rezultatov ETT glede na različne mešanice in načine staranja

#### 6.4 Rezultati razcepne natezne trdnosti (RNT) vzorcev, pripravljenih iz mešanice MIX1 s 6 % in MIX2 z 10 % EFP

RNT s staranjem vzorcev narašča. Vzorec iz mešanice MIX2 je razvil nekoliko višjo trdnost kot vzorci iz MIX1 (slika 50). Na 28 dni starem vzorcu MIX1, ki je bil zavrt v folijo in staran v vlažni komori, preiskava ni uspela, saj je po 28 dneh dosegel nižjo RNT kot enaka vzorca stara 7 in 14 dni.



Slika 50: Primerjava rezultatov RNT glede na različno sestavljene mešanice

RNT vzorca iz mešanice MIX1, ki je po 28 dneh dosegel najvišjo trdnost, predstavlja 4 % delež trdnosti, ki jo je pri preiskavi ETT po 28 dneh dosegel enak vzorec. Dosežena RNT vzorca iz mešanice MIX2 pa po 29 dneh predstavlja 3 % delež ETT primerljivega vzorca.

#### 6.5 Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja

Iz slike 51 vidimo, da sta najvišjo tlačno trdnost po končanih ciklih zmrzovanja in tajanja dosegla vzorca, ki sta bila odtajana na zraku.

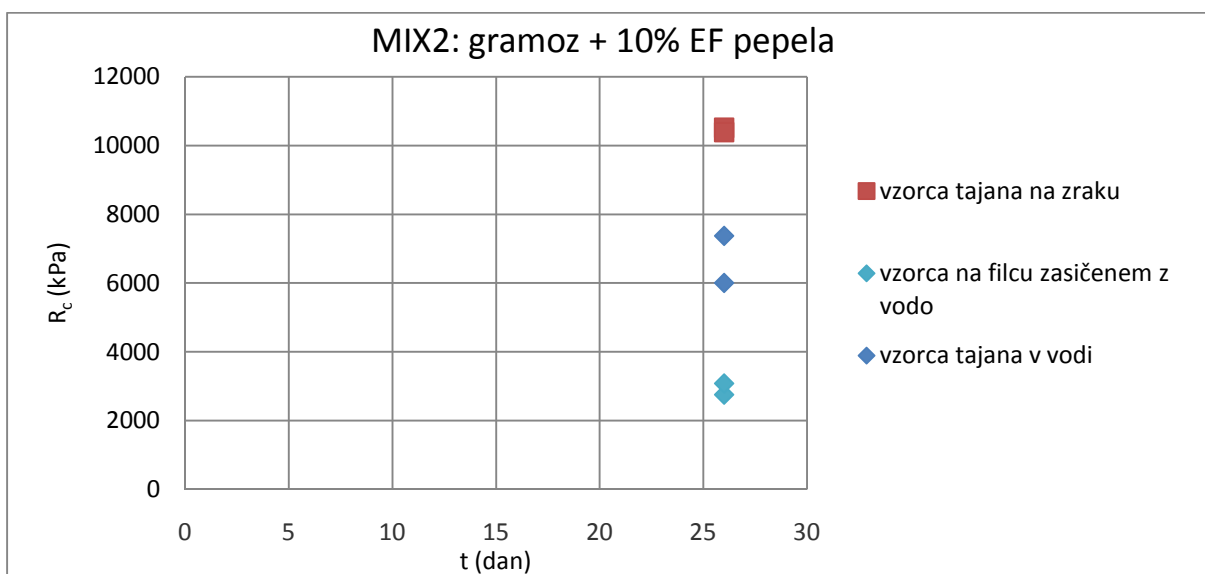
Na vzorca, ki smo ju tajali na zraku in prekrili z vrečko, zmrzal ni imela bistvenega vpliva. Med preizkusom zmrzlinke odpornosti sta ostala nespremenjena in nista razpadala. Iz slike 29 in slike 31 vidimo, da sta vzorca med preizkusom zmrzlinke odpornosti zaradi izsuševanja izgubljala na masi. Oba vzorca sta dosegla zelo visoke tlačne trdnosti. Iz primerjave s podobno starimi nezmrznjenimi vzorci iste mešanice (MIX2) lahko vidimo, da zmrzal na prirast k tlačni trdnosti ni imela vpliva, saj so rezultati praktično enaki.

Vzorca, ki smo ju tajali v vodi, sta pri preskusu ETT dosegla nekoliko nižjo tlačno trdnost kot vzorca, odtajana na zraku (slika 51). Na vzorcih smo med preizkusom zmrzlinke odpornosti opazili nekaj

manjših sprememb. Zaradi namakanja se je vzorcem začela luščiti izravnava na zgornji ploskvi, po površini pa sta rahlo obleдела. Iz podatkov o merjeni masi med preskusom zmrzlinke odpornosti (slika 24 in slika 26) se vidi, da sta vzorca prvih nekaj dni vpijala vodo. V tem času jima je masa naraščala. Kasneje pa sta na masi začela izgubljati, ker so jima začeli odpadati robovi in izravnava z EFP.

Vzorca, zmrznjena in tajana na filcu, sta se med preiskavo zmrzlinke odpornosti vidno najbolj spreminjala. Po petem ciklu so se jima začeli krušiti robovi in razpadla je izravnava. Iz slike 34 in slike 36 je vidno, da sta vzorca sprva preko kapilarnega dviga vpijala vodo in pridobivala na masi. Po 5 ciklu, ko začneta razpadati, pa se jima masa manjša. Iz rezultatov merjenih dimenzij (slike 35 in slike 37) lahko razberemo, da jima volumen narašča. Vzorca sta namreč v območju kapilarnega dviga začela nabrekati. Med vzorci, ki so prestali preizkus zmrzlinke odpornosti, sta dosegla najnižjo tlačno trdnost.

Rezultati merjenja dimenzij (slike 25, 27, 30, 32, 35 in 37) so zaradi premalo natančne metode merjenja zelo različni in po večini ne prikažejo realnega stanja.



Slika 51: Primerjava ETT vzorcev, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom zmrzovanja in tajanja

## 6.6 Vzorci, izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja

Vzorci, ki so bili izpostavljeni 12 ciklom namakanja in sušenja, se vizualno niso spreminjali. Iz meritev mas (slike 39, 41, 43 in 45) je lepo razvidno vpijanje vode med namakanjem in izsuševanje vzorca v ciklu sušenja. Izsuševanje je najbolj izrazito pri vzorcih, sušenih na zraku.

---

Po preizkusu namakanja in sušenja je najvišjo tlačno trdnost dosegel vzorec, ki je bil staran neovit v vlažni komori in sušen na zraku, najnižjo pa vzorec, ki je bil zavrt v folijo in staran v vlažni komori ter sušen, zavrt v folijo.

Vzorec, ki je po 12 ciklih namakanja in sušenja dosegel najvišjo trdnost, je že po 23 dneh razvil 85 % tlačne trdnosti vzorca iz enake mešanice, ki je brez 12 ciklov po 29 dneh dosegel najvišjo vrednost. Vzorec z najnižjo trdnostjo po 12 ciklih, pa je v primerjavi z njim razvil 75 % trdnosti. Iz tega lahko sklepamo, da namakanje in sušenje ne vplivata bistveno na vezanje vzorca.

## 7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo ugotovili, da količina EFP v zmesi zelo vpliva na trdnost hidravlično vezanih plasti. Poleg vpliva deleža pepela na vezanje smo skušali preveriti tudi vpliv različnega staranja in negovanja vzorcev. Ugotovili smo, da že po 28 dneh različno negovani in starani vzorci pri preiskavi ETT dosegajo podobne vrednosti. Zato lahko sklepamo, da način staranja in nege na končno trdnost z EFP vezanih plasti ne vplivata bistveno.

Neugoden vpliv spremenljivih vremenskih razmer na hidravlično vezane plasti smo posnemali s preizkusom zmrzlinke odpornosti ter s preizkusom namakanja in sušenja. Iz rezultatov zmrzlinke odpornosti lahko vidimo, da ima na zamrzovanje velik vpliv prisotnost vode. Na vzorca, ki sta bila zmrznjena in odtajana na zraku, zamrzovanje ni imelo vpliva. Njuna dosežena trdnost je bila povsem primerljiva z nezmrznjenimi vzorci enake starosti, medtem ko so vzorci ob prisotnosti vode dosegali nekoliko nižje vrednosti. Voda pa ni imela velikega vpliva pri preiskavi namakanja in sušenja. Iz rezultatov tlačne trdnosti je bilo namreč ugotovljeno, da namakanje in sušenje ne vpliva bistveno na vezanje z EFP stabilizirane zmesi.

**VIRI**

American Coal Ash Association Educational Foundation. 2008. Soil Stabilization and Pavement Recycling with Self-Cementing Coal Fly Ash. Aurora, American Coal Ash Association: str. 5.

JUS U. BI. 050: 1969. Geomehnička ispitivanja – Ispitivanje otpornosti cementom stabilizovanig tla prema mrazu. Beograd, JZS.

Petkovšek, A. 2011/2012. Vaje iz Osnov mehanike tal. Operativno gradbeništvo. Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo. Univerza v Ljubljani: str. 44-45.

Petkovšek A., Smolar J., Majes B. 2013. Tehnična mapa za kompozite iz mešanice žlindre in EF pepela iz TE Trbovlje. UL FGG, E-03-13: str 10-14.

Problemi poškodovanih odsekov državnih cest v upravljanju direkcije RS za ceste. 2013. Ministrstvo za infrastrukturo in prostor republike Slovenije. [http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/Gradivo\\_novinarska/Stanje\\_cest\\_-\\_gradivo\\_za\\_novinarsko\\_EURO\\_RAP.pdf](http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/Gradivo_novinarska/Stanje_cest_-_gradivo_za_novinarsko_EURO_RAP.pdf) (Pridobljeno 19. 9. 2013)

Svetličič, S. 2010. Smernice za načrtovanje sanacij in obnov pri vzdrževanju vozišč na državnih cestah – novosti. V: Vilhar, M. (ur.) 10. slovenski kongres o cestah in prometu 20. - 22. oktober. 2010. Ljubljana, DRC.

<http://www.drc.si/Portals/6/prispevki/VIII/1414-1424.pdf> (Pridobljeno 19. 9. 2013.)

TSC 06.320. 2001. Vezane spodnje nosilne plasti s hidravličnimi vezivi.

Žmavc, J. 2007. Gradnja cest. Voziščne konstrukcije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 30-32.

**Ostali viri:**

SIST/ ISO/TS 17892-3:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin. Del 3, Ugotavljanje gostote zrn - Metoda s piknometrom.

SIST/ ISO/TS 17892-1:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin. Del 1, Ugotavljanje vlažnosti.

SIST/ ISO/TS 17892-4:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin. Del 4, Ugotavljanje zrnastostne sestave.

SIST EN 13286-2:2010. Nevezane in hidravlično vezane zmesi. Del 2, Preskusne metode za določanje laboratorijske referenčne gostote in vlage - Preskus po Proctorju.

SIST EN 13286-50:2005. Nevezane in hidravlično vezane zmesi. Del 50, Postopek (metoda) za pripravo preizkušancev iz hidravlično vezanih zmesi, zgoščenih po Proctorjevem postopku ali vibracijsko mizo.

SIST EN 14227-3:2005. Hidravlično vezane zmesi – Specifikacije – 3. del: Z elektrofiltrskim pepelom vezane zmesi.

SIST EN 14227-4:2005. Hidravlično vezane zmesi – Specifikacije – 4. del: Elektrofiltrski pepel za hidravlično vezane zmesi.

## **SEZNAM PRILOG**

PRILOGA A: Ugotavljanje zrnastostne sestave

PRILOGA B: Določitev gostote zrn s pomočjo piknometra

PRILOGA C: Ugotavljanje optimalne vlažnosti za mešanico MIX1

PRILOGA D: Ugotavljanje optimalne vlažnosti za mešanico MIX2

PRILOGA E: Zbrani rezultati vzorcev, ki jim je bila določena tlačna ali razcepna natezna trdnost



PRILOGA A: Ugotavljanje zrnavostne sestave

**UGOTAVLJANJE ZRNAVOSTNE SESTAVE**

SIST/ISO/TS 17892-4:2004

**OPIS ZEMLJINE:** dolomitni drobljenec iz kamnoloma Lukovica

	1. posoda	2. posoda	3. posoda
Masa posode $m_p$ (g)	939	1014	622
Masa posode in mokrega vzorca $m_{m+p}$ (g)	5195	4604	5403
Masa posode in suhega vzorca $m_{s+p}$ (g)	5066	4496	5258
Masa mokrega vzorca $m_m$ (g)	4256	3590	4781
Masa suhega vzorca $m_s$ (g)	4127	3482	4636
Masa vode $m_w$ (g)	129	108	145
Vlaga $w$ (%)	3,13	3,10	3,13
Skupna masa suhega vzorca $m_s$ (g)	12245		
Povprečna vlaga $w$ (%)	3,12		

Sito (mm)	Ostane na situ (g)	Presejek (g)	Presejek (%)
31,50	0,00	12245,65	100,0
22,40	463,00	11782,65	96,2
16,00	914,00	10868,65	88,8
8,00	2496,00	8372,65	68,4
4,00	2368,26	6004,39	49,0
2,00	2048,11	3956,28	32,3
1,00	1553,73	2402,55	19,6
0,50	827,59	1574,96	12,9
0,250	469,27	1105,69	9,0
0,125	264,27	841,42	6,9
0,063	181,62	659,80	5,4
< 0,063	659,80	0	0

**Delež finih zrn manjših od 0,063 mm: 5,4 % < 10 % (Aerometriška preiskava ni potrebna)**

PRILOGA B: Določitev gostote zrn s pomočjo piknometra

<b>UGOTAVLJANJE GOSTOTE ZRN – METODA S PIKNOMETROM</b> SIST/ISO/TS 17892-3:2004		
LOKACIJA	kamnolom Lukovica	
OPIS ZEMLJINE:	dolomitni drobljenec GW-GM	
PRIPRAVA VZORCA:	zrna manjša od 0,063 mm; odsejana po mokrem postopku in posušena	
ZAČETEK PREISKAVE:	9. 5. 2013	
KONEC PREISKAVE:	10. 5. 2013	
UPORABLJENA TEKOČINA: destilirana voda		
Oznaka piknometra:	130	132
Masa praznega piknometra <b>m<sub>0</sub></b> (g)	41,925	36,756
Masa piknometra in tekočine <b>m<sub>1</sub></b> (g)	138,980	137,639
Masa piknometra in zemljine <b>m<sub>2</sub></b> (g)	57,545	48,099
Masa piknometra, zemljine in tekočine <b>m<sub>3</sub></b> (g)	149,070	144,950
Ob upoštevanju vlažne zemljine:		
Masa prazne posode <b>m<sub>p</sub></b> (g)	227,57	229,03
Masa posode in suhe zemljine <b>m<sub>s</sub></b> (g)	243,15	240,33
Masa vode <b>m<sub>w</sub></b> (g)	0,040	0,043
Vlaga <b>w</b> (%)	0,3	0,4
Masa suhega vzorca <b>m<sub>4</sub></b> (g)	15,58	11,30
Temperatura <b>T</b> (°C)	24,9	24,9
Gostota vode <b>p<sub>w</sub></b> (t/m <sup>3</sup> )	0,997105	0,997105
Gostota zrnja <b>p<sub>s</sub></b> (t/m <sup>3</sup> )	2,809204	2,794466
Gostota zrn <b>p<sub>s</sub></b> za preiskan dolomitni drobljenec znaša : <b>2,80 t/m<sup>3</sup></b>		

PRILOGA C: Ugotavljanje optimalne vlažnosti za mešanico MIX1

MODIFICIRANI PROCTORJEV PREIZKUS						
OPIS ZEMLJINE: mešanica MIX1: dolomitni drobljenec GW-GM + 6 % EFP						
GOSTOTA ZRN $\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> ):	2,8					
NAJVEČJA ZRNA $d$ (mm):	31,5					
ŠTEVILO SLOJEV:	5					
ŠTEVILO UDARCEV:	59					
MASA NABIJALA $m$ (kg):	4,5					
VIŠINA PADA (mm):	450					
ENERGIJA NABIJANJA (J/m <sup>3</sup> ):	2672					
<b>DOLOČITEV GOSTOTE</b>						
št. preizkušanca	1	2	3	4	5	6
Oznaka	MPP3	MPP4	vzorec1	vzorec2	vzorec3	vzorec5
$m$ cilinder + podlaga (g)	8910	8910	8985	8985	8985	8981
$m$ cilinder + podlaga + zemljina (g)	14226	14363	14200	14492	14574	14518
Masa mokrega vzorca $m_m$ (g)	5316	5453	5215	5507	5589	5537
Volumen cilindra $V$ cilindra (cm <sup>3</sup> )	2209	2209	2209	2209	2209	2209
Gostota $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	2,407	2,469	2,361	2,493	2,530	2,507
Suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	2,328	2,367	2,290	2,377	2,394	2,352
<b>DOLOČITEV VLAGE</b>						
Masa posode $m_p$ (g)	1010,8	542,92	1011,4	1013,4	546,21	1011,12
Masa posode in mokrega vzorca $m_{m+p}$ (g)	6320	5985	6220	6492	6104	6517
Masa posode in suhega vzorca $m_{s+p}$ (g)	6147	5762	6063	6237	5805	6177
Masa mokrega vzorca $m_m$ (g)	5309,16	5442,08	5208,62	5478,63	5557,79	5505,88
Masa suhega vzorca $m_s$ (g)	5136,16	5219,08	5051,62	5223,63	5258,79	5165,88
Masa vode $m_w$ (g)	173	223	157	255	299	340
Vlaga $w$ (%)	3,37	4,27	3,11	4,88	5,69	6,58
<b>FAZNA RAZMERJA:</b>						
Masa vode $m_w$ (g)	173,22	223,45	157,19	256,32	300,68	341,92
Masa trdnin $m_{soil}$ (g)	5142,78	5229,55	5057,81	5250,68	5288,32	5195,08
Volumen trdih delcev $V_{soil}$ (cm <sup>3</sup> )	1836,71	1867,70	1806,36	1875,24	1888,69	1855,39
Volumen vode $V_w$ (cm <sup>3</sup> )	173,22	223,45	157,19	256,32	300,68	341,92
Volumen zraka $V_a$ (cm <sup>3</sup> )	199,00	117,79	245,38	77,37	19,57	11,63
Količnik por $e$	0,20	0,18	0,22	0,18	0,17	0,19
Stopnja zasičenosti $S_r$ (%)	46,54	65,48	39,05	76,81	93,89	96,71
<b>REZULTAT</b>	optimalna vlaga $w_{opt}$ (%) 5,8		Največja suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> ) 2,385			

PRILOGA D: Ugotavljanje optimalne vlažnosti za mešanico MIX2

<b>MODIFICIRANI PROCTORJEV PREIZKUS</b>					
OPIS ZEMLJINE: mešanica MIX2: dolomitni drobljenec GW-GM + 10 % EFP					
GOSTOTA ZRN $\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> ):	2,8				
NAJVEČJA ZRNA $d$ (mm):	31,5				
ŠTEVILO SLOJEV:	5				
ŠTEVILO UDARCEV:	59				
MASA NABIJALA $m$ (kg):	4,5				
VIŠINA PADA (mm):	450				
ENERGIJA NABIJANJA (J/m <sup>3</sup> ):	2672				
<b>DOLOČITEV GOSTOTE</b>					
št. preizkušanca	1	2	3	4	5
Oznaka	MPP1	MPP2	MPP3	MPP4	mpp5
$m$ cilinder + podlaga (g)	8908	8908	8908	8908	8904
$m$ cilinder+podlaga + zemljina (g)	14132	14309	14362	14426	14356
Masa mokrega vzorca $m_m$ (g)	5224	5401	5454	5518	5452
Volumen cilindra $V$ cilindra (cm <sup>3</sup> )	2209	2209	2209	2209	2209
Gostota $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	2,365	2,445	2,469	2,498	2,468
Suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	2,287	2,341	2,343	2,354	2,309
<b>DOLOČITEV VLAGE</b>					
Masa posode $m_p$ (g)	1011,72	981,91	1009,72	1010,6	1013,4
Masa posode in mokrega vzorca $m_{m+p}$ (g)	6222	6356	6434	6491	6430
Masa posode in suhega vzorca $m_{s+p}$ (g)	6051	6128	6156	6174	6081
Masa mokrega vzorca $m_m$ (g)	5210,28	5374,09	5424,28	5480,40	5416,61
Masa suhega vzorca $m_s$ (g)	5039,28	5146,09	5146,28	5163,40	5067,61
Masa vode $m_w$ (g)	171	228	278	317	349
Vlaga $w$ (%)	3,39	4,43	5,40	6,14	6,89
<b>FAZNA RAZMERJA:</b>					
Masa vode $m_w$ (g)	171,45	229,14	279,52	319,17	351,28
Masa trdnin $m_{soil}$ (g)	5052,55	5171,86	5174,48	5198,83	5100,72
Volumen trdih delcev $V_{soil}$ (cm <sup>3</sup> )	1804,48	1847,09	1848,03	1856,72	1821,69
Volumen vode $V_w$ (cm <sup>3</sup> )	171,45	229,14	279,52	319,17	351,28
Volumen zraka $V_a$ (cm <sup>3</sup> )	233,00	132,70	81,38	33,03	35,97
Količnik por $e$	0,22	0,20	0,20	0,19	0,21
Stopnja zasičenosti $S_r$ (%)	42,39	63,33	77,45	90,62	90,71
<div style="text-align: center;"> </div>					
<b>REZULTAT</b>	optimalna vlaga $w_{opt}$ (%) 6,1			Največja suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> ) 2,354	

PRILOGA E: Zbrani rezultati vzorcev, ki jim je bila določena tlačna ali razcepna natezna trdnost

**REZULTATI ENOOSNE TLAČNE TRDNOSTI**

Način staranja	zavrt v folijo, postavljen v vlažno komoro												
Vzorec	M1-2	MIX1-16	MIX1-3	MIX1-6	MIX2-16	MIX2-2	M1-1	M1-3	MIX1-14	MIX1-1	MIX1-4	MIX2-15	MIX2-1
Starost (dni)	7	7	14	28	7	29	7	14	7	14	28	7	29
Namočen	da	da	da	da	da	da	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne
<i>w</i> pred namakanjem (%)	4,58	4,16	4,39	3,69	4,60	4,30							
<i>Sr</i> pred namakanjem (%)	60,52	61,90	61,34	48,30	73,40	67,09							
<i>w</i> po preiskavi (%)	5,60	5,00	5,40	5,20	5,20	5,20	4,10	4,50	4,40	4,30	4,20	4,90	4,20
<i>Sr</i> po preiskavi (%)	72,93	73,64	76,48	71,34	82,15	80,80	55,25	60,08	63,56	60,03	59,87	75,92	61,01
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,41	2,44	2,44	2,42	2,45	2,45	2,39	2,39	2,42	2,41	2,41	2,44	2,40
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,28	2,33	2,31	2,30	2,33	2,33	2,29	2,29	2,32	2,31	2,31	2,33	2,31
<i>R<sub>c</sub></i> (MPa)	1,31	3,47	4,66	4,55	4,39	10091,32	1,80	4,15	4,03	4,92	6,18	5,22	1,07
Način staranja	staran v vlažni komori, neovit												
Vzorec	MIX1-8	MIX1-11	MIX1-11	MIX1-17	MIX1-18	MIX1-17	MIX1-9	MIX1-12	MIX2-4				
Starost (dni)	14	28	7	7	7	14	28	48	29				
Namočen	da	da	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne				
<i>w</i> pred namakanjem (%)	4,1	5,4											
<i>Sr</i> pred namakanjem (%)	56,3	60,1											
<i>w</i> po preiskavi (%)	5,22	5,40	4,30	4,10	4,30	4,60	4,50	4,40					
<i>Sr</i> po preiskavi (%)	74,48	76,98	60,30	56,82	58,14	65,10	61,52	64,90					
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,44	2,44	2,41	2,40	2,39	2,42	2,40	2,41					
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,31	2,31	2,31	2,31	2,29	2,31	2,30	2,31					
<i>R<sub>c</sub></i> (MPa)	4,83	5,49	3,52	3,54	4,74	5,94	6,62	10,60					
Vzorca so prestali	Preizkus zmrzlinске odpornosti						Preizkus namakanja in sušenja						
	odtajana v vodi		odtajana na zraku		vzorca na filcu		sušena v foliji		sušena na zraku				
Vzorec	MIX2-13	MIX2-14	MIX2-9	MIX2-10	MIX2-11	MIX2-12	MIX2-5	MIX2-6	MIX2-7	MIX2-8			
Starost (dni)	26	26	26	26	26	26	23	23	23	23			
V vlažni komori	v foliji	v foliji	v foliji	v foliji	v foliji	v foliji	v foliji	v foliji	neovit	v foliji			
<i>m</i> po nabijanju (g)	6596	6579	6604	6599	6592	6594	6542	6554	6614	6603			
<i>m</i> pred preiskavo (g)	6532	6478	6414	6412	6518	6522	6602	6609	6627	6630			
<i>w</i> (%)	5,20	5,20	1,80	1,90	6,20	5,70	6,10	6,00	5,40	5,40			
<i>Sr</i> (%)	76,26	71,71	28,06	29,28	72,97	70,62	86,55	87,07	85,64	85,07			
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,43	2,40	2,38	2,37	2,36	2,37	2,44	2,44	2,46	2,46			
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,31	2,28	2,33	2,33	2,22	2,25	2,30	2,31	2,34	2,34			
<i>R<sub>c</sub></i> (MPa)	7,37	6,00	10,51	10,39	2,76	3,09	8,15	8,75	8,47	9,15			

**REZULTATI RAZCEPNE NATEZNE TRDNOSTI**

Preizkušanelec	MIX1-15	MIX1-2	MIX1-5	MIX1-10	MIX2-17	MIX2-3
Starost (dni)	7	14	28	28	7	29
V vlažni komori	v foliji	v foliji	v foliji	neovit	v foliji	v foliji
Namočen	ne	ne	ne	ne	ne	ne
<i>m</i> po nabijanju (g)	6575	6553	6463	6569	6584	6576
<i>m</i> pred preiskavo (g)	6568	6545	6447	6471	6578	6559
<i>w</i> (%)	4,50	4,40	4,30	4,40	4,60	4,30
<i>Sr</i> (%)	62,39	61,78	54,20	62,11	68,86	64,43
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,41	2,41	2,36	2,41	2,42	2,41
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,30	2,31	2,26	2,31	2,31	2,31
<i>R<sub>it</sub></i> (MPa)	0,14	0,21	0,13	0,27	0,19	0,32