

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:

Kovač, D., 2014. Vpliv pospešil vezanja in lahkega polnila na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentorica Padovnik, A.): 34 str.

Datum arhiviranja:03-10-2014

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:

Kovač, D., 2014. Vpliv pospešil vezanja in lahkega polnila na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Padovnik, A.): 34 pp.

Archiving Date: 03-10-2014

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

Kandidatka:

**DORA KOVAČ**

**VPLIV POSPEŠIL VEZANJA IN LAHKEGA POLNILA  
NA LASTNOSTI APNENIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC**

Diplomska naloga št.: 139/B-GR

**EFFECT OF BINDING ACCELERATORS AND  
LIGHTWEIGHT AGGREGATE FILLERS ON THE  
PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF LIME-  
BASED INJECTION GROUTS**

Graduation thesis No.: 139/B-GR

**Mentorica:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Predsednica komisije:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-  
Bosiljkov

**Somentorica:**

mag. Andreja Padovnik

Ljubljana, 23. 09. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Podpisana Dora Kovač izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Vpliv pospešil vezanja in lahkega polnila na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 16. 9. 2014

Dora Kovač

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

<b>UDK</b>	<b>691.53(043.2)</b>
<b>Avtor</b>	<b>Dora Kovač</b>
<b>Mentorica</b>	<b>Violeta Bokan-Bosiljkov, izr.prof.dr</b>
<b>Somentorica</b>	<b>Andreja Padovnik, mag. kons.-rest.</b>
<b>Naslov</b>	<b>Vpliv pospešil vezanja in lahkega polnila na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic</b>
<b>Tip dokumenta</b>	<b>diplomsko delo – univerzitetni študij – B</b>
<b>Obseg in oprema</b>	<b>34 str., 11 pregl., 23 sl., 4 graf., 12 en.</b>
<b>Ključne besede</b>	<b>apnene injekcijske mešanice, kemijski dodatki, superplastifikator, mineralni dodatki, ultralahko polnilo, predhodne preiskave, sposobnost injektiranja</b>

### **Izvleček**

V sklopu diplomskega dela sem ugotavljala vpliv različnih dodatkov na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic za restavriranje arhitekturnih površin objektov kulturne dediščine. Veliki del naloge je bil praktičnega tipa in je potekal v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. V laboratoriju smo oblikovali mešanice na osnovi hidratiziranega apna in kalcitne moke z dodatki superplastifikatorja, amonijevega karbamata, tufa (naravnega pucolana) in ultralahkih polnil. S pomočjo standardiziranih metod smo na svežih vzorcih določali: prostorninsko maso sveže mešanice, pretočnost, izločanje vode in vodozadržnost. Na strjenih vzorcih smo naredili standardizirane preiskave upogibne in tlačne trdnosti ter nestandardizirano preiskavo krčenja. Na podlagi opravljenih predhodnih preiskav smo izbrali najboljše mešanice, za katere smo določali tudi sposobnost injektiranja.

V prvem delu naloge sem predstavila problematiko odstopanja ometov od površine na objektih kulturne dediščine, izvedbo laboratorijskih preiskav in kriterije, ki jih je potrebno izpolniti pri zasnovi injekcijskih mešanic.

Drugi del naloge je namenjen analiziranju rezultatov opravljenih preiskav in primerjavi le teh med seboj.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC</b>	<b>691.53(043.2)</b>
<b>Author</b>	<b>Dora Kovač</b>
<b>Supervisor</b>	<b>Violeta Bokan-Bosiljkov, izr.prof.dr</b>
<b>Cosupervisor</b>	<b>Andreja Padovnik, mag. kons.-rest.</b>
<b>Title</b>	<b>Effect of binding accelerators and lightweight aggregate fillers on the performance characteristics of lime-based injection grouts</b>
<b>Document type</b>	<b>Graduation thesis – University studies – B</b>
<b>Scope and tools</b>	<b>34 p., 11 tab., 23 fig., 4 graph., 12 eq.</b>
<b>Keywords</b>	<b>lime-based injection grouts, chemical admixtures, superplasticizer, mineral additives, lightweight aggregate filler, preliminary tests, injectability test</b>

**Abstract**

The aim of my thesis was to determine the effect of different admixtures on the performance characteristics of lime-based injection grouts for restoration of architectural surfaces. A large part of my thesis was practically orientated and was carried out in the laboratory of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of University of Ljubljana. In the laboratory we developed lime-based injection grouts with additives like superplasticizer, ammonium carbamate, tuff (natural pozzolan) and lightweight aggregate filler. By standardized test methods we first determined properties of grouts in fresh state: wet density, flow value, expansion and bleeding, water retention and water release. On samples in hardened state standardized tests to determine flexural and compressive strength were carried out, along with non-standardized test of shrinkage. Once the results of preliminary tests had been obtained, we choose the best grouts for the test of injectability.

In the first part of my thesis I presented the problems of degradation and delamination of architectural surfaces of cultural heritage buildings, description of laboratory tests and criteria that have to be fulfilled in the process of design of lime-based injection grouts.

The second part is focused on analysis of test results and their comparison.

## **ZAHVALA**

Za strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici izr.prof.dr. Violeti Bokan Bosiljkov in somentorici mag. Andreji Padovnik kons.-rest.

Veliko hvala tudi kolegici Luciji Stermšek, za pomoč pri delu v laboratoriju.

Hvala moji družini in vsem prijateljem, ki so me spodbujali pri študiju. Hvala staršema, ki sta mi omogočila študij in me podpirala ves čas šolanja.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problematika injekcijskih mešanic.....	1
1.2 Namen diplomske naloge.....	3
<b>2 SESTAVA INJEKCIJSKE MEŠANICE.....</b>	<b>5</b>
2.1 Vezivo.....	5
2.2 Polnilo.....	5
2.3 Voda – potreba po vodi.....	5
2.4 Dodatki .....	6
<b>3 PREDHODNE PREISKAVE SVEŽIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC.....</b>	<b>7</b>
3.1 Prostorninska masa .....	7
3.2 Razlez.....	8
3.3 Pretočnost in izločanje vode.....	8
3.4 Vodozadržnost.....	9
<b>4 PREISKAVE NA STRJENIH VZORCIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC.....</b>	<b>11</b>
4.1 Upogibna natezna trdnost in tlačna trdnost .....	11
4.2 Določanje krčenja .....	12
<b>5 PRIPRAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC .....</b>	<b>13</b>
5.1 Sestava injekcijskih mešanic.....	14
5.1.1 Priprava injekcijskih mešanic skupine 1 .....	15
5.1.2 Priprava injekcijskih mešanic skupine 2.....	15
5.1.3 Priprava injekcijskih mešanic skupine 3.....	16
5.1.4 Priprava injekcijskih mešanic skupine 4.....	16
5.1.5 Priprava injekcijskih mešanic skupine 5.....	18
<b>6 ANALIZA REZULTATOV PREISKAV.....</b>	<b>20</b>
6.1 Injekcijske mešanice skupine 1 .....	20
6.2 Injekcijske mešanice skupine 2 .....	20
6.3 Injekcijske mešanice skupine 3 .....	21
6.4 Injekcijske mešanice skupine 4 .....	21
6.5 Injekcijske mešanice skupine 5.....	22
6.6 Primerjava mešanic in analiza rezultatov preiskav .....	24
6.6.1 Nestabilne mešanice .....	24
6.6.2 Pretočnost .....	25
6.6.3 Krčenje .....	25



6.6.4 Izločanje vode in vodozadržnost.....	26
6.7 Rezultati upogibne natezne in tlačne trdnosti .....	28
<b>7 POSTOPEK INJEKTIRANJA.....</b>	<b>29</b>
<b>8 ZAKLJUČEK.....</b>	<b>32</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>33</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Sestava injekcijskih mešanic.....	14
Preglednica 2: Rezultati ponovljenih preiskav sveže mešanice B .....	16
Preglednica 3: Masna razmerja posameznih sestavin mešanic skupine 5 .....	19
Preglednica 4: Rezultati preiskav injekcijskih mešanic skupine 1 .....	20
Preglednica 5: Rezultati preiskav mešanic z dodatkom superplastifikatorja (skupina 2) .....	20
Preglednica 6: Rezultati preiskav mešanic z dodatkom amonijevega karbamata (skupina 3) .....	21
Preglednica 7: Rezultati preiskav mešanic z dodatkom ultralahkega polnila (skupina 4) .....	21
Preglednica 8: Rezultati preiskav mešanic z dodatkom tufa (skupina 5).....	22
Preglednica 9: Rezultati izmerjenih tlačnih trdnosti.....	28
Preglednica 10: Opis pogojev pri injektiranju in izmerjeni časi .....	30
Preglednica 11: Opombe in komentarji pri procesu injektiranja.....	31

## KAZALO SLIK

Slika 1: a) Plasti stenske slike; b) pogosta poškodba, prisotna na stenskih slikah je separacija ometov od nosilca (A) ali odstopanje finega od grobega ometa (B) .....	1
Slika 2: Poškodbe na stenskih slikah v cerkvi sv. Nikolaja na Godešiču (avtor slike: Anita Kavčič Klančar) .....	2
Slika 3: Prikaz inkektiranja pri zapolnjevanju razpok in zračnih žepov z injekcijskimi mešanicami (avtor slike: Anita Kavčič Klančar).....	4
Slika 4: a) Tehtanje posode s sveže pripravljeno mešanico, b) merjenje razleza .....	7
Slika 5: a) Merilni valj za meritev izločanja vode; b) modificiran lijak za določanje pretočnosti injekcijske mešanice.....	9
Slika 6: Postopek merjenja vodozadržnosti: tehtanje mase v kalupu; tehtanje mase s kalupom, gazo in filter papirjem; obtežen kalup z maso.....	10
Slika 7: a) Zasnova preizkusa upogibne natezne trdnosti; b) zasnova preizkusa tlačne trdnosti .....	11
Slika 8: Določanje krčenja po nestandardizirani metodi z uporabo peska .....	12
Slika 9: a) Mešalec in mešalna posoda v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju FGG; b) tehničar in posode za merjenje količine posameznih sestavin pred mešanjem .....	13
Slika 10: Vzorci v cilindričnih kalupih .....	13
Slika 11: Strjena mešanica A v cilindričnem kalupu ter po odstranitvi iz njega .....	15
Slika 12: Mešanice D in M po sušenju v cilindričnih kalupih.....	16
Slika 13: Strjevanje izločenih steklenih kroglic na površini mešanice.....	17
Slika 14: a) Napihnjena sveža mešanica E2 takoj po vlivanju vzorca; b) strjeni vzorci mešanice E2 po sušenju .....	18
Slika 15: Strjena mešanica I1 po odstranitvi iz kalupa .....	18
Slika 16: Meritev izločanja vode sveže mešanice E2.....	22
Slika 17: a) Sveža injekcijska mešanica J v papirnatih modelčkih; b) posušena injekcijska mešanica J po odstranitvi papirnatega modelčka, kjer se je zaradi segregacije ločila plast ultralahkega polnila .....	23
Slika 18: Strjena in segregirana mešanica B po razkalupljanju .....	24
Slika 19: Segregirani vzorci mešanice N po razkalupljanju .....	24
Slika 20: Strjeni vzorci mešanice A1 v plastičnih cilindričnih kalupih.....	26
Slika 21: Vzorci mešanice A1 v pred in po razkalupljanju .....	28
Slika 22: Strjena, razpokana mešanica D v kalupu .....	28
Slika 23: Naprava za injektiranje in testiranje sposobnosti injektiranja.....	29

**KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1: Pretočnost mešanic takoj po zamešanju (prvi stolpec) in po preteku 30 min (drugi stolpec) .....	25
Grafikon 2: Potreba po vodi (levo) in rezultati krčenja mešanic (desno).....	25
Grafikon 3: Izločanje vode v % po 3 urah .....	26
Grafikon 4: Vodozadržnost in relativna izguba vode injekcijskih mešanic .....	27

»Ta stran je namenoma prazna.«

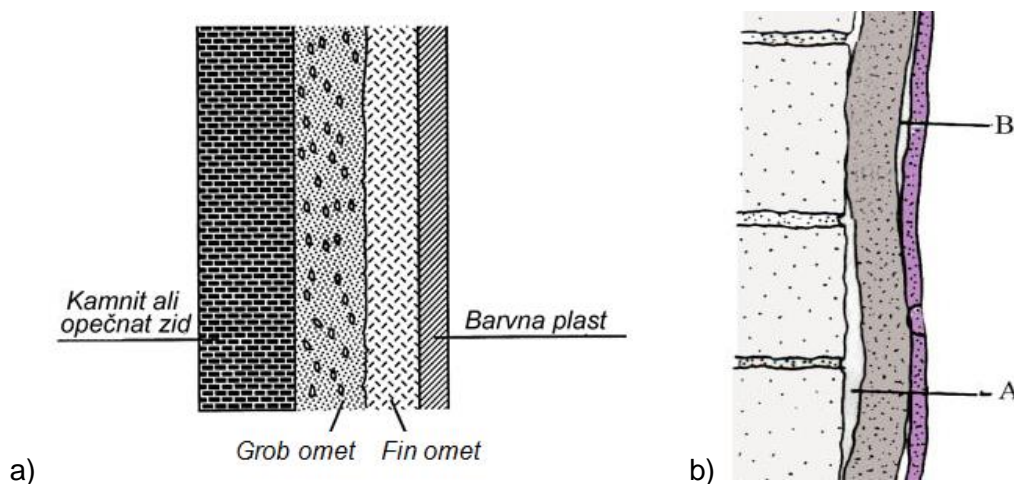
»Ta stran je namenoma prazna.«

## 1 UVOD

### 1.1 Problematika injekcijskih mešanic

Stenske slike in druge dekorativne zidne tehnike so narejene iz različnih slojev mineralnih materialov, ki so zaradi različnih škodljivih vplivov podvrženi medsebojnemu odstopanju. Namen stabilizacije odstopajočih slojev z injekcijskimi masami je preprečiti nadaljnje poškodbe in tako ponovno vzpostaviti strukturno celovitost na ločenih delih stenske slike [1]. Tehnologija izvedbe stenske slike temelji na apnenem vezivu (svežih apnenih ometih) in je praviloma sestavljena iz naslednjih plasti: nosilec (kamnit, opečnat, lesen), grob omet, fin omet in barvna plast.

Čez čas, zaradi različnih škodljivih vplivov, staranja materialov in same nepravilne tehnične izvedbe stenske slike (nepravilna izbira materiala in nepravilna izvedba priprave ter nanosa ometa na steno vpliva na samo kvaliteto in obstojnost), se lahko pojavi razslojevanje oziroma nastajanje zračnih žepov med posameznimi plastmi. Pogost pojav pri stenskih slikah je ločitev ometov od nosilca ali odstopanje grobega in finega ometa.



Slika 1: a) Plasti stenske slike [2]; b) pogosta poškodba, prisotna na stenskih slikah je separacija ometov od nosilca (A) ali odstopanje finega od grobega ometa (B) [3]

Najpogostejši vzroki poškodb na stenskih slikah so škodljivi okoljski vplivi: vlaga, kondenzacija, penetracija vode, zmrzal, nagle spremembe temperature, izločanje soli, razpadanje (degradacija) veziva, staranje in posledično spreminjanje lastnosti vgrajenih materialov ter fizične poškodbe na objektih, kot posledica potresov ali premikov zgradbe. Pogosto so dodatne poškodbe povzročene tudi zaradi napačnega pristopa pri obnovah stavb, uporabe neustreznih materialov ter nepravilnega vzdrževanja historičnih objektov.



Slika 2: Poškodbe na stenskih slikah v cerkvi sv. Nikolaja na Godešiču  
(avtor slike: Anita Kavčič Klančar)

Obstajajo različni sanacijski pristopi za stabilizacijo odstopajočih plasti ometov, kot so: uporaba vijakov ali sider, zamenjava nosilca oziroma rekonstrukcija in uporaba različnih injekcijskih mas. Smernice za obnovo zgodovinskih objektov in samih stenskih slik stremijo k čim manjšemu poseganju v plasti stenske slike in uporabi kompatibilnih materialov. Danes je poudarek predvsem na razvoju ustreznih injekcijskih mas, katere bi zagotavljale varno in učinkovito ter trajno restavriranje arhitekturnih površin.

Številne raziskave so že potrdile, da je uporaba neprimernih materialov pri obnovah zgodovinskih objektov s stenskimi poslikavami, lahko zelo škodljiva za original. Ta problem nastaja še posebej pri uporabi novih, sodobnejših materialov, katerih vplivov še ne poznamo. Napačna izbira materialov za obnovo in zaščito kulturno zgodovinskih objektov lahko uniči ravnovesje med izvornimi materiali in povzroča nadaljnje poškodbe. Zato je treba razviti predvsem mešanice, ki ne škodujejo objektu in ustrezajo določenim zahtevam glede kakovosti. Področje injekcijskih mešanic za restavriranje odstopajočih plasti ometov stenskih slik je danes aktualno tudi zato, ker še ni dovolj raziskano.

Ker je eden od temeljnih principov konservatorske teorije ohranjanje avtentičnega gradiva, se bi moralo pri obnovi kulturno zgodovinskih objektov uporabljati injekcijske mešanice na osnovi apnenega veziva. Stoletja se je apno uporabljalo pri gradnji objektov ter tudi kot osnova za omete, ki so služili kot podlage stenskih slik. Zato so v večini primerov apnene injekcijske mešanice najbolj kompatibilne z originalnimi materiali v zidu. Slaba stran zapolnjevanja zračnih žepov z apnenimi injekcijskimi mešanicami je otežen proces karbonatizacije, zaradi omejenega dostopa ogljikovega dioksida ( $\text{CO}_2$ ) iz zraka, ki je nujno potreben za strjevanje in vezanje apnene mase [4].

Obnova stavbne dediščine je zelo zahteven in kompleksen proces. Pogost pojav je nesodelovanje in pomanjkljivo znanje različnih strok, kar privede do nestrokovne obnove zgodovinskih objektov. Določene posege izvajajo zidarji ali gradbeniki, ki imajo sicer izkušnje z določenimi gradbenimi materiali (predvsem modernimi), nimajo pa dovolj znanj s področja konservatorstva in historičnih materialov.



Injekcijske mase, ki se danes uporabljajo za zapolnjevanje zračnih žepov na stenskih poslikavah, večinoma niso primerne, saj vsebujejo veliko količino vode v vezivu (posledično je tudi veliko izločanje vode in krčenje materiala), imajo preveliko prostorninsko težo, s katero se vnaša dodatna obremenitev na oslavljen arhitekturni element, ter niso kompatibilne s prvotnimi materiali.

Na podlagi omenjenih slabosti smo postavili kriterije, katere naj bi dosegla naša injekcijska masa. Injekcijska masa mora imeti ustrezno pretočnost, majhno lastno težo, minimalno izločanje vode, minimalno spremembo prostornine (oz. minimalno krčenje), majhno vsebnost vodotopnih soli, dobro adhezijo, primeren čas strjevanja, dobro stabilnost in obstojnost ter mehanske lastnosti čim bolj podobne originalnemu materialu [1].

## 1.2 Namen diplomske naloge

Glavni namen moje diplomske naloge je bilo ugotavljanje vpliva kemikalij, ki v stiku z vodo tvorijo ogljikov dioksid ter lahkih polnil na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic, namenjenih za nekonstrukcijsko zapolnjevanje zračnih žepov v večslojnih ometih. Večji del diplomske naloge je bil eksperimentalne narave in je potekal v obliki različnih preiskav svežih in strjenih injekcijskih mešanic. Namen opravljenih preiskav je bil postaviti osnovo za nadaljnje raziskave apnenih injekcijskih mešanic z ustreznimi lastnostmi, ki bi lahko bile uporabne v praksi pri obnovi objektov kulturne dediščine.

Z analizo rezultatov, pridobljenih z izvajanjem standardiziranih in nestandardiziranih preiskav, smo proučili vpliv različnih dodatkov na lastnosti pripravljenih injekcijskih mešanic. Osnovni mešanici sestavljeni iz hidratiziranega apna, apnenčeve moke in vode smo dodajali različne dodatke, kot so: superplastifikatorji za zmanjšanje potrebe po vodi; amonijev karbamat, ki proizvaja CO<sub>2</sub> z reakcijo z vodo; pucolanski dodatek tuf in ultralahko polnilo za zmanjšanje teže injekcijske mešanice.

Na sveže pripravljenih vzorcih smo na podlagi standardiziranih preiskav merili: prostorninsko maso sveže mešanice [5], razlez [6], pretočnost in izločanje vode [7] ter vodozadržnost [8]. Za zapolnjevanje zračnih žepov mora injekcijska masa imeti ustrezno pretočnost, vodozadržnost ter majhen odstotek izločanja vode. Prav tako se mora masa v nekem ustreznem času strditi brez velike spremembe prostornine oziroma velikega krčenja. Ker za določene preiskave injekcijskih mešanic, uporabljenih za zapolnjevanje zračnih žepov nastalih na objektih kulturne dediščine ni podanih oziroma primanjkuje standardnih kriterijev, smo se pri ocenjevanju rezultatov naslonili na izkušnje somentorice Andreje Padovnik, ki je diplomirala in magistrirala na Oddelku za restavracijsko in likovno umetnost in oblikovanje ter restavriral večje število stenskih slik na različnih objektih kulturne dediščine v Sloveniji.

Sveže mešanice smo vgradili tudi v plastične cilindrične kalupe premera 50 mm in višine 30 mm, ter v kalupe v obliki prizem dimenzij 40x40x160 mm. Vzorce, vgrajene v cilindrične kalupe smo uporabili za merjenje časa sušenja, pojava razpok ter za izvedbo nestandardizirane meritve krčenja injekcijske mase. Strjene vzorce v obliki prizem smo uporabili za standardizirane preiskave upogibne in tlačne trdnosti [9].

Mešanice, ki smo jih na podlagi navedenih preiskav ocenili kot ustrezne, smo testirali tudi na sposobnost injektiranja skozi različne materiale, kot je pesek različnih granulacij ter drobljena apnena malta.

Naš cilj je bil oblikovati injekcijske mešanice na bazi apnenega veziva z različnimi dodatki, ki bi bile primerne za zapolnjevanje odstopljenih plasti ometov na objektih kulturne dediščine in modificirati standardne preiskave ter tako pridobiti različne rezultate, ki bi služili za nadaljnje analize in primerjave z drugimi eksperimentalnimi rezultati.



Slika 3: Prikaz injektiranja pri zapolnjevanju razpok in zračnih žepov z injekcijskimi mešanicami  
(avtor slike: Anita Kavčič Klančar)

## **2 SESTAVA INJEKCIJSKE MEŠANICE**

### **2.1 Vezivo**

Mineralna veziva so najpogosteje praškasti materiali, ki pomešani z vodo povezujejo posamezne komponente mešanice v kompaktno maso. Ta zaradi fizikalno-kemijskih procesov po določenem času preide v strjeno stanje.

Kot glavno vezivo smo pri svojih mešanicah uporabili hidratizirano apno. Hidratizirano apno je gašeno apno, ki ga dobimo z gašenjem živega apna oz. dodajanjem vode živemu apnu. To je nehidravlično oz. zračno vezivo, kar pomeni, da ne more vezati v vodi. Za vezanje in strjevanje nujno potrebuje CO<sub>2</sub> iz zraka. Zaradi tega lahko pride do težav pri strjevanju v zračnih žepih in razpokah oz. prostorih, kjer je onemogočen ali otežen dostop zraka [10]. Hidratizirano apno v praškastem stanju je treba uporabiti čim bolj sveže, ker s časom lahko karbonatizira (veže z ogljikovim dioksidom) ter se mu zmanjša sposobnost vezanja.

V mešanicah, kjer smo uporabili tuf, smo ga upoštevali kot vezivo. Tuf je sedimentna kamnina, ki nastane iz vulkanskega pepela ter sodi med naravne pucolane. Dodajamo ga apnenim mešanicam zaradi hitrejšega vezanja in doseganja višjih trdnosti. V splošnem fino mleti pucolani, kot sta tuf in vulkanski pepel, zmanjšujejo pretočnost mešanice, saj potrebujejo večjo količino vode za doseganje želene konsistence [11].

### **2.2 Polnilo**

Kot osnovno polnilo smo uporabili fino mleto apnenčevo moko s premerom zrn 0,2-0,5 mm. Fino mleto polnilo v splošnem zmanjšujejo pretočnost mešanice in izločanje vode ter delujejo pozitivno na zmanjševanje segregacije. Apnenčeva moka, ki smo jo uporabili pri naših preiskavah, je material pridobljen z mletjem apnenca in se dodaja injekcijskim mešanicam z namenom izboljšanja fizikalnih lastnosti [12].

Za zmanjšanje prostorninske mase injekcijske mešanice smo pri nekaterih sestavah kot nadomestek apnenčeve moke uporabili ultralahke steklene kroglice. Steklene kroglice smo dodajali v različnih masnih razmerjih in opazovali, kako njihova vsebnost vpliva na kakovost mešanice. Uporabljene steklene kroglice so imele granulacijo 65 µm.

Za injekcijske mase je zelo pomembna tudi velikost zrn uporabljenih materialov, saj mora biti za uspešno zapolnitev majhnih razpok premer največjega zrna v mešanici manjši od razpoke, ki jo zapolnjujemo.

### **2.3 Voda – potreba po vodi**

Za pripravo mešanic smo uporabljali pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja, ki je povsem ustrezna za pripravo mešanic z vezivi. Količino vode smo dodajali po občutku, med procesom mešanja. Ustrezna količina dodane vode je izredno pomembna za doseganje zahtevanih lastnosti. Prevelika količina vode lahko povzroči neželene učinke, kot so: povečano izločanje vode, povečana segregacija delcev ter prevelik odstotek krčenja zaradi izhlapevanja. Po drugi strani pa moramo mešanici dodati dovolj vode, da bi dosegli ustrezno pretočnost in sposobnost injektiranja.

V nadaljevanju izraz, potreba po vodi ( $v/m$ ), pomeni delež dodane vode, ki jo mešanica potrebuje za doseganje primernih lastnosti. To je razmerje med maso dodane vode in maso ostalih sestavin oz. maso suhe snovi mešanice.

Delež vode pa je razmerje med maso dodane vode in maso celotne mešanice, skupaj z vodo [4].

## **2.4 Dodatki**

Za doseganje potrebnih lastnosti injekcijske mešanice in izboljšanje kakovosti, dodajamo različne dodatke. Ti služijo predvsem za izboljšanje obdelovalnih lastnosti, pretočnosti, zmanjševanje krčenja, preprečevanje segregacije ter tudi za doseganje zahtevanih mehanskih karakteristik.

Pri naših preiskavah smo uporabili superplastifikator na osnovi polikarboksilatnih polimerov (PCE) in amonijev karbamat. Dodajali smo jih osnovni mešanici v različnih odstotkih ter opazovali, kako vplivajo na njene lastnosti.

Superplastifikator je kemijski dodatek, ki služi za izboljšanje lastnosti sveže oz. strjene mešanice. Z njegovim dodajanjem želimo zmanjšati potrebo po vodi oz. zmanjšati vodovezivno razmerje, ne da bi pri tem zmanjšali pretočnost. Pretočnost se ne zmanjša, ker superplastifikatorji vplivajo na disperzijo trdnih delcev [4]. Manjši delež vode v mešanici deluje ugodno, saj zmanjšuje poroznost ter krčenje, kar posledično zmanjšuje tudi nevarnost nastajanja razpok.

Amonijev karbamat je dodatek, s pomočjo katerega želimo pospešiti proces vezanja oziroma sušenja apnenih injekcijskih mešanic. Obstaja v obliki belih kristalov različnih velikosti. Ko pride v stik z vodo, se sproži kemijska reakcija, katere produkt je tudi  $\text{CO}_2$ , ki ga rabi apno za vezanje.

### 3 PREDHODNE PREISKAVE SVEŽIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Glavni namen predhodnih preiskav je spoznavanje lastnosti materiala, katerega želimo uporabljati pri praktičnem delu. Pred samo izvedbo preiskav smo najprej določili sestavo in prostorninsko razmerje posameznih sestavin v injekcijskih mešanicah. Nato smo izračunali mase posameznih sestavin oziroma, pripravili recepturo. Preiskave smo izvajali v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo in uporabljali opremo, ki nam je bila na razpolago.

Zaradi varnega in zdravega dela z nevarnimi kemičnimi snovmi (amonijev karbamat in ultralahko polnilo), je bila pri delu obvezna uporaba zaščitne delovne opreme (zaščitne rokavice in maske - respirator za zaščito dihal pri delu).

Ker za injekcijske mešanice za sanacijo historičnih objektov s stenski poslikavami ni točno predpisanih standardiziranih preiskav, smo preizkuse predhodno modificirali z namenom, da bodo primernejši za naše potrebe.

#### 3.1 Prostorninska masa

Za določanje prostorninske mase sveže mešanice smo uporabljali kovinsko cilindrično posodo z notranjim premerom  $d=125$  mm s prostornino 1l, po standardu SIST EN 1015-6:1999 [5]. Po tehtanju smo prostorninsko maso sveže mešanice določali po enačbi:

$$\rho_m = (m_2 - m_1)/V_v \quad (1)$$

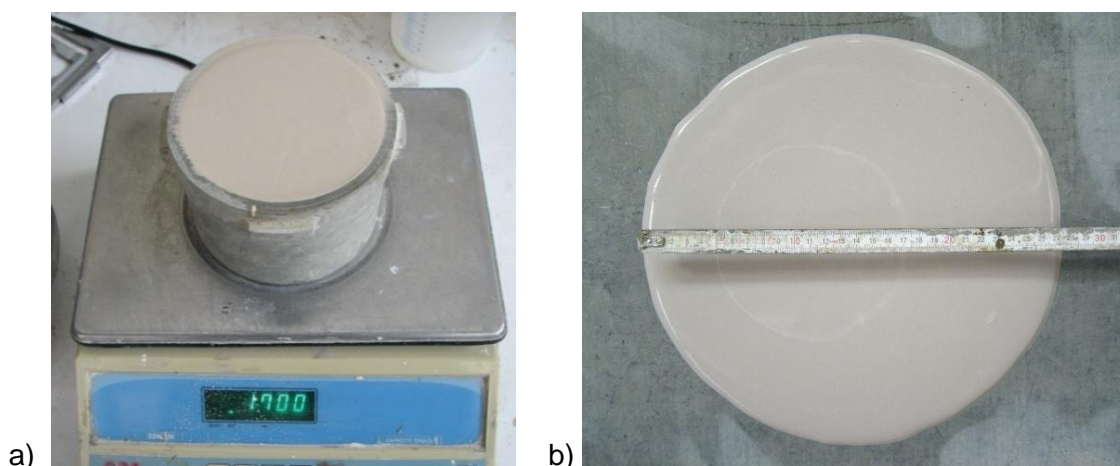
kjer je:

$\rho_m$  – prostorninska masa sveže mešanice [ $\text{kg/m}^3$ ]

$m_1$  – masa prazne posode [g]

$m_2$  – masa posode skupaj z mešanico [g]

$V_v$  – prostornina (volumen) posode [l]



Slika 4: a) Tehtanje posode s sveže pripravljeno mešanico, b) merjenje razleza

### 3.2 Razlez

Meritev razleza nam omogoča določitev konsistence sveže mešanice. Izvedli smo jo po standardu SIST EN 1015-3:1999 [6]. Ker so bile naše mešanice izredno tekoče, smo uporabili razlezno ploščo dimenzij 700x700 mm. Pred vsako preiskavo smo razlezno ploščo obrisali in navlažili. Konusni kalup standardnih dimenzij smo postavili na sredino razlezne plošče in vanj vlili injekcijsko mešanico. Takoj po vlivanju se kalup v eni potezi hitro odstrani. Razlez mešanice smo s pomočjo merilnega traku izmerili v dveh pravokotnih smereh ter kot končen rezultat podali povprečje obeh meritev v mm (slika 4b).

### 3.3 Pretočnost in izločanje vode

Pretočnost in izločanje vode injekcijskih mešanic smo določili na podlagi modificiranega standarda SIST EN 445:2008 [7]. Ustrezna pretočnost je zelo pomembna lastnost za uspešno zapolnjevanje zračnih žepov v večslojnih ometih. Ta nam omogoča doseganje kakovostne zapolnitve razpok in zračnih žepov tudi pri nižjih delovnih pritiskih.

Standard SIST EN 445:2008 [7] predvideva za merjenje pretočnosti lijak prostornine  $1,7 \text{ l} \pm 10\%$  in velikosti spodnje odprtine 1 cm ter se uporablja za injekcijske mešanice za konstrukcijsko injektiranje. Ker pa se za injiciranje injekcijske mase v zračne žepe odstopljenih plasti ometov stenskih poslikav uporabljajo bistveno manjše količine materiala, kot za konstrukcijsko injektiranje (injektira se s pomočjo brizgalk, ki se uporabljajo v zdravstvu, in to praviloma s prostornino 20-60 ml), je bilo potrebno zmanjšati prostornino in premer spodnje odprtine lijaka za merjenje pretočnosti. Uporabili smo lijak s prostornino 0,25 l in spodnjo odprtino premera 0,5 cm. Pri preiskavi smo merili čas, ki je potreben, da 0,25 l injekcijske mešanice steče skozi odprtino na spodnjem delu lijaka. Pred vsako meritvijo smo navlažili ostenje lijaka in nato mešanico vlijali v lijak skozi sito z velikostjo okenca 1,5 mm. Pretočnost smo določali takoj po zaključenem mešanju in po poteku 30 min od začetka mešanja. Odstopanje med obema meritvama ne sme biti večje od 10% ( $\Delta t \leq 10\%$ ). Kot kriterij ustrezne pretočnosti mešanice smo upoštevali čas pretočnosti  $\leq 60 \text{ s}$ .

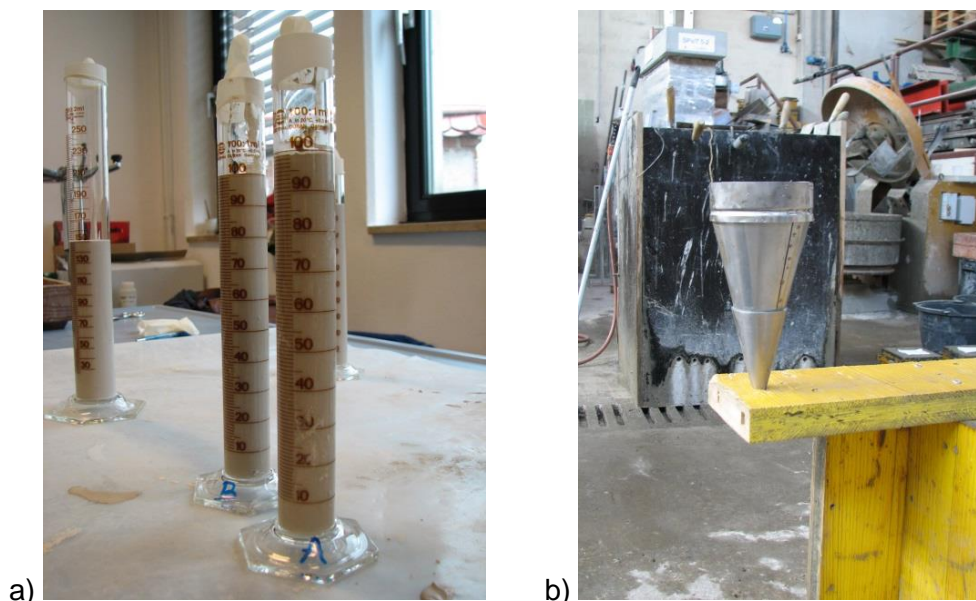
Prav tako smo za meritev izločanja vode po standardu ASTM C 940 [13] reducirali prostornino injekcijske mase z  $800 \pm 10 \text{ ml}$  na  $90 \pm 10 \text{ ml}$  [14]. Uporabili smo prozoren merilen valj prostornine 100 ml s premerom 25 mm in višino 250 mm ter merilno skalo v ml. Valj smo postavili na stabilno ravno površino, na kateri ni bilo nevarnosti vibracij. Vanj smo vlili 95-100 ml mešanice ter vzorec ustrezno zaščitili pred izhlapevanjem. Izločanje vode smo merili v naslednjih časovnih intervalih: 15, 30, 45, 60, 120 in 180 minut. Končni odčitek izločene vode, po preteku 3 ur, smo uporabili za izračun izločanja vode po enačbi (2). Kot kriterij za ustrezno izločanje vode smo upoštevali vrednost  $\leq 2\%$ .

$$\text{Izločanje vode [\%]} = \frac{v_1}{v} \cdot 100\% \quad (2)$$

kjer je:

$v$  – količina mešanice [ml]

$v_1$  – količina vode nad mešanico po preteku 3 ur [ml]



Slika 5: a) Merilni valj za meritev izločanja vode; b) modificiran lijak za določanje pretočnosti injekcijske mešanice

### 3.4 Vodozadržnost

Vodozadržnost svežih injekcijskih mešanic smo določali v skladu s standardom PSIST prEN 1015-8:2001 [8]. Za izvedbo preiskave smo uporabili naslednjo opremo: poseben kalup standardnih dimenzij, gazo, filtrski papir, utež in tehtnico. Najprej smo stehali posebej kalup in filtrski papir v suhem stanju. Nato smo kalup zapolnili s sveže pripravljeno mešanico ter ponovno stehali. Kalup z mešanico smo pokrili z gazo in filtrskim papirjem, obrnili in obtežili z utežjo ter pustili, da stoji obteženo 5 min  $\pm$  10 s. Po preteku 5 min smo kalup ponovno obrnili in ponovno stehali filtrski papir v mokrem stanju.

V standardu je še navedeno, da je preiskavo potrebno ponoviti z večjim številom filtrov, če masa vode, ki jo vsrka filtrski papir, preseže 10 g.

Izračun končne vodozadržnosti smo naredili s pomočjo naslednjih enačb:

$$\text{masa mešanice:} \quad m_5 = m_3 - m_1 \quad (3)$$

$$\text{masa absorbirane vode:} \quad W_3 = m_4 - m_2 \quad (4)$$

$$\text{vsebnost vode v mešanici:} \quad W_2 = m_5 \cdot W_1 \quad (5)$$

$$\text{relativna izguba vode:} \quad W_4 = \frac{W_3}{W_2} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$\text{vodozadržnost:} \quad WRV = 100 - W_4 \quad [\%] \quad (7)$$

kjer je:

$m_1$  – masa suhega kalupa [g]

$m_2$  – masa suhega filtrskega papirja [g]

$m_3$  – masa kalupa z mešanico [g]

$m_4$  – masa z vodo prepojenega filtrskega papirja [g]

$m_5$  – masa mešanice brez kalupa [g]

$W_1$  – delež vode v injekcijski mešanici (razmerje V/m)



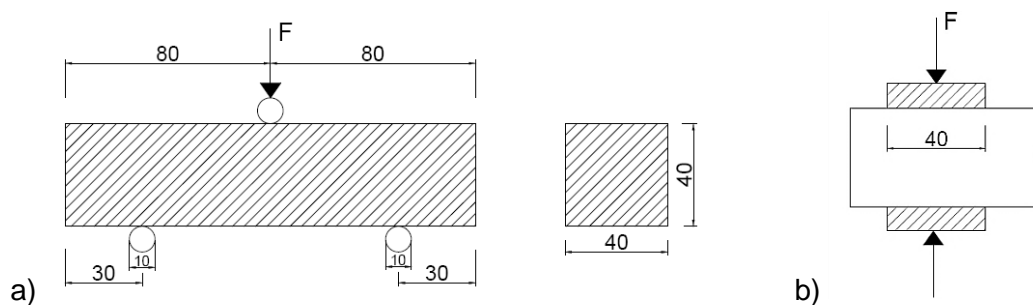
Slika 6: Postopek merjenja vodozadržnosti: tehtanje mase v kalupu; tehtanje mase s kalupom, gazo in filter papirjem; obtežen kalup z maso



## 4 PREISKAVE NA STRJENIH VZORCIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC

### 4.1 Upogibna natezna trdnost in tlačna trdnost

Upogibno natezno trdnost strjenih mešanic smo določali na prizmah dimenzij 40x40x160 mm s tritočkovnim upogibnim preizkusom. Merili smo maksimalno upogibno silo  $F$ , pri kateri se preizkušanelec poruši. Ustrezna vrednost upogibne natezne trdnosti strjene injekcijske mešanice zagotavlja kakovostno povezanost posameznih slojev zidu. V splošnem morajo biti mehanske lastnosti mešanice podobne mehanskim lastnostim obstoječih gradnikov zidu, v katerega injektiramo.



Slika 7: a) Zasnova preizkusa upogibne natezne trdnosti; b) zasnova preizkusa tlačne trdnosti

Za izračun upogibne natezne trdnosti smo uporabili naslednjo enačbo:

$$f_t = \frac{1,5 \cdot F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (8)$$

kjer je:

$f_t$  – upogibna natezna trdnost preizkušanca [MPa]

$F$  – maksimalna dosežena sila [kN]

$l$  – razmik med podporama [cm]

$b$  – širina preizkušanca [cm]

$d$  – višina preizkušanca [cm]

Tlačno trdnost strjenih mešanic smo z enoosnim tlačnim preizkusom določali na preostalih polovicah prizem. Preizkušance smo obremenjevali preko jeklenih ploščic dimenzij 40x40x12 mm, kot je prikazano na sliki 7b). Tlačno trdnost vzorcev smo računali s pomočjo enačbe (9).

$$f_c = \frac{F}{a^2} \quad (9)$$

kjer je:

$f_c$  – tlačna trdnost preizkušanca [MPa]

$F$  – maksimalna tlačna sila [kN]

$a$  – širina preizkušanca [cm]

Obe preiskavi trdnosti smo izvedli v skladu s standardom SIST EN 1015-11:2001 [9].

## 4.2 Določanje krčenja

Krčenje posameznih injekcijskih mešanic smo določali na strjenih vzorcih v plastičnih cilindričnih kalupih premera 50 mm in višine 30 mm. Za določanje odstotka krčenja smo uporabljali nestandardizirano metodo z uporabo peska. Preiskava je potekala tako, da smo najprej stehali vzorec s kalupom. Nato smo prazen prostor med strjenim vzorcem in robovi kalupa napolnili s peskom znane prostorninske mase v nasutem stanju  $\rho_{\text{peska}} = 1,4 \text{ g/cm}^3$  in ponovno stehali. Maso peska, s katerim smo zapolnili kalup, smo izračunali po naslednji enačbi:

$$m = m_2 - m_1 \quad (10)$$

kjer je:

$m_1$  - masa vzorca v posodi brez dodanega peska [g]

$m_2$  - masa vzorca v posodi skupaj z dodanim peskom [g]

$m$  - masa dodanega peska [g]

Na podlagi mase dodanega peska smo izračunali njegov volumen:

$$V_{\text{peska}} = \frac{m}{\rho_{\text{peska}}} \quad (11)$$

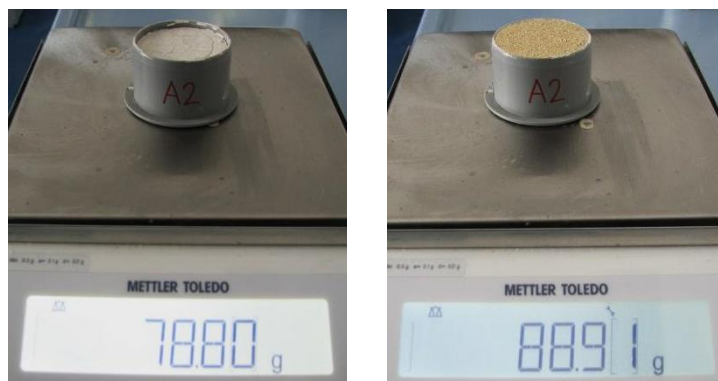
Za vsako mešanico smo račun krčenja naredili za tri vzorce. Končni volumen dodanega peska je povprečna vrednost treh meritev. Odstotek krčenja vzorca smo pa izračunali po enačbi:

$$\text{Krčenje [\%]} = \frac{V_{\text{peska}}}{V_{\text{posode}}} \cdot 100\% \quad (12)$$

kjer je:

$V_{\text{peska}}$  – povprečna vrednost volumna dodanega peska izračunana za tri vzorce vsake mešanice

$V_{\text{posode}}$  – volumen cilindrične posode, v kateri so bili strjeni vzorci

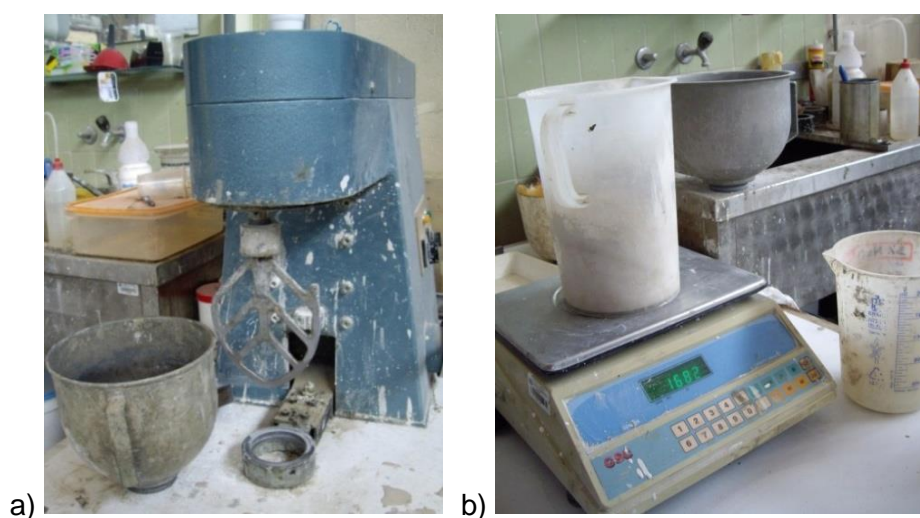


Slika 8: Določanje krčenja po nestandardizirani metodi z uporabo peska

Pomembno je poudariti, da smo z metodo peska poleg prostora nad skrčenim vzorcem zapolnjevali tudi morebitne razpoke, ki so se pojavile po sušenju. Zato taka nestandardizirana metoda ni povsem natančna in jo uporabljamo samo za približno oceno.

## 5 PRIPRAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Čas mešanja je pri injekcijskih mešanicah prav tako en od faktorjev, ki vplivajo na konsistenco in kakovost mešanice. Zato smo pazili, da vsako mešanico mešamo enako dolgo. Vse mešanice smo pripravljali s pomočjo mešalca RILEM-CEN, ki se istočasno obrača okoli svoje vzdolžne osi in tudi planetarno okoli pogonske osi ter omogoča dve hitrosti mešanja. Med časom mešanja smo enkrat ali po potrebi tudi večkrat preverjali, ali se sestavine dobro povezujejo, ker smo pri nekaterih mešanicah zasledili strjene delce apnenčeve moke in apna na dnu posode. Zaradi tega so se tudi pojavljale grudice, kar je pri injekcijskih mešanicah zelo nezaželen pojav. Do tega je prišlo tudi zaradi opreme, ki ni povsem ustrezna za mešanje injekcijskih mešanic. Mešalec, ki smo ga uporabljali, ima premajhno hitrost in neustrezno obliko mešalca (lopaticice), zato ne premeša mešanice na ustrezen način.



Slika 9: a) Mešalec in mešalna posoda v Konstruktivno-prometnem laboratoriju FGG;  
b) tehtnica in posode za merjenje količine posameznih sestavin pred mešanjem

Po končanem mešanju smo sveže mešanice vlivali v plastične cilindrične kalupe, kot je prikazano na sliki 10. Od vsake mešanice smo vlili maso v 3 plastične kalupe in po strjevanju te vzorce koristili za določitev krčenja mešanice. Vzoredno smo opazovali tudi potek sušenja in pojavu razpok med sušenjem.



Slika 10: Vzorci v cilindričnih kalupih

## 5.1 Sestava injekcijskih mešanic

Preglednica 1: Sestava injekcijskih mešanic

<b>Skupina 1: Osnovna mešanica</b>						
Oznaka mešanice	Masa veziva apno [g]	Masa polnila apnenčeva moka [g]	Masa dodane vode [g]			
<b>A</b>	520	2080	1196			
<b>A1</b>	520	2080	1346			
<b>Skupina 2: Mešanice z dodatkom superplastifikatorja</b>						
Oznaka mešanice	Masa veziva apno [g]	Masa polnila apnenčeva moka [g]	Masa dodatka superplastifikator [g]	Masa dodane vode [g]		
<b>B</b>	520	2080	26	736		
<b>B1</b>	520	2080	26	930		
<b>C</b>	520	2080	13	970		
<b>C1</b>	520	2080	13	854		
<b>C2</b>	520	2080	13	1088		
<b>Skupina 3: Mešanice z dodatkom amonijevega karbamata</b>						
Oznaka mešanice	Masa veziva apno [g]	Masa polnila apnenčeva moka [g]	Masa dodatka amonijev karbamat [g]	Masa dodane vode [g]		
<b>D</b>	520	2080	37,29	1346		
<b>M</b>	520	2080	186,79	1470		
<b>Skupina 4: Mešanice z dodatkom lahkega polnila</b>						
Oznaka mešanice	Masa veziva apno [g]	Masa polnila		Masa dodatka superplastifikator [g]	Masa dodane vode [g]	
		apnenčeva moka [g]	steklene kroglice [g]			
<b>E</b>	520	1414	31,2	26	640	
<b>E1</b>	520	1383	31,72	26	910	
<b>E2</b>	520	1414	31,2	26	972	
<b>N</b>	520	1664	18,96	26	678	
<b>I</b>	520	0	96,24	26	578	
<b>I1</b>	520	0	94,27	26	704	
<b>Skupina 5: Mešanice z dodatkom tufa</b>						
Oznaka mešanice	Masa veziva		Masa polnila		Masa dodatka superplastifikator [g]	Masa dodane vode [g]
	apno [g]	tuf [g]	apnenčeva moka [g]	steklene kroglice [g]		
<b>G1</b>	364	164	2080	0	26	908
<b>K</b>	442	82	2080	0	26	744
<b>J</b>	364	164	1304	36,24	26	684
	364	164	1302	36,21	26	684

### 5.1.1 Priprava injekcijskih mešanic skupine 1

Osnovna mešanica, označena z A je sestavljena iz hidratiziranega apna, apnenčeve moke in vode. Delež posameznih sestavin smo izračunali na podlagi volumskega razmerja med vezivom in polnilom 1:4, vodo smo dodajali po potrebi.

Na podlagi rezultatov testa pretočnosti se je izkazalo, da je mešanica A pregosta. Zato smo mešanici A z isto vsebnostjo suhih snovi dodali več vode. Mešanica A1 se je pri preizkusu pretočnosti izkazala kot ustrezna in nam je služila za nadaljnje preiskave.

V nadaljevanju so različne mešanice označene z različnimi črkami (A, B, C...). Če pa oznaka mešanice vsebuje tudi številko (npr. A1) pomeni, da smo tej mešanici (A) dodali več vode, z namenom doseganja ustrezne pretočnosti in konsistence.



Slika 11: Strjena mešanica A v cilindričnem kalupu ter po odstranitvi iz njega

### 5.1.2 Priprava injekcijskih mešanic skupine 2

Mešanice iz skupine 2 so sestavljene iz hidratiziranega apna, apnenčeve moke, vode in superplastifikatorja PCE. Za osnovo smo vzeli mešanico A1 in ji dodajali različen odstotek superplastifikatorja (mešanice B, B1, C, C1, C2) in posledično zmanjševali količino vode. Glavni cilj je bil znižanje deleža vode pri ohranjanju ustreznega časa pretočnosti.

Pri mešanici B in B1 smo uporabili 1% superplastifikatorja PCE, za mešanice C, C1 in C2 smo pa uporabili 0,5% superplastifikatorja. Procent superplastifikatorja smo izračunali glede na maso suhe snovi (veziva in polnila) ne glede na to, da se le ta običajno dodaja glede na maso veziva. Kot pričakovano, je bila potreba po vodi za mešanico B dosti manjša kot za A1.

Pri ponavljanju preiskav za mešanico B smo ugotovili, da pride do zelo velikih odstopanj med rezultati, posebej pri meritvah pretočnosti. Rezultati ponovljenih preiskav so podani v preglednici 2. Ta odstopanja kažejo na nestabilnost mešanice, kar je zelo neugodno predvsem za delo v praksi. Da bi dosegli boljšo pretočnost, smo naredili mešanico B1, kateri smo dodali več vode.

Pri mešanici C2, z dodatkom 0,5% superplastifikatorja PCE, nismo imeli težav z odstopanjem med rezultati. Iz tega smo zaključili, da preveliki odstotek superplastifikatorja v mešanici negativno vpliva na njeno stabilnost.

Preglednica 2: Rezultati ponovljenih preiskav sveže mešanice B

Oznaka mešanice	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s] takoj
B	1872	125
	1874	130
	1892	222
	1902	94

### 5.1.3 Priprava injekcijskih mešanic skupine 3

Za pripravo mešanic iz skupine 3 smo prav tako izhajali iz sestave A1. Pripravili smo dve različni mešanici z dodatkom amonijevega karbamata: mešanico D z dodatkom 1% amonijevega karbamata ter mešanico M z vsebnostjo 5% amonijevega karbamata. Delež smo izračunali glede na celotno maso mešanice.

Amonijev karbamat smo najprej raztopili v vodi in nato zamešali z ostalimi sestavinami. Pri mešanju mešanice M smo dodali večjo količino vode, ker se nam je med mešanjem zdelo preveč gosta. Po končanem mešanju smo ugotovili, da dodajanje vode ni bilo potrebno, ker je bila mešanica dovolj tekoča.



Slika 12: Mešanice D in M po sušenju v cilindričnih kalupih

### 5.1.4 Priprava injekcijskih mešanic skupine 4

Pri mešanicah z dodatkom lahkega polnila smo se odločili izhajati iz mešanice B1, ki je vsebovala 1% superplastifikatorja. Kot lahkega polnila smo uporabili steklene kroglice. Z dodatkom ultralahkega polnila zmanjšamo prostorninsko težo mešanic, saj vsaki poseg v steno z injektiranjem nove mase predstavlja vnašanje dodatne obremenitve, ter povečuje nevarnost nastanka dodatnih poškodb.

Glede na volumsko razmerje moka:kroglice smo oblikovali dve skupini:

- v razmerju 1:1 (mase E, E1 in E2)
- v razmerju 2:1 (masa N)

Pri mešanici I smo apnenčevo moko v celoti nadomestili z ultralahkim polnilom.

Pri pripravi smo najprej steklene kroglice zmešali z vodo in superplastifikatorjem – naredili smo disperzijo steklenih kroglic. To smo naredili predvsem zaradi preprečevanja prevelikega lebdenja ultralahkega polnila v zraku med samim mešanjem.

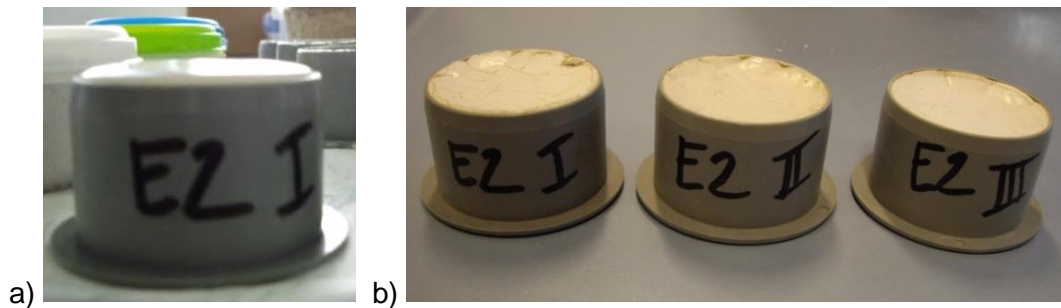
Pri izvedbi preiskav smo ugotovili, da že minimalna sprememba mase kroglic v mešanici zelo vpliva na njene lastnosti. Zato smo pri mešanici E imeli dodatne težave z natančnim tehtanjem kroglic. Rezultatov preiskav mešanic E, E1 in E2 ne moremo med seboj primerjati.

Mešanica E2 se je izkazala kot izredno problematična za uporabo, predvsem zaradi ekstremne segregacije delcev. Takoj po končanem mešanju je bilo vidno izločanje vode na površini mešanice, nato pa je sledilo izločanje ultralahkih kroglic na površino. Izločene kroglice so v zelo kratkem času naredile skorjo na površini mešanice, kot je prikazano na sliki 13. Na dnu mešanice smo pa opazili izločeno apnenčevo moko z apnom. Zaradi navedenih težav smo zaključili, da je mešanica nestabilna ter posledično neuporabna za delo na terenu.



Slika 13: Strjevanje izločenih steklenih kroglic na površini mešanice

Pri vlivanju sveže mešanice E2 v kalupe smo opazili, da se mešanica rahlo napihuje, kot je prikazano na sliki 14 a). Ta lastnost je tudi posledica izločanja ultralahkih kroglic na površino. Po sušenju pa se je masa posedla.



Slika 14: a) Napihnjena sveža mešanica E2 takoj po vlivanju vzorca; b) strjeni vzorci mešanice E2 po sušenju

Pri mešanici I1 smo imeli podobne težave. Pri meritvi pretočnosti se je masa med iztekanjem ustavila v lijaku, kot posledica izločanja kroglic na površino in ustvarjanja skorje na površini. Na strjenem vzorcu se je po odstranitvi iz cilindričnega kalupa videl sloj izločenih ultralahkih kroglic v obliki plasti na površini mešanice, kot je prikazano na sliki 15.



Slika 15: Strjena mešanica I1 po odstranitvi iz kalupa

### 5.1.5 Priprava injekcijskih mešanic skupine 5

Z dodatkom tufa smo naredili tri različne mešanice. Ponovno smo izhajali iz mešanice B1, z dodatkom 1% superplastifikatorja. Tuf smo dodajali glede na delež apna, ker smo ga vzeli kot vezivo. Pred samim mešanjem smo tuf najprej namočili in pustili nekaj minut, da vpije vodo, zato, da se je mešanica lažje mešala in bolj povezala.

Delež posameznih sestavin smo računali glede na naslednja volumska razmerja:

- za mešanico G1 smo določili 70% apna in 30% tufa za vezivo,
- za mešanico K smo za vezivo upoštevali 85% apna in 15% tufa,
- za mešanico J pa smo določili 70% apna, 30% tufa ter približno 60% moke in 40% steklenih kroglic (za polnilo).

Masna razmerja posameznih sestavin mešanic so podana v preglednici 3.



Preglednica 3: Masna razmerja posameznih sestavin mešanic skupine 5

Oznaka mešanice	Apno [%]	Tuf [%]	Apnenčeva moka [%]	Steklene kroglice [%]	Superplastifikator [%]	Potreba po vodi
<b>G1</b>	14	6	80	0	1	0,35
<b>K</b>	17	3	80	0	1	0,29
<b>J</b>	19	9	70	2	1	0,37

Tuf vpije relativno veliko vode, kar zmanjšuje pretočnost mešanic. Dodajamo ga zaradi zmanjšanja krčenja in izboljšanja mehanskih lastnosti. Da bi ohranili ustrezno pretočnost, moramo takim mešanicam obvezno dodati superplastifikator.

## 6 ANALIZA REZULTATOV PREISKAV

Posamezne preiskave na svežih injekcijskih masah smo ponovili minimalno trikrat. S tem smo preverili ali prihaja med posameznimi rezultati do odstopanj, kar bi lahko prav tako kazalo na nestabilnost mešanice.

### 6.1 Injekcijske mešanice skupine 1

V preglednici 4 so podane povprečne vrednosti rezultatov za posamezne analize na svežih injekcijskih masah skupine 1. Pri mešanici A1 ni bilo večjih odstopanj med posameznimi rezultati.

Preglednica 4: Rezultati preiskav injekcijskih mešanic skupine 1

Oznaka mešanice	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Potreba po vodi	Pretočnost [s]		Razlez [mm]	Izločanje vode [%]	Vodozadržnost [%]	Krčenje [%]
			takoj	po 30 min				
<b>A</b>	1699	0,46	*	*	201	2,3	79,07	11,8
<b>A1</b>	1681	0,52	24	26	283	3,4	72,48	14,6

\* Preiskava ni bila opravljena, ker smo na podlagi ostalih preiskav odločili, da mešanica ni ustrežna za injektiranje

Mešanica A1 ima ustrezno pretočnost, vendar je končni odstotek izločene vode previsok in znaša 3,4%. Krčenje injekcijske mase A1 je prav tako previsoko in znaša 14,6%. Ker sta ti dve lastnosti (izločanje vode in krčenje) povezani z deležem vode v mešanici, smo potrebo po vodi poskušali znižati z dodatkom superplastifikatorja.

### 6.2 Injekcijske mešanice skupine 2

V preglednici 5 so podani končni rezultati za injekcijske mešanice skupine 2, kjer smo uporabili za dodatek superplastifikator.

Pri injekcijskih mešanicah iz skupine 2 smo potrdili, da dodatek superplastifikatorja znižuje potrebo po vodi. Uspelo nam je znižati končni odstotek izločene vode in odstotek krčenja ter ohraniti ustrezno pretočnost. Kriteriju pretočnosti ustrezajo vse mešanice skupine 2, razen C1.

Preglednica 5: Rezultati preiskav mešanic z dodatkom superplastifikatorja (skupina 2)

Oznaka mešanice	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Potreba po vodi	Pretočnost [s]		Razlez [mm]	Izločanje vode [%]	Vodozadržnost [%]	Krčenje [%]
			takoj	po 30 min				
<b>B</b>	1880	0,28	*	*	504	2,5	94,44	2,1
<b>B1</b>	1796	0,36	27	24	505	1,6	94,33	9,7
	1818		39	39				
<b>C</b>	1770	0,37	32	34	395	2,8	84,37	8,0
<b>C1</b>	1808	0,33	99	118	333	1,2	83,6	4,3
<b>C2</b>	1742	0,42	20	21	508	3,6	77,93	11,0

Injekcijska mešanica B1 ima v preglednici 5 podani dve različni vrednosti prostorninske mase in pretočnosti. Vzrok za to lahko iščemo v nestabilnosti mase ter segregaciji posameznih delcev.

### 6.3 Injekcijske mešanice skupine 3

Rezultati preiskav, opravljenih na svežih injekcijskih masah D in M so podani v preglednici 6. Obe injekcijski mešanici imata manjši čas pretočnosti, kot mešanice iz skupin 1 in 2, vendar imata zelo visok odstotek krčenja, preveliko izločanje vode in majhen odstotek vodozadržnosti. Zato smo jih ocenili kot neustrezne za injektiranje.

Preglednica 6: Rezultati preiskav mešaníc z dodatkom amonijevega karbamata (skupina 3)

Oznaka mešanice	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Potreba po vodi	Pretočnost [s]		Razlez [mm]	Izločanje vode [%]	Vodozadržnost [%]	Krčenje [%]
			takoj	po 30 min				
<b>D</b>	1666	0,52	19	22	345	3,8	63,46	14,6
<b>M</b>	1618	0,57	14	14	470	*	61,39	21,2

### 6.4 Injekcijske mešanice skupine 4

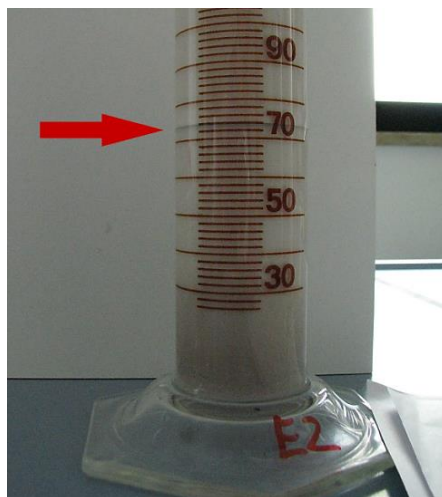
V preglednici 7 so podani končni rezultati svežih injekcijskih mešaníc skupine 4 z dodatkom ultralahkega polnila in superplastifikatorja. Iz preglednice je razvidno, da je potreba po vodi večja za mešanice z večjim deležem ultralahkega polnila.

Preglednica 7: Rezultati preiskav mešaníc z dodatkom ultralahkega polnila (skupina 4)

Oznaka mešanice	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Potreba po vodi	Pretočnost [s]		Razlez [mm]	Izločanje vode [%]	Vodozadržnost [%]	Krčenje [%]
			takoj	po 30 min				
<b>E</b>	1608	0,33	187	185	468	*	*	3,3
<b>E1</b>	1532	0,47	144	119	488	**	91,37	9,8
	1424		42	37				
<b>E2</b>	1458	0,49	24	23	555	**	92,09	5,6
	1546		30	25				
<b>N</b>	1714	0,31	158	131	440	*	*	2,0
<b>I</b>	824	0,94	178	140	*	*	90,64	3,3
<b>I1</b>	762	1,15	130	113	470	**	*	3,1
	658		56	44				

\*\* Pri odčitavanju izločanja vode smo imeli dodatne težave, ki so posebej opisane v tekstu

Analiza izločanja vode nam je pokazala, da mase E, E1, E2, N, I in I1 niso stabilne. Prišlo je do segregacije ultralahkega polnila zaradi prevelikega odstotka dodanega superplastifikatorja. Ultralahko polnilo se je izločilo na površino mase, apno in apnenčeva moka pa sta se usedli na dno valja. Voda pa se je izločila med apnom in moko ter ultralahkim polnilom (slika 16).



Slika 16: Meritev izločanja vode sveže mešanice E2

Na sliki 16 je z rdečo puščico označen nivo vode, ki se je izločila med slojem moke in apna ter ultralahkega polnila (steklenih kroglic).

### 6.5 Injekcijske mešanice skupine 5

Končni rezultati opravljenih analiz na svežih injekcijskih masah skupine 5 z dodatkom tufa (mase G1, K in J) so podane v preglednici 8.

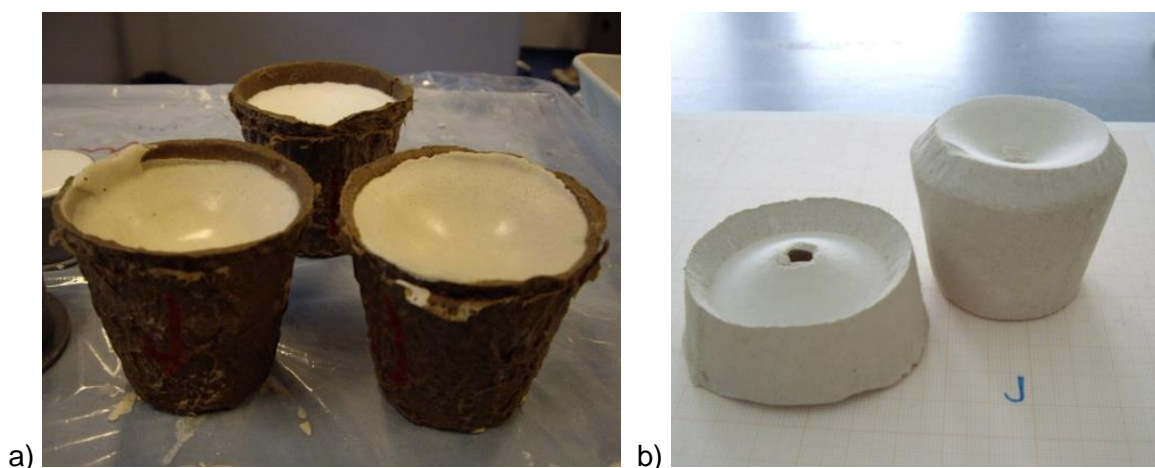
Preglednica 8: Rezultati preiskav mešanic z dodatkom tufa (skupina 5)

Oznaka mešanice	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Potreba po vodi	Pretočnost [s]		Razlez [mm]	Izločanje vode [%]	Vodozadržnost [%]	Krčenje [%]
			takoj	po 30 min				
<b>G1</b>	1838	0,35	67	67	378	1,6	83,16	7,6
<b>K</b>	1896	0,29	134	141	460	1,1	92,56	4,1
<b>J</b>	1498	0,37	252	269	360	0,6	88,29	3,9
	1520		106	138				

Injekcijska mešanica G1, ki vsebuje poleg apnenega veziva in apnenčeve moke tudi tuf, je zelo viskozna in posledično slabo pretočna. Vzrok za to je lahko, ker tufa nismo pred mešanjem injekcijske mešanice namočili v vodi. Tuf je med in po mešanju nase vezal vodo iz mešanice in je posledično masa postala zelo viskozna. Pri injekcijskih mešanicah K in J smo pred samim mešanjem tuf namočili v vodi za nekaj minut in šele nato začeli mešanje ostalih sestavin.

Iz preglednice 8 je razvidno, da niti ena od mešanic z dodatkom tufa nima ustrezne pretočnosti. Vse mešanice ustrezajo kriteriju izločanja vode ( $\leq 2\%$ ) in imajo tudi znižano potrebo po vodi. Krčenje injekcijskih mešanic z dodatkom tufa je manjše kot pri mešanicah iz skupin 1, 2 in 3.

Iz rezultatov v preglednici 8 lahko povzamemo, da ima injekcijska mešanica K sicer preveliki čas pretočnosti, vendar ustreza ostalim kriterijem. Injekcijska mešanica G1 ima najboljši rezultat pretočnosti, ustrezno izločanje vode, vendar prevelik odstotek krčenja. Injekcijska mešanica J ima najboljši rezultat krčenja in izločanja vode, vendar se je med delom izkazala kot nestabilna. Na strjenem vzorcu mešanice je bila zelo očitna segregacija ultralahkega polnila, kot je prikazano na sliki 17 b).

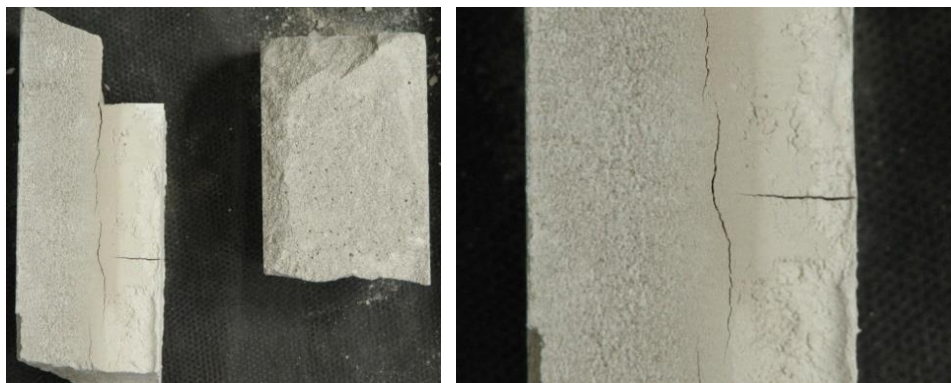


Slika 17: a) Sveža injekcijska mešanica J v papirnatih modelčkih; b) strjena injekcijska mešanica J po odstranitvi papirnatega modelčka, kjer se je zaradi segregacije ločila plast ultralahkega polnila

## 6.6 Primerjava mešanic in analiza rezultatov preiskav

### 6.6.1 Nestabilne mešanice

Analize rezultatov so pokazale, da so nekatere mešanice nestabilne oziroma je prišlo do segregacije ultralahkega polnila, apna in apnenčeve moke. Vzrok za to lahko iščemo v neustreznem odstotku dodanega superplastifikatorja. Kot nestabilna se je izkazala injekcijska mešanica B1 ter vse mešanice, ki so vsebovale ultralahko polnilo (E, E1, E2, N, I, I1 in J). Do velikih odstopanj v rezultatih pretočnosti je prišlo pri mešanicah B1, I1 in J.



Slika 18: Strjena in segregirana mešanica B

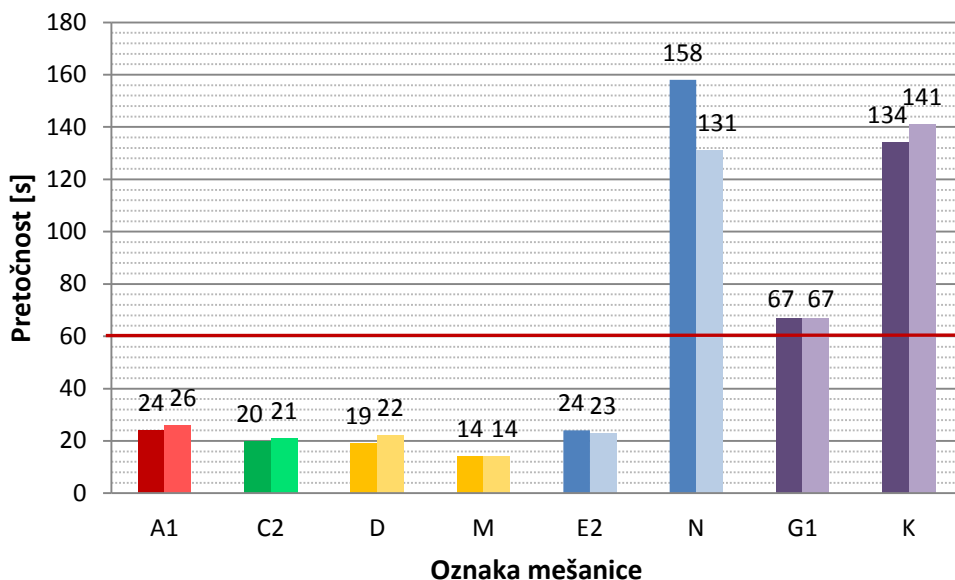
Segregacija se je potrdila na strjenih prizmah, takoj po tem, ko smo jih vzeli iz kalupa. Mešanica N je najbolj segregirala. Na sliki 19 je vidno tudi odstopanje posameznih plasti na površini vzorca. Zaradi take izrazite nehomogenosti vzorcev rezultati tlačne trdnosti niso uporabni.



Slika 19: Segregirani vzorci mešanice N

### 6.6.2 Pretočnost

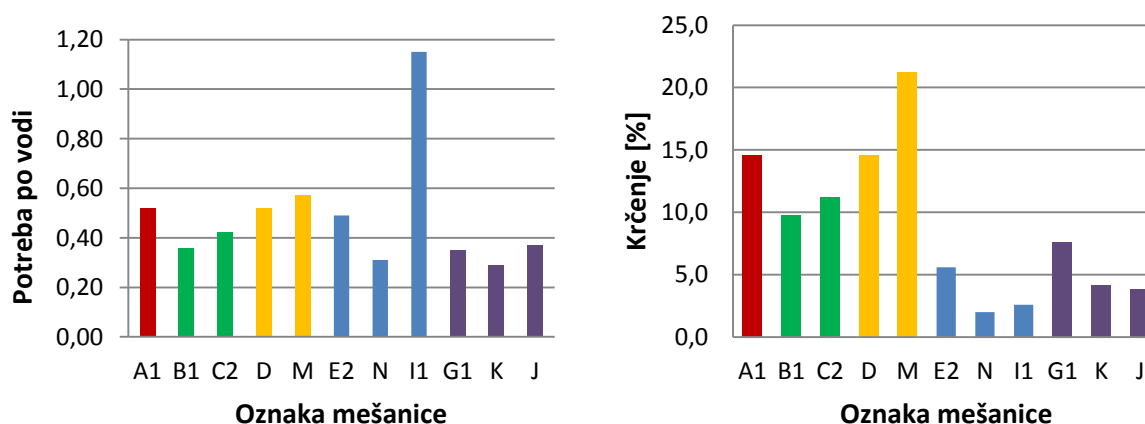
Iz grafikona 1 je razvidno, da imajo najboljše rezultate pretočnosti mešanice iz skupin 1, 2 in 3 ter mešanica E2. Mešanici I1 in J pa sta pokazali zelo veliko odstopanje med rezultati. Kot kriterij ustrezne pretočnosti smo upoštevali čas pretočnosti  $\leq 60$  s.



Grafikon 1: Pretočnost mešaníc takoj po zamešanju (prvi stolpec) in po preteku 30 min (drugi stolpec)

### 6.6.3 Krčenje

Pri mešanícah z dodatkom tufa nam je uspelo znižati potrebo po vodi, kar je posledično vplivalo ugodno tudi na zmanjšanje krčenja. Zanimivo je, da je pri mešanici I1, ki je imela največjo potrebo po vodi, odstotek krčenja zelo majhen. I1 je bila mešanica kateri smo za polnilo dali samo steklene kroglice, brez apnenčeve moke. Lahko sklepamo, da je tako neobičajno obnašanje mešanice posledica obnašanja steklenih kroglic.



Grafikon 2: Potreba po vodi (levo) in rezultati krčenja mešaníc (desno)

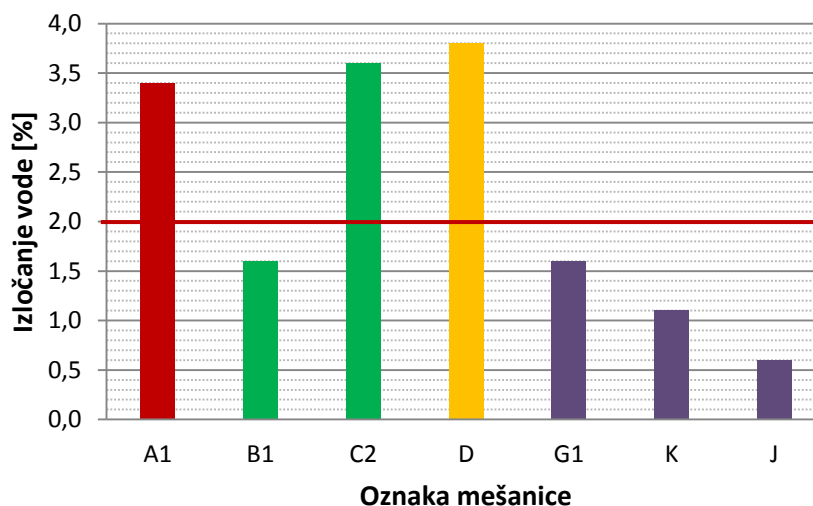
Največji odstotek krčenja smo izračunali pri osnovni mešanici (A1) ter mešanicah z dodatkom amonijevega karbamata D in M. Sklepamo, da ta dodatek neugodno vpliva na njihovo krčenje. Iz grafikona 2 vidimo tudi, da dodatek superplastifikatorja zmanjšuje odstotek krčenja, kar je bilo tudi pričakovano, saj ta dodatek zmanjšuje potrebo po vodi. Krčenje vzorcev v plastičnih cilindričnih kalupih je prikazano na sliki 20.

Najmanjši odstotek krčenja smo dobili pri mešanici N, ki vsebuje ultralahko polnilo v razmerju moka:kroglice = 2:1 ter 1% superplastifikatorja. V splošnem smo pri mešanicah z dodatkom ultralahkega polnila dobili nizek odstotek krčenja.



Slika 20: Strjeni vzorci mešanice A1 v plastičnih cilindričnih kalupih

#### 6.6.4 Izločanje vode in vodozadržnost

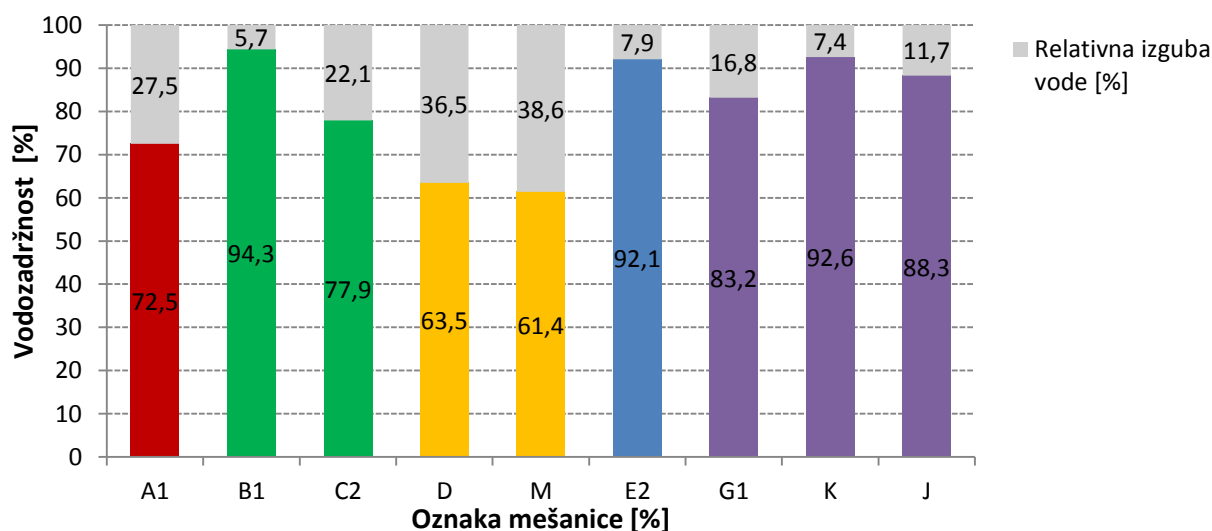


Grafikon 3: Izločanje vode v % po 3 urah

Največje vrednosti izločanja vode smo dobili pri osnovni mešanici A1 ter mešanicah z dodatkom amonijevega karbamata D in M. Mešanice, ki so izpolnile kriterij za izločanje vode so: B1, G1, K in J. Lahko sklepamo, da nam je z dodatkom tufa uspelo znižati odstotek izločanja vode.



Pri mešanicah z ultralahkim polnilom smo imeli težave pri odčitavanju izločene vode, ker so se steklene kroglice izločale na površini.



Grafikon 4: Vodozadržnost in relativna izguba vode injekcijskih mešanic

Najmanjša vodozadržnost je bila izmerjena pri mešanicah z dodatkom amonijevega karbamata D in M. To je bilo pričakovano, saj je pri teh mešanicah izmerjen tudi največji odstotek izločanja vode. Mešanice z dodatkom tufa pa so pokazale zelo dobro vodozadržnost.

Iz vseh navedenih rezultatov lahko zaključimo, da so mešanice z dodatkom amonijevega karbamata, kljub zelo dobri pretočnosti, neustrezne za injektiranje. Imajo prevelik odstotek izločanja vode, zelo majhno vodozadržnost ter izrazito velik odstotek krčenja.

Mešanicam z dodatkom lahkega polnila smo izmerili prevelik čas pretočnosti (razen mešanice E2). Po drugi strani so pokazale ustrezne rezultate pri preiskavi vodozadržnosti in krčenja. Z uporabo ultralahkega polnila smo tudi uspešno zmanjšali prostorninsko težo mešanic. Problem pri teh mešanic predstavlja nestabilnost in neobdelavnost, saj smo imeli velike težave s segregacijo delcev in izločanjem ultralahkih kroglic na površino. Najbolj zanimivo obnašanje je pokazala mešanica I1, z največjim deležem steklenih kroglic, pri kateri je kljub izrazito veliki potrebi po vodi odstotek krčenja bil najmanjši.

Z dodatkom tufa smo uspešno znižali potrebo po vodi. Posledično smo pri mešanicah G1, K in J dobili nizek odstotek izločanja vode in krčenja ter zelo dobro vodozadržnost. Največji problem pri teh mešanicah je predstavljal slaba pretočnost.

## 6.7 Rezultati upogibne natezne in tlačne trdnosti

Med procesom sušenja so vzorci v prizmah zelo razpokali (slika 21). Eden od razlogov tako močnega razpokanja so lahko tudi visoke poletne temperature v laboratoriju in posledično prekomerno izhlapevanje vode. Potem, ko smo jih vzeli iz kalupov, je večina prizem razpadla, zato ni bilo možno izmeriti njihove upogibne natezne trdnosti. Rezultati izmerjenih tlačnih trdnosti pa so podani v preglednici 9.

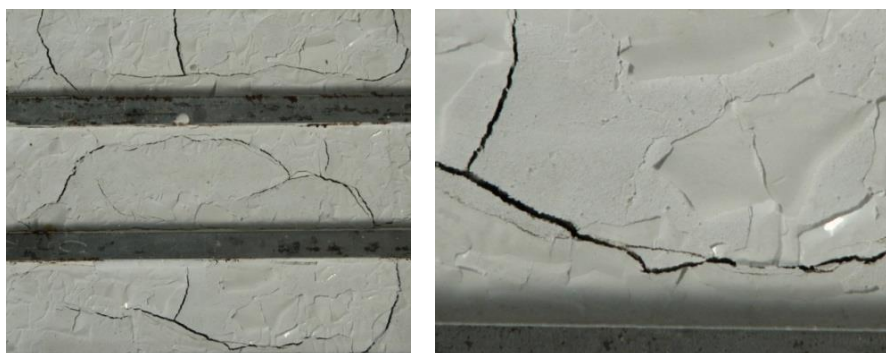
Preglednica 9: Rezultati izmerjenih tlačnih trdnosti

Oznaka mešanice	Tlačna trdnost $f_c$ [MPa]
A1	0,19
B1	0,31
C	0,33
C1	0,70
C2	0,18
D	0,24
N	0,61
I1	0,43
J	1,92

Iz preglednice 9 je razvidno, da so rezultati tlačne trdnosti zelo nizke vrednosti. To je lahko tudi posledica poškodovanosti prizem. Čeprav nismo sledili postavljenemu kriteriju, bi naj vrednost tlačne trdnosti injekcijskih mešanic znašala med 3 in 8 MPa [14]. Temu kriteriju se najbolj približa rezultat za sestavo J, ki je vsebovala tuf in ultralahko polnilo.



Slika 21: Vzorci mešanice A1 pred in po razkalupljenju



Slika 22: Strjena, razpokana mešanica D v kalupu

## 7 POSTOPEK INJEKTIRANJA

Preiskavo sposobnosti injektiranja smo izvajali skladno s standardom SIST EN 1771:2004/AC:2005 [15]. Preiskava temelji na injektiranju mešanice skozi granuliran material ustreznih frakcij pod konstantnim pritiskom 0,075 MPa.



Slika 23: Naprava za injektiranje in testiranje sposobnosti injektiranja

Naprava za injektiranje je sestavljena iz posode, ki je pod pritiskom in v kateri se nahaja posoda za injekcijsko mešanico. V posodo je treba naliti 500 g sveže pripravljene injekcijske mešanice. Posoda pod pritiskom je s prožno cevjo povezana z merilnim valjem napolnjenim z granuliranim materialom. Merilni valj pa je na vrhu z drugo prožno cevjo povezan z merilno iztočno menzuro. Celotna naprava za injektiranje je prikazana na sliki 23.

Za preiskavo sem uporabila plastičen merilni valj z merilno skalo do 360 mm. Pri injektiranju mase skozi valj smo merili čas, ki ga masa potrebuje, da doseže določene višine, in sicer: 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm in 350 mm. Čas se začne meriti, ko mešanica iz prožne cevi doseže dno merilnega valja in se konča, ko se pretok mase ustavi oziroma ne doseže višine 20 ml v iztočni posodi.

Najprej sem pripravila granuliran material tako, da sem zdrobila star apneni omet. Za preiskave sem uporabila drobljen omet frakcij 0/1, 1/2 in 2/4 mm. Navedene frakcije sem dodajala v različnih razmerjih, da sem opazovala spreminjanje injektabilnosti mešanic. Deleži posameznih frakcij so podani v preglednici 10. Uporabila sem suh in predhodno namočen drobljen granuliran material.

Merilni valj sem napolnila s pripravljenim granuliranim materialom do višine 360 mm. Z vsake strani valja sem namestila filtrsko mrežico z velikostjo okenc 0,5 mm in prožno cev z gumijastim zamaškom. Tako pripravljen valj sem nato stehala. Pri preizkušanju injektiranja čez moker granuliran material se valj stehta šele, ko se skozi suh granuliran material pod pritiskom spusti 200 g vode. Po končanem injektiranju injekcijske mešanice merilni valj ponovno stehamo.

Na koncu vsakega preizkusa lahko izrišemo krivuljo injektabilnosti:  $h = f(t)$

kjer je:

$h$  - višina določenega nivoja [mm]

$t$  – čas, potreben za doseg določenega nivoja [s]

Preizkušali smo sposobnost injektiranja mešanic: A1, B1, C2 in E2. Opažanja in težave, ki smo jih imeli pri injektiranju so opisane v nadaljevanju.

Preglednica 10: Opis pogojev pri injektiranju in izmerjeni časi

Oznaka mešanice	Merjeni čas [s]						stanje ometa	Delež posameznih frakcij v materialu [%]		
	Poizkus	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm		0/1	1/2	2/4
A1	1	/ *	/	/	/	/	omočen	0	0	100
	2	00:55	01:31	02:21	06:64	/	suhi	0	0	100
	3	00:82	/	/	/	/	omočen	25	25	50
	4	00:37	/	/	/	/	omočen	0	15	75
B1	1	/ **	/	/	/	/	omočen	25	25	50
	2	/ *	/	/	/	/	omočen	0	0	100
	3	00:81	/	/	/	/	suhi	0	0	100
C2	1	00:82	/	/	/	/	suhi	0	0	100
	2	/ *	/	/	/	/	omočen	0	0	100
	3	00:67	/	/	/	/	omočen	25	25	50
E2	1	/ **	/	/	/	/	suhi	25	25	50

\* Prehiter prehod mase skozi merilni valj

\*\* Masa se je ustavila v merilnem vaju

Preglednica 11: Opombe in komentarji pri procesu injektiranja

Oznaka mešanice	Poizkus	Opombe	Stanje v iztočni menzuri
A1	1	- prehiter prehod skozi valj	napolnjena do višine 32 ml v času 9 s
	2	- masa se je ustavila na višini 20 cm	/
	3	- masa se je ustavila na višini 9 cm v času 02:38 s	/
	4	- masa se je ustavila na višini 9 cm v času 01:98 s	/
B1	1	- masa se je ustavila na višini 4,5 cm	/
	2	- prehiter prehod skozi valj - hitro posedanje mase	napolnjena do višine 144 ml
	3	- masa se je ustavila na višini 6 cm	/
C2	1	- masa se je ustavila na višini 7,5 cm	/
	2	- prehiter prehod skozi valj	napolnjena do višine 100 ml v času 29 s
	3	- masa se je ustavila na višini 8,5 cm	/
E2	1	- masa je čez valj podirala počasi in se ustavila na višini 10 cm - hitro posedanje mase	/

Iz preglednic 10 in 11 je razvidno, da sem imela pri preizkusu sposobnosti injektiranja precej težav. Niti ene preiskave nismo uspeli izvesti pravilno. Pogosto je mešanica skozi medij prešla prehitro, da bi merili čas doseganja določenih višin, ali se je v valju ustavila. Opazili smo tudi, da pogosto masa ni zapolnila vseh votlin med granuliranim materialom v valju. V primerih, ko je mešanica skozi valj prešla prehitro, smo to pripisali segregaciji mešanice. Namreč, v jekleni posodi, ki je pod pritiskom, je ostal bolj gosti del mešanice, kar pomeni, da taki rezultati preiskav niso uporabni. Preiskavo injektiranja lahko pravilno izvedemo samo za stabilne homogene mešanice, ki ne segregirajo. Po izvedbi preiskav smo ugotovili, da mešanica lažje podira skozi omočen medij večjih frakcij kot suh medij manjših frakcij.

V nadaljevanju preiskav sposobnosti injektiranja je treba metodo še dodelati. Treba je ugotoviti primerno zrnovitostno sestavo materiala za zapolnitev valja, ki bi najbolj odgovarjala dejanskim razmeram v praksi oziroma na terenu. Pomembno je, da nam izbrana sestava medija omogoči počasnejši prehod mešanice skozi valj, da lahko opazujemo njen potek in zapolnitev votlin.

## 8 ZAKLJUČEK

Po končanih laboratorijskih preiskavah in analizah rezultatov mi ni uspelo oblikovati injekcijske mešanice, primerne za uporabo v praksi. To je bilo pričakovano, saj je področje preobširno in malo raziskano. Kljub temu sem prišla do koristnih ugotovitev, katere se lahko upoštevajo kot smernice za nadaljnje raziskave.

S pomočjo superplastifikatorja nam je uspelo znižati potrebo po vodi, izločanje vode, krčenje ter izboljšati vodozadržnost. Po drugi strani smo ugotovili, da prevelik odstotek superplastifikatorja povzroča nestabilnost mešanice, kar se kaže kot segregacija veziva in polnila. Zato je potrebno raziskave nadaljevati z zmanjševanjem odstotka dodanega superplastifikatorja oziroma uporabiti drug tip superplastifikatorja.

Mešanice z dodatkom amonijevega karbamata (D in M) so se pri vseh preiskavah, razen pretočnosti, izkazale za zelo slabe. Z nadaljnjimi preiskavami, ki niso vključene v obseg moje diplomske naloge, se je ugotovilo, da je pri uporabi amonijevega karbamata reakcija z vodo zelo hitra in se zato CO<sub>2</sub> prehitro izloči iz mešanice. To deluje negativno na njene lastnosti, saj apno v tako kratkem času ne uspe vezati CO<sub>2</sub>. Potrebno je ugotoviti, kateri dodatki omogočajo počasnejše izločanje CO<sub>2</sub> in tako pripomorejo k vezanju mešanice. Prav tako je sam dodatek (amonijev karbamat) škodljiv za zdravje.

Pri mešanicah z dodatkom lahkega polnila (E, E1, E2, N, I, I1) smo imeli največ težav zaradi hitre segregacije steklenih kroglic na površino in težjih delcev na dno mešanice. Take mešanice so pri delu na terenu neuporabne, saj je njihova obdelavnost zelo slaba.

Največ kriterijev so izpolnile mešanice z dodatkom tufa (G1, K, J). Edini negativni posledici sta bili neustrezna pretočnost ter povečanje prostorninske mase mešanice.

Očitno je, da je za razvoj ustrezne injekcijske mešanice treba kombinirati zelo veliko različnih zahtev in kriterijev. Zaradi tega je to področje težavno, saj je treba ugotoviti ustrezno kombinacijo dodatkov, ki skupaj izboljšajo njene lastnosti. Pri tem je treba upoštevati kriterij kompatibilnosti. Da bi bilo injektiranje dolgoročno uspešno, mora biti injekcijska mešanica kompatibilna z materiali v zidu v kemijskem in mehansko-fizikalnem smislu.

Končna preiskava sposobnosti injektiranja žal ni bila uspešna. Za uspešno preiskavo je treba ugotoviti primerno granulacijo materiala za zapolnitev valja ali ga zamenjati z drugačnim materialom

## VIRI

- [1] Padovnik A. 2013. Prijava teme doktorske disertacije na Doktorskem študijskem programu 3. stopnje Grajeno okolje: Utrjevanje odstopajočih plasti ometov stenske poslikave z nekonstrukcijskim injektiranjem, Ljubljana: 9 str.
- [2] Baglioni, P., et al. 1997. New Autogenous Lime-Based Grouts Used in the Conservation of Lime-Based Wall Paintings.
- [3] Botticelli, G. 1992. Metodologia di Restauro delle Pitture Murali. Firenze: Centro Di della Edifimi.
- [4] Uranjek, M. 2008. Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Podiplomski študij konstrukcijske smeri (samozaložba M. Uranjek): 146 str.
- [5] SIST EN 1015-6:1999. Metode preskušanja zidarskih malt – 6. del: Ugotavljanje prostorninske mase sveže malte.
- [6] SIST EN 1015-3:1999. Metode preskušanja zidarskih malt – 3. del: Določevanje konsistence sveže malte.
- [7] SIST EN 445:2008. Injekcijska masa za prednapete kable: preskusne metode.
- [8] PSIST prEN 1015-8:2001. Metode preskušanja zidarskih malt – 8. del: Določevanje zadrževanja vode sveže malte.
- [9] SIST EN 1015-11:2001. Metode preskušanja zidarskih malt – 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.
- [10] Žarnić, R., 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 351 str.
- [11] Arrigler, A. 2013. Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Konstrukcijska smer (samozaložba A. Arrigler): 164 str.
- [12] Katalog izdelkov Calcit, 2013.  
[http://www.calcit.si/fileadmin/templates/calcit/slo/proizvodi/images/Katalog\\_izdelkov\\_Calcit.pdf](http://www.calcit.si/fileadmin/templates/calcit/slo/proizvodi/images/Katalog_izdelkov_Calcit.pdf) (Pridobljeno 20. 7. 2014.)
- [13] ASTM C 940: 2003. Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory.

- 
- [14] Bicer-Simsir B., Rainer L. 2013. Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces - A Manual of Laboratory and Field Test Methods The Getty Conservation Institute, Los Angeles: 120 str.
- [15] SIST EN 1771:2004/AC:2005. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Ugotavljanje sposobnosti za injektiranje in preskus razcepitve.
- [16] Pristov, T. 2012. Konserviranje in restavriranje stenskih poslikav v okviru celostne prenove Ljubljanske opere. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Akademija za likovno umetnost in oblikovanje (samozaložba T. Pristov): 230 str.
- [17] Padovnik A. 2008. Pomen estetske obdelave večjih poškodb na stenskih slikah. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Akademija za likovno umetnost in oblikovanje (samozaložba A. Padovnik): 71 str.
- [18] Žarnić, R., Bosiljkov V., Bokan-Bosiljkov V., 2009. Gradiva – Vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.
- [19] Černe, N. 2012. In-situ in laboratorijske preiskave historičnih malt. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Prometna smer (samozaložba N. Černe): 87 str.
- [20] Bogovčič, I. 2000. Restavriranje stenskih slik (gradivo za študij): 45 str.
- [21] Padovnik, A. 2013. Izvajanje laboratorijskih preiskav za injekcijske mešanice in kriteriji. Osebna komunikacija.
- [22] Padovnik A. 2012. Power Point predstavitev RILEM Meeting TC SGM, Case study – injection practice in Slovenia: 26 str.
- [23] Ferragni D., et al. 1984. Injection grouting of mural paintings and mosaics (članek): 7 str.







Kovač, D. 2014. Vpliv pospešil vezanja in lahkega polnila na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic  
XXXVII

Dipl. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program I. stopnje Gradbeništvo

---