

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

UNIVERZITETNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat/-ka:

MATEJ GORIŠEK

**STRJEVANJE APNENE INJEKCIJSKE MEŠANICE PRI
OBIČAJNEM IN OMEJENEM DOSTOPU OGLJIKOVEGA
DIOKSIDA**

Diplomska naloga št.: 246/B-GR

**HARDENING OF LIME INJECTION GROUT AT NORMAL
AND RESTRICTED ACCESS OF CARBON DIOXIDE**

Graduation thesis No.: 246/B-GR

Mentor/-ica:

prof. dr., Violeta Bokan Bosiljkov

Somentor/-ica:

asist. dr., Petra Štukovnik

Član komisije:

Predsednik komisije:

Ljubljana, 14. 7. 2016

POPRAVKI

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent Matej Gorišek, vpisna številka 26109807, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom:

»Strjevanje apnene injekcijske mešanice pri običajnem in omejenem dostopu ogljikovega dioksida«,

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)

☒ a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, 11. 07. 2016

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.138.24(043.2)
Avtor:	Matej Gorišek
Mentor:	prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Somentorica:	asist. dr. Petra Štukovnik
Naslov:	Strjevanje apnene injekcijske mešanice pri običajnem in omejenem dostopu ogljikovega dioksida
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	40 str., 10 pregl., 26 sl., 11 graf.
Ključne besede:	apnena injekcijska mešanica, dolomitna moka, preiskave injekcijske mešanice, mehanske lastnosti, karbonatizacija

Izvleček

Namen diplomske naloge je bil spremljati potek karbonatizacije in mehanskih lastnosti vzorcev apnene injekcijske mešanice. Apneno injekcijsko mešanico izbrane sestave smo vgradili v standardne kalupe z dimenzijami 40 mm x 40 mm x 160 mm. Prizme smo po tednu dni razkalupili in jih izpostavili dvema različnima pogojema staranja. Polovico prizem smo pustili odležavati na zraku, polovico pa smo jih zaprli v posode s pokrovom iz apnenega ometa. Za namen diplomske naloge smo načrtovali in izdelali posode iz pleksi stekla ter lesen okvir pokrova z mrežico. V okvir smo nanесли sloj apnene malte in tako skušali simulirati vpliv apnenega ometa na zidu ali stropu. Pri treh različnih časih odležavanja prizem v posodi ali na zraku (1 mesec, 2 meseca in 3 mesece) smo na prizmah opravili upogibne in tlačne preiskave ter fenolftaleinski test, s pomočjo katerega spremljamo napredovanje procesa karbonatizacije. Vsak mesec smo odprli po eno posodo in opravili preiskave na prizmah iz posode, vzporedno s preiskavami prizem, ki so odležavale na zraku. Dobljene rezultate tlačne trdnosti, upogibne natezne trdnosti ter fenolftaleinskega testa smo analizirali in naredili primerjavo med mehanskimi lastnostmi in stopnjo karbonatizacije. Ugotovili smo, da je napredovanje karbonatizacije v posodah z omejenim dotokom CO₂ zelo počasno. Rezultati mehanskih lastnosti trdnosti kažejo, da so bile pri vseh starostih povprečne vrednosti upogibne natezne trdnosti in tlačne trdnosti prizem v posodi manjše, kot pa mehanske trdnosti prizem, ki so odležavale na zraku. Po prvem mesecu fenolftaleinski test na prizmah v posodi ni pokazal karbonatizacije. Kljub temu je injekcijska mešanica dosegla relativno visoko trdnost. Domnevamo, da so dobljeni rezultati posledica vpliva kombinacije sušenja prizem in alkalno-karbonatne reakcije.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	624.138.24(043.2)
Author:	Matej Gorišek
Supervisor:	Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.
Cosupervisor:	Assist. Petra Štukovnik, Ph. D.
Title:	Hardening of lime injection grout at normal and restricted access of carbon dioxide
Document type:	Graduation thesis – University studies
Notes:	40 p., 10 tab., 26 fig., 11 graph.
Keywords:	lime injection grout, dolomite filler, test of injection grout, mechanical properties, carbonization

Abstract:

The purpose of the thesis is to monitor carbonation process and mechanical characteristics of lime injection grouts. Lime grout with selected composition was cast in standard prisms of 40 mm x 40 mm x 160 mm. The prisms were demoulded after 7 days and after that they were exposed to different ageing conditions. First, one half of the prisms were exposed to the laboratory ambient conditions (air) and the second half were put into containers with a cover made of lime mortar. Especially for the purpose of the diploma thesis Plexiglas containers were designed and produced, along with a wooden frame and a net, as supporting system for the lime render which acts as the cover. The lime render cover simulates lime render or plaster on wall or ceiling. In different time periods (1M, 2M, 3M, i.e. one months, two months and three months after demoulding of the prisms), we performed flexural and compressive tests on the prisms as well as a phenolphthalein test for monitoring the carbonation process. Every month, we opened one container and performed the tests on the prisms from the container, parallel to the tests carried out on air-dried prisms. The obtained results were analysed and comparison between mechanical properties and carbonisation depth was made. We established that the carbonization process in the containers with a limited inflow of CO₂ is very slow. The results of mechanical tests show that in all time periods, the obtained average values of flexural tensile strength, as well as the compressive strength of the prisms dried in the container, were lower than the same characteristics of air-dried prisms. After the first month phenolphthalein test carried out on the prisms aged in the container did not show start of carbonisation. However, the prisms showed, despite high humidity in the container, an increase in mechanical characteristics. We presume that the obtained results are combination of two influencing parameters – drying of the prisms and start of alkali carbonate reaction.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov za strokovno pomoč in svetovanje pri nastajanju diplomskega dela.

Zahvaljujem se somentorici asist. dr. Petri Štukovnik za strokovno vodenje, nasvete in potrpežljivost.

Hvala inž. Franciju Čeponu za pomoč pri laboratorijskem delu diplomske naloge.

Hvala družini in vsem ostalim, ki ste mi tekom študija stali ob strani in nesebično pomagali.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
1.1 Motiv za temo diplomske naloge.....	1
1.2 Opredelitev problema	1
1.3 Namen in cilj diplomske naloge	1
2 IZDELAVA POSOD IZ PLEKSI STEKLA IN LESENIH OKVIRJEV POKROVOV.....	3
2.1 Načrtovanje in izdelava pokrova	3
2.2 Načrtovanje in izdelava posode.....	4
3 UPORABLJENI MATERIALI	8
3.1 Sestava malte in injekcijske mešanice.....	8
3.2.1 Apno	8
3.2.2 Voda	8
3.2.3 Polnilo.....	9
4 STANDARDNE PREISKAVE APNENE MALTE IN INJEKCIJSKIH MEŠANIC	9
4.1 Preiskava apnene malte	9
4.2 Izvedba standardnih preiskav sveže injekcijske mešanice	10
4.3 Izvedba standardnih preiskav strjene injekcijske mešanice na prizmah.....	10
5 APNENA MALTA IN ZAPOLNITEV OKVIRJA POKROVA	11
5.1 Priprava apnene malte in njena konsistenca	11
5.2 Zapolnitev okvirja pokrova	12
5.3 Sušenje pokrovov	13
6 APNENA INJEKCIJSKA MEŠANICA	14
6.1 Priprava injekcijske mešanice	14
6.2 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice	16

7 PRIPRAVA PRIZEM IN ZAPIRANJE POSOD	16
7.1 Vlivanje mešanice v kalupe.....	16
7.2 Razkalupljanje pizmic in zapiranje posod.....	17
8 ANALIZA REZULTATOV PREISKAV STRJENE INJEKCIJSKE MEŠANICE	19
8.1 Prostorninska masa strjenih injekcijskih mešanic	19
8.2 Analiza rezultatov mehanskih lastnosti prizem.....	20
8.2.1 Upogibna natezna trdnost prizem.....	20
8.2.1.1 Upogibna natezna trdnost prizem sušenih na zraku	20
8.2.1.2 Upogibna natezna trdnost prizem sušenih v posodi	21
8.2.1.3 Diskusija.....	22
8.2.2 Tlačna trdnost prizem.....	23
8.2.2.1 Tlačna trdnost prizem, sušenih na zraku	23
8.2.2.2 Tlačna trdnost prizem, sušenih v posodi	24
8.2.2.3 Diskusija.....	25
8.3 Razmere v posodi.....	26
8.3.1 Prva posoda – prvi mesec sušenja	27
8.3.2 Druga posoda – dva meseca sušenja	28
8.3.3 Tretja posoda – trije meseci sušenja.....	29
8.3.4 Diskusija.....	30
8.4 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem (fenolftaleinski test)	31
8.4.1 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem, sušenih na zraku	31
8.4.2 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem, sušenih v posodi	32
8.4.3 Diskusija.....	33
9 ZAKLJUČEK	35
VIRI.....	38

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kemijske lastnosti uporabljenega apna	8
Preglednica 2: Sestavine apnene malte (2. 2. 2016)	11
Preglednica 3: Sestava apnene injekcijske mešanice (29. 2. 2016)	14
Preglednica 4: Sestava in rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice	16
Preglednica 5: Povprečne prostorninske mase v treh časovnih obdobjih in koeficienti variacij	19
Preglednica 6: Rezultati povprečne f_{mf} prizem sušenih na zraku v treh časovnih obdobjih	21
Preglednica 7: Rezultati povprečne f_{mf} prizem sušenih v posodi v treh časovnih obdobjih	22
Preglednica 8: Rezultati povprečne f_{cc} prizem sušenih v posodi v treh časovnih obdobjih	24
Preglednica 9: Rezultati povprečne f_{cc} prizem sušenih v posodi v treh časovnih obdobjih	25
Preglednica 10: Pregled podobnosti podatkov o zraku	30

KAZALO SLIK

Slika 1: Idejna zasnova posode	3
Slika 2: Načrt okvirja pokrova	4
Slika 3: Okvir pokrova z vgrajeno mrežico z zgornje strani (levo) in okvir pokrova z vgrajeno mrežico s spodnje strani (desno)	4
Slika 4: Načrt posode	5
Slika 5: Označevanje in vrtanje izvrtin	6
Slika 6: Izvrtini (levo), vrezovanje navoja (sredina) in izvrtini z navojem (desno)	6
Slika 7: Deli posode (levo) in poskusno sestavljanje (desno)	6
Slika 8: Povrtavanje lukenj (levo) in povrtana luknja (desno)	6
Slika 9: Dno sestavljene posode (levo), vijačen spoj (sredina) in pregled spojev (desno)	7
Slika 10: Sestavljene posode (levo), odstranjevanje zaščitne folije (na sredini) in sestavljene posode brez zaščitne folije (desno)	7
Slika 11: Tesnjenje spojev (levo), preverjane tesnjenja posode (sredina) in končane posode (desno) ...	7
Slika 12: Preiskava upogibne natezne trdnosti (levo) in tlačne trdnosti (desno)	10
Slika 13: Mešanje malte	11
Slika 14: Okvir z mrežico (levo), okvir z dodano dodatno mrežico (na sredini) in okvir z dodanim slojem gaze na mrežici (desno)	12
Slika 15: Na začetku nanašanja malte na okvir z mrežico (levo), med nanašanjem (na sredini) in po končanem nanašanju (desno)	12
Slika 16: Zapolnjeni okvirji pokrovov	13
Slika 17: Grudasta mešanica dolomitne moke (levo) in presejana dolomitna moka (desno)	15
Slika 18: Tehtanje dolomitne moke (levo), apna (sredina) in mešanje mešanice (desno)	15

Slika 19: Naoljevanje kalupov (levo), vlivanje mešanice v kalup (sredina) in napolnjeni kalupi (desno)	17
Slika 20: Izločanje vode po napolnitvi kalupov (levo), voda na zapolnjenih kalupih med sušenjem (desno) in počasno sušenje mešanice v kalupih (desno)	17
Slika 21: Razkalupljanje prizmic (levo), poškodovane prizme (sredina) in razpoke v prizmah (desno)	18
Slika 22: Prazne posode z lesenimi podstavki za prizme (levo), zapolnjene posode (sredina) in zapolnjene zaprte posode (desno)	18
Slika 23: Posoda pred tesnjenjem (levo), tesnjenje spoja med stenami posode in okvirjem pokrova (sredina) ter tesnjenje spoja med apneno malto in lesenim okvirjem pokrova (desno)	18
Slika 24: Odpiranje posode	26
Slika 25: Stopnja karbonatizacije 1M (levo), stopnja karbonatizacije 2M (sredina), stopnja karbonatizacije 3M (desno), pri vzorcih sušenih na zraku	32
Slika 26: Stopnja karbonatizacije 1M (levo), stopnja karbonatizacije 2M (sredina), stopnja karbonatizacije 3M (desno), pri vzorcih sušenih v posodi	33

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Spremljanje temperature in vlažnosti zraka tekom sušenja pokrovov v laboratoriju	14
Grafikon 2: Primerjava povprečnih prostorninskih mas tekom sušenja.....	20
Grafikon 3: Primerjava povprečnih upogibnih nateznih trdnosti prizem sušenih na zraku za tri časovna obdobja.....	21
Grafikon 4: Primerjava povprečnih upogibnih nateznih trdnosti prizem sušenih v posodi za tri časovna obdobja.....	22
Grafikon 5: Primerjava povprečnih upogibnih nateznih trdnosti za tri časovna obdobja, pridobljenih s preiskavami na vzorcih, sušenih na zraku in na vzorcih, sušenih v posodi.....	23
Grafikon 6: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti prizem, sušenih na zraku, za tri časovna obdobja	24
Grafikon 7: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti prizem sušenih v posodi za tri časovna obdobja .	25
Grafikon 8: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti za tri časovna obdobja, pridobljenih s preiskavami na vzorcih, sušenih na zraku in v posodi.....	26
Grafikon 9: Temperatura in relativna vlaga znotraj prve posode, merjeni v obdobju enega meseca....	27
Grafikon 10: Temperatura in relativna vlaga znotraj druge posode, merjeni v obdobju dveh mesecev	28
Grafikon 11: Temperatura in relativna vlaga znotraj tretje posode, merjeni v obdobju treh mesecev..	29

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

1.1 Motiv za temo diplomske naloge

Občudovanje in hkrati zavedanje o pomembnosti stavbne kulturne dediščine me spremlja že nekaj let, zato je tema diplomskega dela ni naključje. Kot družba in kot posamezniki moramo imeti težnjo po njenem ohranjanju, saj predstavlja pomemben del kulturne dediščine, hkrati pa je velik pokazatelj ekonomskih, kulturnih, socialnih in drugih vrednot [1]. V sklopu ohranjanja in obnavljanja je pomembno področje utrjevanja zidov. Razlog za to predstavlja sestava zidov naše stavbne dediščine. Velik del njih je grajen iz kamna ali pa iz mešanice opeke in kamna [2]. Priporočljivo je, da pri obnovah stavbne kulturne dediščine uporabimo enaka gradiva, kot so bila uporabljena pri gradnji. Velikokrat je to kar zahteva, ki jo da konservatorsko/restavratorska stroka. V primeru posebnih zahtev, med katere spadajo tudi utrditve zidov z namenom povečanja potresne odpornosti stavbe, pa lahko uporabimo tudi sodobne materiale in visokotehnološke posege [3]. Ena od možnih tehničnih rešitev utrditve konstrukcijskega sistema, s katero povečamo njegovo duktilnost in nosilnost, je injektiranje [4]. S postopkom sistematičnega injektiranja je mogoče izboljšati mehanske lastnosti tako kamnitih, kot tudi kamnito-opečnih zidov z določenim deležem votlin.

Slabosti postopka se pokažejo v primerih utrjevanja zidov, na katerih so freske in druge poslikave. Zaradi posega se lahko poškodujejo ometi in s tem tudi poslikave. Omenjenim težavam se lahko v veliki meri izognemo s poznavanjem vrste in lastnosti posameznih gradnikov zidu, poznavanjem in razumevanjem procesov njihovega propadanja ter z zasnovo in ustrezno vgradnjo kompatibilne injekcijske mešanice [2].

1.2 Opredelitev problema

Bistveno pri postopku sistematičnega injektiranja je vtiskovanje tekoče suspenzije (apnene, cementne ali polimerne) v delno votel zid. S strditvijo injekcijske mešanice dosežemo boljšo povezanost med posameznimi kamni in sloji ter s tem tudi večjo homogenost zidu. Injekcijske mešanice, katerih osnova je apno, so najbolj kompatibilne z originalnimi materiali v kamnitih zidovih, kjer je bila kot vezivo, uporabljena apnena malta [2]. Za freske, mozaike in dekorativne elemente na površini zidov uporaba hidratiziranih apnenih injekcijskih mešanic ni škodljiva [5]. Pojavi pa se vprašanje, kakšen je potek strjevanja mešanice v zidu?

1.3 Namen in cilj diplomske naloge

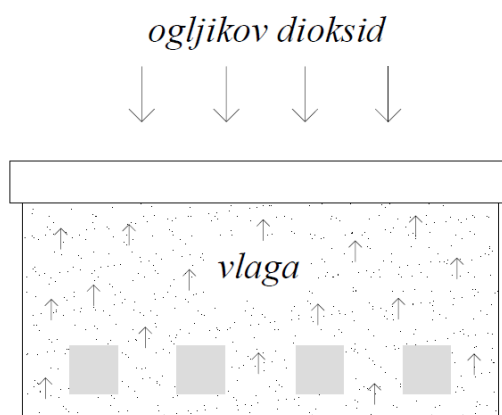
Želeli smo poiskati odgovor na zgoraj zastavljeno vprašanje. Deloma smo se navezovali na magistrsko delo [6], v katerem je avtor, tako kot mi, želel ugotoviti, kakšen je potek vezanja injekcijskih mešanic

v zidu, v katerega je dostop CO₂ iz zraka omejen. Naš namen je bil spremljati potek karbonatizacije apnenih injekcijskih mešanic na zraku in v okolju z omejenim dostopom CO₂. Znano je, da je proces karbonatizacije apnenih injekcijskih mešanic v zidu zelo počasen.

Cilj diplomske naloge je bila primerjava mehanskih lastnosti standardnih prizem iz apnene injekcijske mešanice, ki so odležavale na zraku in v posodi z omejenim dostopom CO₂, s stopnjo karbonatizacije, ki smo jo določali s fenolftaleinskim testom. Preiskave smo izvajali v različnih časovnih obdobjih, ki smo jih poimenovali: stanje nič (stanje ob odprtju kalupov) – v nadaljevanju 0M, en mesec odležavanja v izbranih okoljih – v nadaljevanju besedila 1M, dva meseca odležavanja – v nadaljevanju besedila 2M in tri mesece odležavanja – v nadaljevanju besedila 3M.

2 IZDELAVA POSOD IZ PLEKSI STEKLA IN LESENIH OKVIRJEV POKROVOV

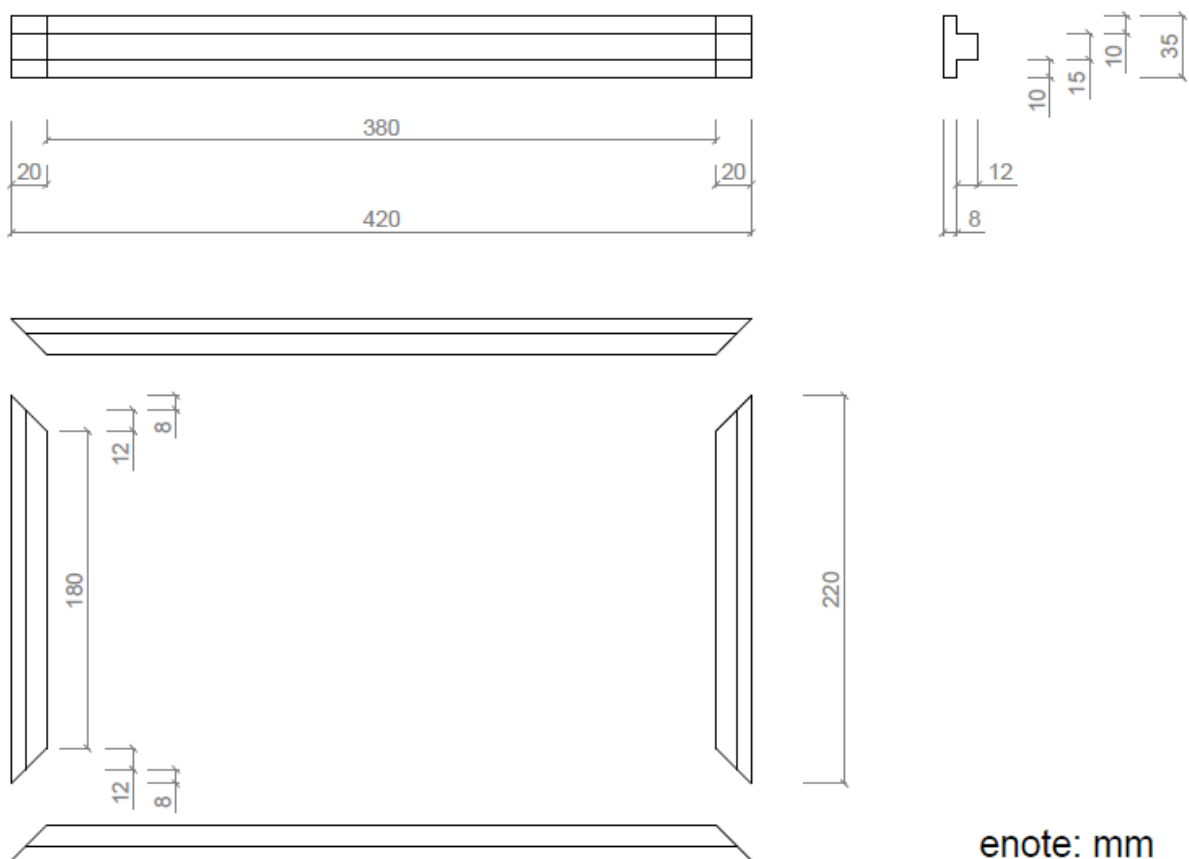
Za namen diplomske naloge smo potrebovali posodo, v kateri bodo razmere podobne tistim v notranjosti zidu. Nismo želeli popolnoma zapreti posode, saj je vidik popolne zapore za dostop CO₂ iz zraka raziskal že Kristjan Rojc [6]. Poleg tega pa smo se odločili upoštevati eno izmed glavnih lastnosti apnene malte in sicer visoko prepustnost za zrak ter vodno paro [7]. S pokrovom smo želeli ponazoriti apnen omet na zidovih, skozi katerega prehaja svež zrak oziroma CO₂ (Slika 1), ki je potreben za vezanje injekcijske mešanice.



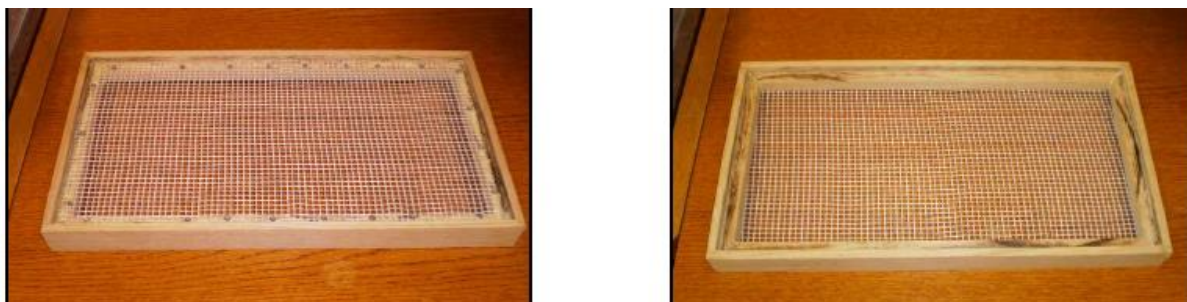
Slika 1: Idejna zasnova posode

2.1 Načrtovanje in izdelava pokrova

Za zaprtje posode smo potrebovali pokrov, s katerim bi to izvedli čim enostavneje. Odločili smo se, da izdelamo okvir pokrova, v katerega bomo namestili fasadno mrežico. Pokrov posode naj bi predstavljal apnen omet na zidu ali stropu. S programskim orodjem AutoCAD smo s pomočjo predhodno narisanih skic ter izdelanega načrta posode izrisali načrt okvirja pokrova (Slika 2). Že pri načrtovanju smo upoštevali, da bo lesen. Želeli smo, da se s spodnje strani nasloni na robove posode, hkrati je bilo treba upoštevati, da moramo v sam pokrov namestiti tudi mrežico, na katero se v nadaljevanju nanese sloj apnene malte v debelini 10 mm. Izdelavo okvirja smo prepustili mizarju, ki je načrte tudi potrdil ter se lotil izdelave. Po posvetu z njim smo se odločili, da bo okvir iz hrastovega lesa ter v celoti lepljen z vodoodpornim lesnim lepilom. Narezali smo štiri kose fasadnih mrežic z velikostjo odprtin 4 x 4 mm. V okvir so bile hkrati privijačene in napete z malimi lesnimi vijaki. Nato so bile po celem naleganju na okvir prilepljene z vodoodpornim lepilom (Slika 3).



Slika 2: Načrt okvirja pokrova

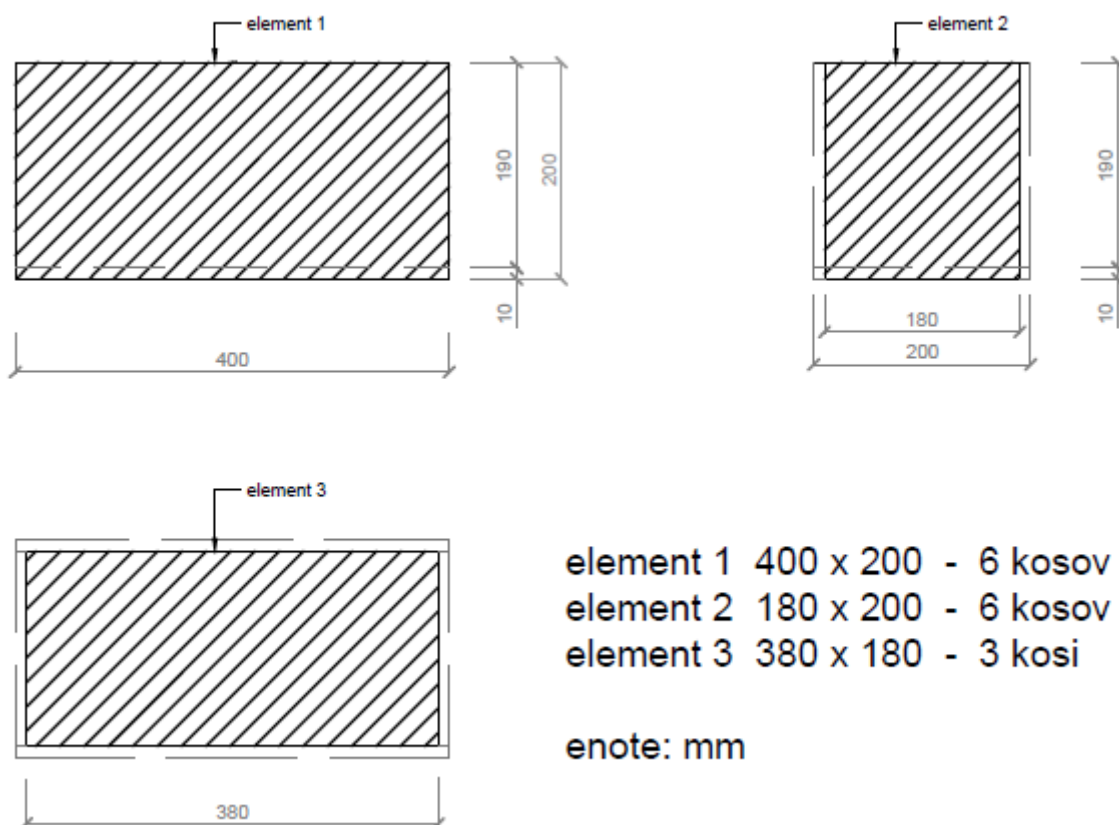


Slika 3: Okvir pokrova z vgrajeno mrežico z zgornje strani (levo) in okvir pokrova z vgrajeno mrežico s spodnje strani (desno)

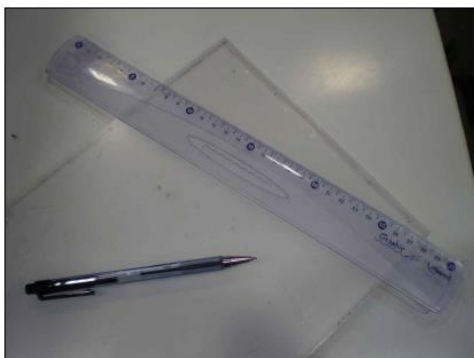
2.2 Načrtovanje in izdelava posode

Zamislili smo si posodo, v katero bomo lahko položili štiri standardne prizmice. Posoda je izdelana iz 10 mm debelega pleksi stekla. V dolžino naj bi merila 400 mm, široka in visoka pa naj bi bila 200 mm. V programu AutoCAD smo izrisali načrte (Slika 4), na podlagi katerih smo naročili material in njegov razrez. Ko so prispeli narezani kosi pleksi stekla, smo pričeli posode sestavljati. Najprej smo

razporedili dele in jih oštevilčili. Sledilo je označevanje mesta izvrtin, ki smo jih izvedeli s samostoječim vrtnim strojem (Slika 5). V izvrtine globine 20 mm smo nato vrezali navoje z ročnim navojnim vreznikom (Slika 6). Po poskusnem sestavljanju (Slika 7) vseh kosov v posodo smo navrtali luknje tako globoko, da je glava vijaka povsem izginila v njej (Slika 8). Dele smo nato ponovno sestavili in jih med sabo privijačili z malimi vijaki (Slika 9). Na koncu smo odstranili še zaščitno folijo (Slika 10), ki je med procesom dela preprečevala večje poškodbe pleksi stekla. Cilj je bil izdelati posodo, kjer bo zrak prehajal le skozi pokorov iz sloja apnene malte. Odločili smo se, da s silikonom zatesnimo vse spoje posode (Slika 11), da zrak ne bo uhajal v posodo preko njih. Samo tesnjenje posod smo, ko se je silikon posušil, preverili z enostavnim preizkusom vodotesnosti posod. Po prvem preizkusu smo videli, da na nekaterih mestih puščajo, zato je bilo treba popraviti tesnjenje ter ponoviti preizkus tesnjenja. Ob izpolnitvi pogoja vodotesnosti so bile posode pripravljene za izvedbo glavnih preiskav v okviru te diplomske naloge.



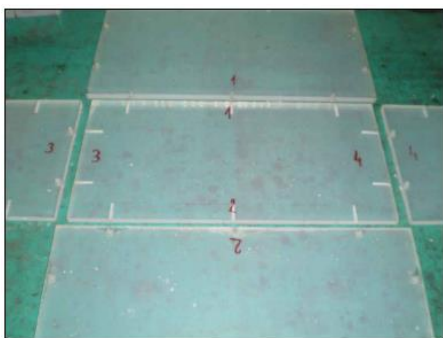
Slika 4: Načrt posode



Slika 5: Označevanje in vrtanje izvrtin



Slika 6: Izvrtini (levo), vrezovanje navoja (sredina) in izvrtini z navojem (desno)



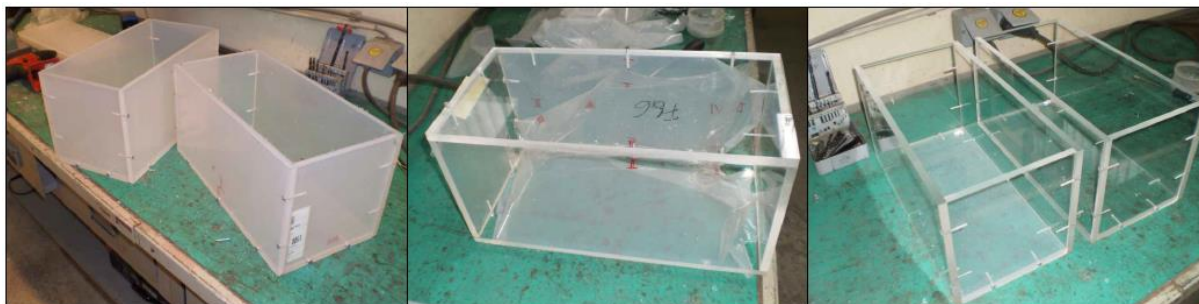
Slika 7: Deli posode (levo) in poskusno sestavljanje (desno)



Slika 8: Povrtavanje lukenj (levo) in povrtana luknja (desno)



Slika 9: Dno sestavljene posode (levo), vijachen spoj (sredina) in pregled spojev (desno)



Slika 10: Sestavljene posode (levo), odstranjevanje zaščitne folije (na sredini) in sestavljene posode brez zaščitne folije (desno)



Slika 11: Tesnjenje spojev (levo), preverjane tesnjenja posode (sredina) in končane posode (desno)

3 UPORABLJENI MATERIALI

3.1 Sestava malte in injekcijske mešanice

3.2.1 Apno

Hidratizirano apno je nehidravlično mineralno vezivo, kar pomeni, da veže in se strjuje samo na zraku. V osnovi je gašeno apno, ki ga pridobivajo z dodajanjem teoretično potrebne količine vode kalcijevemu oksidu (živemu apnu). Zaradi izpolnjevanja zahtev po kompatibilnosti z obstoječimi materiali v zidu je pogosto uporabljen material predvsem na področju obnove kulturne dediščine [2]. Za karbonatizacijo potrebuje hidratizirano apno, kot zračno vezivo, CO₂ iz zraka. V zračnem in suhem okolju je zato strjevanje apnenega veziva hitrejše. Poleg dovajanja CO₂ je pomemben dejavnik pri strjevanju tudi odvajanje vode (sušenje injekcijske mešanice), tako kemijsko nevezane, ki omogoča plastičnost sveže mešanice kot tiste, ki nastaja pri ponovni tvorbi kalcijevega karbonata [8].

V sklopu diplomske naloge smo za pripravo injekcijskih mešanic uporabili hidratizirano (tudi gašeno) apno v prahu, katerega kemijske lastnosti so prikazane v spodnji Preglednici 1 [9].

Preglednica 1: Kemijske lastnosti uporabljenega apna

Karakteristike proizvoda po SIST EN 459-1:1010	Vsebnost
CaO+MgO	≥ 90 %
MgO	≤ 5 %
CO ₂	≤ 4 %
SO ₃	≤ 2 %
Aktivno apno	≥ 80 %
Prosta voda	≤ 2 %
Prostorninska obstojnost	obstojno
Velikost delcev – ostanek na situ	≤ 2 %
	≤ 2 %
Vsebnost zračnih por	≤ 12 %
Ugrez	> 10 mm in < 50
Trajnost	NPD (ni podatka)

3.2.2 Voda

Voda je eden ključnih dejavnikov, od katerega je odvisna sposobnosti injektiranja mešanice. Uporabili smo pitno vodo, za katero velja, da je povsem primerna za pripravo mešanic z vezivi [8]. Pri injekcijskih mešanicah je treba paziti na ustrezno količino dodane vode oziroma vodovezivno

razmerje. Dobro pretočnost dosežemo z večanjem vodovezivnega razmerja, obenem pa s tem injekcijskim mešanicam posledično poslabšamo mehanske lastnosti [6]. K segregaciji so nagnjene mešanice z visokim deležem dodane vode [2].

3.2.3 Polnilo

Uporabili smo kamnino triasni poznodiagenetski dolomit [10,11]. Kot navaja Petra Štukovnik [12]:
»Kamnina je svetlo sive barve z vidnimi belimi žilami.

Petrografski opis kamnine: Kamnina je homogena. Odnos oz. razmerje med zrni in vezivom je ocenjeno po Terry in Chilingar [13] na 20:80. Zrna so alokemičnega izvora, ki so homogeno razporejena po vzorcu in niso orientirana. Kot zrna prevladujejo ooidi, opaziti je tudi fosilne ostanke. Zrna so zaobljena in »plavajo« v osnovi. Osnova kamnine je mikritna do mikrosparitna. V kamnini se pojavijo žile, zapolnjene s sparitnim cementom. Poroznost je ocenjena [13] na 0,5 %. Opaziti je tudi stilolitske šive ob katerih se koncentrira neporozen material. S pomočjo optične mikroskopije bil določen tudi mineral kalcit dolomit. Rezultati praškovne difrakcijske rentgenske analize (XRD) so pokazali, da mineral dolomit zavzema približno 97 % kamnine in mineral kalcit približno 3 %. Prostorninska masa kamnine B je 2847 kg/m^3 , vpijanje vode je 0,48 %.«

Isto vrsto kamnine smo uporabili tako pri apneni malti, kot tudi pri apneni injekcijski mešanici. Razlika je samo v tem, da smo pri malti uporabili frakcijo peska 0/4 mm, pri injekcijski mešanici pa kameno moko.

4 STANDARDNE PREISKAVE APNENE MALTE IN INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Izvedli smo standardne preiskave različnih lastnosti apnene malte in injekcijskim mešanic, in sicer eno na sveži apneni malti ter po tri za svežo in strjeno injekcijsko mešanico. Preiskave so bile opravljene skladno z določili relevantnih standardov. Uporabljen standard za preiskavo sveže apnene malte je v svojem delu povzel Damjan Golob [14]. Podrobne opise standardih preiskav sveže in strjene injekcijske mešanice pa so pred mano v svojih delih že podajali Alja Arrigler [15], Kristjan Rojc [6] in Mojmir Uranjek [2].

4.1 Preiskava apnene malte

• Določevanje konsistence sveže malte (s stresalno mizo)

Skladno s standardom SIST EN 1015-3 [16], izračunamo rezultat, ki je povprečje dveh med seboj pravokotnih premerov razlezene malte, izmerjenih v mm.

4.2 Izvedba standardnih preiskav sveže injekcijske mešanice

• Prostorninska masa sveže mešanice

Prostorninsko maso sveže injekcijske mešanice smo določili v skladu z določili standarda EN 1015-6 [17].

• Pretočnost

Pretočnost injekcijske mešanice smo določili v skladu z določili standarda SIST EN 445. Upoštevali smo kriterij, da je za injekcijske mešanice zahtevan čas pretočnosti $t \leq 25$ s [17].

• Izločanje vode

Izločanje vode smo določili v skladu s standardom SIST EN 445 [18].

4.3 Izvedba standardnih preiskav strjene injekcijske mešanice na prizmah

Preiskave smo izvajali na prizmah dimenzij 40 x 40 x 16 cm v treh časovnih obdobjih, pri 1M, 2M in 3M.

• Prostorninska masa strjene injekcijske mešanice

Prostorninsko maso strjene injekcijske mešanice smo določali skladno s standardom SIST EN 1015-10:2001/A1:2007 [19].

• Upogibna natezna trdnost prizem

Upogibno natezno trdnost (Slika 12 levo) injekcijske mešanice smo določali skladno s standardom SIST EN 1015-11 [20].

• Tlačna trdnost prizem

Tlačno trdnost injekcijske mešanice (Slika 12 desno) smo določali skladno s standardom SIST EN 1015-11 [20].



Slika 12: Preiskava upogibne natezne trdnosti (levo) in tlačne trdnosti (desno)

5 APNENA MALTA IN ZAPOLNITEV OKVIRJA POKROVA

5.1 Priprava apnene malte in njena konsistenca

Postopek priprave apnene malte, s katero smo zapolnili okvir pokrova, je bil enostaven. Uporabili smo recepturo, podano v spodnji Preglednici 2.

Preglednica 2: Sestavine apnene malte (2. 2. 2016)

Sestavina	Količina
Dolomitni pesek frakcije 0-4	4836 g
Apno	518 g
Voda	620 ml

Najprej smo odmerili količino vode in natehtali predvideno količino apna ter peska. Nato smo v posodo za mešanje najprej stresli obe suhi sestavini, torej apno in pesek ter ju premešali s standardnim mešalcem za malte. Možni sta dve hitrosti mešanja. Pri hitrosti mešanja I ima mešalna lopatica 140 ± 5 obratov okoli lastne osi v minuti in 62 ± 5 obratov okoli pogonske osi v minuti. Pri preklopu na drugo hitrost mešanja, torej pri hitrosti mešanja II, pa ima mešalna lopatica 285 ± 10 obratov okoli lastne osi v minuti in 125 ± 10 obratov okoli pogonske osi v minuti [21]. Mešalec je bil vklopljen na hitrost mešanja I toliko časa, da sta se pesek in apno premešala med sabo. Nato smo ugasnili mešalnik, dodali pripravljeno količino vode ter najprej ročno z žlico premešali malto. Nato smo vklopili mešalnik na hitrost mešanja II ter pustili, da se sestavine homogeno premešajo. Vmes smo še z žlico preverili, ali se vse sestavine pravilno mešajo. Malto smo morali zamešati dvakrat (Slika 13), saj nam je med zapolnjevanjem okvirjev zmanjkala. S ponovitvijo zgoraj opisanega postopka po predpisani recepturi smo zamešali novo malto in nadaljevali z nanašanjem.



Slika 13: Mešanje malte

Pred nanašanjem smo določili konsistenco malte. Izmerjena posamična razleza sta bila $D_1 = 125$ mm in $D_2 = 110$ mm, izračunani povprečni razlez pa $D = 117,5$ mm.

5.2 Zapolnitev okvirja pokrova

Na fasadno mrežico, vpeto v lesen okvir pokrova, smo dodatno položili še samolepilni bandažirni trak, da bi preprečili uhajanje malte iz pokrova preko prvotno nameščene fasadne mrežice. Po premisleku smo se nato odločili, da bomo namestili še gazo (Slika 14), s katero bomo strjeno malto po končanem preizkusu enostavno odstranili iz okvirja pokrova. Tako bo okvir ohranjen in pripravljen za morebitne naslednje preizkuse, hkrati pa smo še dodatno zavarovali malto pred polzenjem skozi luknjice fasadne mreže.



Slika 14: Okvir z mrežico (levo), okvir z dodano dodatno mrežico (na sredini) in okvir z dodanim slojem gaze na mrežici (desno)

Premešano apneno malto (Slika 15) smo postopoma in enakomerno z lopatico nanesli na gazo. Debelina nanosa je znašala približno 10 mm. Po končanem nanašanju smo površino nanosa samo še pogladili. Z malto smo napolnili vse štiri okvirje pokrovov, čeprav smo načrtovali uporabo treh. To smo storili iz varnostnih razlogov. En pokrov smo imeli za rezervo, če bi med sušenjem apnena malta preveč razpokala ali pa bi se med sušenjem morebiti poškodoval sam okvir.



Slika 15: Na začetku nanašanja malte na okvir z mrežico (levo), med nanašanjem (na sredini) in po končanem nanašanju (desno)

5.3 Sušenje pokrovov

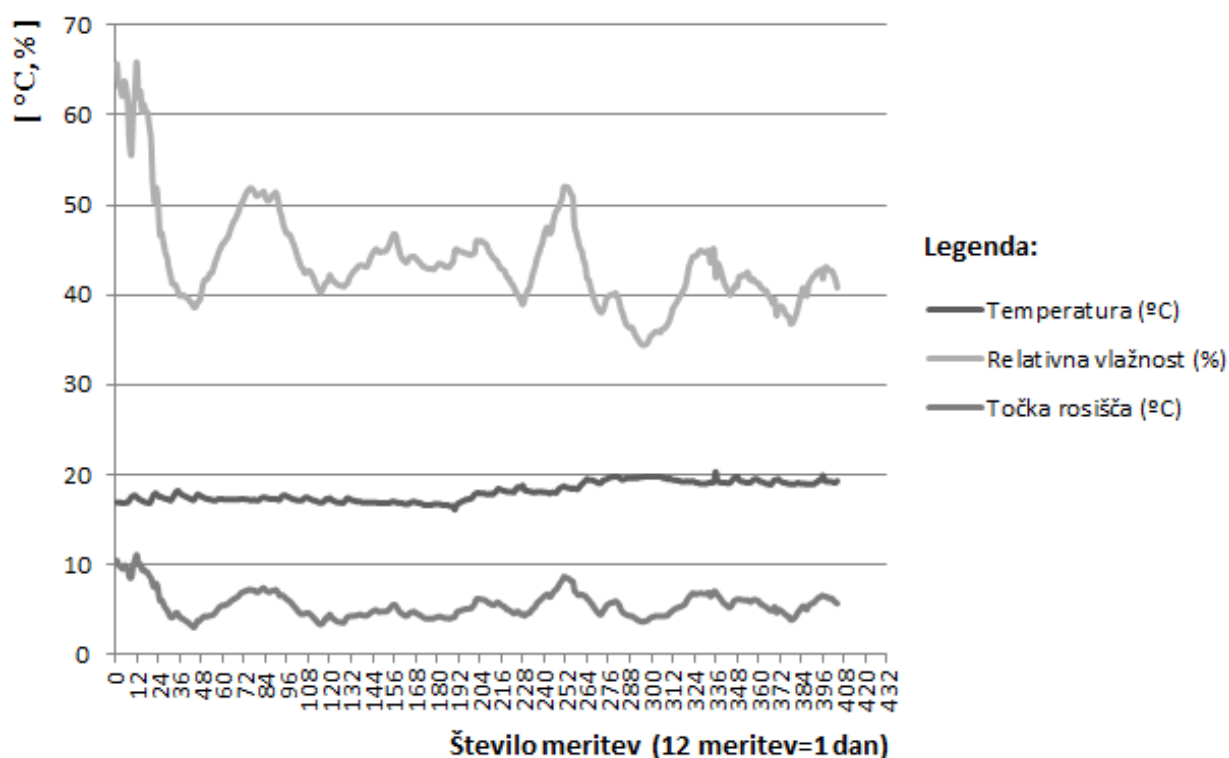
Z apneni malo zapolnjene okvirje (Slika 16) smo pustili dober mesec na zraku, v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo.



Slika 16: Zapolnjeni okvirji pokrovov

V tem času smo spremljali tudi pogoje okolja v laboratoriju, s pomočjo USB - shranjevalnika podatkov o zraku DL-121TH VOLTcraft. Kompaktni shranjevalnik podatkov za zapisovanje 32.000 izmerjenih vrednosti: 16.000 izmerjenih vrednosti temperature in 16.000 vrednosti relativne vlage. Shranjene izmerjene vrednosti lahko prek USB-vmesnika prenesemo na računalnik in jih s programsko opremo grafično obdelamo ali pa jih izvozimo za nadaljnjo obdelavo z drugimi programi. Naprava ima merilno območje temperature: od -40 do $+70$ °C, ter merilno območje vlažnosti zraka: 0–100 %. Hkrati omogoča nastavljen interval zapisovanja, od 2 s do 24 h, in izračun rosišča (Dew Point) [22].

Grafikon 1 prikazuje podatke meritev zraka z DL-121TH VOLTcraft-om. Ordinatna os predstavlja izmerjene vrednosti temperature [°C] in vlažnosti [%], abscisna pa predstavlja število meritev. Ob pogledu na graf takoj opazimo nihanja vseh treh vrednosti: temperature, relativne vlažnosti in rosišča. Interval merjenja smo nastavili na 2 h. To pomeni, da predstavlja 398 meritev dobrih 33 dni sušenja. Sušenje je potekalo skoraj cel februar in še prvi teden marca. Med sušenjem je bila v laboratoriju povprečna temperatura $18,1$ °C, povprečna vrednost relativne vlažnosti pa 44 %. Iz grafa razberemo, da je bila temperatura v laboratoriju približno konstantna, od povprečne je odstopala ± 2 °C. Vlaga je v laboratoriju nihala dokaj enakomerno, brez nenadnih, sunkovitih naraščanj ali padanj. Po pregledu arhiva merjenih in opazovanih meteoroloških podatkov [23] po dnevih za mesto Ljubljana smo izključili vpliv le teh na nivo relativne zračne vlažnosti v laboratoriju. Predvidevamo, da je nivo vlage v večji meri odvisen predvsem od izvajanih delovnih procesov v laboratoriju.



Grafikon 1: Spremljanje temperature in vlažnosti zraka tekom sušenja pokrovov v laboratoriju

6 APNENA INJEKCIJSKA MEŠANICA

6.1 Priprava injekcijske mešanice

Recepturo za injekcijsko mešanico smo povzeli po magistrskem delu »Priprava injekcijskih mešanic na osnovi dolomitnega polnila za kamnite zidove« [6]. Že na začetku smo mešanico zamešali po nekoliko spremenjeni recepturi, vendar smo po izvedenem testu pretočnosti še dodatno zmanjšali količino vode, za 20 ml. V spodnji Preglednici 3 je predstavljena popravljena oziroma uporabljena sestava apnene injekcijske mešanice.

Preglednica 3: Sestava apnene injekcijske mešanice (29. 2. 2016)

Sestavina	Količina
Dolomitna moka	2328 g
Apno	300 g
Voda	730 ml

Še preden pa smo se lotili postopka priprave injekcijske mešanice, smo vlažno, rahlo grudasto mešanico dolomitne moke presejali (Slika 17) skozi sito 1 mm.



Slika 17: Grudasta mešanica dolomitne moke (levo) in presejana dolomitna moka (desno)

Nato smo stehali (Slika 18) vse komponente mešanice (dolomitno moko, hidratizirano apno) ter odmerili količino vode. V posodo za mešanje smo najprej vsuli suhi sestavini ter s standardnim mešalcem, vklopljenim na hitrost I, pripravili suho mešanico. Postopoma smo nato dodali odmerjeno količino vode.



Slika 18: Tehtanje dolomitne moke (levo), apna (sredina) in mešanje mešanice (desno)

Mešanico smo na koncu mešali na hitrosti mešanja II. Med samim mešanjem smo mešalnik večkrat ugasnili in z žlico premešali po dnu in straneh posode, saj je posoda oziroma lopatica mešalnika neustrezne oblike za mešanje injekcijske mešanice, zato se pogosto zgodi, da se sestavine oprimejo posode in posledično ne premešajo dobro. Postopek mešanja smo morali večkrat ponoviti, saj smo za zapolnitev kalupov potrebovali večjo količino injekcijske mešanice, kot pa jo naredimo z enim mešanjem.

6.2 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice

Iz spodnje Preglednice 4 je razvidno, da je izmerjena pretočnost takoj po mešanju ustrezala kriteriju $t \leq 25$ s. Odločili smo se, da pretočnosti po preteku pol ure ne merimo. Pri testu izločanja vode pa so nas rezultati presenetili. Iz Preglednice 4 razberemo, da mešanica kriteriju izločanja vode ne ustreza, saj je delež izločene vode večji od 2,0 %, kolikor je še dovoljeno po standardu SIST EN 445 [18]. Sklepamo, da je večji delež izločene vode kljub nižji količini dodane vode, v primerjavi s sestavo, ki jo je uporabil Kristjan Rojc [6], predvsem posledica vlažne kamene moke. Moramo pa poudariti, da naš namen ni bilo iskanje idealne injekcijske mešanice, temveč spremljanje poteka sušenja in karbonatizacije prizem iz injekcijske mešanice na zraku in zaprtih v posebnih posodah.

Preglednica 4: Sestava in rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice

APNENA INJEKCIJSKA MEŠANICA		
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328
Masa veziva [g]:	apno	300
Masa dodane vode [g]		730
Prostorninska masa [kg/m ³]		1892
Pretočnost [s]	takoj	10,38
Izločanje vode	v [ml]	95
	v_1 [ml]	4
	[%]	4,2

7 PRIPRAVA PRIZEM IN ZAPIRANJE POSOD

7.1 Vlivanje mešanice v kalupe

Za potrebe preiskav strjene injekcijske mešanice smo potrebovali 24 prizem. Odločili smo se, da injekcijsko mešanico vlijemo v več kalupov, za primer morebitnih poškodb pri sušenju ali odpiranju kalupov. Standardne tridelne kalupe za izdelavo prizem smo si pripravili na delovno površino in jih, zaradi lažjega kasnejšega odstranjevanja, namazali z mineralnim oljem (Slika 19). Nekateri kalupi so imeli robove oziroma stike delov kalupov vodotesno zaprte s plastelinom. Le ta prepreči, da bi voda, ki se je izločila iz injekcijske mešanice, odtekala iz kalupov [6]. Na preostalih kalupih, ki tega niso imeli, nismo izvajali tesnjenja stikov. Z injekcijsko mešanico smo napolnili 11 kalupov.



Slika 19: Naoljevanje kalupov (levo), vlivanje mešanice v kalup (sredina) in napolnjeni kalupi (desno)

Po približno desetih minutah od napolnitve kalupov se je začela intenzivno izločati voda iz injekcijske mešanice (slika 20). Napolnjeni standardni kalupi so bili praktično prekriti z vodo. Sušenje je potekalo, kot je razvidno iz podatkov meritev zraka z DL-121TH VOLTcraft-om, cel teden pri temperaturi 19 °C in povprečni vlažnosti zraka 42.1 %. Izhlapevanje vode je potekalo počasi, kar pa je vodilo v neenakomerno sušenje in nastajanje razpok.



Slika 20: Izločanje vode po napolnitvi kalupov (levo), voda na zapolnjenih kalupih med sušenjem (desno) in počasno sušenje mešanice v kalupih (desno)

7.2 Razkalupljanje pizmic in zapiranje posod

Po tednu dni sušenja napolnjenih standardnih kalupov v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, smo kalupe razstavili. Razkalupljanje smo želeli izvesti kar najhitreje, že po nekaj dneh, vendar so bile prizme enostavno premehke. Že pred samim odpiranjem kalupov smo opazili male razpoke, ki so posledica krčenja prizem. Do krčenja pride zaradi izločanja vode oziroma visoke potrebe po vodi [6] injekcijskih mešanic, ki ne vsebujejo superplastifikator. Poleg tega smo verjetno nekatere kalupe premalo namazali z oljem, saj se je injekcijska mešanica zasušila na dele kalupa (Slika 21), ki imajo kakšne pomanjkljivosti (hrpavost), ali pa predhodno niso bili dobro očiščeni.



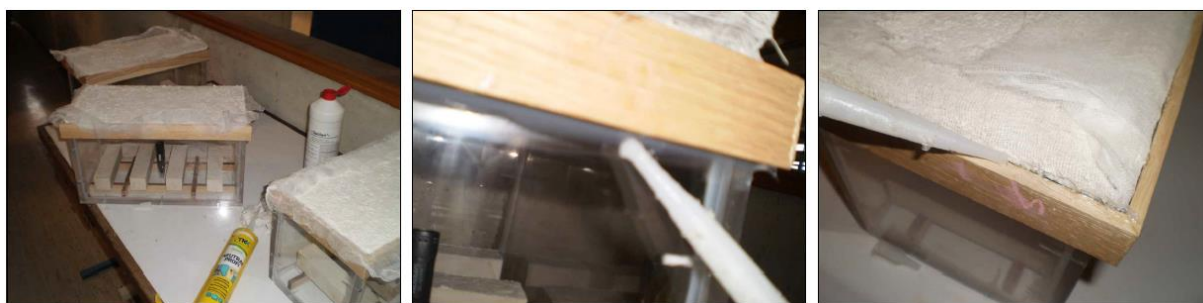
Slika 21: Razkalupljanje prizmic (levo), poškodovane prizme (sredina) in razpoke v prizmah (desno)

V nadaljevanju smo pripravili tri posode, v katere smo namestili lesene podstavke (Slika 22), da lahko zrak kroži tudi pod prizmami. V vsako posodo smo previdno namestili štiri prizme ter USB - shranjevalnik podatkov o zraku DL-121TH VOLTcraft. Posode smo nato zaprli s posebej izdelanimi pokrovi.



Slika 22: Prazne posode z lesenimi podstavki za prizme (levo), zapolnjene posode (sredina) in zapolnjene zaprte posode (desno)

Dosegli smo tesnjenje posode, želeli pa smo, da tesni tudi stik med pokrovom in posodo. S silikonom smo zatesnili tudi ta stik (Slika 23). Zaprli pa smo tudi režo, ki je nastala med posušanim nanosom apnene malte in lesenim okvirjem. Tako smo prehod CO₂ med okolico in notranjostjo posode omejili na območje sloja apnene malte.



Slika 23: Posoda pred tesnjenjem (levo), tesnjenje spoja med stenami posode in okvirjem pokrova (sredina) ter tesnjenje spoja med apneno malto in lesenim okvirjem pokrova (desno)

8 ANALIZA REZULTATOV PREISKAV STRJENE INJEKCIJSKE MEŠANICE

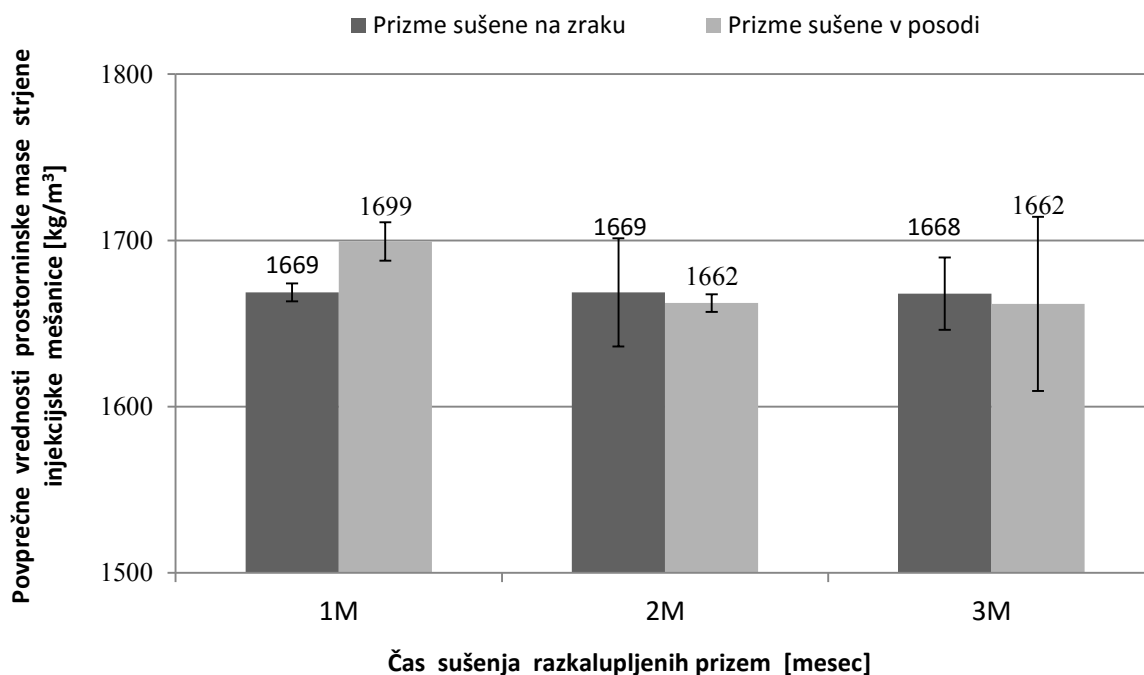
Kot smo že tekom naloge omenili, je bil naš cilj preveriti napredovanje procesa karbonatizacije injekcijske mešanice na preskušancih, sušenih na zraku in tistih, sušenih v posodi z omejenim dotokom CO₂. V ta namen smo v različnih časovnih obdobjih izvajali preiskave strjene injekcijske mešanice. Osredotočil sem se na preiskave upogibno natezne trdnosti in tlačne trdnosti, izmerili pa smo tudi prostorninsko maso injekcijske mešanice. Naša izbrana časovna obdobja 1M, 2M in 3M se nanašajo na obdobje od razkalupljenja prizem in torej pomenijo obdobje sušenja tako na zraku kot tudi v posodi. V posameznih časovnih obdobjih smo izvedli tudi fenolftaleinski test. Fenolftaleinsko metodo smo izvajali po standardu SISIT EN 14630 [24], s katerim ugotavljamo globino karbonatizacije v strjenem betonu.

8.1 Prostorninska masa strjenih injekcijskih mešanic

Preden smo začeli s preskusom tlačne in upogibne natezne trdnosti, smo vzorce oštevilčili, jih s pomičnim merilom izmerili ter stehali. Tako smo pridobili osnovne podatke, na podlagi katerih smo izračunali povprečne prostorninske mase prizem, sušenih na zraku, ter tudi prizem, sušenih v posodi. Iz Grafikona 2 vidimo, da je po prvem mesecu (1M) sušenja povprečna prostorninska masa prizem, sušenih v posodi večja, kot povprečna prostorninska masa prizem, ki so bile tekom sušenja izpostavljene laboratorijski atmosferi. Vzorci z višjo prostorninsko maso so hkrati tudi težji, v primerjavi z vzorci sušenimi na zraku. Razlog večjih prostorninskih mas je vlažnost vzorcev, zaradi neugodnih razmer sušenja. Po 2M in 3M sušenja sta povprečni prostorninski masi vzorcev, sušenih na zraku in vzorcev, sušenih v posodi praktično enaki, razlike so minimalne. Poleg tega opazimo, da je povprečna prostorninska masa vzorcev, sušenih na zraku, ves čas sušenja konstantna. Največji relativni raztros podatkov (Preglednica 5) smo izračunali pri vzorcih v posodi po 3M sušenja.

Preglednica 5: Povprečne prostorninske mase v treh časovnih obdobjih in koeficienti variacij

	Prizme sušene na zraku		Prizme sušene v posodi	
	ρ [kg/m ³]	Koef. variacije [%]	ρ [kg/m ³]	Koef. variacije [%]
1M	1669	0,32	1699	0,7
2M	1669	1,9	1662	0,3
3M	1668	1,3	1662	3,1



Grafikon 2: Primerjava povprečnih prostorninskih mas tekom sušenja

8.2 Analiza rezultatov mehanskih lastnosti prizem

8.2.1 Upogibna natezna trdnost prizem

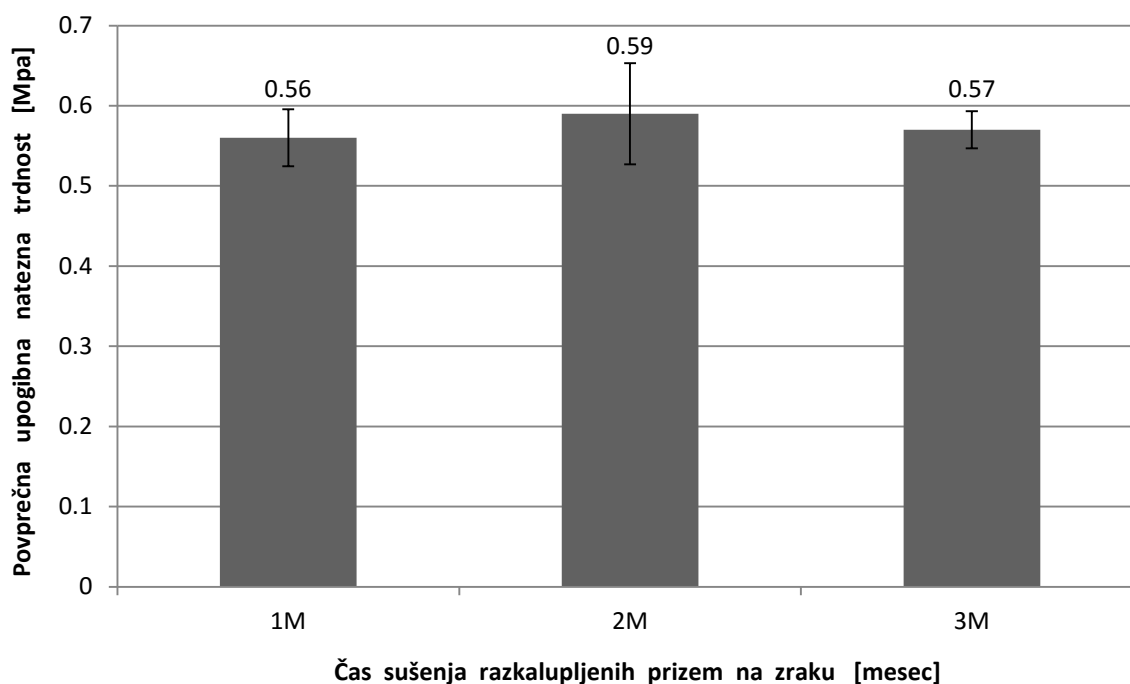
Vrednosti upogibne natezne trdnosti pri stanju 0M nismo preverjali, saj so bile prizme ob razkalupljanju zelo krhke in mehke. Odločili smo se, da predpostavimo povprečno natezno trdnost prizem f_{mf} pri 0M, torej pri odpiranju kalupov, kot vrednost nič.

8.2.1.1 Upogibna natezna trdnost prizem sušenih na zraku

Iz Preglednice 6 in Grafikona 3 vidimo, da so najvišjo upogibno natezno trdnost imele prizme, ki smo jih preizkušali po dveh mesecih sušenja. Ob upoštevanju predpostavke, da je upogibna natezna trdnost pri 0M zanemarljiva lahko trdimo, da imamo trend naraščanja trdnosti prva dva meseca sušenja, nato pa upogibna trdnost ostaja konstantna.

Preglednica 6: Rezultati povprečne f_{mf} prizem sušenih na zraku v treh časovnih obdobjih

Čas [t]	Sila F [kN]	f_{mf} [MPa]	Koef. variacije [%]
1M	0,13	0,56	6,4
2M	0,14	0,59	10,7
3M	0,14	0,57	4,1



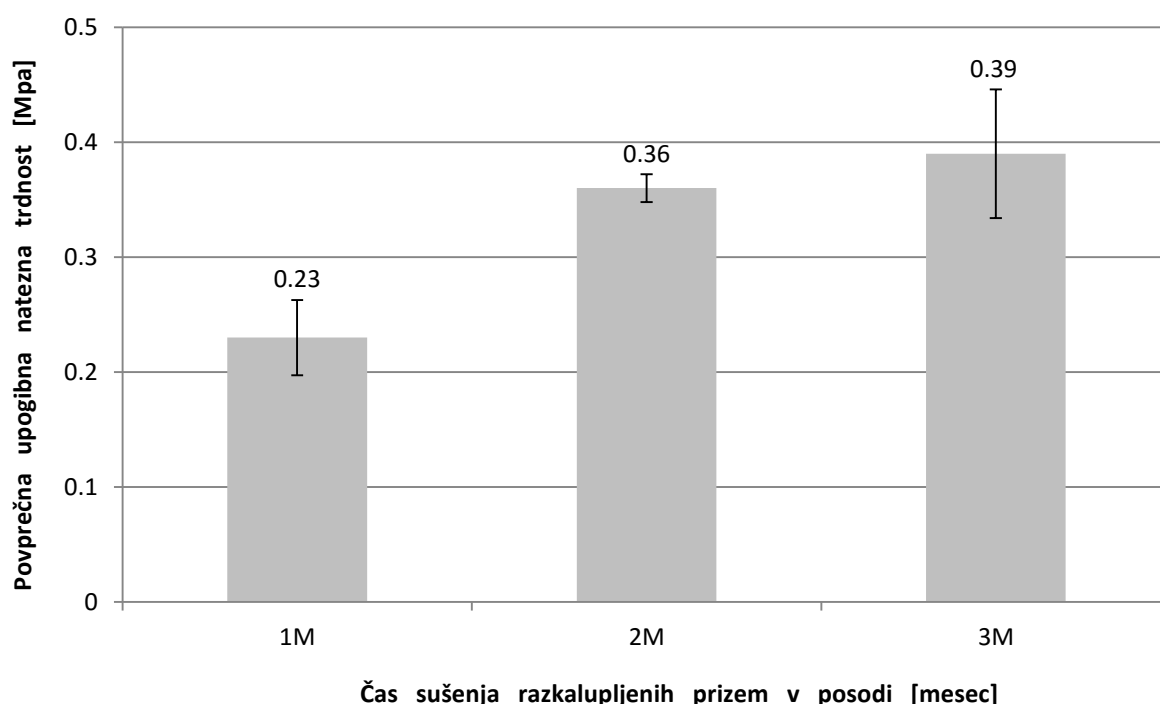
Grafikon 3: Primerjava povprečnih upogibnih nateznih trdnosti prizem sušenih na zraku za tri časovna obdobja

8.2.1.2 Upogibna natezna trdnost prizem sušenih v posodi

Pri prizmah, zaprtih v posodah, ki ponazarjajo razmere v jedru zidu, smo opazili trend naraščanja natezne upogibne trdnosti prve tri mesece sušenja. Iz spodnje Preglednice 7 in Grafikona 4 vidimo, da je največji prirast natezne trdnosti med 0M in 1M, oziroma v prvem mesecu sušenja v posodi. V drugem mesecu sušenja je prirast upogibne trdnosti že manjši, v tretjem pa najmanjši, v primerjavi s tistim v prvem mesecu sušenja. Iz prikazanih rezultatov vidimo, da so prizme kljub omejenemu dotoku oziroma pomanjkanju CO_2 , s staranjem pridobivale na upogibni natezni trdnosti. Pri izvajanju preskusov po 1M ter po 3M smo dobili rezultate s skoraj enakim raztrosom podatkov.

Preglednica 7: Rezultati povprečne f_{mf} prizem sušenih v posodi v treh časovnih obdobjih

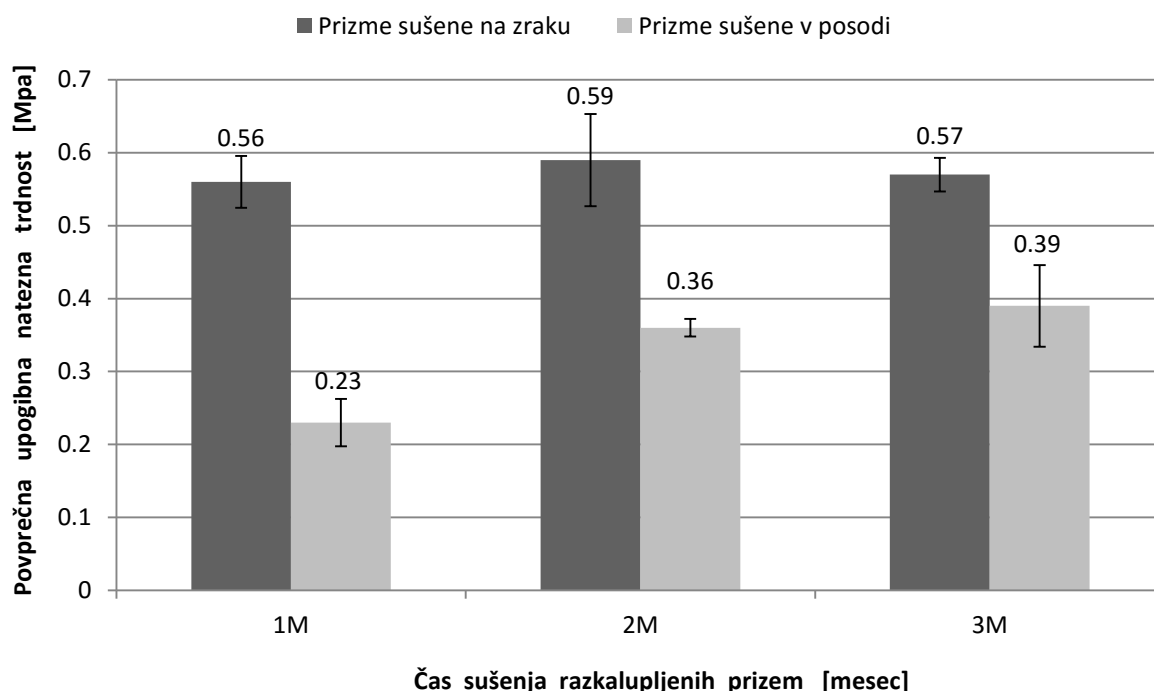
Čas [t]	Sila F [kN]	f_{mf} [MPa]	Koef. variacije [%]
1M	0,06	0,23	14,0
2M	0,09	0,36	3,3
3M	0,09	0,39	14,2



Grafikon 4: Primerjava povprečnih upogibnih nateznih trdnosti prizem sušenih v posodi za tri časovna obdobja

8.2.1.3 Diskusija

Kot vidimo iz Grafikona 5 je razlika med povprečno upogibno natezno trdnostjo prizem, sušenih na zraku in prizem, sušenih v posodi z vsakim mesecem dodatnega sušenja manjša. Zato bi bilo zanimivo spremljati proces strjevanja prizem še nekaj mesecev, da bi lahko z gotovostjo trdili, da bodo vzorci apnene injekcijske mešanice, sušeni v posodi, dosegli povprečno upogibno natezno trdnost vzorcev iste mešanice sušene na zraku in v kolikšnem času.



Grafikon 5: Primerjava povprečnih upogibnih nateznih trdnosti za tri časovna obdobja, pridobljenih s preiskavami na vzorcih, sušenih na zraku in na vzorcih, sušenih v posodi

8.2.2 Tlačna trdnost prizem

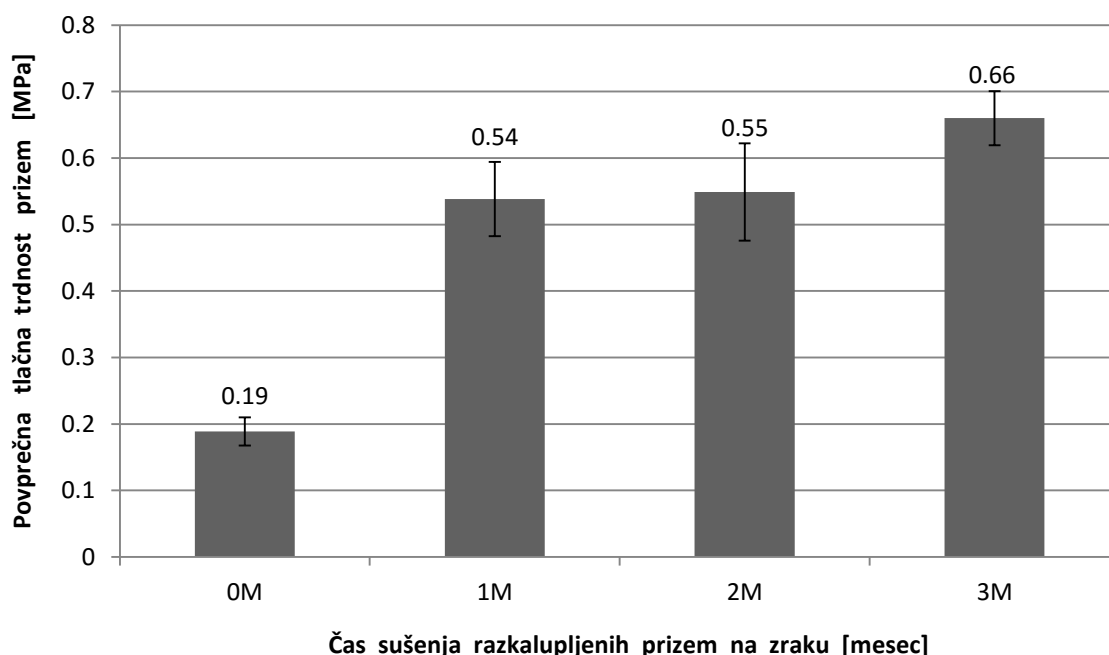
Tlačno trdnost smo določali na polovičkah prizem, nastalih pri upogibnem preskusu. V poglavju 7.2 smo že omenili težave pri razkalupljanju. Odločili smo se, da nekaj večjih kosov prizem, ki so se zlomile ali pa delno odlomile, uporabimo za namen preiskave tlačne trdnosti pri 0M. S tem nismo zmanjšali števila vzorcev za preiskave po 1M, 2M in 3M, hkrati pa smo pridobili neko osnovo za boljši pregled poteka napredovanja oziroma višanja vrednosti tlačne trdnosti preskušancev. V nadaljevanju so grafično prikazane povprečne vrednosti tlačne trdnosti f_{cc} vzorcev v štirih obdobjih.

8.2.2.1 Tlačna trdnost prizem, sušenih na zraku

Najvišja vrednost povprečne tlačne trdnosti je pričakovano pri 3M. Iz Preglednice 8 in Grafikona 6 opazimo, da povprečne vrednosti tlačne trdnosti naraščajo s staranjem vzorcev. Največja rast tlačnih trdnosti je v prvem mesecu sušenja. Mehanske lastnosti vzorcev apnene injekcijske mešanice so že v osnovi nizke, v primerjavi s cementnimi mešanicami [6]. Zato je pomembno izpostaviti, da so imeli vzorci pri 0M (razkalupljanje po enem tednu) slabo tretjino vrednosti tlačne trdnosti, ki smo jo izmerili pri 3M. Iz tega lahko ugotovimo, kako pomembni so pogoji okolja prvi mesec staranja, saj v tem času vzorci pridobijo večji del tlačne trdnosti.

Preglednica 8: Rezultati povprečne f_{cc} prizem sušenih v posodi v treh časovnih obdobjih

Čas [t]	Sila F [kN]	f_{cc} [MPa]	Koef. variacije [%]
0M	0,26	0,19	11,2
1M	0,86	0,54	10,4
2M	0,88	0,55	13,4
3M	1,06	0,66	6,2



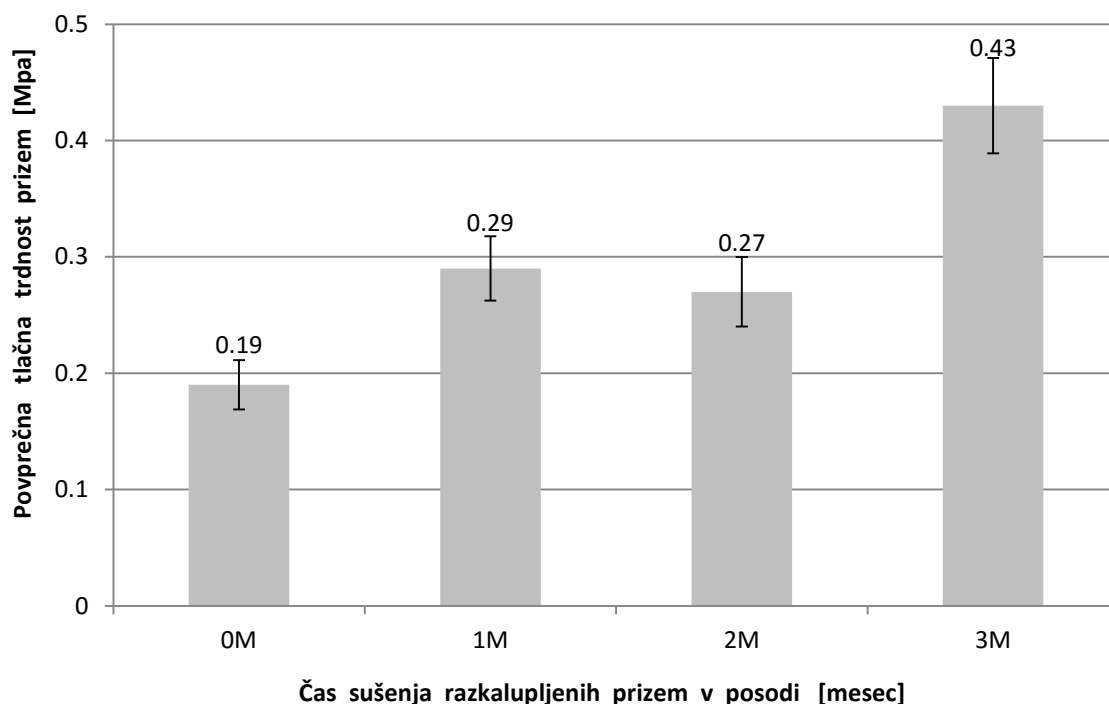
Grafikon 6: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti prizem, sušenih na zraku, za tri časovna obdobja

8.2.2.2 Tlačna trdnost prizem, sušenih v posodi

Glede na rezultate tlačne trdnosti vzorcev ob razkalupljanju predpostavimo, da povprečna vrednost teh rezultatov velja za vse vzorce. Tako nam tlačna trdnost pri 0M služi kot trdnost, ki so jo prizme že imele ob zaprtju v posodo. Iz rezultatov povprečnih tlačnih trdnosti v Preglednici 9 in Grafikonu 7 opazimo, da je ta trdnost največja po preteku 3M sušenja. Po prvem mesecu v primerjavi s primerjalno tlačno trdnostjo pri 0M preskušanci pridobijo malo na trdnosti, medtem ko naslednji mesec sušenja, torej po drugem mesecu, vzorci na tlačni trdnosti niso nič pridobili, v primerjavi s trdnostjo pri 1M. Kako pomembno vlogo pri pridobivanju mehanskih lastnosti ima dostop svežega zraka oziroma CO_2 do vzorcev, vidimo ob primerjavi tlačnih trdnosti pri 0M in 3M. V prvem tednu sušenja v kalupih so standardne prizme pridobile slabo polovico tlačne trdnosti pri 3M.

Preglednica 9: Rezultati povprečne f_{cc} prizem sušenih v posodi v treh časovnih obdobjih

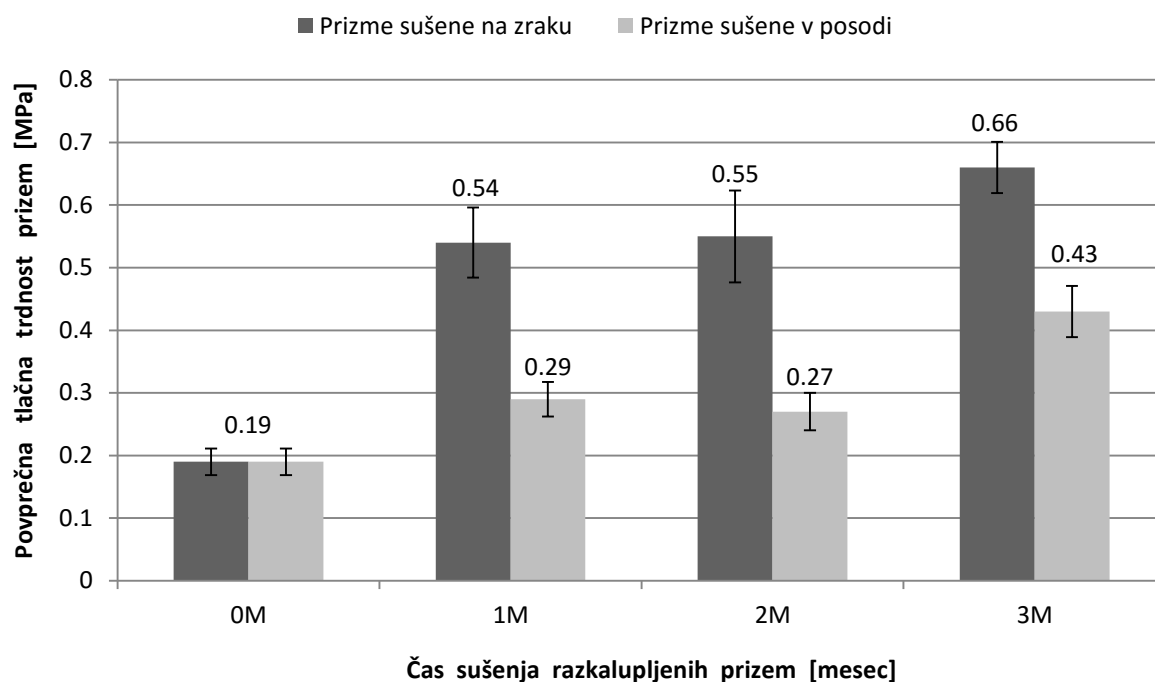
Čas [t]	Sila F [kN]	f_{cc} [MPa]	Koef. variacije [%]
0M	0,26	0,19	11,2
1M	0,46	0,29	9,6
2M	0,43	0,27	11,2
3M	0,68	0,43	9,6



Grafikon 7: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti prizem sušenih v posodi za tri časovna obdobja

8.2.2.3 Diskusija

V primerjavi z začetnim stanjem, torej vrednostjo povprečne tlačne trdnosti pri 0M opazimo, da so se povprečne tlačne trdnosti preskušancev v vseh časovnih obdobjih preskušanja povišale, ne glede na to, kateremu od dveh staranj so bile izpostavljene. Tako prizme sušene na zraku, kot tudi tiste sušene v posodi so dosegle najvišjo povprečno tlačno trdnost pri 3M. Opazimo (Grafikon 8), da tlačna trdnost pri 2M, ne glede na način staranja prizem, v primerjavi z vrednostjo povprečne tlačne trdnosti pri 1M, ne pridobiva na trdnosti in pri obeh načinih sušenja bolj ali manj miruje.



Grafikon 8: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti za tri časovna obdobja, pridobljenih s preiskavami na vzorcih, sušenih na zraku in v posodi

8.3 Razmere v posodi

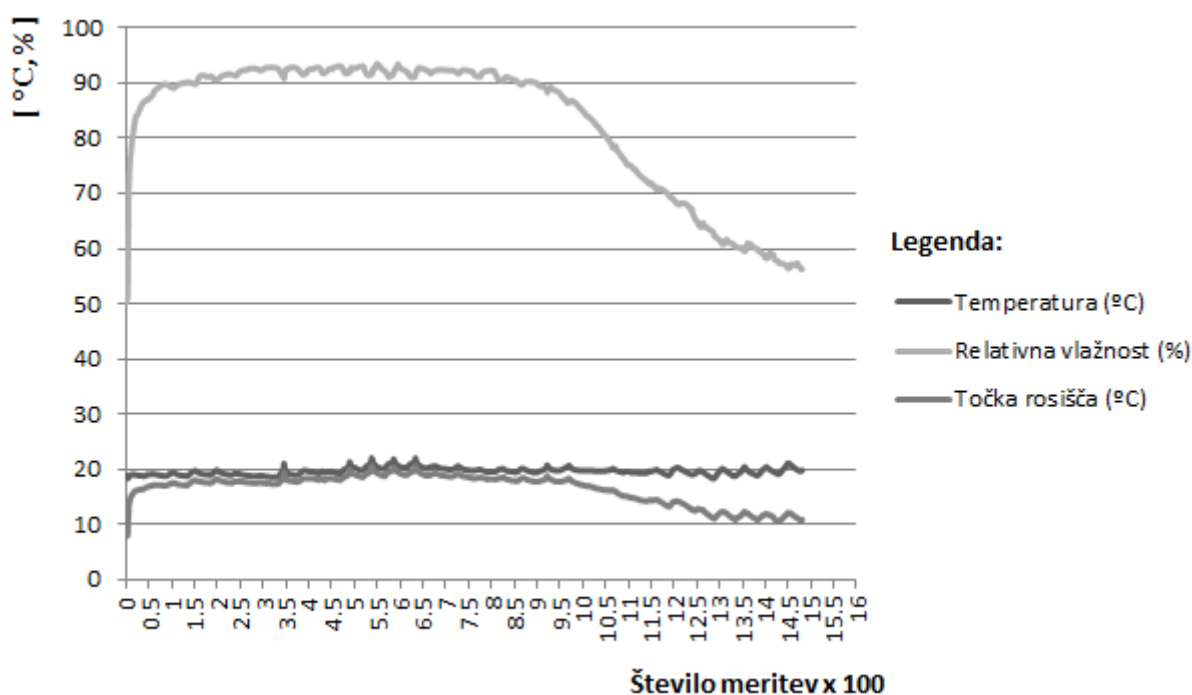
Vse tri posode s preskušanci smo imeli v laboratoriju FGG. Pogoje za sušenje v posodi smo spremljali s pomočjo USB - shranjevalnika podatkov o zraku DL-121TH VOLTcraft. Ob odprtju vsake posode (Slika 24) smo podatke prenesli na računalnik in jih grafično obdelali. V nadaljevanju so predstavljeni podatki z razmerami za vse tri posode. Na ordinatni osi grafov sta prikazani temperatura in relativna vlažnost. Abscisna os pa predstavlja število meritev. V grafu so vključene tudi izračunane vrednosti rosišča, ki prikazujejo temperaturo površine, na kateri pride do kondenzacije pri določeni temperaturi zraka in relativni zračni vlagi [25]. Shranjevalnik podatkov o zraku je bil v vseh treh posodah nastavljen na intervale zapisovanja 30 min, kar znaša 48 meritev na dan.



Slika 24: Odpiranje posode

8.3.1 Prva posoda – prvi mesec sušenja

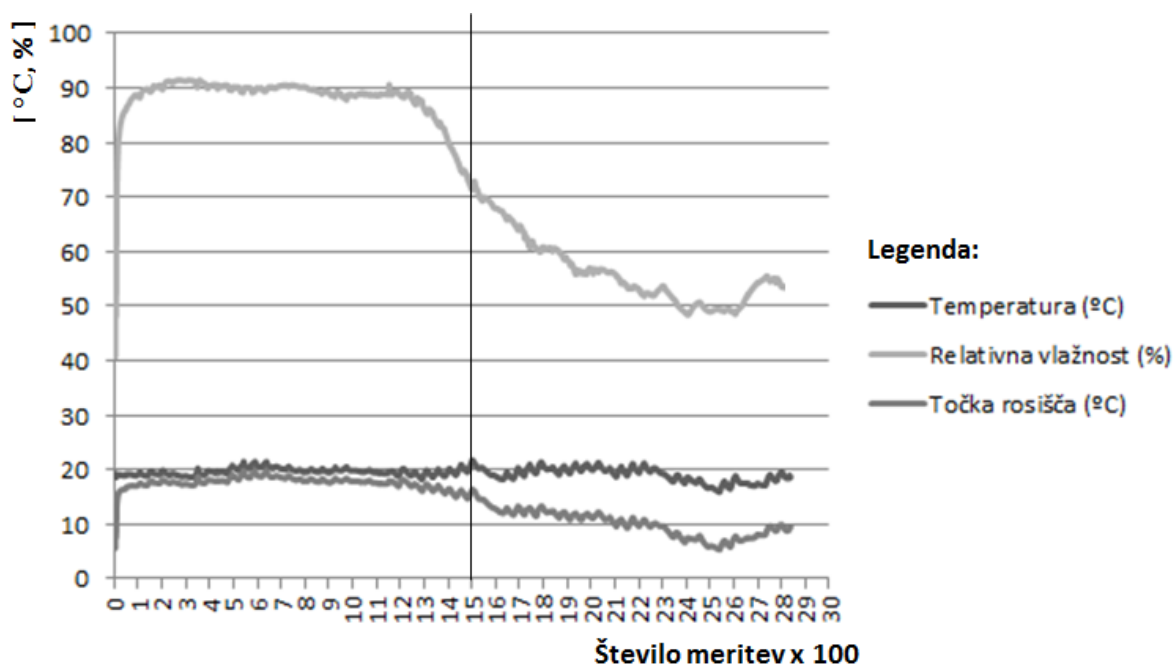
Pričakovano se je ob zaprtju posod s svežimi standardnimi prizdami vlaga močno povečala (Grafikon 9). Največja relativna vlažnost je bila 93,5 %, in sicer enajsti dan po zaprtju posode. Istega dne je bila zabeležena tudi najvišja temperatura 22,1 °C v celotnem enomesečnem merjenju. Vlažnost v posodi je začela kontinuirano padati šele po osemnajstem dnevu od zaprtja posode. Relativna vlažnost je ob odprtju posode znašala 57,1 %. Temperatura se je v posodi skozi celoten mesec gibala med 18,4 in 22,1 °C. Shranjevalnik podatkov o zraku je bil nastavljen pri prvi posodi na intervale zapisovanja 30 min. Absciso os smo uredili tako, da je njena enota 50 meritev, kar predstavlja približno en dan. Tako imamo pregled nad dogajanjem po dnevih. Ob odprtju posode je bila v posodi višja relativna vlaga kot pa v laboratorijskem zraku.



Grafikon 9: Temperatura in relativna vlaga znotraj prve posode, merjeni v obdobju enega meseca

8.3.2 Druga posoda – dva meseca sušenja

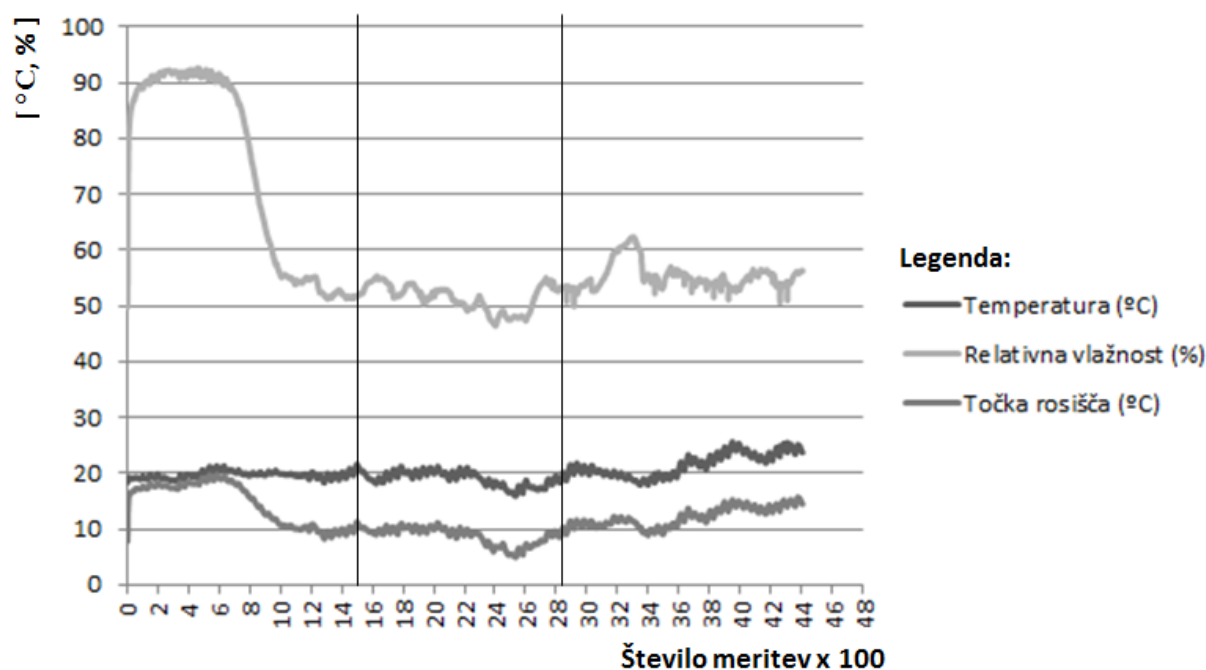
V drugi posodi je bila največja relativna vlažnost 91,4 % in sicer peti dan po zaprtju posode (Grafikon 10). Najvišja izmerjena temperatura je bila trideseti dan od začetka meritev ter je znašala 21,8 °C. Vlažnost v posodi je začela padati po dvajsetem dnevu od zaprtja posode. Relativna vlažnost je od takrat dlje padala, z izjemo rahlega naraščanja nekaj dni pred odprtjem posode. Temperature v posodi so se tekom dveh mesecev gibale precej enakomerno, med 15,9 °C in 21,8 °C, brez pretiranih nenadnih skokov. Enota abscisne osi je zaradi preglednosti 100 meritev. V enem dnevu je bilo izvedenih 48 meritev, iz česar sledi, da 100 meritev predstavlja nekje 2 dni sušenja. Navpična črna črta nakazuje na odpiranje prve posode in služi predvsem lažji primerjavi med grafi, ki pripadajo različnim posodam.



Grafikon 10: Temperatura in relativna vlaga znotraj druge posode, merjeni v obdobju dveh mesecev

8.3.3 Tretja posoda – trije meseci sušenja

V tretji posodi je bila največja relativna vlažnost 92,6 % in sicer deseti dan po zaprtju posode (Grafikon 11). Najvišja izmerjena temperatura je bila dvainosemdeseti dan od začetka meritev ter je znašala 25,6 °C. Vlažnost v posodi je začela padati po trinajstem dnevu od zaprtja posode. Nato pa se je preostalo obdobje sušenja ves čas gibala med 46,7 % in 62,3 %. Temperatura v posodi se je v treh mesecih gibala precej enakomerno. V posodi je bilo nad 20 °C cel zadnji teden v maju, in vse do konca prvega tedna junija, ko smo meritev tudi zaključili. Enota abscisne osi je zaradi preglednosti 200 meritev. V enem dnevu je bilo izvedenih 48 meritev, iz česar sledi, da 200 meritev predstavlja približno 4 dni sušenja. Navpični črti predstavljata odprtje posod. Prva črta z leve proti desni strani, prikazuje odprtje prve posode, druga pa odprtje druge posode.



Grafikon 11: Temperatura in relativna vlaga znotraj tretje posode, merjeni v obdobju treh mesecev

8.3.4 Diskusija

Po pregledu podatkov o zraku (Grafikon 8, 9, 10) v vseh treh posodah ugotovimo, da nam je uspelo, kar smo želeli, in sicer ustvariti enake pogoje sušenja v vseh treh posodah. Opazimo, da je relativna vlaga kmalu po zaprtju posod dosegla svojo največjo vrednost, ki je v vseh treh posodah presegla 90 %. Tudi zabeleženi časi ob dosegu največje relativne vlažnosti so precej podobni. Poleg tega je vlaga v posodah tudi padati začela po precej podobnih časih. V Preglednici 10 so podane največje izmerjene temperature v posamezni posodi tekom trimesečnega sušenja. Temperatura je bila v vseh treh posodah precej konstantna in skoraj enaka. Vrednost relativne vlage je malo dlje oziroma počasneje padala v drugi posodi, v primerjavi z ostalima dvema posodama.

Preglednica 10: Pregled podobnosti podatkov o zraku

	POSODA 1	POSODA 2	POSODA 3
Največja dosežena vrednost relativne vlage [%]	93,5	91,4	92,2
Čas do zabeležene najvišje relativne vlage [dan]	11	5	10
Čas do začetka padanja relativne vlage v posodi [dan]	18	20	13
Največja izmerjena temperatura v času sušenja [°C]	22,1	21,8	25,6

Znano je, da lahko z injektiranjem v zidove vnesena količina vode predstavlja problem pri sanaciji zidov [15]. Spremljajoči pojavi pri injektiranju kamnitega zidovja zgodovinske in umetniške vrednosti kažejo na to, da se je treba injektiranja lotiti skrbno [26].

Iz opazovanja podatkov o zraku, predvsem iz prvega dela grafov vseh treh posod oziroma prvega meseca sušenja vidimo učinek vnosa vode v zid (v našem primeru posodo) in posledično strmo naraščanje relativne vlage. Porožna apnena malta odvaja vlago iz zidu na površje ometa, kjer izhlapi [27]. Tudi to se je pri naših meritvah potrdilo, saj so naši pokrovi delovali kot sloj apnenega ometa. Vlaga je v vseh treh posodah začela padati bolj ali manj istočasno in se počasi približala nivoju relativne vlage v zraku laboratorija.

8.4 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem (fenolftaleinski test)

V poglavju 3.2.1 te naloge smo že omenili, da je apno zračno vezivo, torej veže samo na zrak. To pomeni, da se ob stiku z zrakom želi vrniti v svoje prvotno stanje (kalcijev karbonat). Potek ponovne pretvorbe v kalcijev karbonat je prikazan v enačbi (8.1). Bistven je proces vezave ogljikovega dioksida iz zraka in oddajanje vode v zrak. Opisan proces imenujemo karbonatizacija [28]. Tako za malte kot tudi za injekcijske mešanice velja, da z izhlapevanjem vode zrak pride v odprte pore. Tako dosežemo popolno strjevanje, saj lahko ogljikov dioksid zaradi odprtih por reagira z apnom tudi v notranjosti materiala [29]. Na polovičkih prizem, ki so nastale pri upogibnem preizkusu, smo v različnih časovnih obdobjih izvedli fenolftaleinski test. Z njim na enostaven način spremljamo potek karbonatizacije hidratiziranega apna. Površine prerezov, katerih pH je višji od 9,2 se ob nanosu fenolftaleina s pršenjem obarvajo v roza barvo. Obarvanje kaže na to, da proces karbonatizacije še poteka [30].



kjer je

$Ca(OH)_2$ – gašeno apno oziroma hidratizirano apno

CO_2 – ogljikov dioksid

$CaCO_3$ – apnenec

H_2O – voda [8]

8.4.1 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem, sušenih na zraku

Test smo izvajali po treh obdobjih sušenja: 1M, 2M in 3M. Izvedba testa je enostavna. Paziti je treba na to, da so porušne površine očiščene prahu in nepovezanih drobnih delcev, ki so morebiti nastali pri poružitvi prizme. Raztopina fenolftaleina je običajno sestavljena iz 1g fenolftaleina raztopljenega v 70 mg etanola ter razredčena z destilirano vodo na 100 ml. Raztopino s pršilko popršimo po površini ploskve, ravno toliko, da jo zmočimo. Paziti je treba, da ne popršimo prekomerno (tečenje raztopine po ploskvi). Najbolj optimalno je, da rezultate testa posnamemo čim hitreje po nanosu fenolftaleina, najboljše v roku 30 s [24].

Po prvem mesecu – 1M je bila stopnja karbonatizacije nizka. Opazimo karbonatizacijo v debelini 1 mm po skoraj celotnem obodu porušne ploskve vzorca (Slika 25 levo). Vsi vzorci izpostavljeni

atmosferskim vplivom so se sušili na posebej izdelanih podstavkih, ki so omogočali, da so bile vse stranice izpostavljene enakim pogojem. Proces karbonatizacije je potekal od oboda vzorca proti njegovi notranjosti.

Po preteku dveh mesecev – 2M je stopnja karbonatizacije precej napredovala. Pojavi se samo rahla obarvanost na določenih delih ploskve (Slika 25 sredina).

Po preteku treh mesecev – 3M, opazimo zelo podobno stanje kot pri 2M, saj ni vidnih nekih večjih sprememb (Slika 25 desno).

Skoraj z gotovostjo lahko trdimo, da proces karbonatizacije po treh mesecih sušenja apnene injekcijske mešanice še ni zaključen. Rezultati preiskave po 2M in 3M pa kažejo, kot da bi bila karbonatizacija najhitrejša v območju obroča med površino in jedrom prizme.



Slika 25: Stopnja karbonatizacije 1M (levo), stopnja karbonatizacije 2M (sredina), stopnja karbonatizacije 3M (desno), pri vzorcih sušenih na zraku

8.4.2 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem, sušenih v posodi

Vzporedno z izvajanjem testa na vzorcih, staranih na zraku, smo izvajali fenolftaleinski test tudi na vzorcih sušenih v pogojih z omejenim dostopom CO₂.

Po prvem mesecu – 1M sušenja, napredovanja karbonatizacije praktično ni videti (Slika 26 levo). Cela porušna ploskev vzorca je bila obarvana v roza-vijolično bravo, iz česar sklepamo, da se karbonatizacija še ni začela.

Po preteku dveh mesecev – 2M tudi ni jasnih dokazil za napredovanje procesa karbonatizacije, v primerjavi s posnetkom po 1M. Vidno je sicer, da je v vogalih vzorca začel potekati proces karbonatizacije, saj opazimo svetlejše cone obarvanosti, v primerjavi z obarvanostjo vzorca v jedru (Slika 26 sredina).

Po preteku treh mesecev – 3M smo opazili konkreten napredek (Slika 26 desno) procesa

karbonatizacije prizem sušenih v posodah. Karbonatizacija je potekla po celotnem obodu prereza vzorca enakomerno proti notranjosti. Proces poteka od zunaj proti jedru vzorca in še ni zaključen.



Slika 26: Stopnja karbonatizacije 1M (levo), stopnja karbonatizacije 2M (sredina), stopnja karbonatizacije 3M (desno), pri vzorcih sušenih v posodi

8.4.3 Diskusija

S primerjanjem rezultatov fenolftaleinskega testa in rezultatov mehanskih lastnosti vzorcev ugotovimo, da stopnja karbonatizacije ni nujno merilo za boljše mehanske lastnosti. Hkrati pa ob pomanjkanju CO₂ poteka zelo počasi, kar dokazuje Slika 26.

Če najprej primerjamo rezultate povprečnih upogibnih nateznih trdnosti prizem (Grafikon 5), sušenih na zraku in tistih, sušenih v posodi ter posnetke fenolftaleinskega testa (Slika 25 in Slika 26) opazimo, da smo predvidevali prav in je napredovanje karbonatizacije vzorca, sušenega na zraku, pri 2M in 3M približno enako, kar se ujema tudi z rezultati upogibne natezne trdnosti, ki je pri obeh časih približno enaka. Medtem pa upogibne natezne trdnosti vzorcev, sušenih v posodi ves čas naraščajo. Največji porast upogibne natezne trdnosti teh vzorcev je bil v prvem mesecu sušenja. Stopnja karbonatizacije vzorcev, sušenih v posodi, pri 2M ni napredovala, glede na rezultate pri 1M, z izjemo minimalnih sprememb v dveh kotih vzorca. Napredek stopnje karbonatizacije je viden šele pri 3M, ampak se to pri rezultatih upogibne natezne trdnosti ni opazilo. Povprečna upogibna trdnost prizem, sušenih v posodi, je naraščala, kljub temu, da karbonatizacija skoraj ni napredovala. Res pa je, da smo predpostavili, da je vhodna upogibna natezna trdnost prizem 0 MPa. Predvidevamo, da je v prvem mesecu, ko je bila relativna vlaga v posodah nad 90 % prvih 18 dni, povišanje natezne trdnosti posledica sušenja vzorcev v preostalem času ali kombinacije sušenja vzorcev in reakcije med dolomitno moko in vezivom (ACR).

Podobno opazimo tudi pri primerjavi rezultatov povprečnih tlačnih trdnosti prizem (Grafikon 8), sušenih na zraku, in prizem, sušenih v posodi ter posnetkov fenolftaleinskega testa. Ob primerjavi rezultatov tlačne trdnosti prizem sušenih na zraku in njihovih posnetkov stopnje karbonatizacije (Slika 25) ugotovim, da so vzorci kljub majhnemu napredovanju karbonatizacije pri 1M dosegli tlačne

trdnosti, primerljive s tistimi pri 2M. Pri 2M je stopnja napredovanja karbonatizacije relativno visoka. Razlog za to nam zaenkrat ni znan. Vrednosti tlačnih trdnosti pri prizmah, sušenih v posodah, narašča z napredovanjem stopnje karbonatizacije (Slika 26). Pri 3M so tlačne trdnosti najvišje, največje pa je tudi napredovanje karbonatizacije. Omeniti moramo, da so prvi mesec sušenja v posodi, zaradi visoke vrednosti relativne vlažnosti najbolj neugodne razmere za karbonatizacijo. Vendar pa vidimo porast povprečne tlačne trdnosti, v primerjavi s stanjem 0M, kljub temu, da iz posnetkov fenolftaleinskega testa ni videti poteka procesa karbonatizacije. Porast mehanskih lastnosti preskušancev je tako verjetno posledica kombinacije sušenja prizem v času, ko je relativna vlažnost padala in poteka reakcije med dolomitno moko in apnenim vezivom (ACR). Kot navaja Petra Štukovnik [12] *»Rezultati opravljenih meritev so pokazali, da ima ACR vpliv na mikrostrukturo materiala in s tem tudi na mehanske lastnosti malt. Vpliv ACR reakcije bi lahko izkoristili pri pripravi sanacijskih malt za prenovu objektov stavbne dediščine, še posebej v predelih z višjo vlažnostjo.«*

9 ZAKLJUČEK

Zakaj vztrajati z za uporabo težavnim zračnim vezivom, kot je apno, pri sanaciji kulturnozgodovinskih objektov?

Kljub slabostim apnenih injekcijskih mešanic, kot so počasno pridobivanje na trdnosti, vezanje samo na zraku in nizke končne trdnosti, je njihova bistvena prednost in glavni razlog za uporabo ta, da vnos apnenih injekcijskih mešanic v staro strukturo zidu za freske, mozaike in dekorativne elemente na njegovi površini ni škodljiv [5]. Z injektiranjem se izboljša prostorska povezanost kamna, kar vodi v aktiviranje celotne nosilnosti primarnega zidu, pri tem pa trdnost injekcijske mešanice ni niti odločilna [26].

V diplomski nalogi smo se lotili raziskovanja problematike vezanja in pridobivanja trdnosti s časom za apnene injekcijske mešanice. Želeli smo pridobiti podatke o poteku strjevanja injekcijske mešanice, izpostavljene dvema različnima pogojema staranja. Pogoja staranja, ki smo ju simulirali v nalogi, sta bila laboratorijska atmosfera ter staranje v jedru zidu.

V ta namen je bilo treba zasnovati in izdelati komoro oziroma posodo, v kateri bodo pogoji čim bolj podobni tistim v notranjosti zidu. S programskim orodjem AutoCAD smo izrisali načrta posode in okvirja pokrova. Posoda je sestavljena iz stranic centimeter debelega pleksi-stekla. V lesen okvir pokrova je vpeta fasadna mreža, ki skupaj z okvirjem predstavlja nosilno konstrukcijo centimeter debelemu sloju apnene malte. Sloj malte ponazarja apneni omet, preko katerega prehajata vlaga (iz notranjosti zidu v okolje) ter svež zrak s CO₂, ki je ključen za vezanje injekcijske mešanice (iz okolja v notranjost zidu).

Osnova za pripravo apnene injekcijske mešanice je bila preverjena sestava Kristjana Rojca [6]. Recepturo smo, po prvem izvajanju preskusa pretočnosti mešanice, spremenili oziroma prilagodili, zmanjšali smo količino vode. V sklopu standardnih preiskav sveže injekcijske mešanice smo poleg pretočnosti izvedli še preskusa prostorninske mase ter izločanja vode. Mešanice smo vlili v standardne tridelne kalupe, ki smo jih predhodno namazali z mineralnim oljem. Po tednu dni smo kalupe odprli in del prizem zaprli v posode s predhodno zatesnjenimi spoji stranic. Izdelali smo tri posode, v vsako posodo smo na posebej izdelane podpore položili po štiri standardne prizme. Posode smo nato zaprli s pokrovi, ki so se do tedaj, dober mesec dni sušili na zraku (v laboratoriju). S silikonom smo zatesnili spoj pokrov-posoda ter tako omejili prehod zraka in vlage samo na površino apnene malte. Ostale prizme smo pustili, da se sušijo na zraku.

Ob odprtju kalupov (0M) smo na nekaj vzorcih izvedli preskus tlačne trdnosti in s tem pridobili informativno trdnost, ki so jo vzorci pridobili po tednu dni sušenja v kalupih. Vsak mesec smo odprli novo posodo in izvedli preskuse upogibne natezne trdnosti in tlačne trdnosti, tako na prizmah, sušenih

v posodi kot tudi na prizmah, sušenih na zraku. Tako smo dobili vrednosti mehanskih lastnosti pri 1M, 2M in 3M. Med sušenjem smo spremljali tudi prostorninsko maso na strjenih vzorcih injekcijske mešanice. Prostorninska masa vzorcev, sušenih v posodi je bila po 1M sušenja približno 2 % večja, kot prostorninska masa vzorcev, sušenih na zraku. Rezultat je posledica visoke relativne vlažnosti v posodi v prvih 18 dni. Vlažnost v posodi je potem padala, in prizme so se začele sušiti skozi pokrov posode. Posledica tega so nižje vrednosti povprečne prostorninske mase pri 2M in 3M, ki so praktično enake tistim, ki smo jih dobili za prizme sušene na zraku.

Ob primerjavi povprečne upogibne natezne trdnosti prizem, sušenih v posodi in prizem, sušenih na zraku ugotovim, da je po 3M sušenja povprečna upogibna natezna trdnost prizem, sušenih v posodi za približno 32 % manjša od povprečne natezne trdnosti prizem, sušenih na zraku. Medtem, ko je povprečna tlačna trdnost prizem, sušenih v posodi, 35 % nižja kot povprečna tlačna trdnost vzorcev, sušenih na zraku.

V vsaki posodi smo spremljali razmere za sušenje s pomočjo USB - shranjevalnika podatkov o zraku DL-121TH VOLTcraft. Shranjene izmerjene vrednosti smo grafično obdelali in ugotovili, da nam je uspelo v vseh treh posodah ustvariti primerljive pogoje. S tem imajo tudi rezultati mehanskih lastnosti vzorcev večjo vrednost pri nadaljnji obravnavi. Prvi mesec sušenja se je izkazal za najbolj kritičnega, saj so pogoji v posodi, zaradi omejenega dotoka CO₂ ter visokega deleža relativne vlage, skrajno neugodni za proces vezanja strjevanja apnene injekcijske mešanice. Grafi stanja v posodah lepo prikažejo nenadno povišanje relativne vlage v posodah ob namestitvi pokrova in funkcijo apnene malte kot ometa s svojo lastnostjo visoke prepustnosti za vodno paro [7]. Še enkrat velja omeniti tudi dejstvo, da skozi sloj apnene malte prehaja (sicer omejeno) svež zrak in z njim CO₂.

S primerjanjem rezultatov fenolftaleinskega testa in rezultatov mehanskih lastnosti vzorcev smo dokazali, da stopnja karbonatizacije ni nujno merilo boljših mehanskih lastnosti. To ugotovitev dokazujejo povprečne upogibne natezne trdnosti prizem, sušenih na zraku. Po 1M sušenja smo opazili nizko stopnjo karbonatizacije, medtem ko je bila pri 2M in 3M stopnja karbonatizacije relativno visoka. Medtem pa trend naraščanja povprečnih upogibnih nateznih trdnosti po 2M ni opazen. Tudi povprečne vrednosti tlačne trdnosti vzorcev, sušenih na zraku potrjujejo zgoraj navedeno ugotovitev, saj je pri 1M stopnja karbonatizacije nizka, a so vzorci vseeno dosegli 82 % povprečne tlačne trdnosti pri 3M, kjer je karbonatizacija vzorca že močno napredovala. Pri prizmah, sušenih v posodah po 1M sušenja karbonatizacije z izbranim testom nismo uspeli potrditi, pa so imeli vzorci kljub temu 67 % povprečne tlačne trdnosti pri 3M, kjer je že viden konkretniji napredek karbonatizacije vzorca. Podobno je tudi pri napredku povprečne upogibne natezne trdnosti, kjer imajo vzorci, sušeni v posodi, po obdobju 1M sušenja 59 % povprečne upogibne natezne trdnosti vzorcev po 3M sušenja.

V prvi posodi je bila 18 dni relativna vlažnost več kot 90 %, poleg omejenega dotoka svežega zraka, pa je vseeno prišlo do procesa strjevanja apnene injekcijske mešanice. Sklepamo, da so relativno dobre mehanske lastnosti vzorcev, kljub neugodnim razmeram za sušenje in karbonatizacijo, verjetno predvsem posledica alkalno karbonatne reakcije.

Eno od spoznanj te naloge je tudi pomen polnila pri apnenih injekcijskih mešanicah. Naša ugotovitev se navezuje na ugotovitve magistrskega dela [6], kjer avtor prav tako kot mi opaža, kako velik vpliv ima dolomitna moka, tako na potrebo po vodi, izločanje vode in posledično tudi na mehanske lastnost strjene injekcijske mešanice. Vsem svetujemo, da v mešanicah uporabljate suha polnila, saj z njimi lažje ustvarite optimalno sestavo apnene injekcijske mešanice.

Možnosti za dodatna raziskovanja, kaj se dogaja v jedru zidu, so odprta. Možnosti in idej je ogromno. Zagotovo bi bilo smiselno izdelati še nekaj dodatnih posod in jih odpirati na daljša časovna obdobja. Poleg tega bi bilo uporabno izvesti meritve, kateri plini so v posodi, njihova nihanja in količine tekom sušenja.

VIRI

- [1] Theuerschuh, J. 2014. Ohranjanje stavbne dediščine-prispevek k razumevanju metodološkega pristopa. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žarnić, R., somentorica Vodopivec, B.): 149 str.
- [2] Uranjek, M. 2008. Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V.): 166 str.
- [3] Kavčič, M., Milić, Z., et al. 2004. Vračanje izvornih podob Kako izbrati konservatorja-restavradorja. Ljubljana, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije.
http://www.zvkds.si/sites/www.zvkds.si/files/uploads/files/publication/14_4_vracanje_izvornih_podob_dodatek.pdf (Pridobljeno 15. 6. 2016.)
- [4] Tomažević, M. 1987. Zidane zgradbe na potresnih območjih. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: loč. pag.
- [5] Vintzileou, E., Miltiadou-Fezans, A. 2008. Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts. Engineering Structures 30: 2265-2276.
- [6] Rojc, K. 2015. Priprava injekcijskih mešanic na osnovi dolomitnega polnila a kamnite zidove. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorica Štukovnik, P.): 83 str.
- [7] Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Martinez-Ramirez, S., et al. 2002. Historic Mortars: Characterization and Durability. New Tendencies for Research. Madrid, Eduardo Torroja Institute: 20 str.
- [8] Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: 350 str.
- [9] SIST EN 459-1:2010 - Gradbeno apno - 1. del: Definicije, zahteve in merila skladnosti
- [10] Mioč, P. 1987. Geološka karta SFRJ. 1:100.000. Tolmač lista Slovenj Gradec. L33-55., Beograd, Zvezni geološki zavod.: 74 str.
- [11] Mioč, P., Žnidarčič, M. 1976. Geološka karta SFRJ. L33-55, Slovenj Gradec [karta]. 1:100.000. Beograd: Zvezni geološki zavod, Beograd.

- [12] Štukovnik, P. 2015. Vpliv okolja na historične materiale z mineralnim vezivom. = Influence of environment on the historical material with mineral binder. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (Mentorica Bokan Bosiljkov, V.): 108 str.
- [13] Terry, R. D., Chilingar, G.V. 1955. Summary of "Concerning some additional aids in studying sedimentary formations," by M. S. Shvetsov. Journal of Sedimentary Research, 25, 3: 229 - 234.
- [14] Golob, D. 2007. Vpliv vrste polimerne disperzije na mehanske in fizikalne lastnosti sanacijskih malt in betonov, Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (Mentorica Bokan Bosiljkov, V.): 69 str.
- [15] Arrigler, A. 2013. Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorici Kržan, M., Bokan-Bosiljkov, V.): 164 str.
- [16] SIST. 2001. SIST EN 1015-3:2001 - Metode preskušanja zidarske malte - 3. del: Določevanje konsistence sveže malte (s stresalno mizo).
- [17] SIST EN 1015-6:1999. Metode preskušanja zidarskih malt – 6. del: Ugotavljanje prostorninske mase sveže malte.
- [18] SIST EN 445:2008. Injekcijska masa za prednapete kable: preskusne metode.
- [19] SIST EN 1015-10:2001/A1:2007. Metode preskušanja zidarske malte - 10. Del: Določevanje suhe prostorninske mase strjene malte.
- [20] SIST EN 1015-11:2001/A1:2007. Metode preskušanja zidarskih malt - 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.
- [21] Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan-Bosiljkov, V. 2009. Gradiva – Vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.
- [22] Conrad. 2016. USB - shranjevalnik podatkov o zraku DL-121TH VOLTcraft.
<https://www.conrad.si/USB-shranjevalnik-podatkov-o-zraku-DL-121TH-VOLTcraft.htm?websale8=conrad-slowenien&pi=105057> (Pridobljeno 5. 6. 2016.)
- [23] ARSO. 2016. Arhiv meritev
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (Pridobljeno 24. 5. 2016.)
- [24] SIST EN 14630:2006. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Ugotavljanje globine karbonatizacije v strjenem betonu z fenolftaleinsko metodo.

[25] Senzal. 2015. Tabela točke rosišča.

http://www.senzal.si/files/tabela_tocke_rosisca.pdf (Pridobljeno 21. 6. 2016.)

[26] Tomaževič, M., Apih, V. 1993. Ojačevanje kamnitega zidovja z zidovju prijaznim injektiranjem. Gradbeni vestnik 42: 45 - 48.

[27] Wikipedia. 2016. Lime mortar.

https://en.wikipedia.org/wiki/Lime_mortar (Pridobljeno 18. 6. 2016.)

[28] Križnar, A. 2006. Slog in tehnika srednjeveškega stenskega slikarstva na slovenskem. Ljubljana, ZRC SAZU: 360 str.

[29] Torraca, G. 2009. Lectures on Materials Science for Architectural Conservation. Los Angeles, The Gette Institute: 193 str.

[30] Likar, A. 2006. Sanacija in zaščita betonskih objektov, poškodovanih zaradi korozije armature. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, F., somentor Leskovar, I.): 85 str.