

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DOKTORSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM III. STOPNJE
GRAJENO OKOLJE

Kandidatka:

ANDREJA PADOVNIK

**UTRJEVANJE ODPSTOJAČIH PLASTI OMETOV
STENSKE POSLIKAVE Z NEKONSTRUKCIJSKIM
INJEKTIRANJEM**

Doktorska disertacija številka: 36/GO

**CONSOLIDATION OF DETACHED PLASTER LAYERS
OF MURAL PAINTINGS WITH NON-STRUCTURAL
GROUTING**

Doctoral thesis No.: 36/GO

Komisija za doktorski študij je na 39. seji, 15. maja 2013, po pooblastilu s 30. seje Senata Univerze v Ljubljani z dne 20. januarja 2009, dala soglasje k temi doktorske disertacije.

Za mentorico je bila imenovana izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov.

Ljubljana, 26. april 2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, UL FGG,
- prof. dr. Roko Žarnić, UL FGG,
- doc. dr. Blaž Šeme, UL ALUO,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 39. seji, 27. marca 2013.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- doc. dr. Blaž Šeme, UL ALUO
- doc. dr. Mojmir Uranjek, UM FGPA
- prof. dr. Zvonko Jagličić, UL FGG

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 26. seji, 24. februarja 2016.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, UL FGG, mentorica,
- doc. dr. Blaž Šeme, UL ALUO
- doc. dr. Mojmir Uranjek, UM FGPA
- prof. dr. Zvonko Jagličić, UL FGG

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 5. izredni seji, 18. aprila 2016.

IZJAVA

Podpisana mag. **Andreja Padovnik**, rest.-kons., izjavljam, da sem avtorica doktorske disertacije z naslovom »**UTRJEVANJE ODPSTOJAJOČIH PLASTI OMETOV STENSKE POSLIKAVE Z NEKONSTRUKCIJSKIM INJEKTIRANJEM**«.

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

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

Ljubljana, 26.4.2016

Andreja Padovnik

»Ta stran je namenoma prazna«

ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 691.5:699.8:(043)

Avtor: mag. Andreja Padovnik

Mentorica: prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Naslov: Utrjevanje odstopajočih plasti ometov stenske poslikave z nekonstrukcijskim injektiranjem

Tip dokumenta: doktorska disertacija

Obseg in oprema: 218 str., 52 pregl., 79 sl., 22 en., 6 sh.

Ključne besede: stavbna dediščina, stenske slike, injekcijske mešanice, utrjevanje, nekonstrukcijsko injektiranje

Izvleček

V doktorski disertaciji se ukvarjamo z razvojem kompatibilnih injekcijskih mešanic z apnenim vezivom, namenjenih utrjevanju odstopajočih plasti ometov stenskih slik z nekonstrukcijskim injektiranjem. Podlaga za razvoj injekcijskih mešanic je pregled slovenske in tuje prakse utrjevanja odstopajočih plasti historičnih ometov, katerega rezultat so natančno definirane zahteve za lastnosti injekcijskih mešanic, ki morajo biti kompatibilne s historičnimi ometi v kemijskem, fizikalnem in mehanskem vidiku. Istočasno moramo zagotoviti tudi dobro obdelavnost teh mešanic v svežem stanju, ki jo vrednotimo s pomočjo lastnosti, kot so pretočnost, injektibilnost, zadrževanje vode, čim manjše plastično krčenje, stabilnost itd. Razvoj injekcijskih mešanic je potekal v več fazah. V okviru preliminarnih raziskav je bilo zasnovanih 9 različnih mešanic, kot kriterij za izbiro sestav za nadaljnje raziskave (17 mešanic) pa je bila izbrana prostorninska stabilnost mešanice. Injekcijske mešanice so na osnovi mineralnega veziva in polnila (hidratiziranega apna in kalcitne moke), ultralahkega polnila (zmanjšanje teže mešanice), pucolanskega dodatka tufa (izboljšanje mehanskih lastnosti) in kemičnih dodatkov (PCE in PPh superplastifikator) za zmanjšanje količine vode. Kot prvi ukrep za povečanje prostorninske stabilnosti mešanic je bilo izbrano manjšanje razmerja vezivo : polnilo. Drugi ukrep je bil uporaba superplastifikatorja za zmanjšanje potrebne količine vode za zahtevano obdelavnost. Raziskave mešanic so razdeljene v več sklopov z izključevanjem mešanic s slabšimi lastnostmi (ne dosežajo kriterijev). V okviru raziskovalnega dela so bili razviti posebni modeli – modeli z zračnimi žepi in sendviči, ki simulirajo sklope odstopajočih plasti ometov in omogočajo dodatne raziskave nekaterih ključnih lastnosti, kot je sprjemna trdnost. Uporabljene standardizirane metode smo modificirali in prilagodili za testiranje nekonstrukcijskih injekcijskih mešanic. Kot mešanici z najbolj optimalno kombinacijo ključnih lastnosti sta se izkazali mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE. Mešanici imata dobro prostorninsko stabilnost z minimalnim krčenjem, dobro sposobnost zadrževanja vode, injektibilnost v stolpcu iz suhega ali predhodno navlaženega drobljenega ometa. Mehanske in fizikalne lastnosti so v okviru tistih pri historičnih ometih, z dobro oprijemljivostjo v primeru 2 mm visokih zračnih žepov. Pri preiskavah pospešenega staranja se je pokazalo, da je mešanica $L_1 S_2 B_1$ PCE obstojnejša ob različnih klimatskih vplivih, v kombinaciji z destilirano vodo ali raztopino NaCl. Zato je bila mešanica $L_1 S_2 B_1$ PCE izbrana za stabilizacijo odstopajočih plasti ometov izbrane stenske slike.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**UDK:** 691.5:699.8:(043)**Author:** Andreja Padovnik, M. Sc.**Supervisor:** prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D**Title:** Consolidation of detached plaster layers of mural paintings with non-structural grouting**Document type:** doctoral dissertation**Notes:** 218 p., 52 tab., 79 fig., 22 eq., 6 sche.**Keywords:** architectural heritage, mural paintings, injection grouts, consolidation, non-structural grouting**Abstract**

In this doctoral thesis the development of compatible injection grouts based on hydrated lime for non-structural consolidation of detached plaster layers of decorative architectural surfaces (mural paintings) is studied. A review of Slovenian and international conservation practices of re-attachment interventions of historical plaster layers is given, which has resulted in well-defined requirements for injection grouts that must be compatible with historical renderings in the chemical, physical and mechanical aspects. At the same time, the injection grouts had to assure good working properties in the fresh state, evaluated according properties such as fluidity, injectability, water retention, minimal shrinkage, stability, etc. Injection grouts were developed in several phases. In the framework of preliminary research 9 different injection grouts were designed. Volume stability of the injection grouts was selected as a criterion for the selection of compositions used for further researches (17 injection grouts). Injection grouts were designed based on mineral binder and filler (hydrated lime and inert limestone filler), ultra light filler (for weight reduction), tuff as puccolan additive (to increase the mechanical properties) and chemical admixture (PCE and PPh superplasticizers) to reduce the water content. The first selected measure to increase the volumetric stability of grout mixtures was the decrease of the binder to filler ratio. The second measure was the use of superplasticizer to reduce the water content for the required workability. Furthermore, the research of grout mixtures was divided into several steps by eliminating the mixtures with poor properties (not reaching the requirements). In the framework of the research work, special models have been developed – models with air pockets and sandwiches simulating the detached plaster layers and allowing additional research of significant properties, such as adhesive strength. The grout mixtures were tested following the modified standard tests specially adapted for non-structural grouts. Grout mixtures L1 S3 PCE and L1 S2B1 PCE have proved to possess the most optimal combinations of key properties. Both mixtures have good volumetric stability with minimal shrinkage, and good water retention and injectability with dry and pre-wetted crushed lime mortar columns. Their mechanical and physical properties are within the range of historical plasters and provide good adhesion in the case of 2 mm high air pockets. Moreover, accelerated ageing showed that mixture L1 S2B1 PCE is more durable under various climatic influences in combination with distilled water or NaCl. Therefore, mixture L1 S2B1 PCE was selected for stabilizing the detached plaster layers of the selected mural painting.

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so mi pomagali pri delu in omogočili izvedbo ter nastanek te doktorske disertacije.

Na prvem mestu bi se rada iskreno zahvalila mentorici prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov, ki mi je omogočila uresničitev zastavljenih ciljev, mi zaupala, me podpirala in s koristnimi nasveti vodila do ciljev.

Zahvaljujem se prof. Francesci Pique in dr. Albertu Jornetu za mentorstvo in izkazano gostoljubje med mojim gostovanjem na SUPSI (University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland, Institute of Materials and Construction) v Švici.

Zahvaljujem se prav tako dr. Mauriziu Bellottu za izkazano gostoljubje in pomoč pri raziskavah med mojim gostovanjem na Giovanni Bozzetto S.p.A. v Italiji.

Prav tako cenim pomoč vseh, ki so mi pomagali pri preiskavah na UL FGG. To so asist. dr. Petra Štukovnik, dr. Patricija Cotič in Franci Čepon.

Zahvaljujem se tudi doc. dr. Katji Kavkler, Sonji Fister in Maji Gutman, ki so mi omogočile izvedbo analiz vzorcev v Naravoslovnem oddelku Restavratorskega centra (ZVKDS RC) v Ljubljani.

Posebno zahvalo želim izraziti še staršem, ki so me spodbujali in mi stali ob strani vsa leta mojega šolanja.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO

UVOD	1
1.1 Predstavitev problematike	1
1.2 Definiranje izhodišč in ciljev doktorske disertacije	2
1.3 Zasnova doktorske disertacije	4
2 PREGLED LITERATURE	7
2.1 Splošno o tehniki in tehnologiji stenskih slik.....	7
2.1.1 Nosilec – zid/stena	7
2.1.2 Stratigrafije stenskih slik.....	8
2.1.3 Fresko in secco tehnika slikanja.....	10
2.1.4 Sestavine ometov in procesi strjevanja mineralnih veziv.....	12
2.2 Lastnosti historičnih apnenih ometov.....	15
2.3 Vzroki propadanja in nastajanje poškodb na stenskih slikah	17
2.3.1 Vpliv vlage in vode	19
2.3.2 Vročina in zmrzal	21
2.3.3 Mehanski vplivi.....	22
2.3.4 Nepravilna tehnična in tehnološka izdelava stenske slike.....	23
2.3.5 Neprimerne intervencije	24
2.4 Pregled neporušnih preiskav odstopajočih plasti ometov stenskih slikah.....	26
2.5 Pregled uporabe injekcijskih mešanic v Sloveniji.....	29
2.6 Pregled uporabe injekcijskih mešanic v mednarodnem prostoru	33
2.7 Pregled obstoječih komercialno dostopnih injekcijskih mešanic	37
2.7.1 Komercialno dostopne injekcijske mešanice med 1990 in 2000.....	38
2.7.2 Komercialno dostopne injekcijske mešanice od leta 2000 naprej	41
3 IZHODIŠČA ZA RAZVOJ KOMPATIBILNIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC ZA STABILIZACIJO ODSTOPAJOČIH PLASTI OMETOV STENSKE SLIKE.....	45
3.1 Predstavitev zahtevanih lastnosti nekonstrukcijskih injekcijskih mešanic.....	45
3.2 Izhodišče izbire materialov za injekcijske mešanice.....	47
3.2.1 Vezivo	48
3.2.2 Polnila	49
3.2.3 Voda	51
3.2.4 Kemijski dodatki	51
3.3 Priprava vzorcev.....	52
3.3.1 Mešanje	52

3.3.2	Priprava in negovanje preskušancev	54
3.4	Metode za preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic	55
3.4.1	Standardni testi in njihova uporabnost	55
3.4.2	In-situ testi	60
3.5	Priprava modelov za simulacijo poškodb stenskih slik	62
3.5.1	Priprava apnene plošče s kanalčki	62
3.5.2	Priprava modela z zračnimi žepi	64
3.5.3	Priprava sendvič modela.....	65
3.5.4	Priprava apnenih skodelic.....	66
3.5.5	Drobljen apneni omet (za preverjanje injektibilnosti in pretočnosti).....	67
3.5.6	Lastnosti malt in apnenih ometov	68
3.6	Povzetek in zaključki tretjega poglavja	69
4	RAZVOJ IN EKSPERIMENTALNE PREISKAVE INJEKCIJSKIH MEŠANIC (IZVEDENE PREISKAVE IN ANALIZE REZULTATOV).....	71
4.1	Sklop 1: Preliminarne preiskave	72
4.1.1	Potreba po vodi.....	74
4.1.2	Sprememba prostornine injekcijskih mešanic	76
4.1.3	Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic	79
4.1.4	Povzetek rezultatov prvega sklopa	81
4.2	Sklop 2: Razvoj dodatnih sestav kompatibilnih injekcijskih mešanic.....	82
4.2.1	Potreba po vodi.....	85
4.2.2	Prostorninska masa svežih injekcijskih mešanic	87
4.2.3	Preverjanje homogenosti/stabilnosti injekcijskih mešanic	88
4.2.4	Izločanje vode.....	92
4.2.5	Mini razlez s posedom svežih injekcijskih mešanic	94
4.2.6	Sposobnost zadrževanja vode injekcijskih mešanic	95
4.2.7	Sprememba prostornine injekcijskih mešanic	97
4.2.8	Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic	99
4.2.9	Preizkušanje injektibilnosti injekcijskih mešanic z injekcijsko brizgo.....	103
4.2.10	Preizkušanje pretočnosti injekcijskih mešanic z injekcijsko brizgo	105
4.2.11	Preizkušanje tečenja na apnenih ploščah s kanalčki.....	106
4.2.12	Povzetek rezultatov in ocena mešanic ter izbira mešanic za nadaljnje raziskave.....	108
4.3	Sklop 3: Preiskave na strjenih injekcijskih mešanicah	113
4.3.1	Prostorninska masa strjenih injekcijskih mešanic	114
4.3.2	Poroznost	115

4.3.3	Koeficient kapilarnega srka vode	120
4.3.4	Ugotavljanje lastnosti za prehod vodne pare – paroprepustnost	122
4.3.5	Tlačna trdnost	124
4.3.6	Cepilna natezna trdnost	127
4.3.7	Stopnja karbonatizacije injekcijskih mešanic	128
4.3.8	Povzetek rezultatov in ocena mešanic tretjega sklopa	129
4.4	Sklop 4: Detajlne preiskave injekcijskih mešanic	136
4.4.1	Pretočnosti injekcijskih mešanic	137
4.4.2	Določanje injektabilnosti injekcijskih mešanic	139
4.4.3	Določanje časa vezanja injekcijskih mešanic	143
4.4.4	Meritve sprijemne trdnosti – »pull off« test	147
4.4.5	Vodovpojnost injekcijskih mešanic v zračnih žepih	152
4.4.6	Vpliv pospešenega staranja na lastnosti injekcijskih mešanic	155
4.4.7	Povzetek rezultatov in ocena mešanic četrte faze	162
4.5	Zaključki	170
5	IN-SITU PREISKAVE STENSKE SLIKE IN IZVEDBA INJEKTIRANJA	175
5.1	Izhodišča in namen preiskav	175
5.2	Opis stenske slike	176
5.3	Neporušne preiskave	178
5.3.1	Metoda s trkanjem	178
5.3.2	Mikroskopska analiza s sistemom HIROX	179
5.3.3	Termografske meritve	181
5.3.4	Povzetek rezultatov neporušnih metod	182
5.4	Destruktivne metode	184
5.4.1	Optična mikroskopija	184
5.4.2	Infrardeča spektroskopija s Fourierovo transformacijo (FTIR)	185
5.4.3	Povzetek rezultatov destruktivnih analiz	187
5.5	Izvedba sistematičnega injiciranja na izbrani stenski sliki	187
5.5.1	Priprava in testiranje injekcijske mešanice L ₁ S ₂ B ₁ PCE na terenu	188
5.5.2	Utrjevanje odstopajočih plasti ometov stenske slike	190
5.6	Neporušne preiskave po postopku utrjevanja	191
5.7	Povzetki in zaključki poglavja in-situ preiskav stenske slike in utrjevanja	193
6	PRIPOROČILA ZA IZBIRO USTREZNE INJEKCIJSKE MEŠANICE IN UTRJEVANJE ODSTOPAJOČIH PLASTI OMETOV	195
6.1	Predhodne preiskave	195

6.2	Izbira ustrezne injekcijske mešanice za kakovostno izvedbo utrjevanja	195
6.3	Preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic na terenu z in-situ metodami	197
6.4	Postopek utrjevanja odstopajočih plasti ometov.....	198
6.5	Zaporednje izvajalskih ukrepov pri konstrukcijskem in nekonstrukcijskem injektiranju ...	199
7	ZAKLJUČEK.....	201
7.1	Rezultati in najpomembnejše ugotovitve.....	201
7.2	Prispevek doktorske disertacije	203
7.1	Možnosti nadaljnjega raziskovanja	204
VIRI.....		207

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: FAKTORJI VPLIVA NA POŠKODBE HISTORIČNIH OMETOV	i
PRILOGA B: PREGLED UPORABE INJEKCIJSKIH MAS V SLOVENIJI OD LETA 1950 DO 2014	iii
PRILOGA C: SPREMEMBA PROSTORNINE S PLASTIČNIMI CILINDRIČNIMI KALUPI	v
PRILOGA D: SPREMEMBE PROSTORNINE INJEKCIJSKIH MEŠANIC Z METODO APNENIH SKODELIC	vii
PRILOGA E: PREIZKUŠANJE INJEKTABILNOSTI INJEKCIJSKIH MEŠANIC Z INJEKCIJSKO BRIZGO	xii
PRILOGA F: PREIZKUŠANJE PRETOČNOSTI INJEKCIJSKIH MEŠANIC Z INJEKCIJSKO BRIZGO	xiii
PRILOGA G: PREIZKUŠANJE TEČENJA INJEKCIJSKIH MEŠANIC NA APNENIH PLOŠČAH S KANALČKI	xiv
PRILOGA H: NAČINI PORUŠITVE INJEKCIJSKIH MEŠANIC V ZRAČNIH ŽEPIH IN NASTAJANJE RAZPOK MED SUŠENJEM	xv
PRILOGA I: POSPEŠENO STARANI PRESKUŠANCI	xvi
PRILOGA J: NAČINI PORUŠITVE ZA POSAMEZNE INJEKCIJSKE MEŠANICE IN NASTAJANJE RAZPOK MED SUŠENJEM	xvii
PRILOGA K: RAMAN SPEKTROSKOPIJA POSPEŠENO STARANE INJEKCIJSKE MEŠANICE	xviii
PRILOGA L: REZULTATI SONDIRANJA IN PREGLEDA STANJA OBRAVNAVANE KAPELE NA GMAJNI	xix
PRILOGA M: TESTIRANE INJEKCIJSKE MEŠANICE L₁ S₂B₁ PCE NA TERENU	xxiii
PRILOGA N: UTRJEVANJE ODSSTOPAJOČIH PLASTI OMETOV STENSKE SLIKE	xxvi

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Shematski prikaz prereza skozi klasično stensko sliko: A – kamniti zid; B – omet ravnalec (rinzaffato); C – omet hrapavec (arricciato), na katerega se je narisala podrisba ali sinopija; D – omet glajenec (intonaco); E – omet gladilec; F – barvna plast.....	8
Slika 2.2: Shematski prikaz prereza skozi klasične stenske slike pri nas (levo): A – kamniti zid; B – omet hrapavec (arricciato); C – omet glajenec (intonaco); D – barvna plast. Obstajajo stenske slike (desno), ki jih sestavlja samo ena plast ometa (B) in barvna plast (C).....	10
Slika 2.3: Shematični prikaz karbonatizacije apna v fresko tehniki (Mora in sod., 1984: str. 12). A – kamniti zid; B – omet hrapavec (arricciato); C – omet glajenec (intonaco); D – barvna plast.	11
Slika 2.4: Stenske slike pripadajo velikemu odprtemu fizikalno-kemičnemu sistemu, kar pomeni, da so v stiku z ostalimi gradbenimi elementi (stene, tla, streha) in vpletene v številne fizikalne in kemične procese, pred in po konservatorsko-restavratorskih posegih (Matteini, 1987: str. 138).....	17
Slika 2.5: Shematični prikaz odstopanja grobega ometa (B) od zidu (A) (levo) in finega (C) od grobega (B) ometa (desno).	18
Slika 2.6: Godešič, cerkev sv. Miklavža, odpadanje in odstopanje ometa zaradi delovanja kapilarne vlage (levo). Detajl odstopajoče plasti ometa od stene (desno) (Kavčič, 2008).....	21
Slika 2.7: Godešič, cerkev sv. Miklavža, odstopanje ometa od zidu zaradi potresa in prezidav v preteklosti. Valovita površina stenske slike (levo) in detajl nivojske razpoke zaradi odstopljenega ometa od zidu (desno) (Kavčič, 2015).....	23
Slika 2.8: Soča, cerkev sv. Jožefa, odstopanje ometa zaradi nepravilne priprave površine pred nanosom nove plasti ometa. Detajl nivojske razpoke (levo) in naključvana površina z ostanki beležev, na katero je bila nanešena nova plast ometa s poslikavo (desno).....	24
Slika 2.9: Viteška dvorana, grad Brežice, po konstrukcijskem utrjevanju zidu z injekcijsko maso na cementni osnovi (levo) se je pojavila na površini barvne plasti plesen (desno zgoraj) in izsoljevanje vodotopnih soli (desno spodaj).....	25
Slika 2.10: Vstop na trg in uporaba komercialno dostopnih mešanic v evropskem in slovenskem prostoru, prikazani na časovnem traku.	38
Slika 3.1: Sejalna krivulja kalcitne moke.	50
Slika 3.2: Ultralahko polnilo (levo), votla mikrosfera (desno).	50
Slika 3.3: Shematični prikaz delovanja SP PCE: a) molekula PCE; b) adsorpcija na površino cementnih zrn; c) učinkovitejši sterični odboj že delno hidratiziranih cementnih zrn (Duh, 2008: str. 20).....	52
Slika 3.4: Standardni mešalec Hobart (levo), kuhinjski mešalnik (desno).	53
Slika 3.5: Prikaz določanja spremembe prostornine mešanice zaradi krčenja s plastičnimi cilindričnimi kalupi: A) prazen kalup; B) kalup, napolnjen z mešanico; C) tehtanje strjene mešanice; D) prazen volumen napolnimo s peskom; E) kalup z mešanico in peskom stehtamo.....	57

Slika 3.6: Cilinder za preverjanje stabilnosti injekcijskih mešanic.	58
Slika 3.7: Shematski prikaz metode vodozadržnosti.	59
Slika 3.8: Plošča z odprtimi (levo zgoraj) in zaprtim kanalčkom (levo spodaj) V-oblike. Injiciranje mešanice v kanalček s pomočjo uteži na injekcijskem batu (desno).	63
Slika 3.9: Priprava zračnega žepa, vstavljen PVC vložek debeline 5 mm (levo zgoraj). Model zračnega žepa (levo spodaj). Injiciranje mešanice v zračni žep (desno).	64
Slika 3.10: Sendvič (levo) in načrt sendvičev (desno).	65
Slika 3.11: Apnena skodelica (levo) in načrt apnene skodelice (desno).	66
Slika 3.12: Sejalna krivulja drobljenega apnenega ometa, uporabljenega za preizkus injektibilnosti.	67
Slika 3.13: Grain size distribution of crushed lime mortar for injectability tests.	68
Slika 4.1: Kvalitativni test z injekcijsko brizgo za preverjanje injektibilnosti mešanice.	75
Slika 4.2: Potreba po vodi (v/m) pri pripravi injekcijskih mešanic.	76
Slika 4.3: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic in vidne razpoke.	78
Slika 4.4: Sprememba prostornine mešanic $L_1 S_2$, $L_1 S_2$ PCE in $L_1 S_2$ PPh z metodo apnenih skodelic.	79
Slika 4.5: Sprememba prostornine mešanic $L_1 S_2$, $L_1 S_2$ PCE in $L_1 S_2$ PPh z metodo apnenih skodelic.	80
Slika 4.6: Potreba po vodi (v/m) injekcijskih mešanic za doseganje ustrezne pretočnosti.	85
Slika 4.7: Vodovezivno razmerje (v/v) injekcijskih mešanic.	86
Slika 4.8: Cilindrična posoda, napolnjena z injekcijsko mešanico (levo). Injekcijska brizga, napolnjena z injekcijsko mešanico (desno).	87
Slika 4.9: Shematski prikaz razporeditve delcev v suspenziji: a) stabilna suspenzija; b) počasno posedanje delcev ali izločanje vode na površini; c) povečano izločanje vode; d) ločevanje posameznih delcev v suspenziji – segregacija.	89
Slika 4.10: Stabilnost injekcijskih mešanic brez superplastifikatorja.	90
Slika 4.11: Stabilnost injekcijskih mešanic s PCE superplastifikatorjem.	91
Slika 4.12: Stabilnost injekcijskih mešanic s PPh superplastifikatorjem.	92
Slika 4.13: Injekcijski mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_3$ PPh sta odtekli iz suhih in navlaženih odprtih kanalčkov in se nabrali pod kanalčki.	107
Slika 4.14: Velikost por; gelne pore, kapilarne pore in zračne pore (Thomson in sod., 2004a: str. 77).	116
Slika 4.15: Rezultati meritve kapilarnega srka injekcijskih mešanic v različnih časovnih obdobjih.	121
Slika 4.16: Določitev stopnje karbonatizacije injekcijskih mešanic pri starosti 90 in 365 dni.	129
Slika 4.17: Razmerje med potrebo po vodi (v/n) in stopnjo odprte poroznosti injekcijskih mešanic.	131
Slika 4.18: Razmerje med vodovezivnim razmerjem (v/v) in koeficientom kapilarnega srka.	132
Slika 4.19: Razmerje med stopnjo kapilarnih por in koeficientom kapilarnega srka injekcijskih mešanic.	133

Slika 4.20: Razmerje med stopnjo skupne poroznosti in difuzijsko upornostjo (μ) injekcijskih mešanic.....	134
Slika 4.21: Razmerje med stopnjo skupne poroznosti in tlačno trdnostjo pri starosti 90 dni (levo). Razmerje med stopnjo skupne poroznosti in cepilno natezno trdnostjo pri starosti 90 dni (desno)....	135
Slika 4.22: Modificiran lijak za merjenje pretočnosti injekcijske mešanice (levo) z dimenzijami v mm (desno).....	138
Slika 4.23: Injektabilnost injekcijskih mešanic, pripravljenih s kuhinjskim mešalnikom.....	140
Slika 4.24: Injektabilnost injekcijskih mešanic $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, pripravljenih s kuhinjskim mešalnikom.....	141
Slika 4.25: Injektabilnost injekcijskih mešanic, pripravljenih s standardnim Hobart mešalnikom. ...	142
Slika 4.26: Vicatova metoda, merjenje končnega časa vezanja injekcijskih mešanic z modificiranim kalupom (levo) in apneno skodelico (desno).....	144
Slika 4.27: Čas vezanja injekcijskih mešanic po standardizirani metodi s prilagojenim kalupom in apneno skodelico.	145
Slika 4.28: In-situ metoda (levo), merjenje končnega časa vezanja injekcijskih mešanic s pomočjo injekcijske brizge in igle brez konice (desno).	145
Slika 4.29: In-situ metoda časa strjevanja injekcijskih mešanic, vgrajenih v odprte suhe/navlažene in zaprte suhe/navlažene apnene skodelice.....	146
Slika 4.30: Prikaz načina porušitve (rdeča linija): a) in b) adhezijska porušitev na stiku mešanice in podlage; c) kohezijska porušitev v mešanici; d) kohezijska porušitev v podlagi.	148
Slika 4.31: Mešanica RC, ki ni zapolnila 2 mm visokega zračnega žepa (levo). Nastale razpoke med sušenjem mešanice $L_1 S_3$ (desno).....	150
Slika 4.32: Vodovpojnost injekcijskih mešanic v zračnih žepih višine 2 in 5 mm.....	153
Slika 4.33: Cikel zmrzovanja/tajanja in segrevanja/ohlajanja.	155
Slika 4.34: Pospešeno staran sendvič z mešanico $L_1 S_2 B_1$ PCE (levo). Akumulacija in eflorescenca soli na zgornji (desno zgoraj) in stranski (desno srednje) ploskvi finega ometa. Razpadanje ometa zaradi eflorescence vodotopnih soli (desno spodaj).....	160
Slika 4.35: Pospešeno staran sendvič z mešanico RC (levo). Akumulacija in eflorescenca soli med mejno ploskvijo grobega ometa in RC mešanico (desno).	161
Slika 4.36: Razmerje med razlezom in pretočnostjo injekcijskih mešanic s superplastifikatorjem. ..	164
Slika 4.37: Primerjava sprijemne trdnosti na 90 dni starih mešanicah, vgrajenih v zračne žepe, in na sendvičih.....	166
Slika 4.38: Primerjava koeficienta vodovpojnosti preskušancev in injekcijskih mešanic, vgrajenih v 2 in 5 mm visoke zračne žepe pri 15-ih minutah.....	167
Slika 4.39: Primerjava tlačnih trdnosti injekcijskih mešanic, starih 90 in 365 dni ter pospešeno staranih mešanic.	169

Slika 5.1: Kapela na gmajni v Šetarovi pri Lenartu v Slovenskih goricah, rdeč kvadrat označuje mesto stenske slike v notranjosti (levo). Notranjost kapele: na levi strani je sv. Lenart, na desni strani pa sv. Frančišek (desno).	176
Slika 5.2: Označena lokacija izbranega področja.	178
Slika 5.3: Označeni del odstopajočih plasti ometov z metodo s trkanjem.	179
Slika 5.4: Merilna mesta z mikroskopskim sistemom HIROX KH 3000 in mesta odvzema vzorcev.	179
Slika 5.5: Meritve širine razpok.	180
Slika 5.6: Razpoka, merilno mesto M1, 50x povečava. Multifokalna slika (levo zgoraj).....	180
Slika 5.7: Razpoka, merilno mesto M3, 100x povečava. Multifokalna slika (levo zgoraj).....	181
Slika 5.8: Fotografija z označeno lokacijo termografske meritve (levo), temperaturna slika po 30-ih s končanega gretja (desno).....	182
Slika 5.9: Združena metoda s trkanjem in označenimi razpokami.	183
Slika 5.10: Združena metoda s trkanjem in termografska meritev.	183
Slika 5.11: Mikroskopska slika vzorca ometa (V1). Splošne slike, 5x in 10x povečave, PPT (levo). Splošne slike, 5x in 10x povečave, XPT (desno).	185
Slika 5.12: FTIR spekter vzorca V2.	186
Slika 5.13: FTIR spekter vzorca V2.	186
Slika 5.14: Označene lokacije injiciranja mešanice.	190
Slika 5.15: Preverjanje kakovosti utrjevanja z metodo s trkanjem.	192
Slika 5.16: Preverjanje kakovosti utrjevanja s termografsko meritvijo.	192
Slika 5.17: Združena metoda s trkanjem in termografska meritev po utrjevanju.	193

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Primerne instrumentalne tehnike za analizo originalnih ometov.	15
Preglednica 2.2: Splošne lastnosti apnenih historičnih ometov.	16
Preglednica 2.3: Sestava injekcijskih mešanic v Sloveniji od 1950 do 2014.	31
Preglednica 2.4: Lastnosti injekcijske mase v obliki pene (Ettl, 2005: str. 19).	35
Preglednica 2.5: Lastnosti injekcijskih mas Ledan TB1 (Kremer, 2014) in Ledan TC1-PLUS (Toscana, 2015).	39
Preglednica 2.6: Lastnosti injekcijske mešanice Albaria Inizione 100 (MAC, 1992).	40
Preglednica 2.7: Lastnosti injekcijske mase John M40 (Jahn, 2012).	40
Preglednica 2.8: Lastnosti injekcijske mase Mape Antique F21 (Mapei, 2012).	41
Preglednica 2.9: Lastnosti injekcijske mešanice PLM-M (Rousset in sod., 2005).	42
Preglednica 2.10: Lastnosti injekcijske mešanice na osnovi proizvoda Calosil paste-like (Maryniak-Piaszczyński in Ziegenbalg, 2010).	43
Preglednica 3.1: Splošne zahteve za nekonstrukcijske injekcijske mešanice.	46
Preglednica 3.2: Kemična sestava in lastnosti hidratiziranega apna (IGM, 2005).	48
Preglednica 3.3: Kemijska sestava tufa in apnenčeve moke v masnih deležih (%).	49
Preglednica 3.4: Gostote uporabljanih materialov	49
Preglednica 3.5: Število pripravljenih preskušancev za posamezne teste strnjenih mešanic.	55
Preglednica 3.6: Laboratorijski testi za preverjanje lastnosti na sveže pripravljenih injekcijskih mešanicah.	56
Preglednica 3.7: Laboratorijski testi za strjene injekcijske mešanice.	59
Preglednica 3.8: Seznam in-situ testov z modifikacijami.	61
Preglednica 3.9: Lastnosti apnenih ometov.	68
Preglednica 4.1: Sestava injekcijskih mešanic z različnim razmerjem vezivo : polnilo. Potreba po vodi je izražena v v/m.	73
Preglednica 4.2: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic z različnim razmerjem vezivo : polnilo in obseg razpok zaradi sušenja.	77
Preglednica 4.3: Sestava injekcijskih mešanic z dodanim ultralahkim polnilom.	83
Preglednica 4.4: Sestava injekcijskih mešanic z dodanim tufom.	84
Preglednica 4.5: Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice.	88
Preglednica 4.6: Izločanje vode v % po 3 urah.	93
Preglednica 4.7: Meritve razleza injekcijskih mešanic.	95
Preglednica 4.8: Sposobnost zadrževanja vode injekcijskih mešanic.	96
Preglednica 4.9: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic.	98
Preglednica 4.10: Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic.	100

Preglednica 4.11: Razporeditev injekcijskih mešanic glede na vrste razpok, nastale med sušenjem v apnenih skodelicah.	102
Preglednica 4.12: Razvrstitev injekcijskih mešanic glede na injektabilnost z injekcijsko brizgo.	104
Preglednica 4.13: Razvrstitev injekcijskih mešanic glede na tečenje na apnenih ploščah s kanalčki.	108
Preglednica 4.14: Povzetek rezultatov in klasifikacija lastnosti sveže pripravljenih injekcijskih mešanic.	109
Preglednica 4.15: Povzetek rezultatov in klasifikacija lastnosti in-situ testov injektabilnosti in pretočnosti.	112
Preglednica 4.16: Prostorninska masa strjenih injekcijskih mešanic pri starosti 90 dni.	115
Preglednica 4.17: Stopnja poroznosti injekcijskih mešanic pri starosti 90 dni negovanja.	118
Preglednica 4.18: Rezultati meritev kapilarnega srka (kg/m^2) s pripradajočim koeficientom kapilarnega srka ($\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$).	120
Preglednica 4.19: Difuzijska upornost (μ).	124
Preglednica 4.20: Rezultati preiskav tlačne trdnosti injekcijskih mešanic pri starosti 90 in 365 dni.	125
Preglednica 4.21: Rezultati preiskav cepilne natezne trdnosti injekcijskih mešanic pri starosti 90 dni.	127
Preglednica 4.22: Povzetek kriterijev in klasifikacija lastnosti strjenih injekcijskih mešanic.	130
Preglednica 4.23: Izmerjene vrednosti pretočnosti injekcijskih mešanic takoj po zamešanju in preteku 30 min.	138
Preglednica 4.24: Meritve sprijemne trdnosti na modelih zračnih žepov pri starosti 90 dni.	148
Preglednica 4.25: Koeficient vodovpojnosti injekcijskih mešanic v zračnih žepih višine 2 in 5 mm po 15-ih minutah.	154
Preglednica 4.26: Rezultati preiskav tlačne trdnosti pospešeno staranih injekcijskih mešanic.	157
Preglednica 4.27: Sprijemna trdnost referenčnih in pospešeno staranih sendvičev.	159
Preglednica 4.28: Povzetek rezultatov in klasifikacija lastnosti injekcijskih mešanic detajlnih preiskav.	163
Preglednica 4.29: Povzetek rezultatov in klasifikacija sprijemne trdnosti injekcijskih mešanic na zračnih žepih in sendvičih.	165
Preglednica 4.30: Povzetek in ovrednotenje pospešeno staranih preskušancev.	168
Preglednica 5.1: Lastnosti injekcijske mešanice $L_1 S_2 B_1$ PCE, testirane na terenu.	189
Preglednica 6.1: Kriteriji lastnosti sveže pripravljenih in strjenih injekcijskih mešanic.	196
Preglednica 6.2: Sinteza in-situ testov za preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic na terenu.	197

KAZALO SHEM

Shema 3.1: Potek zasnove kompatibilnih injekcijskih mešanic.	45
Shema 4.1: Zasnova raziskovalnega programa.....	72
Shema 4.2: Potek 1. sklopa, preliminarne preiskave.	74
Shema 4.3: Potek 2. sklopa, razvoj injekcijskih mešanic.	82
Shema 4.4: Potek 3. sklopa, karakteristika strjenih injekcijskih mešanic.	114
Shema 4.5: Potek 4. sklopa, detajlne preiskave injekcijskih mešanic.	137

LIST OF FIGURES

Figure 2.1: Schematic representation of the stratigraphy of a typical wall painting: A- stone wall; B- rinzaffato; C- arricciato, with preparatory drawing or sinopia; D- intonaco; E- final glazing plaster; F- paint layer.....	8
Figure 2.2: Schematic representation of the stratigraphy of a typical wall painting in Slovenia (left): A- stone wall; B- arricciato; C- intonaco; D- paint layer. There are also examples of wall paintings (right), made of A- stone wall; B- one layer of plaster; C- paint layer.	10
Figure 2.3: Scheme of lime carbonation of the fresco technique (Mora in sod., 1984: p 12). A- stone wall; B- arriccio; C- intonaco; D- paint layer.	11
Figure 2.4: Wall paintings constitute part of an open physicochemical system in which their situation gradually and continually evolves due to their contiguity with other elements of a building, before and after conservation interventions (Matteini, 1987: p 138).	17
Figure 2.5: Schematic representation of a detachment between the wall (A) and the arriccio (B) (left) and between the arriccio (B) and the intonaco (C) (right).	18
Figure 2.6: Godešič, St. Nicholas Church, lost and detached plaster layer from the wall (left) because of capillary rising damp. A detail of detached plaster layer from the wall (right) (Kavčič, 2008).	21
Figure 2.7: Godešič, St. Nicholas Church, detached plaster layer from the wall because of earthquake and rebuildings in the past. The corrugated surface of the wall painting (left) and a detail of a leveling crack caused by the detached plaster from the wall (right) (Kavčič, 2015).	23
Figure 2.8: Soča, St. Joseph Church, detached plaster layer due to improper surface preparation before applying a new layer of plaster. A detail of a leveling crack (left) and pecking area with the remains of paint layers to which a new layer of plaster with painting is applied (right).	24
Figure 2.9: The Knights' Hall in the Castle of Brežice, after construction consolidation of the wall with cement based grout (left), mould and soluble salts deposition appeared on the paint surface (bottom right).	25
Figure 2.10: Introduction to the market and use of commercial grouts in Europe and in Slovenia, shown on the timescale.	38
Figure 3.1: Grain size distribution of limestone filler.	50
Figure 3.2: Ultra-light filler (left), hollow microsphere (right).	50
Figure 3.3: Mechanism of PCE superplasticizer's action: a) longer surfactant chains; b) adsorption; c) more effective steric repulsion of partially hydrated cement particles (Duh, 2008: p 20).	52
Figure 3.4: Hobart mixer (left), kitchen mixer (right).	53
Figure 3.5: Illustration of volume shrinkage measurement with the plastic cylindrical mould method: 1. Empty plastic mould; 2. Mould filled with grout; 3. Mould with hardened grout is weighed; 4. Empty volume is filled with sand; 5. Plastic mould with sand and grout is weighed.	57

Figure 3.6: Cylinder for stability evaluation of injection grouts.	58
Figure 3.7: Schematic representation of the water retentivity method.	59
Figure 3.8: Plastered tile with open (top left) and closed (bottom left) V-shaped channels. Injection of grout into a channel with weight on the plunger of syringe (right).	63
Figure 3.9: Preparation of an air pocket, PVC plate with thickness of 5 mm (top left). The model of an air pocket (bottom left). Injecting the mixture into the air pocket (right).	64
Figure 3.10: Sandwich (left) and scheme of sandwiches (right).	65
Figure 3.11: Mortar cup (left) and scheme of the cup (right).	66
Figure 3.12: Grain size distribution of coarse (left) and fine (right) limestone aggregate.	67
Figure 3.13: Grain size distribution of coarse (left) and fine (right) limestone aggregate.	68
Figure 4.1: Qualitative test of injectability of grout mixture with syringe.	75
Figure 4.2: Water-binder ratio used for preparation of injection grouts.	76
Figure 4.3: Change in volume of injection grouts and visible drying shrinkage cracks.	78
Figure 4.4: Drying shrinkage of injection grouts L1 S2, L1 S2 PCE in L1 S2 PPh with mortar cups.	79
Figure 4.5: Drying shrinkage of injection grouts L1 S2, L1 S2 PCE in L1 S2 PPh with mortar cups.	80
Figure 4.6: Water demand (v/m) of injection grouts in order to achieve adequate fluidity.	85
Figure 4.7: Water-binder ratio (v/v) of injection grouts.	86
Figure 4.8: Cylindrical cup filled with injection grout (left). Syringe filled with grout (right).	87
Figure 4.9: Schematic presentation of suspension equilibrium: a) perfectly stable; b) slight bleeding; c) excessive bleeding; d) segregation.	89
Figure 4.10: Stability of injection grouts without superplasticizer.	90
Figure 4.11: Stability of injection grouts with PCE superplasticizer.	91
Figure 4.12: Stability of injection grouts with PPh superplasticizer.	92
Figure 4.13: The grouts L1 S3 PCE and L1 S3 PPh are collected at the bottom of open dry and pre-wetted channels.	107
Figure 4.14: Pore size classification. The pore ranges of sorption, capillary and coarse pores are illustrated (Thomson et al., 2004a: p 77).	116
Figure 4.15: Results of water absorption in different time periods.	121
Figure 4.16: Determination of the carbonation degree of injection grouts at the age of 90 and 365 days.	129
Figure 4.17: Relationship between water/(binder+filler) ratio and open porosity of injection grouts.	131
Figure 4.18: Relationship between water/binder ratio and water absorption coefficient.	132
Figure 4.19: Relationship between capillary porosity and water absorption coefficient of injection grouts.	133
Figure 4.20: Relationship between open porosity and factor of resistance to water vapour diffusion (μ) of injection grouts.	134

Figure 4.21: Relationship between open porosity and compressive strength at the age of 90 days (left). Relationship between open porosity and splitting tensile strength at the age of 90 days (right).	135
Figure 4.22: Modified Marsh cone for measuring fluidity of injection grouts (left), with dimensions in mm (right).	138
Figure 4.23: Injectability curves for injection grouts prepared with kitchen mixer.....	140
Figure 4.24: Injectability curves for injection grouts L1 S2B1 PCE in L0,8T0,2 S3 PCE prepared with kitchen mixer.....	141
Figure 4.25: Injectability curves for injection grouts prepared with Hobart mixer.....	142
Figure 4.26: Vicat method, measuring the final setting time of injection grouts with modified mould (left) and mortar cup (right).	144
Figure 4.27: Vicat method, final setting time of injection grouts with modified mould and mortar cup.	145
Figure 4.28: Field method (left), measuring the final setting time of injection grouts with syringe with blunt cannula (right).....	145
Figure 4.29: Field method, final setting time of injection grouts injected into open dry/pre-wetted and close dry/pre-wetted mortar cups.	146
Figure 4.30: Fracture pattern (red line): a) and b) Adhesion fracture, at the interface between grout and substratum; c) Cohesion fracture in the grout itself; d) Cohesion fracture in the substratum mortar.	148
Figure 4.31: The RC grout not filling the whole 2 mm high air pocket (left). Drying shrinkage cracks of the grout L1 S3 (right).	150
Figure 4.32: Water absorption of injection grouts in 2 mm and 5 mm high air pockets.....	153
Figure 4.33: Freezing-thawing and heating-cooling cycles.	155
Figure 4.34: Sandwich with the injection grout L1 S2B1 PCE after accelerated ageing (left). Accumulations and efflorescences of salts at the upper and side surface of fine plaster (right upper, middle). Degradation of plaster because of efflorescences of salts (right bottom).	160
Figure 4.35: Sandwich with the RC injection grout after accelerated ageing (left). Accumulations and efflorescences of salts at the rough plaster-injection mixture RC interface (right).....	161
Figure 4.36: Relationship between mini slump and fluidity of grouts with superplasticizer.....	164
Figure 4.37: Comparison of adhesive strength on the models of air pockets at the age of 90 days and sandwiches.	166
Figure 4.38: Comparison of water absorption coefficient of samples and injection grouts in 2 mm and 5 mm high air pockets at the time of 15 minutes.	167
Figure 4.39: Comparison of compressive strength of injection grouts at the age of 90 and 365 days and injection grouts after accelerated ageing.	169

Figure 5.1: Chapel in Šetarova at Lenart in Slovenske gorice, red square indicates the position of the wall painting in the interior (left). The interior of the chapel: St. Leonard on the left, St. Francis on the right (right).	176
Figure 5.2: Selected part of the wall painting.....	178
Figure 5.3: Marked detached plaster layers evaluated by the tapping method.....	179
Figure 5.4: Measurement points with the HIROX KH 3000 microscope system and the place of taken samples.	179
Figure 5.5: Measurement of width of the cracks.	180
Figure 5.6: Crack measurement point M1 50x magnification. Multifocus image (top left). Topography image (top right). 3D image (bottom left). Profile (bottom right).....	180
Figure 5.7: Crack measurement point M1 50x magnification. Multifocus image (top left). Topography image (top right). 3D image (bottom left). Profile (bottom right).....	181
Figure 5.8: Marked locations of thermographic measurement (left), the temperature image after 30 s of heating (right).....	182
Figure 5.9: Combined method by tapping and marked cracks.	183
Figure 5.10: Combined method by tapping and thermographic measurement.....	183
Figure 5.11: Microscopic image of mortar (V1). Images of the sample, 5x and 10 x magnification, PPT (left). Images of the sample, 5x and 10x magnification, XPT (right).....	185
Figure 5.12: FTIR spectra of the sample V2.	186
Figure 5.13: FTIR spectra of the sample V2.	186
Figure 5.14: Injection points.....	190
Figure 5.15: Checking the quality of consolidation with the tapping method.....	192
Figure 5.16: Checking the quality of consolidation with the thermographic measurement.	192
Figure 5.17: Combined method by tapping and thermographic measurement after consolidation....	193

LIST OF TABLES

Table 2.1: Common instrumental methods for characterization of original plasters.	15
Table 2.2: General characteristics of historic lime plasters.	16
Table 2.3: Composition of injection grouts in Slovenia from 1950 to 2014.	31
Table 2.4: Properties of injection foam grout (Ettl, 2005: p 19).	35
Table 2.5: Properties of injection grouts Ledan TB1(Kremer, 2014) and Ledan TC1-PLUS (Toscana, 2015).	39
Table 2.6: Properties of injection grout Albaria Inizione 100 (MAC, 1992).	40
Table 2.7: Properties of injection grout John M40 (Jahn, 2012).	40
Table 2.8: Properties of injection grout Mape Antique F21 (Mapei, 2012).	41
Table 2.9: Properties of injection grout PLM-M (Rousset in sod., 2005).	42
Table 2.10: Properties of injection grout based on Calosil pasta-like (Maryniak-Piaszczyński and Ziegenbalg, 2010).	43
Table 3.1: Basic requirements for non-construction injection grouts.	46
Table 3.2: Chemical composition and properties of hydrated lime (IGM, 2005).	48
Table 3.3: Chemical composition of trass and calcit filler in % by mass.	49
Table 3.4: Density of materials.	49
Table 3.5: Number of prepared specimens for each test of hardened properties.	55
Table 3.6: Laboratory tests for the evaluation of working properties.	56
Table 3.7: Laboratory tests for the evaluation of hardened properties.	59
Table 3.8: List of in-situ tests with modifications.	61
Table 3.9: Properties of lime mortars.	68
Table 4.1: Composition of injection grouts with different binder : filler ratio. Water-binder ratio is expressed in v/m.	73
Table 4.2: Change in volume of injection grouts with different binder-filler ratio and extent of drying cracks.	77
Table 4.3: Composition of injection grouts with ultralight filler.	83
Table 4.4: Composition of injection grouts with trass.	84
Table 4.5: Bulk density of freshly prepared injection grouts.	88
Table 4.6: Bleeding in % after 3 hours.	93
Table 4.7: Results of mini slump for injection grouts.	95
Table 4.8: Water retentivity of injection grouts.	96
Table 4.9: Change in volume of injection grouts.	98
Table 4.10: Drying shrinkage of injection grouts with mortar cups.	100
Table 4.11: Arranging of the injection grouts according to the type of cracks generated during drying in mortar cups.	102

Table 4.12: Classification of injectability of injection grouts with syringes.	104
Table 4.13: Classification of the flow of injection grouts on plastered tile with channels.....	108
Table 4.14: Summary of results and classification of working properties.	109
Table 4.15: Summary of results and classification of in-situ method for injectability and flow.....	112
Table 4.16: Bulk density of hardened injection grouts at the age of 90 days.	115
Table 4.17: Porosity characteristics of injection grouts at the age of 90 days.	118
Table 4.18: Results of water absorption (kg/m ²) with water absorption coefficient (kg/(m ² √min)).	120
Table 4.19: Factor of resistance to water vapour diffusion (μ).	124
Table 4.20: Compressive strength of injection grouts at the age of 90 and 365 days.....	125
Table 4.21: Splitting tensile strength of injection grouts at the age of 90 days.	127
Table 4.22: Summary of criteria and classification of hardened properties.	130
Table 4.23: Measured values of fluidity of injection grouts immediately after preparation and after 30 min.....	138
Table 4.24: Adhesive strength on the models of air pockets at the age of 90 days.	148
Table 4.25: Water absorption coefficient of injection grouts in 2mm and 5 mm high air pockets after 15 minutes.	154
Table 4.26: Compressive strength of injection grouts after accelerated ageing.	157
Table 4.27: Adhesive strength of sandwiches without and after accelerated ageing.....	159
Table 4.28: Summary of results and classification of detail properties of injection grouts.....	163
Table 4.29: Summary of results and classification of adhesive strength of injection grouts on the models of air pockets and sandwiches.....	165
Table 4.30: Summary of compressive strength results and classification of injection grouts after accelerated ageing.	168
Table 5.1: Properties of injection mixture L1 S2B1 PCE tested at the field.	189
Table 6.1: Characteristics of fresh and hardened injection grout properties.	196
Table 6.2: Synthesis of field tests to evaluate injection grouts properties at the field.....	197

LIST OF SCHEME

Scheme 3.1: Diagram of steps in designing compatible injection grouts.	45
Scheme 4.1: Planning of experimental programme.	72
Scheme 4.2: Planning of the 1st phase, preliminary research.	74
Scheme 4.3: Planning of the 2nd phase, development of injection grouts.	82
Scheme 4.4: Planning of the 3rd phase, characteristics of injection grouts.	114
Scheme 4.5: Planning of the 4th phase, detailed research of injection grouts.	137

KRATICE IN SIMBOLI

<i>OM</i>		optična mikroskopija
<i>PLM</i>		polarizacijski optični mikroskop
<i>FTIR</i>		Fourierjeva transformacijska infrardeča spektroskopija
<i>EDS</i>		energijsko disperzivna rentgenska spektroskopija
<i>SEM</i>		vrstična elektronska mikroskopija
<i>XRD</i>		praškovna difrakcijska rentgenska analiza
<i>TGA</i>		termična gravimetrijska analiza
<i>RAMAN</i>		ramanska mikroskopija
<i>PPT</i>		optična mikroskopija, presevna svetloba, vzporedni nikoli
<i>XPT</i>		optična mikroskopija, presevna svetloba, navzkrižni nikoli
<i>FRF</i>		frekvenčna odzivna funkcija
<i>ESPI</i>		elektronska interferometrija s pikčastim vzorcem
<i>ICCROM</i>		International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property
<i>ZVKDS RC</i>		Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Restavratorski center
<i>GCI</i>		Getty Conservation Institute
<i>SP</i>		superplastifikator
<i>PCE</i>		superplastifikator na osnovi polikarboksilata
<i>PPh</i>		superplastifikator na osnovi polifosfonata
stdev		standardni odklon ali standardna deviacija
<i>E</i>		enostavno
<i>F</i>		izvedljivo
<i>D</i>		težavno
<i>L</i>		krajša razdalja
<i>M</i>		srednja razdalja
<i>H</i>		daljša razdalja
<i>Sta</i>		stabilnost
<i>IzV</i>		izločanje vode
ΔV	%	sprememba prostornine
V_p	g	prostornina dodanega peska med strnjeno injekcijsko maso in robovi kalupa
V_z	g	prostornina začetne mase
W_4	%	relativna izguba vode (%),
W_2	g	vsebnost vode v mešanici
W_3	g	masa absorbirane vode
<i>WRV</i>	%	vodozadržnost
ρ_{sv}	g/cm ³	prostorninska masa sveže injekcijske mešanice
m_1	g	masa prazne posode

m_2	g	masa posode skupaj z mešanico
V_C	ml	prostornina posode
V	ml	prostornina mešanice pred pričetkom merjenja
V_2	ml	prostornina vode nad mešanico po pretoku 3 ur
ρ_{sv}	g/cm^3	prostorninska masa sveže injekcijske mešanice
ρ_{st}	g/cm^3	prostorninska masa strnjene injekcijske mešanice
m	g	masa strnjjenega preskušanca
V_{st}	cm^3	prostornina preskušanca
n	%	stopnja skupne poroznosti
V_p		prostornina por
V_C		prostornina snovi
m_{TOTo}	g	masa mokrega vzorca po izsesanem zraku iz eksikatorja
m_{110}	g	masa suhega vzorca po končanem testu
ρ_w	g/cm^3	prostorninska masa vode
V_E	cm^3	volumen preskušanca
U_e	%	stopnja kapilarnih por
m_{Eo}	g	masa mokrega vzorca po 96 urah potopitve v vodi
m_{110}	g	masa suhega vzorca po končanem testu
ρ_w	g/cm^3	prostorninska masa vode
V_E	cm^3	volumen preskušanca
LP	%	stopnja zračnih por
m	kg/m^2	kapilarni srk na enoto površine
A	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$	koeficient kapilarnega srka vode
t	min	čas
μ	(1)	difuzijska upornost prehoda vodne pare
δ_a	$\text{kg/m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$	difuzijski koeficient vodne pare v zraku
δ	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$	difuzijska prepustnost materiala za vodno paro
f_{c90}	MPa	tlačna trdnost pri 90 dneh
f_{c365}	MPa	tlačna trdnost pri 365 dneh
F	kN	maksimalna dosežena sila
A	mm^2	obremenjena površina preskušanca
f_{st}	MPa	cepilna natezna trdnost
d	mm	premer preskušanca
l	mm	dolžina preskušanca
f_u	MPa	sprjemna trdnost
F_u	kN	sila pri porušitvi

k	$\text{g}/(\text{cm}^2\sqrt{\text{min}})$	koeficient vodovpojnosti
m_v	g	masa vode
S	cm^2	površina, skozi katero omet vpija vodo po standardu ($4,91 \text{ cm}^2$)
t	min	čas po standardu (15 minut)

1 UVOD

1.1 Predstavitev problematike

Stenske slike predstavljajo krhek del evropske in slovenske kulturne dediščine, saj so zaradi fizične in estetske povezanosti z arhitekturo ranljive. V večjem delu Evrope in Slovenije izvedba stenske slike temelji na apnenem vezivu oziroma svežih apnenih ometih, ki so naneseni na nosilec, ki ga predstavlja kamnit ali opečnat zid. Omet so praviloma nanašali v dveh plasteh, in sicer najprej grobo plast (arriccio) in nanjo še fino plast (intonaco). Slikali so na svežo plast finega ometa, saj se pigmenti med procesom sušenja apnenega veziva in karbonatizacije povežejo z ometom.

V preteklosti so posebno pozornost posvečali tehniki in tehnologiji izvedbe stenske slike, saj so se zavedali, da vsaka nepravilna izbira materiala in nepravilna izvedba priprave ter nanosa ometa na steno vpliva na kvaliteto in obstojnost stenske slike.

Skozi čas so bili stenske slike in zgodovinski materiali, ki so prisotni v stenski sliki, ogroženi in poškodovani na različne načine, zaradi različnih lastnosti se namreč na vplive iz okolja odzovejo različno.

Pogosta poškodba, ki je prisotna na stenskih slikah, je ločitev ometov od nosilca ali odstopanje finega od grobega ometa. Najpogostejši vzroki za odstopanje plasti ometov in nastajanje zračnih žepov so temperaturne spremembe, zmrzal in nihanje relativne vlage ter s tem povezani škodljivi vplivi, kot so različno deformiranje plasti, kristalizacija vodotopnih soli, biodegradacija idr. Poškodbe lahko povzročijo tudi mehanski vplivi (vibracije, posedanje tal in potresna obtežba) in nepravilna tehnična oziroma tehnološka izdelava stenske slike.

Prav tako imajo velik vpliv na stanje stenskih slik konservatorsko-restavratorski posegi na stenski sliki ali posegi v zidu, kot je utrjevanje zidu s sistematičnim konstrukcijskim injektiranjem, s katerim se želi zlepiti posamezne gradnike v zidu v čim bolj homogeno celoto in s tem izboljšati mehanske lastnosti zidu.

Konsolidacija odstopljenih plasti historičnih ometov z nekonstrukcijskim injektiranjem (injekcijsko brizgo) je ireverzibilna metoda, ki omogoča ponovno stabilizacijo strukturne celovitosti stenskih slik.

Injektiranje mešanice z injekcijsko brizgo je razširjena konservatorska metoda, ki omogoča kakovostno zapolnjevanje zračnih žepov in razpok pri nižjih delovnih pritiskih, z namenom preprečitve nastajanja novih poškodb med samim postopkom injektiranja.

Konservatorji-restavratorji za stabilizacijo odstopajočih plasti ometov so in še uporabljajo različne pristope, pri čemer so eni bolj in drugi manj agresivni do stenske slike. Eden od teh pristopov je uporaba injekcijske mase, ki lahko s svojimi mehansko-fizikalnimi lastnostmi vpliva na nadaljnji obstoj stenske slike. Tem masam je praviloma skupno: visoka vsebnost vode v vezivu, vnašanje

dodatne teže in vlažnosti v konstrukcijo, segregacija in sedimentacija injekcijskih materialov, omejeno področje prilagajanja lastnosti in parametrov trdnosti/gostote lastnostim originalnih materialov.

Za uspešno konsolidacijo odstopajočih plasti ometov je ključen celovit pristop h konserviranju-restavriranju stenskih slik in poznavanje tehnologije izdelave in lastnosti večslojnih historičnih materialov ter njihovega medsebojnega delovanja s strani restavratorja. Velikokrat so nepravilne intervencije in neprimerne izbire sanacijskih materialov povezane z nepoznavanjem materialov. Vnašanje neprimernih materialov pa lahko vodi do uničenja vezi in ravnovesja med izvirnimi materiali ter povzroča nadaljnje poškodbe na dragocenih stenskih slikah.

1.2 Definiranje izhodišč in ciljev doktorske disertacije

Zavedajoč se, da je konsolidacija odstopajočih plasti ometov ireverzibilen postopek, od katerega je lahko odvisen obstoj stenske slike, in ob dejstvu, da ni razvitih primernih metod za preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic, postaja pristop k nekonstrukcijskemu injektiranju v Evropi pomembna tema. V ta namen se je v okviru tehničnega odbora 243 – Specifikacije za nekonstrukcijsko injektiranje zgodovinskih zidov in arhitekturnih površin pri mednarodni organizaciji RILEM (Mednarodno združenje laboratorijev in ekspertov s področja gradbenih materialov, sistemov in konstrukcij) povezala skupina strokovnjakov iz Evrope in ZDA, s katero sem sodelovala pri preizkušanju in vrednotenju primernosti standardnih in nestandardnih metod za področje nekonstrukcijskega injektiranja.

Na podlagi praktičnih izkušenj, ki sem jih pridobila z večletnim sodelovanjem pri konserviranju-restavriranju stenskih slik na različnih objektih kulturne dediščine v Sloveniji in pri spremljajočih laboratorijskih analizah historičnih materialov, lahko rečem, da za sanacijo odstopajočih plasti ometov s poslikavami še vedno ni materiala in/ali tehnologije, ki bi izpolnila vse predpisane zahteve glede kakovosti in obstojnosti saniranega ometa s poslikavo.

Osnovni namen stabilizacije odstopajočih slojev historičnih ometov z injekcijskimi mešanicami je preprečiti nadaljnje poškodbe historičnih ometov z zapolnitvijo nastalih zračnih žepov in razpok ter tako ponovno vzpostaviti strukturno celovitost stenske slike. V ta namen uporabljene injekcijske mešanice bi morale biti kompatibilne z originalnimi historičnimi materiali po kemičnih, fizikalnih in mehanskih lastnostih. Poleg tega pa morajo imeti injekcijske mešanice tudi ustrezne lastnosti v svežem stanju (obdelovalnost), predvsem ustrezno stabilnost, pretočnost, injektabilnost in sposobnost lepljenja.

Namen doktorske disertacije je razvoj pristopa k zasnovi injekcijskih mešanic, ki bodo kompatibilne z originalnimi materiali ter obstojne, istočasno pa bodo izpolnjevale tudi specifične zahteve glede materialov za nekonstrukcijsko injiciranje, kot sta na primer nizka lastna teža in zmanjšana količina vode. Pri izbiri osnovnega veziva, hidratiziranega apna, sem izhajala iz rezultatov neporušnih in delno

porušnih preiskav originalnih materialov stenske slike in predhodnega pregleda slovenske in evropske konservatorske-restavratorske prakse.

Zasnova novih kompatibilnih nekonstrukcijskih injekcijskih mešanic zahteva uporabo učinkovitih metod za preverjanje ključnih lastnosti teh mešanic v laboratoriju in na terenu s strani restavratorjev. Ker za konservatorsko-restavratorsko področje standardne preiskave materialov ne obstajajo, se v praksi velikokrat uporabijo materiali, katerih kompatibilnost z originalnim historičnim materialom ni dokazana. Standardni testi, ki so na voljo in se v manjši meri tudi uporabljajo, so namenjeni uporabi na področju industrije gradbenih materialov (malt, sintetičnih smol, mineralnih veziv, cementnih injekcijskih mešanic za prednapete kable ...). Za testiranje injekcijskih mešanic za konservatorsko-restavratorsko področje je treba te teste najprej modificirati in preveriti njihovo učinkovitost.

V doktorski disertaciji sem za ovrednotenje lastnosti injekcijskih mešanic uporabila relevantne standardne metode s področja preizkušanja gradbenih materialov, ki sem jih največkrat modificirala tako, da so primernejše za manjše količine materiala, ki se pripravi za nekonstrukcijsko injektiranje. Poleg teh sem uporabila tudi novo razvite metode, namenjene posebej nekonstrukcijskim injekcijskim mešanicam. Novo razvite metode so namenjene predvsem preverjanju lastnosti injekcijskih mešanic na terenu.

Sledil je razvoj kompatibilnih injekcijskih mešanic s hidratiziranim apnom kot glavnim ali edinim vezivom ter z različnimi polnili in kemijskimi dodatki za zmanjšanje količine vode, s pomočjo obsežnega programa modificiranih laboratorijskih in razvitih in-situ preiskav. Na podlagi dobljenih rezultatov sem kritično ovrednotila lastnosti razvitih injekcijskih mešanic in izbrala tiste, ki so izpolnile največ postavljenih kriterijev.

Cilji doktorske disertacije so sledeči:

- razviti kompatibilne injekcijske mešanice na osnovi apnenega veziva in dodatkov, ki bodo primerne za utrjevanje odstopajočih plasti ometov;
- prilagoditi standardizirane metode in razviti nove metode, ki bi bile primerne za področje nekonstrukcijskega injektiranja in za hitro preverjanje ključnih lastnosti injekcijskih mešanic na terenu;
- ovrednotiti rezultate eksperimentalnih preiskav na svežih in strnjenih injekcijskih mešanicah ter preveriti njihovo obstojnost, predvsem vpliv zmrzovanja/taljenja in vlaženja/sušenja v kombinaciji z delovanjem vodotopnih soli na lastnosti injekcijskih mešanic;
- ovrednotiti rezultate in-situ preiskav odstopljenih plasti ometov, konsolidiranih z izbrano injekcijsko mešanico;
- vzpostaviti cenovno sprejemljiv sistem kontrole materialov, postopkov in izvedenih del v laboratoriju in na terenu, s pomočjo dostopnih in dovolj učinkovitih metod preiskav, ki bi se vpeljal v prakso pri konservatorskih-restavratorskih projektih;

- na podlagi dostopne literature in rezultatov lastnih preiskav podati priporočila za nadaljnji razvoj in raziskave kompatibilnih materialov z mineralnim vezivom za obnovo odstopljenih plasti ometov s poslikavami.

1.3 Zasnova doktorske disertacije

Doktorsko disertacijo sestavlja sedem poglavij: uvod, pregled literature s pregledom obstoječih injekcijskih mešanic, izhodišča za razvoj kompatibilnih injekcijskih mešanic za stabilizacijo odstopajočih plasti ometov stenske slike, razvoj in eksperimentalne preiskave injekcijskih mešanic, in-situ preiskave stenske slike in izvedba injektiranja, priporočila za izbiro ustrezne injekcijske mešanice in utrjevanje odstopajočih plasti ometov ter zaključek.

V uvodnem poglavju je na kratko predstavljena problematika poškodovanih stenskih slik in pristop k njihovemu restavriranju z injektiranjem. Predstavljeni so izhodišča in cilji, ki se jih želi doseči v okviru doktorske disertacije.

V drugem poglavju je predstavljen pregled literature, ki se začne s kratkim pregledom tehnike in tehnologije stenskih slik, vzrokov njihovega propadanja in posledično nastajanja poškodb na historičnih ometih stenskih slik. Nato sledi obširni pregled ohranjanja odstopajočih plasti ometov v slovenskem in evropskem prostoru. Poudarek je na pregledu uporabljenih injekcijskih mešanic skozi zgodovino, od leta 1950 pa vse do danes. Ta pregled je omogočil primerjavo slovenske in evropske prakse na področju utrjevanja odstopajočih plasti ometov stenske poslikave z injektiranjem. Ugotovitve poglavja *Pregled literature* so izhodišče za tretje in četrto poglavje. V tretjem poglavju, *Izhodišča za razvoj kompatibilnih injekcijskih mešanic za stabilizacijo odstopajočih plasti ometov stenske slike*, je poudarek na kriterijih, ki naj bi jih injekcijske mešanice izpolnjevale, na izbiri sestavin in postopku priprave injekcijskih mešanic ter na laboratorijskih in in-situ testih za preverjanje njihovih lastnosti. Četrto poglavje, *Razvoj in eksperimentalne preiskave injekcijskih mešanic (izvedene preiskave in analize rezultatov)*, ki je najbolj obsežno, je razdeljeno na več delov, in sicer na preliminarne raziskave, razvoj dodatnih sestav kompatibilnih injekcijskih mešanic in preiskave na strjenih injekcijskih mešanicah. Na koncu so predstavljene podrobne preiskave izbranih injekcijskih mešanic. V tem poglavju so bile uporabljene številne metode za preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic v svežem in strjenem stanju, ki smo jih modificirali ali posebej razvili za področje nekonstrukcijskega injektiranja.

Tukaj bi izpostavila, da smo v okviru podrobnih preiskav izbranih mešanic pripravili posebne modele, ki simulirajo dejanske materiale in sklope odstopajočih stenskih slik tako, da vsebujejo zračne žepe, ki jih zapolnimo z injektiranjem in na njih preverjamo učinkovitost injekcijskih mešanic glede vzpostavitev ponovne povezave med ometi in obstojnost te povezave. Poleg izbranih injekcijskih mešanic, razvitih v okviru disertacije, smo preizkusili tudi učinkovitost apnene injekcijske mešanice,

ki se v slovenski restavratorski praksi največ uporablja. V petem poglavju, *In-situ preiskave stenske slike in izvedba injektiranja*, smo na podlagi rezultatov preiskav in analiz, ki smo jih opravili v četrtem poglavju, izbrali injekcijsko mešanico za utrditev odstopajočih ometov stenske slike na terenu. Ta faza ima pomembno in končno vlogo pri oceni učinkovitosti razvite injekcijske mešanice, saj poteka na terenu, kjer je injekcijska mešanica podvržena dejanskim razmeram pri konsolidaciji odstopljenih plasti ometov.

V šestem poglavju so podana priporočila za izvedbo injektiranja in postopek izbire injekcijske mešanice za utrditev stenske slike. V zaključku so podani ključni rezultati in ugotovitve doktorske disertacije. Sledi predstavitev prispevkov disertacije k znanosti ter priporočil za nadaljnje delo.

»Ta stran je namenoma prazna«

2 PREGLED LITERATURE

2.1 Splošno o tehniki in tehnologiji stenskih slik

Slikanje na steno je eno od najstarejših oblik človeškega izražanja in ga zasledimo od prazgodovine naprej.

V okviru terminologije stenskega slikarstva je *tehnika* izraz za postopek opravljanja kakega dela (npr. načina slikanja), medtem ko *tehnologija* pomeni skupek postopkov kakega dela (npr. izdelave stenske slike) od začetka do konca.

Na začetku je bila tehnika slikanja zelo preprosta, barva je bila nanesena neposredno na kamnito površino. S časom se je tehnika izdelave stenske slike spreminjala in svojo klasično strukturo dobila, ko so začeli slikati na ravno površino vrhnjega ometa, v sklopu večih plasti ometov, ki so bili nanešeni na steno.

V večjem delu Evrope tehnologija izvedbe stenske slike temelji na apnenem vezivu oziroma svežih apnenih ometih (Mora in sod., 1984). Stenska slika je sestavljena praviloma iz naslednjih plasti: nosilec (stena ali strop iz kamna, opeke ali lesa), ometi (grob (ital. arricciato) in fin omet (ital. intonaco)) in barvna plast.

Velika pozornost je bila posvečena tehniki in tehnologiji izvedbe stenske slike, saj sta bili od tega odvisni kakovost in obstojnost poslikave. Običajno se je slikalo na svežo plast finega ometa, da so se pigmenti med procesom sušenja in karbonatizacije apnenega veziva povezali z ometom. Prav tako pa so že v (naj)zgodnejših obdobjih poznali različne secco tehnike slikanja, slikanaj na suh omet.

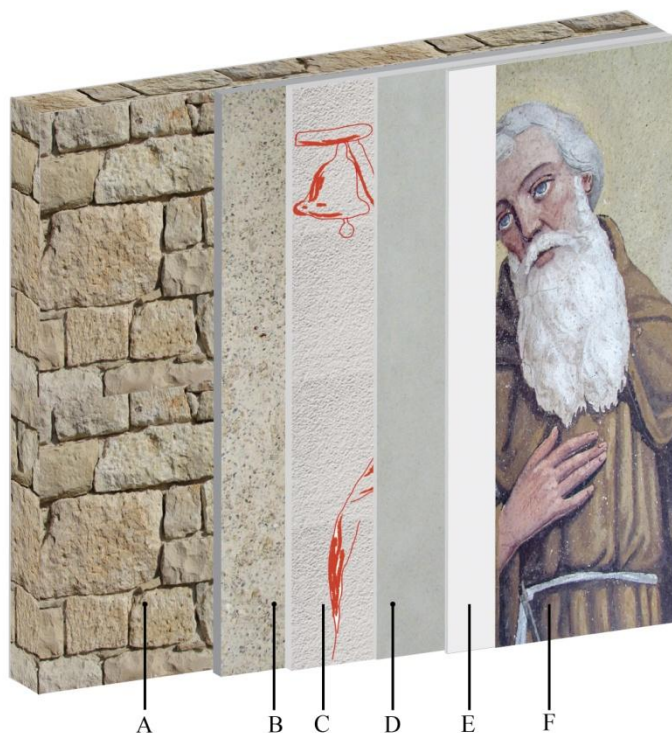
2.1.1 Nosilec – zid/stena

Nosilec stenske poslikave je lahko stena/zid ali strop. Zidovi so bili povečini iz kamna, opeke ali kombinacije kamna in opeke, to je zidakov, povezanih z malto. Najtrdnjši in najtrajnejši nosilci stenske slike so kamniti zidovi, vezani na suho in ometani z ometom debeline do 5 cm. Tak zid (nosilec) enakomerno srka vodo iz nanj nanešenega ometa, ki se tako enotneje in čvrsto pritrdi (Bogovčič, 2000). Mešano grajen nosilec (naravni kamen in opeka) za stenske slike ni primeren, zaradi različnega koeficienta toplotnega raztezka, različne toplotne prevodnosti in prenosa vlage skozi materiale. Na določenih mestih takih nosilcev se lahko nabira vlaga. Nosilec, grajen iz opeke, je v primerjavi s kamnitim bolj podvržen spremembam in propadanju zaradi prisotnosti vode in vplivov okolja (kristalizacija vodotopnih soli, slabo prenaša zmrzal) (Bogovčič, 2000).

2.1.2 Stratigrafije stenskih slik

Stratigrafija stenske slike je izraz za proučevanje zaporedij nanesenih plasti ometov na zid/nosilec vključno z barvno plastjo.

Klasična stratigrafija stenskih slik, ki ji sledimo tudi v konservatorski-restavratorski stroki, je nastala v italijanskem prostoru in jo tvorijo (slika 2.1): zid/nosilec, vsaj štiri plasti ometa (ravnalec, hrapavec, glajenec in gladilec) in barvne plasti (Merrifield, 1952, Botticelli, 1992). Vsaka plast od nosilca proti vrhu je bolj fina, z več apna in manj peska, ki je drobnejši. Namen prve plasti (ravnalec) je poravnati steno, drugi dve (hrapavec in glajenec) sta podlagi za poslikavo, gladilec pa je vrhnja zadnja plast, na katero se je slikalo.



Slika 2.1: Shematski prikaz prereza skozi klasično stensko sliko: A – kamniti zid; B – omet ravnalec (rinzaffato); C – omet hrapavec (arricciato), na katerega se je narisala podrisba ali sinopija; D – omet glajenec (intonaco); E – omet gladilec; F – barvna plast.

Figure 2.1: Schematic representation of the stratigraphy of a typical wall painting: A- stone wall; B- rinzaffato; C- arricciato, with preparatory drawing or sinopia; D- intonaco; E- final glazing plaster; F- paint layer

Prva plast ometa (imenovan ravnalec (ital. rinzaffato)) (Merrifield, 1952, Botticelli, 1992) sestoji iz živega ali gašenega apna in trdega kremenčevega ali mehkejšega apnenčevega peska (Hudoklin, 1955). Zid so morali pred nanosom ometa močno navlažiti, da je voda prodrla v zidake in malto. S tem ometom so prekrili zid in zapolnili vse reže, razpoke in majhne luknje v njem, da so ga povsem izravnali. Površina ometa je morala biti hrapava. Če se je prva plast ometa posušila pred nanosom

drugega, so razpraskali njegovo površinsko skorjico in ga izdatno navlažili pred nanosom naslednje plasti ometa. Naslednjo plast so nanесли, ko je spodnja že dobro »prijela«.

Omet hrapavec (imenovan arricciato) je narejen iz starega odležanega gašenega apna ter zmletega drobnega agregata (apnenčev pesek z največjim zrnom od 2 do 3 mm). Volumsko razmerje med gašenim apnom in drobljenim peskom je bilo 1 : 3.

Hrapavec je moral biti gost in masten ter dobro zmešan. Nanesen je bil lahko v plasteh do skupne debeline enega do treh centimetrov (Hudoklin, 1955). Posameznih plasti niso zgladili, ostati so morale hrapave, da so se jih sledeče plasti čvrsteje oprijele (Hudoklin, 1955). Tako so bile vse plasti strnjene v enoten in v notranjosti trdno povezan omet.

Plast hrapavca je bila poravnana z leseno letvijo, ni pa bila zglajena.

Na svež omet hrapavca so slikarji pogosto naredili pripravljalno skico ali sinopijo, katera jim je služila za orientacijo pri postavitvi prizora na večjo stensko površino in za porazdelitev dela na dnevnicе (Križnar, 2006).

Med vsemi ometi stenske slike je bil glajenec (imenovan intonaco) najbolj zahteven. Mojstri so se zavedali, da je od njegove sestave in priprave v največji meri odvisna lepota in trajnost stenske slike.

Gašeno apno za glajenec je moralo biti gosto in mastno, po gašenju odležano najmanj tri leta. Agregat (pesek) je moral biti enovrsten, presejan in opran ter razmeroma drobno zrnat (največje zrno od 0,5 do 1 mm). Uporabna je bila tudi mivka, a boljši je bil drobljen apnenec. Volumsko razmerje med gašenim apnom in peskom je bilo 1 : 2. Nanesli so ga lahko v eni, dveh ali treh plasteh v skupni debelini 0,5 do 1 cm (Hudoklin, 1955). Posameznih plasti niso vlažili. Vrhajo ploskev so zravnali in zgladili z leseno deščico, katero so občasno vlažili z apneno vodo ali z zelo redkim apnenim mlekom.

Mojstri (freskanti) so fin omet (glajenec) nanašali le v debelini nekaj milimetrov, na dobro navlažen hrapavec. Nanosi finega ometa so bili lahko razdeljeni v večje vodoravne pasove (imenovane pontate) ali v dnevnicе (imenovane giornate) (Merrifield, 1952, Mora in sod., 1984). Vodoravni pasovi in dnevnicе ustrezajo velikosti dela poslikave, ki ga je lahko mojster naredil v enem dnevu ali v urah, ko je bil fin omet še vlažen. Omet, ki je ostal neposlikan, so odstranili, rob dnevnicе pa so odrezali pod kotom 45°, kar je omogočilo lepši in manj viden spoj z naslednjo dnevnicо.

Gladilec so nanašali le tam, kjer so slikarji hoteli imeti popolnoma gladko, polirano podlago. Gladilec je sestavljen iz enega dela odležanega gašenega apna, enega dela opranega marmornega prahu in precej vode. Za dobro vtiranje je moral biti dovolj redek. Nanašanje in vtiranje v glajenec so izvajali z leseno deščico, navlaženo z apneno vodo ali z apnenim mlekom, preden je začelo apno v njem karbonatizirati. Na vsej ploskvi je moral biti "lošč" enako gost, enako debel (1 do 2 mm) in enako zglajen.

Število plasti ometa stenske slike je bilo odvisno tudi od klimatskih razmer, razpoložljivih materialov in (ne)ravnosti zidov. To je bilo pomembno predvsem pri izdelavi prave fresko tehnike (a fresco). Čim bolj suho je podnebje, več plasti ometov je potrebno, da se vlaga v ometu ohranja dalj časa. Čim bolj neraven je zid, več plasti ometov je potrebno za njegovo izravnavo.

Najpogostejša kombinacija (slika 2.2) je sestavljena iz dveh ali treh plasti ometov, v nekaterih primerih pa je poslikava narejena samo na eno plast ometa (Botticelli, 1992).

Poslikave na obokih so bile po navadi narejene na manj plasteh, večinoma le na eni. Plasti so tanjše, da se prepreči preobremenitev stropa z ometi ali odpadanje samih ometov.



Slika 2.2: Shematski prikaz prereza skozi klasične stenske slike pri nas (levo): A – kamniti zid; B – omet hrapavec (arriciato); C – omet glajenec (intonaco); D – barvna plast. Obstajajo stenske slike (desno), ki jih sestavlja samo ena plast ometa (B) in barvna plast (C).

Figure 2.2: Schematic representation of the stratigraphy of a typical wall painting in Slovenia (left):

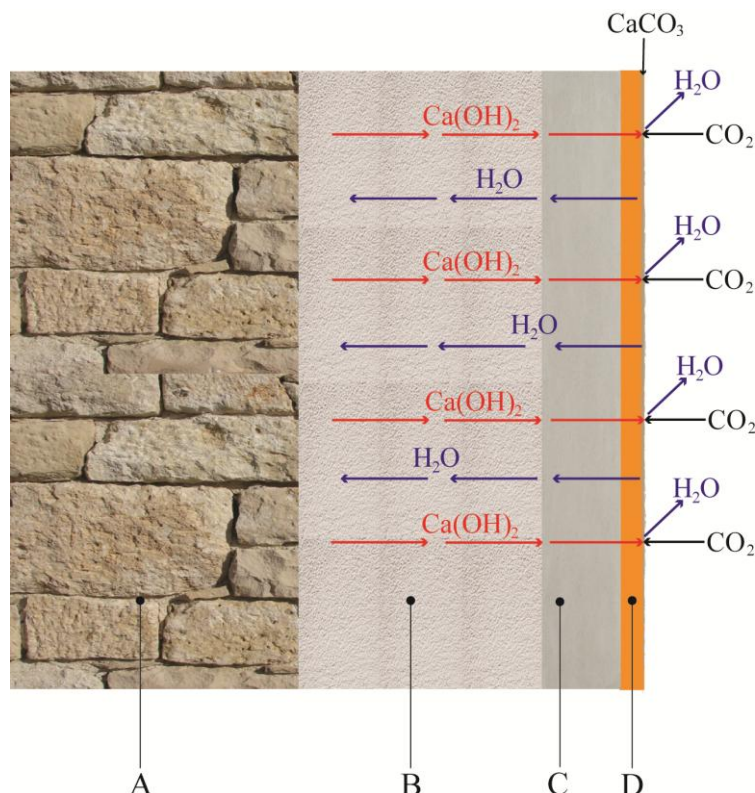
A- stone wall; B- arriciato; C- intonaco; D- paint layer. There are also examples of wall paintings (right), made of A- stone wall; B- one layer of plaster; C- paint layer.

2.1.3 Fresko in secco tehnika slikanja

Beseda fresko pomeni slika, ki je narejena na sveži omet. Pigmente so nanašali s čisto vodo ali v nekaterih primerih z apneno vodo, ki se s pomočjo karbonatizacije apnenega veziva iz ometa zvežejo z apneno podlago, po enačbi 2.1.



V fresco tehniki (slika 2.3) kalcijev hidroksid Ca(OH)_2 v vezivu grobega in finega ometa potuje s procesom izhlapevanja vode (H_2O) proti površju skozi barvno plast, ki vsebuje pigmente. Kalcijev hidroksid Ca(OH)_2 na površini pride v stik z ogljikovim dioksidom (CO_2), reagira in se transformira v skorjico kalcijevega karbonata (CaCO_3), kar poveže pigmente na površino. Reakcija poteka iz površine proti notranjosti. Del vode (H_2O) na površini izhlapi, del pa ponovno penetrira nazaj v omet, kar je odvisno od njegove poroznosti.



Slika 2.3: Shematični prikaz karbonatizacije apna v fresco tehniki (Mora in sod., 1984: str. 12). A – kamniti zid; B – omet hrapavec (arriccio); C – omet glajenec (intonaco); D – barvna plast.

Figure 2.3: Scheme of lime carbonation of the fresco technique (Mora in sod., 1984: p 12). A- stone wall; B- arriccio; C- intonaco; D- paint layer.

Pod termin secco tehnika so uvrščene vse tehnike slikanja, izvršene na suhem ometu (Mora in sod., 1984). Pigmente pred nanosom zmešamo z vezivom, ki jih pričvrsti na površino. Za vezivo so pogosto uporabljali jajčni rumenjaki, kazein ali klej. Izbira veziva je bila odvisna predvsem od izbire pigmentov, od zelenega učinka in dostopnosti materialov (Križnar, 2006).

Število plasti in sestava ometa pri slikanju na suh omet nima nobenega vpliva, saj je apno v ometu že karbonatiziralo.

2.1.4 Sestavine ometov in procesi strjevanja mineralnih veziv

Ometi, ki so služili kot podloga stenski sliki, so bili v evropskem prostoru večinoma narejeni iz hidratiziranega apna v vlogi veziva in agregata (z ali brez dodatkov) (Mora in sod., 1984). Analize historičnih ometov v Sloveniji, opravljene v okviru konservatorsko-restavratorskih posegov, so pokazale, da se sestava ometov bistveno ne razlikuje od ostalega evropskega prostora (Križnar, 2006, Kramar in Mirtič, 2009).

Vezivo predstavlja glavno komponento ometa in ima nalogo, da med seboj ustrezno poveže ostale sestavine (polnila in dodatke) v kohezivno in lepljivo plastično zmes, malto, ki se da enostavno nanesti na nosilec/zid ali plast ometa.

Apno je mineralno vezivo, pridobljeno s toplotno obdelavo (kalcinacijo) karbonatnih kamnin (apnenca, krede, dolomitnega apnenca itd.). Glavna sestavina karbonatnih kamnin je mineral kalcit (CaCO_3). Apnenec se v naravi redko nahaja v čisti obliki, to je kot skoraj 100 % kalcijev karbonat. Praviloma vsebuje primesi, kot so magnezijev karbonat (MgCO_3) in silikati, železovi oksidi in gline (največ do 6 %). Kvaliteta apnenega veziva, pridobljenega iz karbonatnih kamnin je odvisna od razmerja vseh sestavin, ki nastopajo v kamnini in je močno povezana tudi z načinom žganja kamnine. Običajno se pri proizvodnji apna uporablja apnenec z manj kot 5 % magnezijevega karbonata (MgCO_3). Proizvod imenujemo visoko kalcitno apno. Iz apnenca z več kot 20 % magnezijevega karbonata pridobivamo dolomitno apno ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) (Elert in sod., 2002). Čeprav dolomitno apno izkazuje dobro obdelovalnost, lahko zaradi kasnejše hidratacije magnezijevega oksida slabša mehanske lastnosti ometa.

Apno se pridobiva z žganjem kalcijevega karbonata (enačba 2.2) CaCO_3 (apnenca) pri temperaturi med 925 in 1340°C (Elert in sod., 2002). V procesu žganja pride do kalcinacije, ki poteka od zunanje površine kamnov proti notranjosti, in izločanja ogljikovega dioksida (CO_2). Produkt reakcije je porozen kamen, kalcijev oksid (CaO), ki ga imenujemo žgano ali živo apno.



Živo oziroma žgano apno se nato gasi z vodo. Reakcija gašenja živega apna je eksotermna reakcija, pri kateri del vode izpari. To je treba upoštevati, ko se določa količina vode za gašenje. Produkt reakcije je kalcijev hidroksid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ali gašeno apno (enačba 2.3).



Tradicionalno so gašeno apno za zgodovinske omete proizvajali v obliki apnenega testa, ki vsebuje od 30 do 40 % proste vode (Elert in sod., 2002). Že stari mojstri in pisci traktatov Plinius, Vitruvius, Alberti in Cennino Cennini (Merrifield, 1952) so v svojih zapisih poudarjali pomembnost kakovostne izdelave gašenega apna. V navodilih poudarjajo, da mora apneno testo odležati od nekaj mesecev do nekaj let v apneni jami, kjer je pokrito z vodo, da pridobiva na kakovosti. Tudi Ashurst (1983) navaja, da je bilo tradicionalno pripravljeno apneno testo odležavano nekaj mesecev ali celo let. Staranje apnenega testa vpliva na lastnosti apna, kot so plastičnost, viskoznost in modifikacijo oblike kristalov kalcijevega hidroksida (Elert in sod., 2002, Hansen in sod., 2008).

Hidratizirano apno v prahu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dobimo kot rezultat gašenja žganega apna z optimalno količino vode, ki je potrebna za hidratizacijo. Količina vode, ki je potrebna za hidratacijo, je približno enaka 33 % mase žganega apna. Produkt je suho praškasto vezivo. To apno vsebuje največ 5 % proste vode. Suho hidratizirano apno je treba uporabiti čim bolj sveže, ker s časom lahko karbonatizira (veže z ogljikovim dioksidom) ter se mu s tem zmanjša sposobnost vezanja. Injekcijske mešanice na osnovi hidratiziranega apna, ki so injicirane v zračne žepe odstopljenih plasti ometov, do katerih je dostop zraka in s tem ogljikovega dioksida (CO_2) omejen, bodo vezale počasi in posledično bo tudi njihova trdnost počasi naraščala.

Polnila so materiali, ki služijo kot trdni del skeleta apnenega ometa (Mora in sod., 1984), izboljšajo mehanske lastnosti, vplivajo na volumsko stabilnost (zmanjšujejo krčenje, do katerega pride med sušenjem malte) in karbonatizacijo predvsem s svojo poroznostjo (Ashurst, 1983). Poroznost namreč omogoča večji pretok zraka, kar pripomore k strjevanju ometa.

Običajno so pri izdelavi apnenega ometa uporabljali kot polnilo ali agregat pesek. Stari mojstri so se zavedali pomena pravilne izbire kakovostnega peska. Navajajo, da se lahko uporablja samo rečni kremenov pesek, nikoli pa morskega (Mora in sod., 1984). Prav tako je pomembno, da je pesek v prvi vrsti čist, obstojen, nespremenljiv oziroma inerten in ne vsebuje škodljivih nečistoč, kot so: organizmi, minerali glin, železovi oksidi, zemlja, organske snovi, predvsem premog, nitrati, žveplo itd. (Ashurst, 1983). Škodljive primesi v pesku lahko povzročijo predčasno propadanje ometa in stenske slike.

Apnenemu ometu so z različnimi dodatki že v preteklosti poskušali izboljšati njegove lastnosti, predvsem trdnost in obstojnost, ter vplivati na čas sušenja in strjevanja ometa. Dodatki, ki so jih uporabljali, so anorganski (vulkanski pepel, tuf, zdrobljena opeka, marmor, mavec) in organski (slama, živalska dlaka in mast, kazein, sladkor, laneno olje, kri) (Križnar, 2006, Bogovčič, 2000).

Apnen omet je sestavljen iz hidratiziranega apna v obliki apnenega testa ali v praškasti obliki, agregata (peska) in vode. Izhlapenje vode vpliva na začetno strjevanje apnenega ometa. Ko je sveža malta delno suha, sledi proces karbonatizacije. Proces karbonatizacije apnenega ometa poteka (enačba 2.4), ko kalcijev hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagira z ogljikovim dioksidom (CO_2 v vodi ali zraku) in nastane

kalcijev karbonat (CaCO_3). Pri tej kemični reakciji se sprošča voda. Hitrost reakcije je odvisna od relativne vlage, koncentracije ogljikovega dioksida in paroprepustnosti ometa (Elert in sod., 2002).



Karbonatizacija se deli na proces difuzije ogljikovega dioksida iz zraka skozi strukturo por ometa in njegovim raztapljanjem v vodi, pri čemer nastane ogljikova kislina (enačba 2.5) ter na kemijsko reakcijo med raztopljenim ogljikovim dioksidom (CO_2) in kalcijevim hidroksidom (Ca(OH)_2), pri kateri se formirajo kristali kalcijevega karbonata (enačba 2.6) (Elert in sod., 2002).



Reakcija karbonatizacije v apnenih maltah poteka samo v primeru, če lahko CO_2 nemoteno prehaja iz zraka v malto in če je istočasno prisotna voda za reakcijo raztapljanja CO_2 (Cizer in sod., 2012).

Zaradi tega lahko pride do težav pri karbonatizaciji v zračnih žepih in razpokah oz. prostorih, kjer je onemogočen ali otežen dostop zraka (Baglioni in sod., 1997).

Optimalno karbonatizacija poteka pri 20°C . Pri višjih temperaturah karbonatizacija poteka hitreje, se pa zmanjšuje sposobnost raztapljanja ogljikovega dioksida in hidratiziranega apna. Naraščanje koncentracije ogljikovega dioksida se kaže v pospešeni karbonatizaciji, ker je za reakcijo razpoložljivo več ogljikovega dioksida. Karbonatizacija pri 100 % koncentraciji ogljikovega dioksida lahko povzroči prekomerno proizvodnjo toplote, kar vodi v prehitro sušenje materiala in zaviranje procesa karbonatizacije (Elert in sod., 2002). Proces karbonatizacije se odvija s površine proti notranjosti, debelina, poroznost in prepustnost ometa pomembno vplivajo na stopnjo karbonatizacije. Dodajanje agregata poveča poroznost ometa (kar vpliva na transport vlage in difuzijo CO_2), med tem ko povišanje deleža apnenega veziva poslabša poroznost (Elert in sod., 2002).

Cazalla je s sodelavci (2000) preučevala razvoj karbonatizacije v maltah in ugotovila, da razmerje med nastajajočim kalcijevim karbonatom in kalcijevim hidroksidom hitreje narašča pri maltah iz dlje časa uležanega apnenega testa. Prav tako uležavanje apnenega testa vpliva na obnašanje malt z različnimi deleži vezivo/agregat (Cazalla in sod., 2000). Nestarane komercialne hidratizirane apnene malte potrebujejo višje razmerje vezivo/agregat (1 : 3) kot uležana apna. Nižje razmerje vezivo/agregat enako 1 : 4 je primerno za starana apna, medtem ko višje razmerje 1 : 3 pri staranem apnu vpliva na oblikovanje razpok. Prav tako isti avtorji ugotovijo, da so za konservatorske intervencije na zgodovinskih zgradbah primerne apnene malte, ki so pripravljene z odležanim apnenim testom (> 1 leto) z razmerjem vezivo : agregat $\leq 1 : 4$ (nižje razmerje vezivo : agregat vpliva na hitrejšo karbonatizacijo

in manj nastalih razpok). V primeru uporabe hidratiziranega apna v prahu se mora apneno testo pripraviti, preden se doda agregat, priporoča se razmerje 1 : 3, vezivo : agregat.

2.2 Lastnosti historičnih apnenih ometov

Karakterizacija historičnih ometov je po navadi del širših preiskav, katerih rezultati so ključni za izbiro najprimernejših konservatorsko-restavratorskih posegov na določenih objektih oziroma stenskih slikah.

Sestava ometa variira glede na geografsko lego objekta, časovno obdobje nastanka stenske slike, kot tudi na vrsto aplikacije, kar ugotavljata avtorici Kramar in Mirtič (2009). Načeloma so material za izdelavo ometov pridobili iz lokalnih virov. V srednjem veku je za osrednji, severozahodni, severovzhodni in severni del Slovenije značilna sestava ometa iz apnenega veziva (kalcijev karbonat) s prevladujočim deležem kremenčevega peska (Križnar, 2006). V zahodnem in osrednjem delu Slovenije so ometi prav tako narejeni iz apnenega veziva in karbonatnega peska. V nekaterih primerih so v omet dodali koščke slame. Srednjeveški ometi v južnem in jugovzhodnem delu Slovenije so pretežno narejeni iz apnenega veziva in kalcitnega peska (Križnar, 2006).

Analize historičnih ometov se pogosto izvršijo po vzorčenju in posredujejo pomembne podatke, kot so: kemična in mineraloška sestava, poroznost, trdnost, modul elastičnosti, vsebnost vodotopnih soli itd. Vse analizirane lastnosti in pridobljeni podatki imajo pomemben vpliv pri izbiri ustrezne injekcijske mešanice. Preskusne metode, ki se uporabljajo pri analiziranju historičnih ometov, so podane v preglednici 2.1.

Preglednica 2.1: Primerne instrumentalne tehnike za analizo originalnih ometov.

Table 2.1: Common instrumental methods for characterization of original plasters.

TEHNIKA	KRAJŠAVA	OPIS	MINIMALNA VELIKOST VZORCA	MATERIALI
OPTIČNI MIKROSKOP	OM	identifikacija materialov, ki temeljijo na vidnih lastnostih	5 µm	preseki odvzetih vzorcev
POLARIZACIJSKI OPTIČNI MIKROSKOP	PLM	identifikacija materialov, ki temeljijo na vidnih lastnostih	5 µm	petrološko/mineraloška karakterizacija malt
IR SPEKTROSKOPIJA	FTIR	preučevanje kemijskih struktur in sestavin	10 µm	minerologija, organski in anorganski pigmenti, organska in anorganska veziva, vlakna, kamen, keramika, steklo

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 2.1

ENERGIJSKO DISPERZIJSKA SPEKTROSKOPIJA	EDS	- elementarna analiza (skupaj z vrstičnim elektronskim mikroskopom) - kemični elementi, težji od ogljika	1 µm	kovine, kamen, steklo, keramika, pigmenti, veziva (apno, cement, sadra ...)
VRSTIČNI ELEKTRONSKI MIKROSKOP	SEM	omogoča opazovanje površine trdnih vzorcev	1 µm	kovine, kamen, steklo, keramika, pigmenti, veziva, homogenost, poroznost, razpoke (apno, cement, sadra ...)
RENTGENSKA DIFRAKCIJA	XRD	analizna sestava mineralov materiala	1 mg	kamen, keramika, malte, pigmenti
TERMIČNA ANALIZA	TGA	fizikalno ali kemijsko lastnost materiala	1 mg	sintetični polimeri, keramika, organski in anorganski materiali, kovine, kamen identifikacija mineraloških faz
RAMANSKA SPEKTROSKOPIJA	RAMAN	preučevanje kemijskih struktur in sestavin	1 µm	organski in anorganski pigmenti, organska in anorganska veziva, vlakna, kamen, keramika, steklo
POLDESTRUKTIVNE, DESTRUKTIVNE METODE		določanje mehanskih in fizikalnih lastnosti	20x20 mm ²	trdnost, poroznost, koeficient vpijanja vode

Analize historičnih materialov nam podajo parametre njihove sestave ter fizikalnih in mehanskih lastnosti, pomembnih za določitev ali izbiro primerne materiala za sanacijo, ki mora biti čim bolj podoben originalnemu materialu stenske slike. Pravimo, da mora biti kompatibilen z originalnim materialom stenske slike.

Težavo pa predstavlja odvzem reprezentativnega vzorca, saj je to destruktivni poseg, ki v določeni meri poškoduje stensko sliko. Zato se pogosto odvzamejo manjši vzorci, na katerih se lahko opravijo mikroskopske analize oziroma določi mineralna in kemična sestava. Za določanje mehanskih in fizikalnih lastnosti (tlačna in natezna trdnost, poroznost, vpijanje vode idr.) originalnih materialov pa velikokrat vzorca ni dovolj.

V preglednici 2.2 so podane splošne lastnosti apnenih historičnih ometov, ki so povzete po opravljenih analizah apnenih historičnih ometov.

Preglednica 2.2: Splošne lastnosti apnenih historičnih ometov.

Table 2.2: General characteristics of historic lime plasters.

LASTNOST	VREDNOST	VIR
Poroznost	20–40 %	Papayianni in Stefanidou, 2001
Koeficient kapilarnega vpijanja vode	1,1–4,1 kg/(m ² √h)	Veiga in sod., 2004
Difuzijska upornost materiala za vodno paro (µ)	8–15	Jornet in sod., 2010 Jornet in Romer, 2008

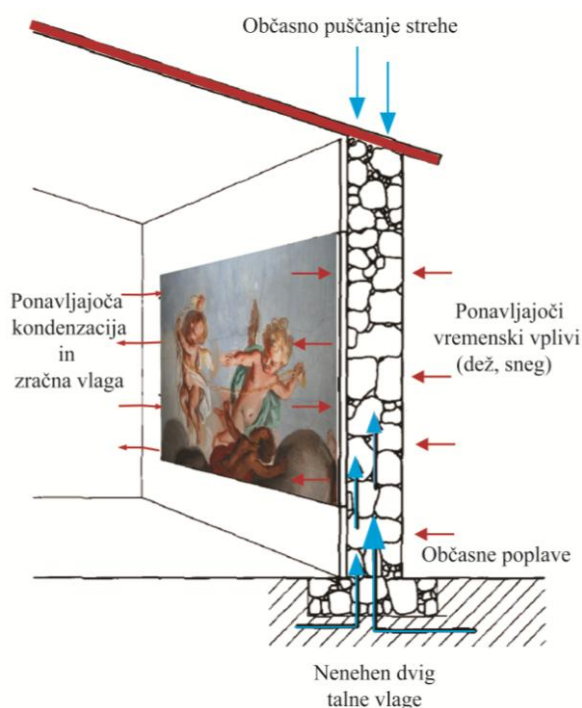
se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 2.2

Difuzijska upornost za vodno paro ekvivalentne debeline zračne plasti (S_d)	0,30–0,4 m	Jornet in sod., 2010 Jornet in Romer, 2008
Tlačna trdnost	0,2–0,8 MPa	Veiga, 2012

2.3 Vzroki propadanja in nastajanje poškodb na stenskih slikah

Stenske slike so del večjega odprtega fizičnega sistema stavbe, kar pomeni, da so v stiku z ostalimi gradbenimi elementi (stene, tla, streha) in vpletene v številne fizikalne in kemične procese (slika 2.4) (Matteini, 1987). Prav tako pa je stenska slika narejena iz poroznih gradbenih materialov, ki absorbirajo tekočine in pline s škodljivimi primesmi (vodotopne soli, atmosfersko onesnaženje, raztopine materialov, ki se uporabljajo pri konserviranju-restavriranju itd.).



Slika 2.4: Stenske slike pripadajo velikemu odprtemu fizikalno-kemičnemu sistemu, kar pomeni, da so v stiku z ostalimi gradbenimi elementi (stene, tla, streha) in vpletene v številne fizikalne in kemične procese, pred in po konservatorsko-restavratorskih posegih (Matteini, 1987: str. 138).

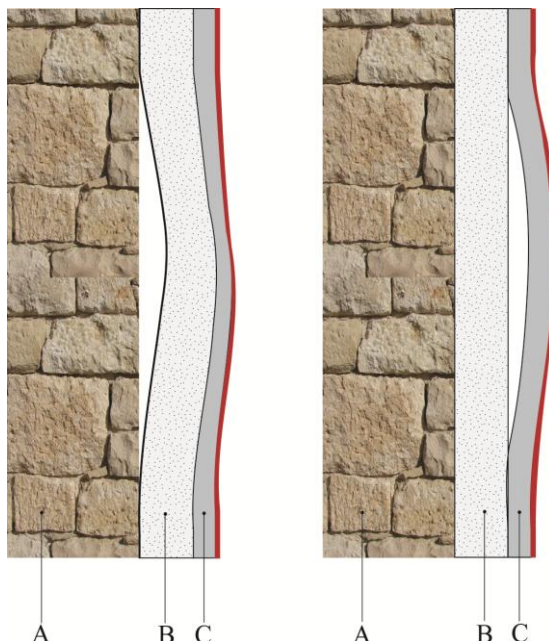
Figure 2.4: Wall paintings constitute part of an open physicochemical system in which their situation gradually and continually evolves due to their contiguity with other elements of a building, before and after conservation interventions (Matteini, 1987: p 138).

Materiali, prisotni v stenski sliki, se zaradi razlik v lastnostih odzovejo na vplive iz okolja različno. Ko je vez med ometom in nosilcem pretrgana, bo plast ometa odstopila in nastal bo zračni žep, ki je od primera do primera različno velik. Ko plast ometa odstopi, je lahko naslednji korak, da odpade.

Ločita se lahko dve vrsti odstopanja, in sicer:

- fin omet od grobega ometa (slika 2.5, desno),

- grob omet od nosilca/zidu (slika 2.5, levo).



Slika 2.5: Shematični prikaz odstopanja grobega ometa (B) od zidu (A) (levo) in finega (C) od grobega (B) ometa (desno).

Figure 2.5: Schematic representation of a detachment between the wall (A) and the arriccio (B) (left) and between the arriccio (B) and the intonaco (C) (right).

Na propadanje stenskih slik lahko vplivajo različni dejavniki, ki pogosto delujejo vzajemno in potencirajo drug drugega. Poškodbe postanejo praviloma vidne po daljšem časovnem obdobju. V določenih primerih, na primer v potresu, poplavi, v primeru posedanja temeljev, lahko nastopijo poškodbe tudi hipno.

V večini primerov je glavni vzrok za propadanje in odstopanje plasti ometov prisotnost vlage v konstrukcijskih elementih stavbe ter v prostoru, kjer se stenska slika nahaja. Lahko pa so vir ogroženosti tudi sestavni elementi stenske slike, predvsem nosilec, pa tudi omet in barvna plast.

V poglavju so izpostavljeni tisti vzroki propadanja in nastajanja poškodb, ki povzročajo globinske poškodbe stenske slike (barvna plast je izključena) in vodijo k separaciji grobega ometa od nosilca ali finega ometa od grobega ometa. V prilogi A je prikazan povzetek vplivov posameznih faktorjev in nastalih poškodb na ometu.

Avtorji Mora in sod. (1984) ter Agrawal in Pathak (2001) predpostavljajo, da na proces odstopanja plasti ometov vpliva več zunanjih in notranjih dejavnikov, kot so:

1. vpliv vlage in vode (navlaženje/sušenje materialov, raztapljanje in oslabitev veziva in drugih sestavin v ometu),

2. kristalizacija soli (povzročanje pritiska z rastjo kristalov) in hidratacija soli (Arnold in Zehnder, 1987).
3. zmrzovanje in taljenje (povzročanje termalnih napetosti in pritiskov zaradi nastajanja ledu),
4. nepravilna tehnika in tehnologija izdelave stenskih slik (prvotno krčenje in sušenje materialov), tehnične napake na stavbi (zamakanje, nezadostne povezave materialov),
5. mehanski vplivi (potresi, promet, konstrukcijski posegi in drugi procesi, ki povzročajo vibracije in mehanske vplive),
6. neprimerne intervencije.

2.3.1 Vpliv vlage in vode

Prisotnost vlage je eden od poglavitnih vzrokov propadanja gradbenih materialov in stenskih slik (Mora in sod., 1984). S tem je mišljeno vlaženje sten, kjer voda vstopa v porozni material v tekočem stanju zaradi kapilarne srka in infiltracije ali v plinastem agregatnem stanju zaradi higroskopičnih materialov in površinske ali kapilarne kondenzacije (Uranjek, 2011). Voda lahko posredno ali neposredno vpliva na fizikalne (izhlapevanje, kapilarni srk) in kemijske reakcije ter biološke napade (rast mikroorganizmov, prisotnost alg, bakterij, gliv itd.), ki škodljivo vplivajo na gradbene materiale (Collepari, 1990, Mora in sod., 1984). Razlogi za to so, da je voda v tekočem ali plinastem stanju aktivno udeležena pri vseh kemijskih reakcijah; voda v tekočem stanju ima pomembno vlogo transporta ene komponente k drugi in tako zagotovi fizični kontakt dveh komponent (Uranjek, 2011).

Do prekomernega navlaženja in posledično poškodb pride zaradi (slika 2.4):

- prodiranja meteorne vode skozi poškodovano streho in strop,
- prodiranja meteorne vode skozi zid, zaradi neprimerne ovoja stavbe,
- vlaženja gradiva, kot posledica kapilarne srka vode iz zemlje, zaradi neprimerne ali poškodovane hidroizolacije oziroma drenaže,
- kondenzacijske vlage na površini zidu oziroma stenske slike,
- absorpcije higroskopičnih materialov, ki so prisotni v zgradbi zidov,
- visoke vlažnosti okolja.

Avtorji Mora in sod. (1984) navajajo, da je zgornja še sprejemljiva meja prisotnosti vlage v zidu okrog 3 do 5 %. Avtor Matteini (1987) ugotavlja, da so nekatere pomembne fizikalne lastnosti, kot so mikrokohezija, adhezija med plastmi itd., povezane z majhno vendar potrebno količino vlage, ki jo gradbeni elementi morajo vsebovati.

Vlaženje in sušenje zidov povzroči transport vode z raztopljenimi solmi, izhlapevanje vode in kristalizacijo vodotopnih soli (Uranjek, 2011). Prisotne vodotopne soli pa vplivajo na povišanje prisotnosti vlage v poroznih materialih, zaradi intenzivnejšega kapilarnega srka vode in same higroskopičnosti soli (Charola, 2000), saj absorbirajo vlago iz zraka. Poznanih je več virov soli, ki lahko v zid prispejo kot:

- soli, transportirane iz tal s kapilarnim srkom talne vode, infiltracijo deževnice ali zaradi površinske kondenzacije,
- soli, ki potujejo iz gradbenega materiala vgrajenega v zidu (portlandski cement vsebuje alkalne sulfate, nepravilno žgana opeka pa natrijeve sulfate (Uranjek, 2011)),
- soli iz morskega peska, uporabljenega za malto,
- aerosoli iz onesnaženega zraka in morske okolice,
- soli iz živalskih iztrebkov itd.

Soli, ki so dospele v zid, s sušenjem zidu potujejo proti površju, kjer prihaja do izhlapevanja vlage in kristalizacije soli. Eflorescenca ali cvetenje soli je v osnovi prašnat depozit soli, ki se formira pod ali na površini materiala (opeka, kamen, ometi) (Vindišar, 2004). S stalnim menjavanjem vlaženja in sušenja se njihova koncentracija povečuje.

Izgubo vezi med ometom in steno/zidom pogosto povzroči kapilarni srk talne vode, v kateri so raztopljene vodotopne soli (slika 2.6). Delovanje kapilarne vlage lahko povzroči degradacijo veziva v ometu oziroma kristaliziranje soli med zidom in ometom ter poškodbe zaradi različnih temperaturnih koeficientov raztezanja soli in okoliških materialov. Posledica tega je odstopanje ometa od nosilca, kjer med nosilcem in ometom nastane zračni žep.

Podroben opis delovanja soli in njihove kristalizacije sta podala avtorja Arnold in Zehnder (1987). Kristali soli lahko rastejo samo v večjih zračnih porah materiala, velikosti od 1 do 10 μm (Arnold in Zehnder, 1987), medtem ko kapilare in majhne pore dovajajo in shranjujejo vodo za rast teh kristalov (Torraca, 2009). Ko volumen kristala soli doseže volumen pore materiala, začnejo v notranjosti por rasti kristalizacijski pritiski. Ti tlaki lahko dosežejo visoke vrednosti in ko presežejo natezno trdnost materiala, pride do poškodbe. Ta pojav se imenuje subflorescenca in do njega pride, ko se kristalom v porah materiala, zaradi vezanja vode, poveča prostornina. Posledica je prašenje, luskanje, osipanje materiala, odstopanje plasti ometov ali barvnih plasti.

Poškodba oziroma degradacija veziva v ometu se lahko pojavi med temperaturnimi spremembami, ko imajo določene soli (npr. NaCl) višji koeficient temperaturnega raztezka od okoliških materialov (Lubelli, 2006).



Slika 2.6: Godešič, cerkev sv. Miklavža, odpadanje in odstopanje ometa zaradi delovanja kapilarne vlage (levo). Detajl odstopajoče plasti ometa od stene (desno) (Kavčič, 2008).

Figure 2.6: Godešič, St. Nicholas Church, lost and detached plaster layer from the wall (left) because of capillary rising damp. A detail of detached plaster layer from the wall (right) (Kavčič, 2008).

2.3.2 Vročina in zmrzal

Nastajanje ledu v notranjosti vlažnih poroznih in vodoprepustnih materialov nastopi, ko temperature padejo pod 0 °C (Torraca, 2009), kar lahko povzroči resne poškodbe materialov, občutljivih na zmrzal. Obstojnost materialov na zmrzal oziroma njihova zmrzljinska odpornost predstavlja odpornost navlaženih materialov, da se upirajo ciklom zmrzovanja/taljenja brez poškodb in je odvisna od podnebnih pogojev, toplotne prevodnosti, vodovpojnosti (Uranjek, 2011), trdnosti (mehanskih lastnosti) in predvsem od poroznosti materiala (Torraca, 2009).

Eden od poglavitnih razlogov za nastajanje poškodb v primeru zmrzali je rast kristalov ledu v porah materiala, ko je pogoj za kristalizacijo dosežen. Ko temperatura pade pod 0°C, se v mokrem poroznem materialu oblikujejo kristali ledu, ki za svojo rast porabljajo vodo v porah in ko je prične zmanjkovati, črpajo vodo iz kapilar. Prostornina kristalov ledu je večja od prostornine vode, iz katerih se kristali oblikujejo. V primeru, ko je število oziroma prostornina zračnih por večja od prostornine kapilar, ki jih povezujejo med seboj, zmrzovanje vode ne predstavlja večje nevarnosti za nastajanje poškodb (Torraca, 2009).

V nasprotnem primeru, ko je prostornina kapilar večja, ta omogoča večjo količino vode v poroznih materialih. Rastoči kristali imajo po zapolnitvi razpoložljivega prostora v zračnih porah še vedno dotok vode iz kapilar. Posledica so pritiski na stene por in oblikovanje poškodb (Torraca, 2009).

V primeru zmrzali, ko kristali ledu rastejo v materialu blizu površine, je pritisk, ki se pojavi, podoben natezni obremenitvi na tanko plast krhkega materiala in lahko se pojavijo poškodbe. Če večja količina kristalov raste v razpoki, se formirajo ledene leče. Njihov vpliv je lahko zelo destruktiven (Torraca, 2009).

Zmrzal je pomemben faktor, ki povzroča razpad materialov. Zelo mala verjetnost je, da stenska slika, ki je izpostavljena takšnim razmeram, ostane nepoškodovana. Močna nihanja temperatur čez noč in dan povzročajo hiter razpad stenskih slik (Agrawal in Pathak, 2001).

Vzrok za poškodbe poroznega materiala pa ni samo zmrzovanje vode v zračnih porah, ampak velika temperaturna nihanja na splošno. S spreminjanjem temperature se materiali krčijo in raztezajo. Zaradi cikličnega ponavljanja teh procesov in različnega odziva plasti stenske slike na nihanje temperature se lahko na primer zgornja plast ometa odluči od spodnje plasti, ker pride do porušitve stika med plastema. Prisotnost vlage ta proces pospeši.

Tudi visoka temperatura lahko povzroči poškodbe na apnenem ometu. Pri temperaturah, ki so posledica požara, se lahko apneni omet, ki je kalcijev karbonat, spremeni v kalcijev oksid. Kalcijev oksid ima tendenco absorbiranja vlage in prehajanja v kalcijev hidroksid, katerega prostornina je večja kot pri kalcijevem oksidu. Posledica te kemijske reakcije so poškodbe ometa (Agrawal in Pathak, 2001).

2.3.3 Mehanski vplivi

Obstoj stenske slike je poleg vlage in kemijskih vplivov močno odvisen od stanja nosilca (zidu) in stabilnosti stavbe (Sfarra in sod., 2014). Glede na strukturo je potrebno ločiti med razpokami, povzročenimi zaradi slabih temeljev in neprimerne nosilnosti konstrukcijskih elementov, zunanjih vplivov, kot so potres, posedanje tal itd.

Mehanski vplivi so lahko začasni ali trajni, napetosti se povečujejo postopoma ali pa se hipno povečajo. Pri trajnih mehanskih vplivih je lahko že majhno povečanje pritiskov nevarno. Pri začasnih vplivih pa je praviloma nevarna le večja obremenitev (Leitner, 2000).

Do posedanja zidov skupaj s temelji prihaja v primerih slabega temeljenja ali oslabelosti temeljev.

Posedanje tal je pojav, ki nastane zaradi tektonskih premikov v zemeljskih globinah, izkopov pod površjem zemlje, neustreznih posegov v vodotoke in izsuševanja zemljišč. Posedanje v blagih oblikah povzroča razpoke in separacijo (podmehurjenje) ometov, v težjih oblikah pa odpadanje večjih kosov oziroma površin stenskih slik in rušenje stavbe (Bogovčič, 2000).

Potresi lahko močno ogrozijo obstojnost stavbe in s tem stenskih slik na ostenju in obokih (slika 2.7). Slabijo kohezivnost ometa in njegovo povezavo z zidom kot nosilcem, načenjajo strukturo samih zidov, ustvarjajo globoke kaverne in razrahljajo vezivno malto. Močnejši potresi povzročajo tudi večje

poškodbe: številnejše in širše razpoke, razrahljane zidove, separacijo plasti (podmehurjenja) in odpadanje večjih ploskev ometa s poslikavo (Bogovčič, 2000).



Slika 2.7: Godešič, cerkev sv. Miklavža, odstopanje ometa od zidu zaradi potresa in prezidav v preteklosti. Valovita površina stenske slike (levo) in detajl nivojske razpoke zaradi odstopljenega ometa od zidu (desno) (Kavčič, 2015).

Figure 2.7: Godešič, St. Nicholas Church, detached plaster layer from the wall because of earthquake and rebuildings in the past. The corrugated surface of the wall painting (left) and a detail of a leveling crack caused by the detached plaster from the wall (right) (Kavčič, 2015).

2.3.4 Nepravilna tehnična in tehnološka izdelava stenske slike

Nepravilna izdelava stenske slike je lahko med glavnimi vzroki njenega propadanja in razpadanja. Do luščenja barvnih plasti, odpadanja ometov in propadanja grajene osnove sten pogosto pride tudi zaradi (Mora in sod., 1984):

- Slabe priprave gradiva za izdelavo nosilne konstrukcije, ometov in barvnih plasti. Pogosto je zaradi tega oslavljen stik med zidom in plastjo ometa oziroma stik med posameznimi plastmi ometov. Primer neprimerne priprave gradiv je na primer omet, ki je bil nanesen na star, neočiščen zid (nosilec) oziroma na star omet, na zaglajeno površino ometa ali barvno plast. V tem primeru bi bilo potrebno predhodno odstraniti in nahrapati ali naključvati površino, da se omogoči dobra povezava veziva s podlago. Prav tako je pomembno, da se površina dobro omoči z vodo, posebej v primeru, če porozni zid hitro absorbira vodo (opeka). Za ustrezno sušenje in vezanje apnenih malt je treba preprečiti hitro absorpcijo vode iz malte s strani porozne podlage.

- Nepravilne uporabe materialov oziroma nepravilne priprave ometa. Ključnega pomena je ustrezna izbira materialov in priprava ometa. Če je uporabljenega preveč veziva, obstaja nevarnost nastajanja večjih razpok, zaradi krčenja veziva, kar prej ko slej povzroči odstopanje ometa od zidu ali finega od grobega ometa. V nasprotnem primeru, če veziva primanjkuje, pa imamo opravka s premajhno kohezijo znotraj posamezne plasti ometa in s premajhno adhezijo med plastmi ometov ali med

ometom in nosilcem, zato nastopi ločevanje posameznih plasti stenske slike in/ali razkrajanje (prašenje) ometa (Torraca, 2009). Na kakovost vgrajenih apnenih malt vplivajo tudi ustrezna temperatura pri izvedbi, vlažnost ozračja, čistost surovin, način priprave in čistost oziroma pravilna priprava podlage, na katero se nanaša omet.

Prav tako je pomembna pravilna sestava ometa, velikost zrn agregata in razmerje med vezivom ter agregatom glede na debelino ometa.



Slika 2.8: Soča, cerkev sv. Jožefa, odstopanje ometa zaradi nepravilne priprave površine pred nanosom nove plasti ometa. Detajl nivojske razpoke (levo) in naključna površina z ostanki beležev, na katero je bila nanešena nova plast ometa s poslikavo (desno).

Figure 2.8: Soča, St. Joseph Church, detached plaster layer due to improper surface preparation before applying a new layer of plaster. A detail of a leveling crack (left) and pecking area with the remains of paint layers to which a new layer of plaster with painting is applied (right).

2.3.5 Neprimerne intervencije

Prav tako imajo velik vpliv na stanje stenskih slik pretekli/sedanji konservatorsko-restavratorski posegi. Za sanacijo odstopajočih plasti ometov so se in se še vedno uporabljajo različni pristopi, eni bolj in drugi manj agresivni do stenske slike: uporaba vijakov, mrež in/ali sider, injiciranje različnih injekcijskih mas, zamenjava dotrajanega nosilca, rekonstrukcija (Leitner, 2000).

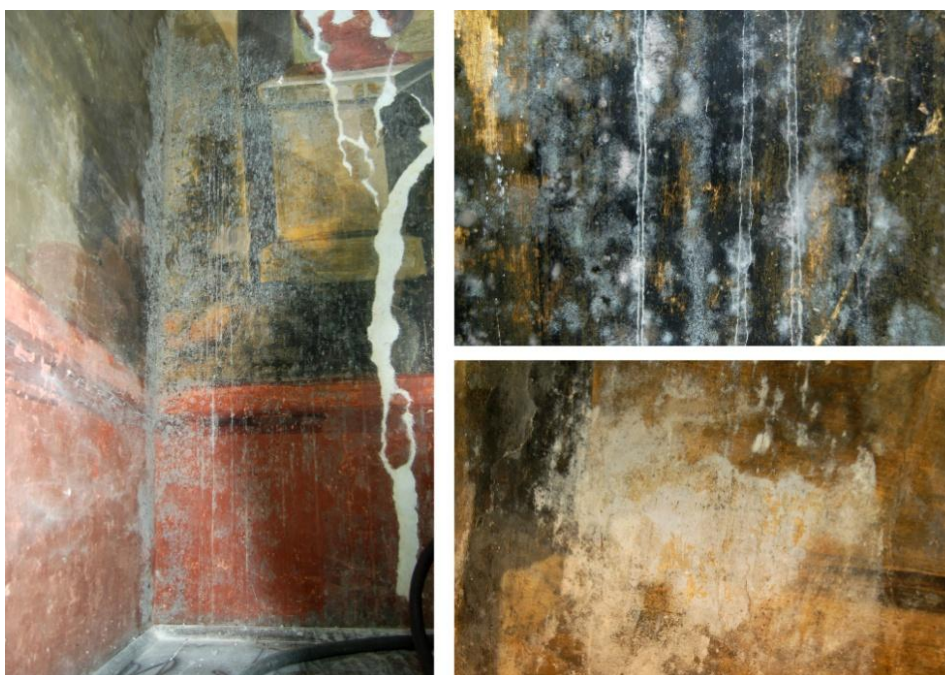
Pogoj za integralni pristop konserviranja-restavriranja stenskih slik je poznavanje tehnologij izdelave in lastnosti večslojnih historičnih materialov ter njihovega medsebojnega delovanja. Pogoste nepravilne intervencije in/ali nepoznavanje materialov pri konservatorsko-restavratorskih delih uničujejo vez in ravnovesje med izvornimi materiali ter povzročajo nadaljnje poškodbe.

Stenske slike so bile večinoma zasnovane na podlagah apnenih ometov (apneno vezivo – hidratizirano (gašeno) apno in pesek kot polnilo), zato je pravilno oziroma nujno, da se za konservatorske-restavratorske posege uporabljajo materiali na osnovi mineralnih veziv, z ustreznim polnilom in dodatki.

Eden od najbolj razširjenih vzrokov za poškodbe na historičnih stavbah in posledično na stenskih slikah je uporaba betona (utrjevanje temeljev, ojačitve opornikov, izdelava armiranobetonskih vencev), ugotavlja avtor Arendt (1987). Avtorja Arnold in Zehnder (1987) navajata, da soli iz portlandskega cementa (etringit in tumasit) vplivajo na propadanje gradiv historičnih zgradb.

Na problematično uporabo injekcijskih mešanic na osnovi cementnega veziva pri utrjevanju zidov s stenskimi slikami opozarjajo avtorji Mora in sod., (1984):

- Voda, ki je potrebna pri postopku injektiranja, lahko doseže barvno površino stenske slike in povzroča poškodbe med procesom sušenja (slika 2.9).
- Cementna voda lahko prodre skozi majhne razpoke in doseže stensko sliko, kar se kaže kot izcedek na barvni površini ali kot mesta različne trdnosti pod barvno plastjo. Posledica so neizbežni madeži in razkroj veziv stenske slike.
- Nizka poroznost cementnega veziva ovira prehod vodne pare in s tem povzroči zastajanje vode v originalnem materialu ter posledično vodi do razvoja plesni, mehanskega propadanja, problemov pri zmrzovanju.
- Ko se vlaga pojavi v poznejših stadijih, topi vodotopne soli v cementu in jih transportira na površino stenske slike, kar povzroči velike poškodbe zaradi njihove kristalizacije.



Slika 2.9: Viteška dvorana, grad Brežice, po konstrukcijskem utrjevanju zidu z injekcijsko maso na cementni osnovi (levo) se je pojavila na površini barvne plasti plesen (desno zgoraj) in izsoljevanje vodotopnih soli (desno spodaj).

Figure 2.9: The Knights' Hall in the Castle of Brežice, after construction consolidation of the wall with cement based grout (left), mould and soluble salts deposition appeared on the paint surface (bottom right).

Z razvojem umetnih smol se je pričela njihova uporaba tudi za utrjevanje odstopajočih plasti ometov. Izkazalo se je, da prekomerna uporaba umetnih smol vpliva na spremembe naravnega režima prehoda vodne pare skozi plasti ometov in zidu, kar vodi v ponovno odstopanje plasti ometov in nastajanje novih poškodb.

2.4 Pregled neporušnih preiskav odstopajočih plasti ometov stenskih slikah

Stenska slika je sestavljena iz več različnih plasti ometov in barvnih plasti. Odstopanje ometov in nastajanje zračnih žepov sta običajna pojava njene degradacije. Pogosto historični ometi s poslikavami le deloma odstopijo od nosilca. Za prepoznavanje odstopljenih plasti ometov so zato potrebne posebne tehnike pregleda. Vsaka tehnika ima svoje prednosti in slabosti, zato je priporočljiva kombinacija različnih tehnik.

V vsakem primeru je osebni vizualen pregled izkušenega konservatorja-restavratorja osnova za nadaljnje diagnosticiranje s sofisticiranimi tehničnimi metodami.

Iz zornega kota občutljive narave historičnih del, bi pregled moral biti nedestruktiven, kar pomeni, da se v objekt fizično ne posega.

V literaturi je velik poudarek na diagnosticiranju barvnih plasti – analizi pigmentov, kot tudi kemičnem in biološkem raziskovanju površin stenskih slik. Relativno malo literature pa je posvečene diagnosticiranju strukture stenske slike, kar ugotavljajo tudi avtorji Sfarra in sod. (2014).

Klasična metoda pregleda stanja stenske slike je test z udarjanjem, katerega se konservatorji-restavratorji pogosto poslužujejo. Ta poteka tako, da po površini dekorativnega ometa ali stenske slike nežno trkamo s prsti ali s primernim lahkim kladivom. Akustični odziv na mehanski poseg je na splošno znak za stanje povezave plasti. Višji toni običajno pomenijo kompaktno strukturo, medtem ko se nizki toni pojavijo nad zračnimi žepi odstopljenih plasti ometov. Spekter zvokov je lahko zelo različen že na majhni površini – zvoki se postopno znižujejo ali višajo skozi odstopljene in kompaktno strukture – zato je njihova interpretacija lahko težavna.

Za tak pregled je potreben izkušen konservator-restavrator, da zagotovi skladne in zanesljive rezultate. Prav tako je potrebno omeniti, da je metoda mehanska in je zato potrebno biti pazljiv, še posebej na mestih močnejšega odstopanja plasti ometov, kjer je potrebno mehanski pritisk prilagoditi stanju.

Preiskava s pritiskom je pogosto dopolnilna preiskava pri pregledu mehurjev, izboklin in različnih vrst razpok. Stopnjo vertikalnega ali horizontalnega premikanja poškodovanih mest proti nosilcu se preizkuša z uporabo majhnega pritiska.

Če se bližnja razpoka v ometu pokrije z belim prahom (mehak čopič), bo tudi manjši premik v ometu viden z dvigovanjem prahu iz razpoke (Hinsch in sod., 2009).

Temeljit pregled poškodovane stenske slike omogoča pridobitev večjega števila podatkov in ne samo podatkov o področjih kompaktnih mest in zračnih žepov. Avtorji Hinsch in sod. (2009) so pri klasični metodi pregleda stenske slike v samostanski cerkvi Müstair v Švici razločili in zabeležili več pojavov, kot so: kompaktna stabilna področja; področja zračnih žepov; nestabilna področja plasti ometov, ki lahko odpadejo; globoka votla področja v zidu pod plastmi ometov; odstopanja blizu površine med barvnimi plastmi (mehurji); globoke razpoke (mehanski vplivi); razpoke na površini (nastale zaradi krčenja); področja z izgubo ometov (lakune).

Avtorji Castellini in sod. (Castellini in sod., 1996) menijo, da se metoda s trkanjem ne sme obravnavati kot standardna metoda, saj je popolnoma odvisna od sposobnosti in izkušenosti konservatorja-restavratorja in ne omogoča kvantitativnih rezultatov. Je popolnoma subjektivna in neponovljiva in ni primerna za pregled in oceno skozi čas.

Za Castellini in sod. (1996) je zelo pomembno, da se reducirajo mehanski stiki s površino stenske slike med postopkom pregledovanja na najnižjo možno mero. Izogibati se je treba tudi montaži različnih senzorjev na stensko sliko. Optični instrumenti zagotavljajo možnosti nedotikajoče detekcije odstopajočih plasti ometov.

Termografija je nekontaktna in neinvazivna metoda merjenja temperature in prikaza porazdelitve temperature po površini historičnih ometov in stenskih slik. Prav tako omogoča nekontaktno, široko področje zaznavanja podpovršinskih anomalij. Omogoča hiter pregled objektov, saj je možno naenkrat pregledati več kvadratnih metrov površine. Rezultati, ki se pridobijo, so relativno enostavni za interpretacijo, saj so prikazani slikovno. Uporabljena je lahko kot nadomestna ali dodatna preiskava uveljavljenih neporušnih preiskav. Pasivna termografija zabeleži meritve naravno segretyh predmetov na temperaturo okolja. Drugi pristop je aktivni pristop, kjer je za izvedbo meritev potrebno umetno dovajanje toplote. Največjo težavo predstavlja hitro in enotno gretje večjih površin, kar se večkrat težko zagotovi. Zaznati je možno le napake oz. defekte, ki imajo dovolj različno toplotno prevodnost od ostalega materiala. Nenazadnje pa je metoda omejena tudi z debelino preizkušanca, saj toplotni tok lahko prodre največ približno 10 cm pod površino (Jazbec, 2013). Na to temo obstaja kar nekaj razprav, analiz in eksperimentov (Spagnolo in sod., 1999, Bodnar in sod., 2012a, Bodnar in sod., 2012b). Skupno vsem raziskavam je, da termografija omogoča zaznavanje odstopljenih plasti ometov (zračnih žepov) in poškodb na stenski sliki.

Glede na slabosti, ki jih ima klasična metoda s trkanjem, so poskušali razviti bolj sistematičen način diagnosticiranja odstopljenih plasti stenske slike. D'Ambrogio in sod. (1994) predlagajo uporabo nedestruktivnega orodja za zaznavanje odstopajočih plasti ometov stenske slike z merjenjem funkcij odzivnih frekvenc (FRF Frequency Response Functions). Metoda izkorišča inercijo posameznih elementov, ki so predmet preiskave, ko vzbujamo konstrukcijo z nizko udarno silo in merimo njen

odziv s pomočjo pospeškomerov. Obstaja jasna razlika med frekvenčnim odzivom in odstopljenih predelov, kar pomeni, da obstaja korelacija med delom stenske slike, ki je odstopila od podlage in FRF obliko.

Rezultati meritev FRF so za avtorje D'Ambrogio in sod. (1994) zelo spodbudni, saj je metoda zaznala vsa odstopanja ometov (zračnih žepov). Avtorji ugotavljajo, da primeren način vzbujanja, ustrezno merilno območje in nizka intenziteta napetosti vzbujanja niso škodljivi za občutljive strukture stenske slike. Poleg tega je zagotovljena ponovljivost testa, metoda je enostavna za uporabo, možno pa je pridobiti tudi informacije o debelini, obliki in velikosti zračnih žepov.

Castellini in sod. (1996) so predlagali metodo merjenja z laserskim vibrometrom. Laserski vibrometer je optična naprava, namenjena merjenju površinskih vibracij na daljavo. Vibrometer je predvsem primeren za merjenje vibracij na težko dostopnih mestih, večjih površinah stenske slike, metoda je neinvazivna. Za svoje delovanje vibrometer izkorišča Dopplerjev pojav (t. i. laserski Dopplerjev vibrometer). Na podlagi interference testnega laserskega žarka, odbitega od merjene površine in referenčnega žarka znotraj naprave, lahko naprava določi hitrosti nihanja ali odmike površine od prvotne lege. Ustvari se 2D slika (namišljena), z analizo katere se določijo lokacije in oblike poškodovanih območij. Avtorji Castellini in sod. (1996) so meritve opravili najprej na pripravljenih modelih s poškodbami in nato še na pravih stenskih slikah v notranjosti cerkev.

Calicchia in Cannelli (2005) sta uporabila akustično metodo, ki temelji na absorpciji akustične energije, ko je stenska slika izpostavljena določenim akustičnim valovom. Ta nedestruktivna metoda zagotovi zvočno sliko poškodb.

Avtorja Vescovo in Fregolent (2005) sta nadgradila akustično metodo FRF, ki temelji na analizi dinamičnega odziva ometa. Rezultati analize kažejo, da je pregled z akustično metodo zmožen zaznati odstopljene plasti ometov, kot tudi njihovo obliko (Del Vescovo in Fregolent, 2009). Učinkovitost diagnoze je odvisna od občutljivosti akustične metode na vibracijo strukture ometa. Na splošno je ta občutljivost zadostna za zaznavo pozicije oblike poškodovanega območja.

Optične metode, ki temeljijo na hologrfski interferometriji, so bile prav tako množično uporabljene na področju konservatorstva. Ta metoda zagotavlja natančne informacije o lokaciji in velikosti odstopljenih plasti ometov oziroma poškodb, vendar je uporaba za rutinske preglede brez ustrezno izobraženega operaterja težka naloga. Pogosto so hologrfske tehnike preveč kompleksne in drage za rutinsko uporabo, ker se zateva stabilnost opreme za merjenje (ne sme biti vibracij). V večini primerov hologrfski interferometri niso primerni za diagnosticiranje na objektu, razen pri uporabi laserja.

Izjema je ena od novejših metod, ki uporablja laserski interferometer imenovan TV-holograf. Gre za ESPI-elektronsko interferometrijo s pikčastim vzorcem (ang. Electronic Speckle Pattern

Interferometry). Metoda je bila uspešno uporabljena za diagnosticiranje odstopljenih plasti ometov (Spagnolo in sod., 1999, Hinsch in sod., 2009, Sfarra in sod., 2014). Ta metoda je poceni, varna in enostavna za uporabo ter namenjena rutinskim preiskavam na objektih. ESPI je bila razvita kot metoda za pridobivanje interferometričnih podatkov brez uporabe tradicionalnih holografskih snemalnih tehnik. ESPI se lahko uporablja kot kombinacija holografije in vzorčaste interferometrije, kot medij za snemanje je namesto holografskega filma uporabljena CCD digitalna kamera (Sfarra in sod., 2014).

Nedavno sta v Švici Zehnder in Voute (2009) razvila novo neporušno metodo, imenovano zrcalni mikrometer, ki je sposobna zaznati odstopanja plasti ometov v μm področju in teraherčni spektroskopski sliki za vrednotenje podrisb in barvnih plasti pod ometi.

2.5 Pregled uporabe injekcijskih mešanic v Sloveniji

Pregled prakse oziroma uporabe injekcijskih mešanic v Sloveniji od leta 1950 do 2014, na podlagi dostopne literature (članki, poročila) in poizvedovanja pri več aktivnih konservatorjih-restavradorjih, kaže, da posebnih raziskav injekcijskih mešanic na področju stenskega slikarstva v Sloveniji do leta 2014 ni bilo. V pregled so vključeni tudi postopki utrjevanja odstopljenih plasti ometov stenskih slik, ki se nahajajo na zunanjsčini ali notranjsčini stavbe, na kamnitem ali opečnatem nosilcu. Izsledki pregleda so predstavljeni v prilogi B.

Med vsemi pregledanimi delovnimi poročili imajo nekatera poročila injekcijski postopek omenjen le kot kratek zapis, brez sestave in detajlov o injekcijskih mešanicah.

Pergar (1988) v poročilu navaja, da so stenske slike svetih treh kraljev v Sužidu na severni strani ladje močno podmehurjene, zato na raznih mestih omet odpada. V nadaljevanju avtor ne omenja detajlov konsolidacije in vrste uporabljene injekcijske mešanice, temveč navaja le: »*podmehurjena mesta smo utrdili z injektiranjem*« (Pergar, 1988).

V primeru cerkva sv. Neže v Lopati, sv. Neže v Vrheh, sv. Trojice v Hrastovljah ter sv. Petra in Pavla v Dobravljah je opisu sanacije odstopajočih plasti ometov namenjena večja pozornost.

Natančnejši opis podaja starejši zapis sanacije odstopljenih plasti ometov stenske slike v primeru cerkve sv. Petra in Pavla v Dobravljah. Zadnikar in Komelj (1953–1954) opisujeta, da je bil omet, odstopljen od zidu, predhodno zaščiten z opažem. Izvrtanih je bilo 25 lukenj, skozi katere se je injicirala apneno-kazeinska injekcijska mešanica. Porabili so okrog 5 l doma pripravljene kazeina.

Bogovčič (1990) v primeru sanacije odstopljenih plasti ometov v cerkvi sv. Trojice v Hrastovljah navaja, da je bilo mikroinjektiranje opravljeno po celotni poslikavi. Vseh injektirnih točk je bilo 422.

Izdelana je bila natančna grafična predloga o lokacijah podmehurjenosti (zračni žepi) in o injektirnih vrtinah. Prav tako avtor navaja sestavo injekcijske mešanice, ki je iz apnenega testa in akrilne emulzije (Primal AC35) v volumskem razmerju 60 : 40. Gostoto (verjetno gre za viskoznost) injekcijske mešanice so prilagajali potrebam injektiranja.

Avtorja poročila Bogovčič in Vardjan (1991) ugotavljata in se zavedata, da je stabilizacija odstopajočih plasti ometov od nosilca (zidu) tehnološko zahtevni poseg na stenskih slikah v cerkvi sv. Neže v Lopati. Kot vzrok za odstopanje plasti ometov od nosilca navajata slabo tehnologijo izvedbe stenske slike. Ista avtorja navajata, da je potrebno najprej odstopljene plasti ometov obšiti in nato injicirati, da se odstopljen omet ponovno oprime zidu.

Podobna opažanja navaja avtor Kovačič (1983) v primeru cerkve sv. Neže na Vrheh. Zapisal je, da je sanacija odstopljenih plasti ometov stenskih slik zahtevala veliko natančnost pri konserviranju. Zaradi številnih votlih mest je bil omet precej razrahljan in s tem občutljiv že na vsak dotik. Za sanacijo so uporabili apneno kazeinsko injekcijsko maso (Kovačič, 1983).

Kot je razvidno iz zgoraj navedenih poročil, je za obdobje od leta 1950 do 1990 značilna množična uporaba injekcijske mešanice, pripravljene s hidratiziranim apnom v obliki testa (apneno testo) in z dodatkom kazeina (t. i. apneni kazeinat), z ali brez polnila, ki je praviloma kalcitna moka (preglednica 2.3, Masa 1). Apnena kazeinska injekcijska mešanica, ki so jo slovenski konservatorji-restavratorji uporabljali v letih med 1950 in 1990, sestoji iz 5 delov apnenega testa in 1 dela kazeina, z ali brez finega peska (Bogovčič, 2006). Podatek o količini dodanega peska v pripravljen apneni kazeinat ni dostopen.

Kazein je glavna beljakovina v mleku sesalcev, ki ga je moč ločiti s koagulacijo pod vplivom kislin ali sirila (Mora in sod., 1984) in je glavna sestavina sira, ki se pripravi iz posnetega mleka. Topen je v bazah (npr. v vodi z dodanim apnom), netopen pa v vodi, etru itd.

V apneno vezivo so ga dodajali zaradi povečanja sprijemne trdnosti s podlago in zmanjšane potrebe po vodi. Sčasom je prešel, zaradi reakcije kalcijevega hidroksida s CO₂ iz zraka, v stabilni in bolj ali manj za mikroorganizme neobčutljiv apneni kazeinat. Pogosto so konservatorji-restavratorji uporabili apneni kazein s premalo gašenega apna, ki je imel funkcijo topila za kazein, veziva in konzervansa. Obstojnost take injekcijske mešanice na mikroorganizme je zelo slaba. Zato so dodajali za povišanje obstojnosti na mikroorganizme razne fungicide (Bogovčič, 2000).

Politična in ekonomska situacija v Sloveniji po drugi svetovni vojni, vse do leta 1990, je znatno vplivala na konservatorsko-restavratorsko prakso. V tem časovnem obdobju je bilo zelo težko pridobiti materiale iz tujine. Zato so uporabljali materiale, ki so bili proizvedeni in dostopni na lokalnem trgu (v Jugoslaviji). Tako so nekateri konservatorji-restavratorji uporabljali lokalne kemične

datke, kot je akrilna smola Barlep. Barlep je akrilna disperzija, proizvedena v podjetju Prva-Iskra iz Bariča v Srbiji leta 1980 (Bogovčič, 2014a). Drugi podatki o Barlep produktu niso znani.

Preglednica 2.3: Sestava injekcijskih mešanic v Sloveniji od 1950 do 2014.

Table 2.3: Composition of injection grouts in Slovenia from 1950 to 2014.

Oznaka mešanice	Sestava injekcijske mase	Opis	Vir
Masa 1	5 delov apnenega testa 1 del kazeina	V nekaterih primerih se je dodal fin pesek (apnenčeva moka). Za obstojnost na mikroorganizme se je dodal fungicid.	(Bogovčič, 2006)
Masa 2	5 delov apnenega testa 1 del akrilne smole (Paraloid AT85, Barlep)	V nekaterih primerih se je dodal fin pesek (apnenčeva moka).	(Butina, 2005b)
Masa 3	2 dela apnenega testa 1 del akrilne smole (Paraloid, Primal AC33 ali Barlep)	V nekaterih primerih se je dodal fin pesek (apnenčeva moka).	(Butina, 2005b)
Masa 4	1 del apnenega testa 1 del finega peska (kalcitne moke) 1 del vode	Če je mogoče čim manj vode.	(ZVKDS, 2014, Kavčič in Andrejčič, 2006)
Masa 5	1 del apnenega testa 1 del kalcitne moke 1 del vode Akrilna smola (Ares SF-016 ali Sokrat 2804)	Koncentracija akrilnih smol je neznana.	(Zoubek, 2013)

Apneni kazeinat so pozneje izpodrinile emulzije sintetičnih smol, ki so jih dodajali v apnene injekcijske mase, kar uporabljajo nekateri konservatorji-restavratorji še danes za zapolnitev votlih mest. Na podlagi dostopne dokumentacije in osebno pridobljenih informacij za obdobje od leta 1984 do 2013 so bile najbolj uporabljane naslednje akrilne smole tujih proizvajalcev: Primal AC-35, Paraloid AT-85, Primal AC-33 in Primal E-330 FM. Med primerljivimi slovenskimi izdelki pa izstopata (Zoubek, 2013) Sokrat 2804 in Ares AF-016 proizvajalca Samson Kamnik. Na podlagi pregledane literature in opravljene primerjave je razviden časovni zamik uporabe akrilnih smol v injekcijskih mešanicah v Sloveniji, glede na evropsko konservatorsko-restavratorsko prakso, kjer so akrilne smole v injekcijskih mešanicah uporabljali že od leta 1960 (Zajadacz in sod., 2010, Mora in sod., 1984).

S pojavom akrilnih smol se je spremenila sestava injekcijske mešanice. Od leta 1986 do 2005 je večina slovenskih konservatorjev-restavratorjev uporabljala dve injekcijski mešanici, Masa 2 in Masa 3 (preglednica 2.3), sestavljeni iz gašenega apna (apnenega testa) in akrilne smole (Paraloid AT-85, Primal AC-33, Primal E-330 FM in Sokrat 2804) (Butina, 2005b). Razlika med Maso 2 in Maso 3 je v razmerju gašenega apna in akrilne smole, Masa 3 ima veliko večji delež akrilne smole kot Masa 2. V

obeh primerih se lahko v mešanico doda fini pesek. Na žalost za omenjeni injekcijski mešanici ni podanih navodil, za kakšne poškodbe oziroma odstopanja naj bi se masi uporabljali.

Priprava injekcijskih mešanic z dodatki akrilnih smol je bila zelo preprosta. Lepljenje oziroma pritrjevanje odstopljenih plasti ometov na podlago je bilo hitro in v večini primerov niso bile potrebne dodatne opore po injiciranju.

Vendar pa sintetična sredstva za utrjevanje (akrilne smole), ki se dodajajo v apneno injekcijsko mešanico, pri višjih koncentracijah močno vplivajo na paropropustnost in transport vode v utrjeni stenski sliki. V območju posegov postanejo ometi velikokrat neprepustni za izmenjavo vlage med zidom in atmosfero. Zato lahko zaradi prekomerne vlage v spodnjih plasteh pride čez čas do odpadanja ometa ali barvne plasti. Poleg tega se nekateri produkti starajo in pri tem spremenijo barvo in fizikalne ter mehanske lastnosti, kar lahko dodatno poškoduje stensko sliko.

V obdobju od leta 1994 do 2000 v pregledanih poročilih in literaturi o konservatorskih-restavratorskih projektih nisem našla zapisa o sanaciji odstopljenih plasti ometov in njihovi sestavi.

Po letu 2005 sem v nekaterih primerih zasledila uporabo hidravličnega apna (naravni hidravlično apno NHL 5), predvsem za utrditev večjih odstopanj plasti ometov in razpok, ter uporabo komercialnih injekcijskih mešanic Ledan TB1 in Ledan TC1 (Priloga B).

Pri restavriranju stenske poslikave v stolni cerkvi sv. Nikolaja v Ljubljani je bila uporabljena injekcijska mešanica na osnovi hidravličnega apna (naravni hidravlično apno NHL5) (Zoubek, 2012).

Od leta 2007 naprej so slovenski konservatorji-restavratorji za stabilizacijo odstopljenih plasti ometov uporabljali injekcijsko mešanico na osnovi apnenega testa, ki so mu dodali kalcitno moko in vodo (preglednica 2.2, Masa 4). Pričetek uporabe injekcijske mase (masa 4) sovпада s predhodnim seminarjem o konserviranju historičnih fasad, ki ga je organiziral Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Restavratorski center (ZVKDS RC) leta 2006. Seminar je podal splošne smernice za obnovo historičnih ometov in navodila za stabilizacijo odstopljenih plasti ometov. Predlagana injekcijska mešanica je sestavljena iz 1 dela gašenega apna, 1 dela finega peska in 1 dela vode (Kavčič in Andrejčič, 2006, ZVKDS, 2014).

Injekcijsko mešanico Masa 4 so nekateri konservatorji-restavratorji modificirali (Masa 5) in ji dodali akrilno smolo (Sokrat 2084 ali Ares SF-016) (Zoubek, 2013). Na žalost informacija o deležu akrilne smole v mešanici ni dostopna.

V nekaterih primerih se je za manjša odstopanja ometov uporabljalo samo apneno testo, mešano z vodo. V primeru sanacije odstopljenih plasti ometov v cerkvi sv. Nikolaja v KREDU je konservator-restavrator modificiral komercialno injekcijsko mešanico Ledan TB1 z dodajanjem apnenega testa in kalcitne moke (Jazbec, 2012c).

V primeru konsolidacije odstopajočih plasti ometov stenske slike v cerkvi sv. Lamberta v Rutu so uporabili komercialno mešanico italijanskega proizvajalca s komercialnim imenom PLM-A (Zalar, 2014).

2.6 Pregled uporabe injekcijskih mešanic v mednarodnem prostoru

Pregled mednarodnih virov je pokazal, da zametki prve uporabe apnenega kazeinata segajo v srednji vek (Horie, 2002), vendar so ga množično začeli uporabljati šele v drugi polovici 19. stoletja (Mora in sod., 1984). Kazein so dodajali gašenemu apnu v utežnem razmerju 1: 9, zaradi povečanja kohezivnosti mešanice in s tem njene sposobnosti zadrževanja vode, kar je preprečilo prekomerno izgubo vode v stiku s poroznimi historičnimi materiali (Ferragni in sod., 1985).

Avtorji Mora in sod. (1984) so kot glavna razloga za uporabo injekcijske mase na osnovi apnenega kazeinata navedli sorodnost materialov in zmožnost dodajanja naravnih materialov v apneno mešanico za prilagoditev lepilne moči. Apnenem kazeinatu so pripisali nekaj dobrih lastnosti, kot so dobra penetracija in zapolnjevanje zračnih žepov v primeru predhodne navlažitve z vodo in etanolom v razmerju 50 : 50.

Zavedali pa so se, da se v primeru prisotnosti vlage v zidovih na mestih, kjer je uporabljen apneni kazeinat, lahko pojavi plesen. V primeru premočne koncentracije pa lahko apneni kazeinat poškoduje omet. Slabe lastnosti apnenega kazeinata, ki izvirajo predvsem iz narave apnenega veziva, so še njegovo nestrjevanje (vezanje) v vlažnem okolju ali v okolju brez dostopa zraka in visoko krčenje (Ferragni in sod., 1984).

Ponekod so apnenemu kazeinatu dodali olje za izboljšanje tečenja mase (Colalucci, 1987) ali polivinil acetat (razmerje 1:1 ali 1:0,5) za povečanje lepilne moči in elastičnosti (Mora in sod., 1984).

V apneni kazeinat z dodano polivinil acetatno smolo, se je lahko dodala marmornata moka ali fino mlet pesek kot polnilo (Mora in sod., 1984).

Apneni kazeinat s polivinil acetatom so uporabljali pri konsolidaciji odstopljenih plasti ometov stenskih slik v kapeli sv. Lovrenca v Švici leta 1982 (Horky, 1986). Prav tako so v isti kapeli za stabilizacijo ometov na nekaterih področjih uporabljali Vinavil, ki so ga razredčili z vodo v razmerju 1 : 2.

Uporaba disperzije polivinil acetatne smole v konservatorske-restavratorske namene se je začela leta 1940, čeprav so se intenzivne raziskave materiala in njegove primernosti za tovrstne posege začele šele leta 1960 (Horie, 2002).

Po letu 1950 so se počasi začele uveljavljati akrilne smole: Paraloid B-72 in Primal AC-33 (Cocca in sod., 2004, Horie, 2002). Avtorji Mora in sod. (1984) predlagajo za sanacijo odstopljenih plasti ometov akrilni raztopini Paraloid B72 in Primal AC-33, v 10 % volumenskem deležu veziva.

V nekaterih primerih so uporabljali za zapolnitev votlih mest hidravlična veziva (cement), ki niso kompatibilna z apnenimi ometi in povzročajo dodatne poškodbe na stenski sliki (Ferragni in sod., 1985).

Prva sistematična raziskava injekcijskih mešanic, namenjenih konserviranju dekorativnih arhitekturnih površin, je bila opravljena v okviru organizacije ICCROM (angl. International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property) v začetku osemdesetih let 20. stoletja (od leta 1979 do 1983).

V okviru ICCROM organizacije so razvili injekcijske mešanice na osnovi hidravličnega apna in jih promovirali za uporabo v praksi. Prav tako je v okviru ICCROM organizacije potekalo raziskovalno delo različnih avtorjev (Ferragni in sod., 1984) o injekcijskih mešanicah za stenske slike in mozaike. Avtorji so v raziskavi analizirali takrat dostopne in uporabljane materiale za injiciranje (apneno vezivo z dodatkom kazeina, apneno vezivo z dodatkom emulzij umetnih smol, umetne smole in cement). Na podlagi številnih testiranj injekcijskih mešanic v laboratoriju in na terenu so prišli do zaključka, da je najbolj primerna mešanica hidravličnega apna in zdrobljene opeke (razmerje ena proti ena), z dodatkom akrilne emulzije – Primal AC33 in natrijevega glukonata v vlogi plastifikatorja (Kenyon, 1996).

Leta 1995 je potekala konferenca z naslovom »Stabilising the substrate: Grouting the Optins«, kjer je bila glavna tema teorija in praksa injiciranja. Konferenca je bila razdeljena v tri sklope: injektiranje konstrukcijskih elementov (kamni, opeke, malte); injektiranje nekonstrukcijskih elementov (odstopanje ometov); praktične študije (Kenyon, 1996). Na konferenci je avtor Oldenbourg (1996) predstavil nemško prakso sanacije odstopljenih plasti ometov, konstrukcijskega injektiranja in razvoj ter uporabo injekcijske mase v obliki pene (nem. Schaummörtel), ki so jo razvili na Univerzi Weimer v Nemčiji leta 1993. Injekcijska mešanica iz hidravličnega apna in cementnega veziva z dodatkom stabilne pene je bila namenjena predvsem konstrukcijskemu injektiranju zidov. Oldenbourg (1996) je na konferenci predstavil tudi komercialno dostopno injekcijsko maso Ledan TB1, ki so jo uporabljali v Nemčiji.

Avtorica Ballantyne (1996) je na isti konferenci (leta 1995) predstavila prakso sanacije odstopljenih plasti ometov stenskih slik v Angliji. Za sanacijo je uporabljala le gašeno apno, z ali brez polnila v obliki peska, ker je menila, da ni modro vnašati v stensko sliko ničesar, kar lahko kasneje ogrozi njeno obstojnost. Predstavila je več primerov uporabe apnene injekcijske mase.

Na podlagi raziskav injekcijske mešanice s stabilno peno iz leta 1993 so leta 1996, prav tako v Nemčiji, opravili novo raziskavo različnih injekcijskih mešanic z lahkimi polnili, kot so silika gel, Aerosil, steklene kroglice, drobljen lehnjak, za namen sanacije odstopljenih plasti ometov stenskih slik

v Münchnu. Nobena od testiranih injekcijskih mešanic ni bila primerna, ker so vsebovale preveč vode in bile pretežke. Nadaljnje raziskave so privedle do razvoja posebne injekcijske mase v obliki pene, ki je izpolnila vse postavljene kriterije (preglednica 2.4): med procesom injektiranja se vnese manj vlage, masa se ne krči, ima dobro adhezijo, obstojna je na soli, istočasno pa gre za relativno lahek material (Klarner in Schick, 1998). Posebnost te injekcijske mase/pene je, da je primerna za večja odstopanja – več kot 3 cm. Masa se pripravi iz komercialno dostopnega Ledana TC1 in proteinske pene SB3 v razmerju 1 : 2 (Klarner in Schick, 1998).

Preglednica 2.4: Lastnosti injekcijske mase v obliki pene (Ettl, 2005: str. 19).

Table 2.4: Properties of injection foam grout (Ettl, 2005: p 19).

Lastnosti	Vrednost
Trdnost (MPa)	0,12
Prostorninska masa (g/cm ³)	0,93
Oprijem (MPa)	0,11–0,18
Oprijem na prvotnem ometu (MPa)	0,02–0,06
Poroznost (Vol. %)	58–82

Med starejšimi tujimi študijami je potrebno omeniti študijo avtorjev Baglioni in sod. (1997), ki so analizirali injekcijsko mešanico na osnovi gašenega apna. V študiji so izpostavili problem dostopa CO₂ v žepe med dvema odstopljenima plastema ometa, saj gašeno apno za karbonatizacijo potrebuje dovolj ogljikovega dioksida. Raziskava je bila usmerjena na dodatke, ki pospešijo strjevanje injekcijske mase na osnovi gašenega apna ob nizki prisotnosti CO₂ ter dodatkov, ki povečajo pretočnost mešanice. Na podlagi rezultatov preiskav je bila izbrana injekcijska mešanica, pripravljena iz gašenega apna in peska v razmerju 1 : 1 (v/v), z dodatkom etil karbamata in plastifikatorja na osnovi polinaftalen sulfonata. Z njo so stabilizirali odstopljene plasti ometov v kapeli Brancacci v Firencah (Italija).

Avtorica Bass (1998) je eksperimentirala in zasnovala injekcijske mešanice za odstopljene apnene omete na zidovih iz nežganih glinenih zidakov (earthen walls, adobe bricks). Za najboljšo injekcijsko mešanico se je izkazala sestava iz 2 masnih delov hidravličnega apna, 1 masnega dela peska, 1 masnega dela ultralahkega polnila in 1/10 masnega dela akrilne emulzije v vodi. Glavni namen raziskave je bila analiza lastnosti injekcijskih mešanic iz lahkih polnil v laboratorijskih razmerah.

V restavratorskem laboratoriju v Firencah je bila leta 1999, v okviru Opificio delle Pietre Dure (OPD), opravljena raziskava nabrekajočih injekcijskih mešanic za stabilizacijo odstopajočih dekorativnih ometov. Injekcijske mešanice so bile sestavljene iz gašenega apna, inertnega peska in

aluminijevega prahu (Lantern, 1999). Rezultati laboratorijskih analiz so bili spodbudni, saj med procesom nabrekanja masa ni poškodovala tankih krhkih plošč.

Prav tako je pomembno omeniti raziskavo v okviru doktorske disertacije avtorice Griffin (2004), ki je izpostavila težaven dostop zraka (CO₂) do lepilnega materiala med ločenima plastema ometov. Zato je raziskovala injekcijske mešanice na osnovi gašenega apna in pucolanskih dodatkov. Izbrani pucolanski dodatki so bili mleta žgana glina, tuf in vulkanski pepel. Raziskava (Griffin, 2004) prikazuje vpliv sušenja/strjevanja na lastnosti posamezne injekcijske mešanice in težave pri strjevanju na terenu – *in situ*.

Leta 2004 so raziskovalci v okviru GCI (Getty Conservation Institute) pričeli izvajati raziskavo na komercialno pripravljenih injekcijskih mešanicah. Cilj projekta je bil oceniti lastnosti komercialnih proizvodov in postaviti standarde za injekcijske mase, ki se uporabljajo pri konserviranju-restavriranju dekorativnih ometov. Projekt je temeljil na laboratorijskih analizah in preverjanju učinkovitosti materialov na terenu ter informiranju konservatorsko-restavratorske stroke o pravilni uporabi injekcijskih mešanic, z namenom izboljšanja pristopa v praksi. Avtorji Biçer-Simsir in sod. (2009) so pripravili obsežen pregled literature uporabljenih injekcijskih mešanic na konservatorskem področju. Pozneje sta avtorici Biçer-Simsir in Rainer (2013) izdali priročnik, v katerem opisujeta laboratorijske preiskave in priročne in-situ teste za preverjanje mešanic na terenu, ki omogočajo izbiro primerne injekcijske mešanice na osnovi hidravličnega apna za stabilizacijo odstopljenih plasti dekorativnih ometov.

Na konferenci s področja historičnih ometov HMC2010 in delavnici RILEM TC 203-RHM leta 2010 v Pragi so avtorji Zajadacz in sod. (2010) predstavili uporabo injekcijskih mešanic na Poljskem, od leta 1950 do 2010. Iz pregleda je razvidno, da so od leta 1950 do 1970 na Poljskem največ uporabljali apneni kazeinat. Sintetične smole so se na poljskem trgu pojavile že leta 1960, in to polivinil acetatne smole (Mowilith, Afcolac, Vinavil NPC in Winacet) in polivinil alkoholne ter akrilne smole (Primal AC 33, Rhoplex N560). Po letu 1990 se na poljskem trgu pojavijo komercialne mineralne mešanice, najprej Malta 6001 in Ledan TB1, po letu 2000 pa Albaria Inizione 100 (MAC) in PLM (CTS).

Potrebno je omeniti tudi novejšo raziskavo v okviru EU-STONECOR projekta, v okviru katerega sta avtorja Daehne in Herm (2013) oblikovala injekcijsko mešanico na osnovi nanodelcev apna ter s polnili in dodatki, ki je prav tako namenjena stabilizaciji odstopljenih plasti ometov. Najboljše lastnosti je dosegla mešanica iz CaLoSil in CaLoSiL-Micro nanodelcev, s celuloznim etrom ali marmornatim prahom kot polnilom (Daehne and Herm, 2013).

V času preiskav v okviru moje doktorske disertacije je na Portugalskem potekala primerljiva raziskava injekcijskih mešanic na osnovi hidratiziranega apna, finega agregata (peska), metakaolina in kemičnih dodatkov (Azeiteiro in sod., 2014), namenjenih stabilizaciji ometov, ki so odstopili od nosilca. V študiji so posebno pozornost posvetili reološkim lastnostim svežih injekcijskih mešanic in njihovim lastnostim v strjenem stanju, še posebej oprijemljivosti z nosilcem. V ta namen so bili razviti posebni preizkušanci, tako imenovani »sendviči«, ki omogočajo ovrednotenje sprijemne trdnosti med injekcijsko mešanico in podlago ter preverjanje sprememb v transportu vode skozi večplastni utrjen omet, kot posledica uporabljene injekcijske mešanice.

Pri pregledu literature po obsegu izstopajo raziskave in študije injekcijskih mešanic za konstrukcijsko injektiranje zgodovinskih zidov z namenom njihove utrditve. V zadnjih nekaj letih na tem področju intenzivno delajo raziskovalne skupine iz Portugalske, Italije, Grčije in Slovenije. (Uranjek, 2011, Valluzzi, 2009, Valluzzi in sod., 2002). V magistrskem delu je Uranjek (Uranjek, 2008) obdelal problematiko injektiranja zidov objektov kulturne dediščine v Sloveniji in opravil preiskave in analize devetih industrijsko predzamešanih mešanic, dobavljivih na slovenskem tržišču. V doktorski disertaciji pa se je ukvarjal z razvojem injekcijskih mešanic na bazi gašenega apna za konstrukcijsko injektiranje (Uranjek, 2011).

Izpostaviti je še potrebno dva avtorja Böttger (1997) in Macchiarola (2014), ki se ukvarjata z razvojem kompatibilnih malt za ohranitev zgodovinskih apnenih ometov na kulturnih objektih.

2.7 Pregled obstoječih komercialno dostopnih injekcijskih mešanic

Potem ko je bila razvita injekcijska mešanica na osnovi hidravličnega apna v okviru ICCROM projekta leta 1984, so se na evropskem trgu pojavile številne komercialno dostopne, v obratih pripravljene injekcijske mešanice. Narejene so na osnovi hidravličnih veziv in vsebujejo veliko pucolanskih in silikatnih mineralnih dodatkov ter dodatkov, ki niso kompatibilni ali so celo škodljivi za stensko sliko. Praviloma proizvajalci ne razkrivajo točne sestave svojih proizvodov, zato je nujno njihovo predhodno testiranje. Na žalost v dostopni literaturi ni veliko analiz, ki bi bile opravljene na komercialno dostopnih injekcijskih mešanicah.

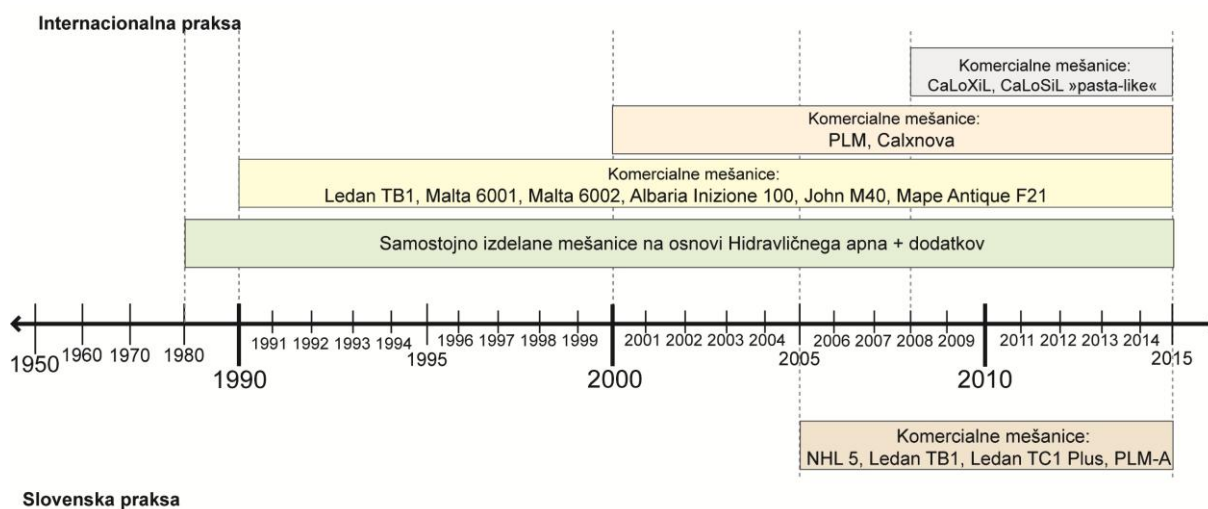
Skupna lastnost komercialno dostopnim injekcijskim mešanicam je enostavna in hitra priprava ter dobre delovne lastnosti (injektabilnost, pretočnost). Slabe strani takih injekcijskih mešanic pa so visoka vezivna moč in velika vsebnost vodotopnih soli (Biçer-Simsir in sod., 2013).

Na sliki 2.10 je na časovnem traku prikazan začetek uporabe komercialno dostopnih, v obratih pripravljenih injekcijskih mešanic v evropskem in slovenskem prostoru. Razvidno je, da se

komercialne mešanice v slovenski konservatorsko-restavratorski praksi pojavijo relativno pozno, glede na evropsko prakso na tem področju.

Od leta 1990 se na evropskem trgu in v konservatorski praksi pri utrjevanju odstopajočih plasti ometov pojavljajo v obratih pripravljene injekcijske mešanice s komercialnimi imeni: LEDAN (Tecno edile Toscana, Italija), Malta 6001 in Malta 6002 (Bresciani, Italija), Albaria Inizione 100 (MAC, Italija), John M40 (Heinz John, Nizozemska) in Mape Antique F21 (Mapei, Italija).

Od leta 2000 naprej pa so na trgu še: PLM (CTS, Italija), CaLoXiL in CaLoSiL »pasta-like« (IBZ, Nemčija) ter Calxnova (Deffner & Johann, Nemčija).



Slika 2.10: Vstop na trg in uporaba komercialno dostopnih mešanic v evropskem in slovenskem prostoru, prikazani na časovnem traku.

Figure 2.10: Introduction to the market and use of commercial grouts in Europe and in Slovenia, shown on the timescale.

2.7.1 Komercialno dostopne injekcijske mešanice med 1990 in 2000

Ledan TB1 in Ledan TC1-PLUS sta fizikalno/kemijsko kompatibilni injekcijski masi s kemično stabilno sestavo. Imata odlično sposobnost tečenja brez predhodnega vlaženja ometa in odlično sposobnost zapolnjevanja votlih mest ter razpok.

V tehničnem listu proizvajalci navajajo, da Ledan TB1 in Ledan TC1-PLUS sestojita iz hidravličnega veziva z malo vsebnostjo vodotopnih soli, kremenovega prahu, zelo finega pucolanskega dodatka (Terra Pozzuoli) in dodatkov, ki izboljšajo pretočnost, vodozadržnost ter poroznost (Kremer, 2014, Toscana, 2015).

Ledan TB1 in Ledan TC1-PLUS sta namenjeni konsolidaciji odstopajočih plasti ometov in razpok, debeline/širine do 5 mm. Na trgu je moč zaslediti več vrst injekcijskih mas, poimenovanih s komercialnim imenom Ledan in z različnimi oznakami (Ledan D1, LedanD/F, Ledan TC1, Ledan TC1-PLUS, Ledan SM02), ki so proizvedene v Italiji (Tecno edile Toscana).

Sestava posameznih injekcijskih mas Ledan z različnimi oznakami se razlikuje in s tem posledično njihova namembnost oziroma uporabnost (utrjevanje konstrukcijskih elementov ali utrjevanje dekorativnih historičnih ometov, štukature).

V preglednici 2.5 so podane lastnosti injekcijskih mas Ledan TB1 in Ledan TC1-PLUS, ki jih podajajo proizvajalci v tehničnem listu.

Slaba lastnost injekcijske mešanice Ledan je, da vsebuje vodotopne soli z visoko vsebnostjo sulfatov (SO_4) (Rousset in sod., 2005). Prav tako pa lahko Ledan povzroča madeže na barvni plasti in v primeru oslabiljenega veziva v ometu povzroči nadaljnje poškodbe na ometu in barvni plasti (Zajadacz in sod., 2010).

Preglednica 2.5: Lastnosti injekcijskih mas Ledan TB1 (Kremer, 2014) in Ledan TC1-PLUS (Toscana, 2015).

Table 2.5: Properties of injection grouts Ledan TB1(Kremer, 2014) and Ledan TC1-PLUS (Toscana, 2015).

Lastnosti	TB1	TC1-PLUS
Izločanje vode (%)	0	0
Vodozadržnost (%)	> 80	> 85
Absorpcija vode (%)	4,2	8
Prostorninska masa (g/cm^3)	1,4	1,25
Tlačna trdnost (MPa)	6	20
Upogibna trdnost (MPa)	2	5,2
Oprijem (MPa)	0,8	0,17
Difuzijska upornost prehoda vodne pare (μ)	6	15
Sušenje (h)	1	12 h
Krčenje (%)	0,7–1,8	6
Poroznost (%)	-	46

Malta 6001 in Malta 6002 (Bresciani, Italija) sta injekcijski masi na osnovi hidravličnega apna s silikatnim agregatom, superplastifikatorjem in dodatki za izboljšanje vodozadržnosti ter ekspanzivnimi sredstvi (Luzzana in Stefanoni, 2008). Tehnična lista posamezne injekcijske mase, Malta 6001 in Malta 6002, ne vsebujeta podatkov o njuni sestavi ter lastnostih (trdnost, oprijem, koeficient paroprepustnosti itd.). Razvidno je le, da je Malta 6001 namenjena manjšim odstopanjem (zračnim žepom) in Malta 6002 odstopanjem od 3 do 4 cm. Injekcijski masi Malta 6001 in Malta 6002 so uporabljali za konsolidacijo odstopljenih plasti ometov predvsem v Italiji (Luzzana in Mauri, 1991, Luzzana in Stefanoni, 2008).

Injekcijska masa Albaria Inizione 100 (MAC, Italija) je mešanica v prahu, ki se meša z vodo. Sestavljena je iz hidratiziranega apna, mikroniziranega karbonata, metakaolina in raznih dodatkov za

ekspanzijo mase, vendar ne deluje destruktivno na krhke porozne materiale. Ima dobro vodozadržnost, kar omogoča injiciranje brez predhodnega močenja z vodo. Superplastifikator na osnovi polikarboksilat etra omogoča dobro penetracijo in injektibilnost mešanice.

Proizvajalci v specifikaciji injekcijske mase Albaria Inizione 100 zagotavljajo, da masa ne vsebuje topnih soli (sulfatov, nitratov, kloridov, alkalij) in ni podvržena degradaciji (MAC, 1992). V preglednici 2.6 so podane lastnosti injekcijske mase iz tehničnega lista proizvajalca.

Suhi snovi se gljkjede na težo doda do 42% vode. Največje zrno praškastega materiala je 12 μm .

Preglednica 2.6: Lastnosti injekcijske mešanice Albaria Inizione 100 (MAC, 1992).

Table 2.6: Properties of injection grout Albaria Inizione 100 (MAC, 1992).

Lastnosti	Vrednost
Pretočnost (s)	25
Izločanje vode	minimalno
Koeficient vpijanja vode ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2})$)	0,07
Tlačna trdnost (MPa)	10
Natezna trdnost (MPa)	1,2
Upogibna trdnost (MPa)	3
Oprijem (MPa)	$\geq 0,15$
Sušenje (h)	20–30

John M40 je injekcijska masa, razvita za konservatorsko-restavratorske namene, proizvedena na Nizozemskem. Mineralno vezivo je na osnovi cementa, produkt ne vsebuje akrilnih smol, lateksa ali drugih sintetičnih polimerov in dodatkov (Jahn, 2012). Masa je zelo viskozna in dobro penetrira, ima visoko vezivno zmogljivost, nizko krčenje, odporna je na zmrzal ter vodotopne soli. V strjenem stanju ostaja porozna in ne vpliva na paroprepustnost.

Pimerna je za zapolnjevanje razpok in zračnih žepov širine/debeline od 5 do 10 mm. Vrednosti posameznih lastnosti injekcijske mase John M40 so povzete iz tehničnih listov in so podane v preglednici 2.7.

Pripravi se iz 2–2,5 volumskega dela veziva John M40 in 1 volumskega dela vode.

Preglednica 2.7: Lastnosti injekcijske mase John M40 (Jahn, 2012).

Table 2.7: Properties of injection grout John M40 (Jahn, 2012)..

Lastnosti	Vrednost
Pretočnost (s)	25
Izločanje vode	minimalno
Tlačna trdnost (MPa)	14,5 do 20,0
	se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednic 2.27

Upogibna natezna trdnost (MPa)	1,5 do 5,0
Sušenje (h)	24–48
Vpijanje vode (%)	10,0
Koeficient vpijanja vode ($\text{kg/m}^3\sqrt{\text{h}}$)	4,40
Difuzijska upornost prehoda vodne pare (μ)	16,8

Injekcijska masa z imenom Mape Antique F21 (Mapei, Italija) je namenjena stabilizaciji dekorativnih ometov in je zelo tekoča, stabilna ter odporna na vodotopne soli. Proizvajalec v tehničnem listu navaja, da masa sestoji iz apna in eko-pucolanskega dodatka, ultra finega polnila in dodatka za zadrževanje vode (Mapei, 2012). Lastnosti injekcijske mase Mape Antique F21 so podani v preglednici 2.8.

Injekcijska mešanica Mape Antique F21 je primerna za stenske slike na opečnatem nosilcu. Uporablja se za utrditev grobega ometa, ki je odstopil od zidu. Ima visoko sposobnost penetracije in vsebuje vodotopne soli.

Preglednica 2.8: Lastnosti injekcijske mase Mape Antique F21 (Mapei, 2012).

Table 2.8: Properties of injection grout Mape Antique F21 (Mapei, 2012).

Lastnosti	Vrednost
Pretočnost (s)	30
Zločanje vode (%)	0
Prostorninska masa strnjene mešanice (kg/m^3)	1,11
Tlačna trdnost (MPa)	10,0

2.7.2 Komercialno dostopne injekcijske mešanice od leta 2000 naprej

PLM (CTS, Italija) je injekcijska masa za stabilizacijo odstopljenih dekorativnih plasti ometov, ki je prišla na trg leta 2000. Sestoji iz hidravličnega apna, kremenovega polnila in dodatkov za povečano sposobnost tečenja ter stabilnost mešanice (odpornost proti sedimentaciji). V tehničnem listu je masa PLM opisana z naslednjimi lastnostmi (CTS, 2002): ne odbija vode, ne spremeni paroprepustnosti v zidu, ima podobne fizikalne in mehanske lastnosti kot apnena malta ter ne vsebuje vodotopnih soli.

Poznanih je več vrst injekcijskih mas s PLM oznako. Za stabilizacijo historičnih ometov se večinoma uporabljata masi z oznako PLM-A in PLM-M, predvsem ju uporabljajo italijanski konservatorji (Zini in Fenu, 2009). Suhi mešanici PLM je mogoče primešati apneno vezivo ali druge inertne dodatke. Za doseganje želene pretočnosti se lahko doda do 80 % masnega deleža vode.

V okviru konservatorskih posegov na katedrali Lausanne v Švici so bile opravljene analize injekcijske mešanice PLM-M. Rezultati so podani v preglednici 2.9 (Rousset in sod., 2005). Med drugimi testi so

opravili tudi test vsebnosti vodotopnih soli in ugotovili visoko vsebnost sulfatov (SO_4^{--}) in nitratov (Na^+).

Preglednica 2.9: Lastnosti injekcijske mešanice PLM-M (Rousset in sod., 2005).

Table 2.9: Properties of injection grout PLM-M (Rousset in sod., 2005).

Lastnosti	Vrednosti
Absorpcija vode (wt.-%)	6
Poroznost (%)	40
Koeficient vpivanja vode ($\text{mg}/\text{cm}^2\sqrt{\text{h}}$)	93
Tlačna trdnost (MPa)	20
Krčenje (%)	Ni krčenja

Po letu 2000 se na nemškem trgu pojavi injekcijska masa s komercialnim imenom Calxnova (Deffner&Johann, Nemčija). Proizvajalec v tehničnem listu navaja, da injekcijska mešanica Calxnova sestoji iz hidratiziranega apna (dispergirano), mineralnega polnila in dodatka celuloznega etra (< 0,5 %) (Deffner in Johann, 2012). Injekcijska mešanica Calxnova je primerna za vpojne mineralne podlage in konsolidacijo odstopajočih plasti ometov, razpok ter zračnih žepov. Več podatkov o injekcijski mešanici ni na razpolago.

Po letu 2008 sta se pojavili novi injekcijski masi na osnovi nanodelcev kalcijevega hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) s tržnim imenom CaLoXiL in CaLoSiL »paste-like« (IBZ, Nemčija).

CaLoXiL injekcijska masa vsebuje fino kalcijevo karbonatno polnilo z granulacijo manjšo od 6 μm . Namenjena je za manjše razpoke in stabilizacijo odstopajočih ometov (IBZ, 2015). Odlikuje jo dobra stabilnost z visoko pretočnostjo in adhezijo. Po strditvi postane masa porozna, z velikimi kapilarnimi porami. Mase CaLoXiL so hidrofobne.

Injekcijska masa CaLoSiL »paste-like« ima visoko koncentracijo suspenzije kalcijevega hidroksida z delci velikosti od 50 nm do 1 μm . Namenjena je za konsolidacijo razpok in odstopljenih plasti ometov, širine/debeline med 5 mm in 2 cm. Masa CaLoSiL »paste-like« ima visoko poroznost in tlačno trdnost (IBZ, 2015).

Avtorja Maryniak-Piaszczyński in Ziegenbalg (2010) sta modificirala in testirala injekcijske mase na osnovi proizvoda CaLoSiL »paste-like«. CaLoSiL pasti sta dodala kalcitno polnilo, disperzijo poliakrilat natrijeve soli in metakaolin. Rezultati preiskav modificirane injekcijske mase so povzeti po Maryniak-Piaszczyński in Ziegenbalg (2010) in predstavljeni v preglednici 2.10.

Preglednica 2.10: Lastnosti injekcijske mešanice na osnovi proizvoda Calosil paste-like (Maryniak-Piaszczyński in Ziegenbalg, 2010).

Table 2.10: Properties of injection grout based on Calosil pasta-like (Maryniak-Piaszczyński and Ziegenbalg, 2010).

Lastnosti	Vrednost
Absorpcija vode (wt.-%)	23,2
Poroznost (%)	36,2
Koeficient vpivanja vode ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{1/2})$)	4
Tlačna trdnost pri 30 dneh (MPa)	4,3
Upogibna trdnost (MPa)	1,1
Oprijem (MPa)	0,1
Krčenje (%)	0,4

»Ta stran je namenoma prazna«

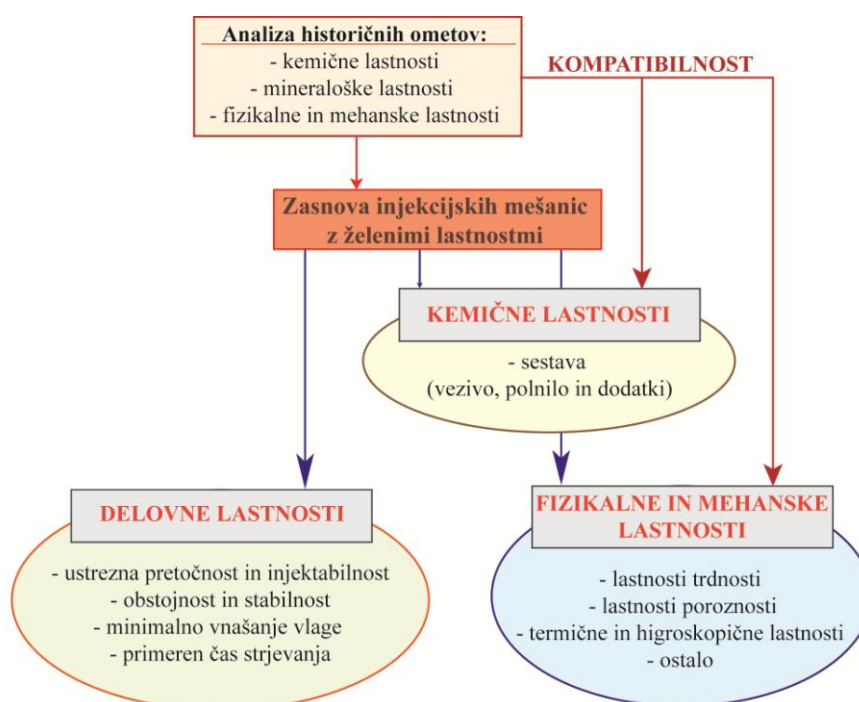
3 IZHODIŠČA ZA RAZVOJ KOMPATIBILNIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC ZA STABILIZACIJO ODSTOPAJOČIH PLASTI OMETOV STENSKE SLIKE

3.1 Predstavitev zahtevanih lastnosti nekonstrukcijskih injekcijskih mešanic

Z večletnim sodelovanjem pri konserviranju-restavriranju stenskih slik na različnih projektih kulturne dediščine in pri spremljajočih laboratorijskih analizah historičnih materialov sem prišla do zaključka, da za sanacijo odstopajočih plasti ometov s poslikavami še vedno ni materiala in/ali tehnologije, ki bi izpolnili predpisane pogoje glede kakovosti in obstojnosti saniranega ometa s poslikavo. To potrjuje tudi predhodno opravljen pregled uporabe injekcijskih mešanic za stabilizacijo odstopajočih plasti dekorativnih ometov v Sloveniji.

Avtor Oldenbourgh (1996) ugotavlja, da imajo injekcijske mešanice na osnovi apnenega veziva, ki so se in se še uporabljajo (predvsem v Sloveniji), več slabosti, kot so: visoka vsebnost vode v vezivu; vnašanje dodatne teže in vlažnosti v konstrukcijo; segregacija in sedimentacija injekcijskih materialov; omejeno področje prilagajanja karakteristik in parametrov trdnosti/gostote z originalnimi materiali.

Komercialno dostopne, v obratih pripravljene injekcijske mešanice s stališča konservatorsko-restavratorske stroke velikokrat niso primerne za obnovo občutljivih stenskih slik, saj pogosto vsebujejo sestavine (portlandski cement), ki niso kompatibilne ali so celo škodljive za sestavine stenske slike.



Shema 3.1: Potek zasnove kompatibilnih injekcijskih mešanic.
Scheme 3.1: Diagram of steps in designing compatible injection grouts.

Zasnova injekcijskih mešanic z zelenimi lastnostmi je prikazana na shemi 3.1. Pred pričetkom zasnove injekcijskih mešanic je pomembno analizirati historične omete, ki bodo predmet posega. Določiti je treba njihove kemične, mineraloške, fizikalne in mehanske lastnosti ter analizirati vzroke poškodb. Rezultati preiskav analiziranih historičnih ometov pripomorejo k definiranju ustreznih kriterijev oziroma lastnosti injekcijskih mešanic.

V preglednici 3.1 so podane splošne zahteve za nekonstrukcijske injekcijske mešanice.

Preglednica 3.1: Splošne zahteve za nekonstrukcijske injekcijske mešanice.

Table 3.1: Basic requirements for non-construction injection grouts.

Lastnost	Zahteva
Konsistenca/viskoznost	Dovolj tekoča, da se lahko injicira (Tavares in sod., 2010)
Izločanje vode	Najmanjše možno, $\leq 2\%$ (EN 447:1996)
Vodozadržnost	Čim višja.
Čas strjevanja	≤ 48 ur (Ferragni in sod., 1984)
Krčenje	Najmanjše možno. $< 4\%$ (Ferragni in sod., 1984)
Poroznost	$> 20\%$
Koeficient prehoda vodne pare (μ)	50–100 % vrednosti historičnih ometov (Zajadacz and Simon, 2006)
Koeficient vpivanja vode	50–100 % vrednosti historičnih ometov (Tavares in sod., 2010)
Tlačna trdnost	Manjša od historičnih ometov ($< 60\%$) (Tavares in sod., 2010) 0,4–2,5 MPa (Veiga, 2012) 3–8 MPa (Ferragni in sod., 1984)
Cepilna natezna trdnost	0,3–1,2 MPa (Ferragni in sod., 1984)
Sprijemna trdnost	$\geq 0,1$ MPa (Tavares in sod., 2010)
Vsebnost vodotopnih soli	Količina vodotopnih soli naj bo čim manjša; vsebnost topnih natrijevih in kalijevih ionov mora biti čim manjša (< 120 meq/kg), vsebnost vodotopnega kalcija mora biti razumno nizka (< 60 meq/kg) (Zajadacz and Simon, 2006)

Za injekcijske mešanice je v prvi vrsti pomembna kompatibilnost z originalnimi materiali, saj je postopek konsolidacije ireverzibilna metoda. To pomeni, da morajo imeti injekcijske mešanice podobne lastnosti (kemijske, fizikalne in mehanske), kot utrjevani historični ometi, in to so:

- sestava (vrsta veziva in polnila, dodatki),
- trdnost (tlačna, cepilna natezna, sprijemna),
- poroznosti (poroznost, velikosti por, kapilarno vpivanje vode, paroprepustnost),
- ostalo (majhna lastna teža, minimalno krčenje pri sušenju, odpornost na zmrzovanje/tajanje in segrevanje/ohlajanje, vsebnost vodotopnih soli).

Pomembne so tudi delovne lastnosti mešanic v svežem stanju (tudi obdelavnost mešanic), od katerih je odvisna uspešnost zapolnjevanja odstopajočih plasti ometa. Zaželene delovne lastnosti so:

- ustrezna pretočnost in injektibilnost (za dobro zapolnitev razpok in zračnih žepov),
- odpornost na segregacijo in stabilnost,
- minimalno vnašaje vlage med postopkom injiciranja,
- primeren čas strjevanja,
- prilagoditev viskoznosti glede na objekt in vrsto problema.

3.2 Izhodišče izbire materialov za injekcijske mešanice

Izbor materialov za injekcijske mešanice je odvisen od lastnosti, ki se jih želi doseči ali dosegljivosti posameznih materialov. Cena materiala ima prav tako lahko pomembno vlogo pri izbiri, posebej pri obsežnih intervencijah.

V pričujoči doktorski disertaciji izbor hidratiziranega apna v praškasti obliki kot veziva in kalcitne moke kot polnila temelji na:

- Analizi historičnih ometov (apneno testo kot vezivo in kalcitni ali kremenčev agregat).
- Predhodno opravljenem pregledu literature in konservatorsko-restavratorske prakse v Sloveniji (priloga B). Iz pregleda je razvidno, da slovenski konservatorji-restavratorji za injekcijske mešanice uporabljajo vezivo iz hidratiziranega apna v obliki apnenega testa in kalcitno moko kot polnilo.
- Dostopnosti in poznavanja materialov. Na izbor hidratiziranega apna v prahu je vplivalo dejstvo, da le industrijsko proizvedeno apno v praškasti obliki zagotavlja ponovljivost sestave in lastnosti injekcijskih mešanic.
- Dejstvo, da izbrana sestava injekcijske mešanice zagotavlja kemično kompatibilnost z originalnimi materiali historičnih ometov s poslikavami v Sloveniji.

Za zmanjšanje potrebnega deleža vode in posledično zmanjšanje krčenja injekcijskih mešanic ter vnosa vode v plasti stenske slike sta bila izbrana dva kemična dodatka tipa superplastifikator. Eden je bil superplastifikator na osnovi polikarboksilatnega etra (PCE), drugi pa na osnovi polifosfonata (PPh). Preliminarne raziskave, opravljene v okviru diplomske naloge Dore Kovač (Kovač, 2014), so rezultirale v določitvi optimalnega deleža obeh superplastifikatorjev v apneni injekcijski masi, ki preprečuje segregacijo polnila in zagotovi dobro injektibilnost.

Za zagotovitev lastnosti, kot so majhna lastna teža in primeren čas strjevanja, smo v okviru iste diplome (Kovač, 2014) osnovni mešanici, sestavljeni iz hidratiziranega apna, kalcitne moke in vode, dodali še: amonijev karbamat, ki proizvaja CO₂ z reakcijo z vodo v alkalnem okolju (Baglioni in sod., 1997); pucolanski dodatek tuf in ultralahko polnilo za zmanjšanje teže injekcijske mase. Za

neprimeren dodatek se je izkazal amonijev karbamat, in sicer zaradi toksičnosti in nezadovoljivih rezultatov (Kovač, 2014).

Na podlagi preliminarne raziskave sta bila, poleg obeh superplastifikatorjev, za nadaljnje raziskave izbrana še ultra lahko polnilo (zmanjšanje teže mase) in pucolanski dodatek tuf (izboljšanje mehanskih lastnosti in skrajšanje časa strjevanja).

3.2.1 Vezivo

Hidratizirano apno je zračno mineralno vezivo. Lahko je v obliki apnenega testa ali v praškasti obliki. Apnena pasta, ki jo dobimo z zamešanjem apna v praškasti obliki in ustrezne količine vode ali pa uporabimo apneno testo, je sposobna povezati zrna mineralnega polnila (rečni pesek, drobljen pesek, kamena moka, itd.) v homogeno injekcijsko mešanico ali malto. Apno zaradi fizikalno-kemijskih procesov, izhlapevanja vode v okolico ali transporta vode v porozno podlago ter vezanja hidratiziranega apna s CO₂ iz zraka, počasi pridobiva na trdnosti. Prav omejen dostop CO₂ do zaprtih zračnih žepov je lahko njegova glavna pomanjkljivost pri uporabi za injekcijske mešanice (Chaudhry, 2007). Mešanice na osnovi hidratiziranega apna, injicirane v zračne žepe, zaradi tega še počasneje pridobivajo na trdnosti.

Kot glavno vezivo injekcijskih mešanic smo uporabili hidratizirano apno, proizvod podjetja IGM (IGM Zagorje, d. o. o.) z oznako CL90-S po standardu SIST EN 459-1. Kemijska sestava hidratiziranega apna, povzeta po tehničnem listu proizvajalca apna, je podana v preglednici 3.2.

Preglednica 3.2: Kemična sestava in lastnosti hidratiziranega apna (IGM, 2005).

Table 3.2: Chemical composition and properties of hydrated lime (IGM, 2005).

Kemična sestava	Vrednosti
CaO+MgO	≥ 96 %
MgO	≤ 5 %
CO ₂	≤ 4 %
SO ₃	≤ 0,2 %
Lastnosti	
Velikost delcev	0,2 mm ≤ 0,5 % 0,09 mm ≤ 5 %
Aktivno apno	≥ 85 %
Prosta voda	≤ 2 %

Drugo uporabljeno vezivo je apneno testo, proizvod podjetja Gnom (Gnom d.o.o.). Apneno testo je bilo pripravljeno na tradicionalen način iz žganega apna in starano več kot eno leto (Gnom, 2016).

Apneno testo vsebuje okrog 47 % vode glede na maso suhega apnega testa.

Za hitrejšo pridobivanje na trdnosti in izboljšanje mehanskih lastnosti smo hidratiziranemu apnu pri izbranih sestavah dodali mineralni dodatek tuf, ki smo ga upoštevali kot del veziva. Tuf spada v družino naravnih pucolanov, ki fino mleti, v prisotnosti vode in pri normalni zunanji temperaturi reagirajo z raztopljenim kalcijevim hidroksidom ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tako, da nastanejo spojine kalcijevih silikatov in kalcijevih aluminatov. Te dajejo trdnost in so podobne tistim, ki nastanejo pri hidrataciji hidravličnih veziv (Uranjek, 2011).

V splošnem fino mleti pucolani, kot je tuf, zmanjšujejo pretočnost injekcijske mešanice, saj potrebujejo za popolno oblitje finih delcev večjo količino vode. Kemijska sestava uporabljenega tufa je prikazana v preglednici 3.3. Gostota njegovih zrn pa v preglednici 3.4.

Preglednica 3.3: Kemijska sestava tufa in apnenčeve moke v masnih deležih (%).

Table 3.3: Chemical composition of trass and calcit filler in % by mass.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaCO ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ž.i.
Tuf	62,96	13,31	3,70	3,76		1,94	0,07	3,34	3,07	7,41
Apnenčeva moka	0,02		0,01		98					

Mineralna sestava tufa je polimineralna, s 45 mas. % klinoptilotita/heulandita, 35 mas. % kremenca, 11 mas. % glincev, 7 mas. % ilita/muskovita ter 2 mas. % montmotilonita (Uranjek, 2011).

Zrna vzorca so zaobljena in ostroroba, velikosti do 200 μm .

Preglednica 3.4: Gostote uporabljanih materialov

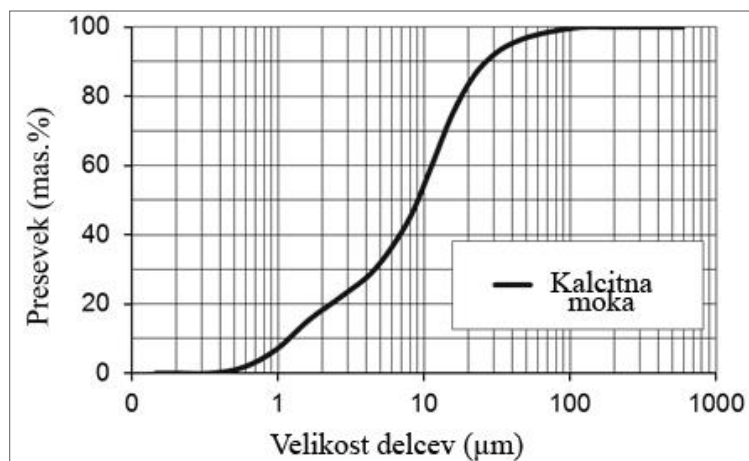
Table 3.4: Density of materials.

Lastnosti	Specifična gostota
Hidratizirano apno (kg/m^3)	2,28
Tuf (kg/m^3)	2,41
Kalcitna moka (kg/m^3)	2,75
Ultralahko polnilo (g/cm^3)	0,125

3.2.2 Polnila

Kot glavno polnilo je bila uporabljena apnenčeva moka, za zmanjšanje krčenja in izboljšanje mehanskih lastnosti. Apnenčeva moka spada med polnila, ki so naravni ali umetni anorganski mineralni materiali, kateri zaradi svoje porazdelitve velikosti zrn izboljšajo fizikalne lastnosti injekcijske mešanice, kot sta obdelovalnost in sposobnost zadrževanja vode.

Uporabljena je bila apnenčeva moka (SIST EN 197-1:2002) podjetja Calcit (Calcit d. o. o., Stahovica). Kemična analiza kalcitne moke je podana v preglednici 3.3, gostota njenih zrn v preglednici 3.4, zrnavostna sestava apnenčeve moke pa na sliki 3.1.

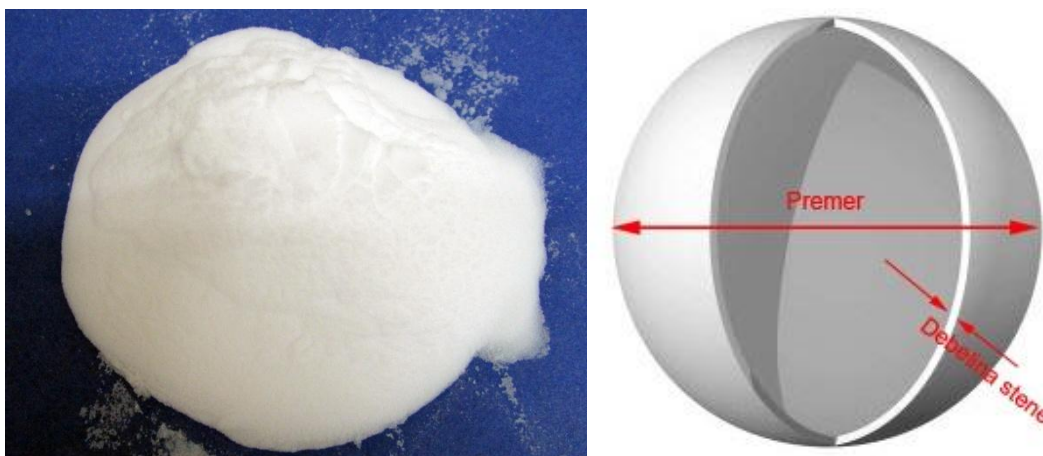


Slika 3.1: Sejalna krivulja kalcitne moke.

Figure 3.1: Grain size distribution of limestone filler.

Za zmanjševanje lastne teže injekcijskih mešanic smo apnenčevo moko postopno nadomeščali z ultralahkim polnilom. Uporabljeno ultralahko polnilo je proizvod iz taljenega kemično stabilnega natrijevega borosilikatnega stekla. Stekleni delci se s pomočjo penilnega sredstva razširijo v votle mikrosfere premera od 60 do 69 μm in z debelino sten od 0,5 do 1,5 μm (slika 3.2). Gostota delcev je $0,125 \text{ g/cm}^3$ (preglednica 3.4).

V vodi je ultra lahko polnilo netopno, pH suspenzije je od 9,1 do 9,9. V suhem stanju pa je neporozno in inertno. Ultralahko polnilo zmanjšuje težo in viskoznost injekcijskim mešanicam ter s tem izboljša pretočnost.



Slika 3.2: Ultralahko polnilo (levo), votla mikrosfera (desno).

Figure 3.2: Ultra-light filler (left), hollow microsphere (right).

3.2.3 Voda

Voda je pomembna komponenta, ki v apnenih injekcijskih mešanica deluje kot disperzijsko sredstvo za ostale sestavine. Potrebna je tudi pri kemični reakciji med hidratiziranim apnom in pucolanskimi dodatki. V sveži mešanici deluje kot komponenta za doseganje potrebne obdelavnosti injekcijske mešanice.

Delež vode, ki je dodan injekcijski mešanici, je zelo pomemben, posebej v primeru občutljivih stenskih slik. Velik delež vode sicer lahko izboljša pretočnost in injektibilnosti mešanice, po drugi strani pa mešanica lahko postane nestabilna (segregacija, izločanje vode), poveča se njeno krčenje in nevarnost oblikovanja razpok (Biçer-Simsir in sod., 2009). Višji delež vode vpliva tudi na druge lastnosti injekcijske mešanice v strjenem stanju, kot so poroznost in mehanske lastnosti.

Za pripravo injekcijskih mešanic smo uporabili pitno vodo iz vodovoda, ki je primerna za pripravo mešanic z mineralnimi vezivi (Zarnic, 2003).

3.2.4 Kemijski dodatki

Kemijski dodatki so materiali, dodani vodi, agregatu ali vezivu, kateri s svojim kemijskim in/ali fizikalnim delovanjem vplivajo na določene lastnosti sveže ali strjene injekcijske mešanice. Dodajajo se lahko v majhnih količinah pred ali med mešanjem komponent.

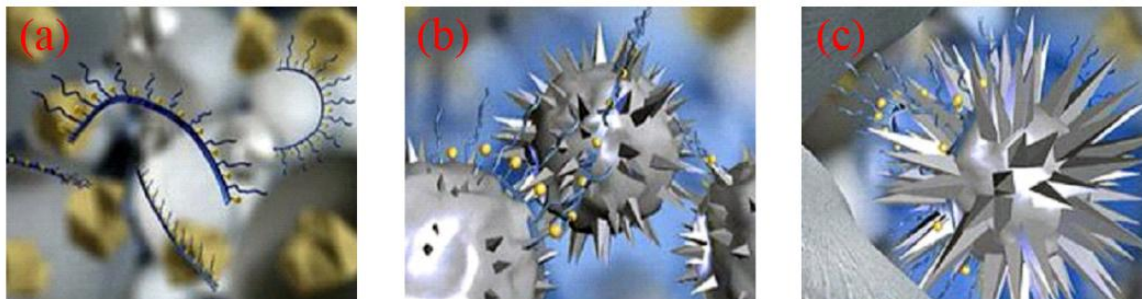
Pri naših preiskavah smo uporabili dva različna superplastifikatorja (SP). Prvi je superplastifikator na osnovi polikarboksilatnih polimerov (PCE), drugi pa je superplastifikator polifosfonatnega tipa (PPh) (SIST EN 934-2/ T3.1 in T3.2). Oba superplastifikatorja sta proizvoda proizvajalca TTK Srpenica (Proizvodnja kemičnih izdelkov Srpenica ob Soči d. o. o.), prvi je komercialni proizvod, drugi pa proizvod v razvoju. Oba kemijska dodatka, dodana v količini nekaj promilov glede na skupno maso praškastih delcev, v mešanici zagotavljata ustrezne lastnosti mešanice v svežem stanju pri bistveno manjši količini vode.

Superplastifikatorji (SP) so ena od pomembnejših skupin kemijskih dodatkov za materiale s cementnimi vezivi (Černilogar, 2010). Po standardu SIST EN 934-2:2009 so to snovi, ki se jih doda betonu v času mešanja v količinah $< 5\%$ na maso cementa, da se spremenijo lastnosti svežih in /ali strjenih betonov (Černilogar, 2010).

SP na osnovi polikarboksilatov so površinsko aktivne snovi (slika 3.3), ki se z negativno nabitimi skupinami adsorbirajo na površino cementnih zrn in povzročajo njihovo disperzijo z električnim in steričnim oziroma prostorskim odbojem (Kodelja, 2009). Cementna zrna s sprejetim negativnim električnim nabojem iz karboksilatnih skupin se medsebojno odbijajo in dispergirana struktura cementnih zrn se stabilizira. Posledica negativnega odboja je nastanek orientiranih molekul na

površini cementnih zrn, ki delujejo kot mazivo oziroma povečujejo obdelavnost svežega betona. Dolge verige iz polietilen oksidov povzročijo nastanek steričnega odboja, ki prostorsko preprečujejo združevanje cementnih delcev. Prostorski odboj ima veliko večji in dalj časa trajajoči učinek kot električni odboj.

PCE je zgrajen iz ene glavne polimerne verige ter iz krajših stranski verig z negativnimi karboksilatnimi skupinami in dolgih stranskih verig iz polietilen oksidov (Duh, 2008).



Slika 3.3: Shematični prikaz delovanja SP PCE: a) molekula PCE; b) adsorpcija na površino cementnih zrn; c) učinkovitejši sterični odboj že delno hidratiziranih cementnih zrn (Duh, 2008: str. 20).

Figure 3.3: Mechanism of PCE superplasticizer's action: a) longer surfactant chains; b) adsorption; c) more effective steric repulsion of partially hydrated cement particles (Duh, 2008: p 20).

Za izbran SP polikarboksilatnega tipa je priporočljiva dozacija 0,5–2 % na maso cementa: odvisno od v/c razmerja in želene obdelavnosti betona, vrste in količine cementa in vrste betona. Nižje dozacije ustrezajo običajnim, manj zahtevnim betonom, višje dozacije pa so primerne za visokotrdne betone.

SP polifosfonatnega tipa (PPh) je nov proizvod, ki ni komercialno dostopen na trgu kemijskih dodatkov. Avtor Gašperič (2013) navaja, da je za približno enako stopnjo obdelavnosti cementne malte potrebno dodati okrog 50 % več polifosfonatnega SP, v primerjavi s polikarboksilatnim SP.

Po predhodno opravljenih analizah, ki jih je pod mojim somentorstvom opravila Kovač (2014), je bila izbrana količina superplastifikatorja za PCE superplastifikator 0,5 % in za PPh superplastifikatorja 0,75 %.

3.3 Priprava vzorcev

3.3.1 Mešanje

Injekcijske mešanice smo pripravljali z laboratorijskim standardnim mešalcem po standardu SISI EN 196-1:2005 in kuhinjskim mešalnikom z eno lopatico (dve lopatici povzročata v masi preveč zračnih mehurčkov), glej sliko 3.4.

Za tehtanje mase hidratiziranega apna, kalcitne moke, vode in tufa smo uporabili tehtnico z natančnostjo $\pm 0,1$ g. Pri tehtanju SP in ultralahkega polnila smo uporabljali tehtnico z natančnostjo $\pm 0,01$ g.



Slika 3.4: Standardni mešalec Hobart (levo), kuhinjski mešalnik (desno).
Figure 3.4: Hobart mixer (left), kitchen mixer (right).

Konservatorji-restavratorji za pripravo injekcijskih mešanic pogosto uporabljajo kuhinjske mešalnike ali mešajo mase na roke. Uporaba standardnega laboratorijskega mešalca na terenu namreč ne pride v poštev.

Biçer-Şimşir in Rainer (2013) ugotavljata, da ima lahko mešanica, ki je pripravljena v laboratoriju, drugačno konsistenco ali mikrostrukturo od mase, pripravljene na terenu. Različna konsistenca mešanice iste sestave lahko vpliva na stabilnost in injektabilnost mešanice. Isti avtorici (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013) navajata, da se mešanicam, pripravljenim pri večji hitrosti in daljšem času mešanja izboljša injektabilnost, pretočnost in stabilnost. S pravim načinom mešanja se torej lahko bistveno izboljšajo lastnosti injekcijske mešanice v svežem stanju.

Postopek 5-minutnega mešanja injekcijskih mešanic brez superplastifikatorja je bil sledeč:

1. V primeru uporabe ultralahkega polnila pred pričetkom mešanja v dodatni posodi ultralahkemu polnilu primešamo 60 % masnega deleža vode. V primeru uporabe tufa temu primešamo 15 % masnega deleža vode in pustimo 5 min, da se omoči.
2. V mešalni posodi v prvih 15 sekundah premešamo hidratizirano apno in kalcitno moko na minimalni hitrosti (540 rpm).
3. Med mešanjem na minimalni hitrosti v naslednjih 45 sekundah dodamo omočeno ultralahko polnilo ali tuf in preostanek vode.
4. Mešanje nato nadaljujemo na minimalni hitrosti še 1 min.

5. Mešanje prekinemo za 15–30 sekund, da očistimo morebitne prilepljene delce sveže mešanice na lopaticah in steni posode.
6. Naslednje 3 min mešanje nadaljujemo na 2. stopnji oziroma na 3. stopnji (1200 rpm) v primeru uporabe kuhinjskega mešalnika.

Postopek 5-minutnega mešanja injekcijskih mešanic s superplastifikatorjem je sledeč:

1. V primeru uporabe ultralahkega polnila pred pričetkom mešanja v dodatni posodi ultralahkemu polnilu primešamo 50 % masnega deleža vode. V primeru uporabe tufa temu primešamo 15 % masnega deleža vode in pustimo 5 min, da se omoči.
2. V mešalni posodi v prvih 15 sekundah premešamo hidratizirano apno in kalcitno moko na minimalni hitrosti (540 rpm).
3. Med mešanjem na minimalni hitrosti v naslednjih 45 sekundah dodamo omočeno ultralahko polnilo ali tuf, skupaj z 20 ali 55 % masnega deleža vode.
4. Mešanje nato nadaljujemo na minimalni hitrosti 45 sekund.
5. V naslednjih 15 sekundah med mešanjem na minimalni hitrosti dodamo superplastifikator skupaj s 30 % preostale vode.
6. Mešanje prekinemo za 15–30 sekund, da očistimo morebitne prilepljene delce sveže mešanice na lopaticah in steni posode.
7. Naslednje 3 min mešanje nadaljujemo na 2. stopnji oziroma na 3. stopnji (1200 rpm) v primeru uporabe kuhinjskega mešalnika.

V večini primerov z enim mešanjem ni bilo mogoče pripraviti dovolj velike količine mešanice za vse potrebne preiskave, zato se je mešanico enake sestave pripravljalo večkrat. Ponovljivost sestave in lastnosti posameznih mešanic je zagotovljena z vedno istim načinom mešanja in preverjanjem temperature zamesne vode.

3.3.2 Priprava in negovanje preskušancev

Po mešanju so bile mešanice podvržene testiranju ali vgrajene v valjaste plastične kalupe brez osnovnih ploskev za preiskave na strjenih mešanicah -. Plastični kalupi so bili predhodno namaščeni z oljem, za lažji odvzem iz kalupa, in postavljeni na ravno podlago iz plošč avtoklaviranega celičastega betona, prekritih s papirnatimi brisačami. Na ta način smo simulirali vpojno porozno podlago v sistemu stenske slike. Vsak kalup je bil napolnjen z injekcijsko mešanico do zgornjega robu kalupa. V preglednici 3.5 so opisane vrste kalupov za posamezne teste.

Preskušance smo po 48-ih urah vzeli iz kalupov in postavili v prostor s temperaturo 20 ± 2 °C in relativno vlažnostjo 60 ± 5 %, kjer so devetdeset dni zoreli. Temperaturo in relativno zračno vlažnost smo preverjali vsak dan.

Preglednica 3.5: Število pripravljenih preskušancev za posamezne teste strnjenih mešanic.
Table 3.5: Number of prepared specimens for each test of hardened properties.

Test	Oblika	Velikost kalupa	Količina preskušancev
Tlačna trdnost	Valj	Premer 25 mm Višina 50 mm	3
Cepilna natezna trdnost			
Koeficient kapilarnega vpijanja vode			
Poroznost			
Pospešeno staranje			5
Ugotavljanje lastnosti za prehod vodne pare	Disk	Premer 100 mm Višina 20 mm	3

3.4 Metode za preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic

3.4.1 Standardni testi in njihova uporabnost

Eno večjih težav predstavlja preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic v laboratoriju, saj za konservatorsko-restavratorsko področje ni na razpolago standardnih testov. Standardni testi, ki so na voljo (EN, ASTM, UNI), so namenjeni predvsem preiskavam materialov, ki jih proizvaja industrija gradbenih materialov (malte, betoni, epoksidne smole, cementna veziva) in niso reprezentativni za lastnosti injekcijskih mešanic, namenjenih konserviranju-restavriranju dekorativnih historičnih ometov (stenske slike, mozaiki), kar ugotavljajo tudi avtorji Biçer-Simsir in sod. (2009) ter Griffin (2004).

Zato se je pri preiskavah v okviru doktorske disertacije, ki sem jih izvajala na univerzi SUPSI v Švici in na UL FGG v Sloveniji, raziskovalno delo usmerilo tudi v razvoj preskusnih metod, ki bi bile prilagojene lastnostim in namenu uporabe injekcijskih mešanic za konservatorsko-restavratorske posege.

Glavni poudarek modificiranja standardiziranih metod je na področju preverjanja lastnosti svežih injekcijskih mešanic. Zmanjšala sem predvsem potrebno količino mešanice, saj se na terenu z enim mešanjem praviloma pripravi le manjša količina mešanice in je popolnoma nesmiselno, da bi se ta količina zaradi preiskav nekajkrat povečala. Manjše velikosti vzorcev posledično zahtevajo prilagoditev opreme za izvedbo preiskav.

Za testiranje injekcijskih mešanic z namenom ovrednotenja njihovih ključnih lastnosti v svežem in strjenem stanju smo uporabili prilagojene mednarodne ali tuje standarde, priporočila tehničnega

odbora RILEM TC SGM in priročnik avtoric Biçer-Simsir in Rainer (2013). Kot izhodišče (pred opravljeno modifikacijo) smo uporabili SIST EN, EN, ASTM, RILEM in SIA preizkusne metode.

Biçer-Simsir in Rainer (2013) sta v priročniku razdelili postopke testiranja na:

- kvalitativne teste, ki so potrebni za preverjanje lastnosti pri projektiranju ali modificiranju obstoječih injekcijskih mešanic v laboratoriju,
- dodatne pomožne teste, ki so potrebni za testiranje mešanic s posebnimi lastnostmi, kot so visoko viskozne mešanice za zapolnitev finih razpok, ultralahke mase itd.,
- enostavne »in-situ« teste, ki so namenjeni konservatorjem-restavratorjem za primerjavo in kontrolo kvalitete materialov ali mešanic, predhodno testiranih v laboratoriju.

Preglednica 3.6: Laboratorijski testi za preverjanje lastnosti na sveže pripravljenih injekcijskih mešanicah.

Table 3.6: Laboratory tests for the evaluation of working properites.

Laboratorijski test	Standard	Modifikacija
Določevanje injektabilnosti injekcijskih mešanic	SIST EN 1771:2004	NE
Določevanje pretočnosti	SIST EN 445:2008	DA, zmanjšal se je volumen lijaka z 1,7 na 0,25 litra.
Izločanje vode	ASTM C940-03	DA, sprememba volumna merilnega valja s 1000 ml na 100 ml.
Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice	ASTM C185-02	Da, sprememba volumna posode z 1 l na 100 ml.
Določevanje vodozadržnosti	PSIST prEN 1015-8:2001	NE
Razlez s posedom	SIST EN 1015-3:2001	Da, meri se razlez po dvigu prisekanega stožca – mizice ne stresamo.
Določanje časa vezanja	SIST EN 196-3:2005	DA, sprememba volumna injekcijske mešanice in uporaba apnene skodelice namesto standardnega kalupa.
Določanje spremembe prostornine	-	Nova metoda, razvita v okviru doktorske disertacije.
Preverjanje stabilnosti oziroma segregacije	Priporočilo Rilem TC 145 WSM (RILEM, 2002)	DA, sprememba volumna cilindra z 1,5 l na 140 ml.

Iz preglednice 3.6 je razvidno, da smo večino standardiziranih laboratorijskih testov za preverjanje lastnosti mešanic v svežem stanju modificirali, predvsem smo zmanjšali velikost vzorca in posledično tudi opremo.

V skupino laboratorijskih testov sta vključeni še dve nestandardizirani metodi, in sicer določitev spremembe prostornine mešanice zaradi krčenja in preverjanje stabilnosti injekcijskih mešanic v svežem stanju – razviti sta bili v okviru doktorske disertacije.

Metoda za preverjanje spremembe prostornine injekcijske mešanice zaradi krčenja se izvaja s pomočjo plastičnih cilindričnih kalupov premera 46 mm in višine 30 mm (slika 3.5, A).

Kalup napolnimo z injekcijsko mešanico, poravnamo jo z robovi kalupa (slika 3.5, B). Spremembo prostornine izmerimo po poteku 30 dni, ko se vzorec posuši in strdi. Za določanje spremembe prostornine mešanice uporabimo pesek z znano prostorninsko maso v nasutem stanju.

Najprej stehtamo strjen vzorec s kalupom (slika 3.5, C). Prazen prostor med vzorcem in robovi kalupa napolnimo s peskom (slika 3.5, D). Ponovno stehtamo kalup z vzorcem in peskom (slika 3.5, E). Spremembo prostornine določimo po enačbi (3.1):

$$\Delta V = \frac{V_p}{V_z} 100\% \quad (3.1)$$

kjer je ΔV sprememba prostornine (%), V_p prostornina dodanega peska med strnjeno injekcijsko maso in robovi kalupa (g) in V_z začetna prostornina mase (g).



Slika 3.5: Prikaz določanja spremembe prostornine mešanice zaradi krčenja s plastičnimi cilindričnimi kalupi: A) prazen kalup; B) kalup, napolnjen z mešanico; C) tehtanje strjene mešanice; D) prazen volumen napolnimo s peskom; E) kalup z mešanico in peskom stehtamo.

Figure 3.5: Illustration of volume shrinkage measurement with the plastic cylindrical mould method:

1. Empty plastic mould;
2. Mould filled with grout;
3. Mould with hardened grout is weighed;
4. Empty volume is filled with sand;
5. Plastic mould with sand and grout is weighed.

Druga metoda, ki je bila prav tako prilagojena v okviru doktorske disertacije, preverja stabilnost injekcijskih mešanic v svežem stanju. Uporaba metode je še posebej pomembna v primeru uporabe ultralahkega polnila in kemičnih dodatkov, saj so tovrstne mešanice še posebej občutljive na ločevanje veziva, polnila in vode.

V ta namen je bil prilagojen poseben cilinder višine 37 cm in notranjega premera 2,2 cm, ki omogoča preverjanje prostorninske mase mešanic iz treh nivojev – zgornji, srednji in spodnji (slika 3.6).

Na dnu vsakega nivoja je odprtina s čepom, skozi katero priteče mešanica, ko čep odstranimo.

Po končanem mešanju v cilinder nalijemo mešanico in pokrijemo s folijo na vrhu cilindra. Po 24-ih urah odstranimo čep najprej z zgornjega nivoja, da steče zgornji del mešanice v stekleno posodo.

Potem sledi enak postopek še za srednji in spodnji nivo. V nadaljevanju s pomočjo 20 ml injekcijske brizge določimo prostorninsko maso sveže injekcijske mešanice za vsak nivo posebej.



Slika 3.6: Cilinder za preverjanje stabilnosti injekcijskih mešanic.

Figure 3.6: Cylinder for stability evaluation of injection grouts.

Preverjanje vodozadržnosti, ki temelji na osnutku standarda PSIST prEN 1015-8:2001, je uporabna in enostavna metoda, ki jo lahko uporabimo za preverjanje vodozadržnosti mešanic tudi na terenu.

Za preiskavo vodozadržnosti potrebujemo kalup, filterški papir, gazo in utež (slika 3.7). Preiskavo pričnemo po končanem mešanju injekcijske mešanice. Pred tem stehamo suh kalup in filterški papir. Kalup napolnimo s pripravljeno injekcijsko mešanico in ponovno stehamo, pokrijemo z gazo, filterškim papirjem in obrnemo ter obtežimo z utežjo za $5 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$. Po 5-ih min kalup obrnemo. Filterški papir, ki je vpil del vode iz vzorca, ponovno stehamo. Vodozadržnost (WRV) mešanice določimo po enačbi (3.2) in (3.3):

$$W_4 = \frac{W_3}{W_2} 100 \quad (3.2)$$

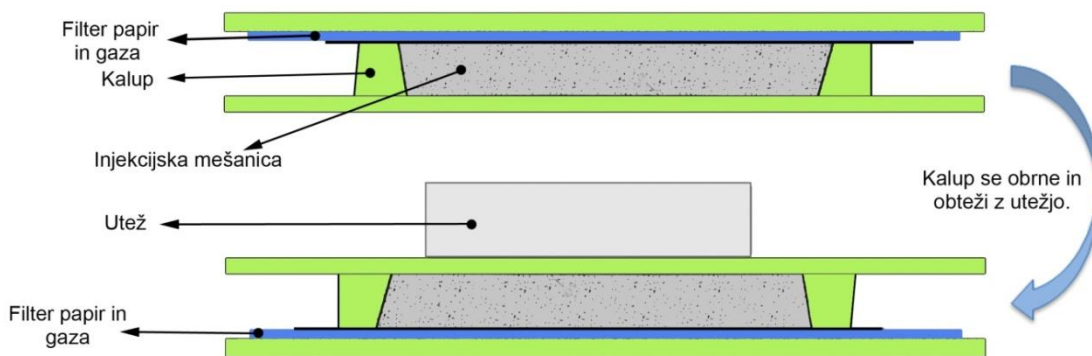
kjer je W_4 relativna izguba vode (%), W_2 vsebnost vode v mešanici (g) in W_3 masa vode, ki jo je vpil filterški papir (g).

$$WRV = 100 - W_4 \quad (3.3)$$

kjer je WRV vodozadržnost (%) in W_4 relativna izguba vode (%).

Za laboratorijske namene sama metoda preverjanja vodozadržnosti ni dovolj natančna. Veliko težavo predstavlja slab stik med površino injekcijske mešanice in filter papirjem. Če je stik med mešanico in

filter papirjem slab, mešanica ni v celoti podvržena kapilarnemu srku in ne dobimo realnih vrednosti. Zato je veliko primernejša laboratorijska metoda, ki jo predlagata avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013).



Slika 3.7: Shematski prikaz metode vodozadržnosti.

Figure 3.7: Schematic representation of the water retentivity method.

Standardni testi, namenjeni testiranju mehanskih in fizikalnih lastnosti na strjenih injekcijskih mešanicah, so prikazani v preglednici 3.6. V primeru preverjanja mehanskih lastnosti so se spremenile samo dimenzije preskušancev, sama metoda preverjanja pa je ostala nespremenjena. Preverjanje fizikalnih lastnosti po standardiziranih metodah je ostalo nespremenjeno.

Preglednica 3.7: Laboratorijski testi za strjene injekcijske mešanice.

Table 3.7: Laboratory tests for the evaluation of hardened properties.

Laboratorijski test	Standard	Modifikacija
Tlačna trdnost	SIST EN 1015-11:1999	Da, sprememba dimenzij preskušancev.
Cepilna natezna trdnost	ASTM C 496/C 496M	Da, sprememba dimenzij preskušancev.
Sprijemna trdnost	SIST EN 1015-12:2001	Priprava zračnih žepov in sendvičev.
Koeficient kapilarnega vpivanja vode	RILEM Test No. II. 6	NE
Ugotavljanje lastnosti za prehod vodne pare	ISO 12572:2001	NE
Ugotavljanje stopnje prepojitve z vodo (poroznost)	SIA 262/1: 2003 dodatek A	NE
Koeficient vodovpojnosti	Priporočilo RILEM Test No. II. 4	NE
Pospešeno staranje	Priporočilo RILEM TC 176 (Setzer in sod. 2004)	DA, združeno z odpornostjo na delovanje soli.

Za preverjanje adhezije med ometom in injekcijsko mešanico smo pripravili modele z ometi, zračnimi žepi in poroznimi ploščami, ki posnemajo celo strukturo stenske slike (zid, grob in fin omet), in sendviče, sestavljene iz grobega in finega ometa. Priprava modelov z zračnimi žepi je zahtevnejša od priprave sendvičev, obe metodi pa omogočata izbiro materialov in sestavo ometov, ki so kopija originalnih materialov obravnavane stenske slike. Glavna prednost modela z zračnimi žepi je, da med injiciranjem/zapolnjevanjem žepov z vrhnje strani ni nobenega pritiska na mesto zračnega žepa oziroma odstopljen omet s svojo težo ne pritiska na injekcijsko maso. Prav tako pa se lahko poljubno spreminja usmerjenost žepov, v smislu vertikalne (zid) ali horizontalne lege (strop).

Pri izdelavi sendvičev pa lastna teža finega ometa pritiska na injekcijsko mešanico, kar izboljša oprijem. Poleg tega je sendviče mogoče zapolnjevati le horizontalno.

3.4.2 In-situ testi

Izhodišče za predlagane in uporabljene in-situ teste so testi v priročniku avtoric Biçer-Simsir in Rainer (2013). In-situ testi so namenjeni konservatorjem-restavratorjem na terenu, za hitro in enostavno preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic. Razviti so na podlagi laboratorijskih metod, ki so se poenostavile in prilagodile razmeram na terenu.

In-situ testi lahko podajo uporabne informacije o obnašanju injekcijskih mešanic v okolju, v katerem bo konsolidacija odstopajočih plasti izvršena (okoljski vplivi, priprava mešanice). Prav tako pa lahko pripomorejo k modifikaciji injekcijskih mešanic za posebne primere ali pogoje in na podlagi rezultatov meritev omogočajo, boljšo komunikacijo med konservatorji-restavratorji ter laboratorijem. Prednost in-situ testov je v njihovi prilagodljivosti na razmere na terenu in v uporabi materialov, iz katerih so dejansko narejene stenske slike, če so taki materiali na voljo.

Zavedati pa se je treba tudi njihovih omejitev. In-situ testi niso tako natančni, kot so laboratorijske analize, zato je njihova ponovljivost slabša kot pri laboratorijskih testih. To pomeni, da se in-situ testi ne smejo uporabljati za projektiranje novih injekcijskih mešanic ali modifikacijo obstoječih mešanic. Te faze naj se izvajajo le v laboratoriju.

Osnovni namen in-situ testov je pomoč konservatorjem-restavratorjem pri kontroli lastnosti injekcijskih mešanic na terenu in preverjanju ponovljivosti lastnosti iste sestave, zamešane v različnih ponovitvah.

V doktorski nalogi so in-situ testi vpeljani z namenom, da bi se konservatorjem-restavratorjem ponudilo orodje za kontrolo lastnosti na terenu. Vedno sem jih izvajala vzporedno z ustreznim laboratorijskim testom za ovrednotenje enake lastnosti injekcijske mešanice.

Na terenu se lahko z in-situ testi preverjajo in primerjajo predvsem delovne lastnosti mešanic, kot so pretočnost in injektibilnost ter stabilnost injekcijskih mešanic. Prav tako pa je nekaj testov namenjenih preverjanju lastnosti med sušenjem in strjevanjem mešanic ter lastnosti v strjenem stanju (vpijanje vode in paroprepustnost).

In-situ testi so razdeljeni v tri skupine: delovne lastnosti, lastnosti med sušenjem in strjevanjem ter lastnosti na strjenih mešanicah. V preglednici 3.8 je podan pregled in-situ testov in njihovih modifikacij.

Opis priprav posameznih modelov je podan v naslednjem poglavju.

Preglednica 3.8: Seznam in-situ testov z modifikacijami.

Table 3.8: List of in-situ tests with modifications.

»In-situ« test	Označba in referenca	Modifikacija
Kvalitativni test z injekcijo	-	NE
Preizkušanje injektibilnosti z injekcijo	GCI 4.1. (Biçer-Şimşir and Rainer, 2013)	NE
Preizkušanje pretočnosti z injekcijo	GCI 4.2. (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013)	NE
Preizkušanje pretočnosti na apnenih ploščah	GCI 4.3. (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013)	DA, kanalčke na apnenih ploščah smo zaprli, pritisk na injekcijo je bil vedno enak.
Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice	GCI 4.5. (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013)	NE
Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic	GCI 4.6. (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013)	DA, skodelice smo predhodno navlažili in zaprli.
Določevanja časa vezanja z metodo apnenih skodelic	GCI 4.7. (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013)	DA, skodelice smo predhodno navlažili in zaprli.

Glede na nekatere pomanjkljivosti in-situ metod, testiranje mešanic v raziskovalne namene z njimi ni priporočljivo, saj se absolutnim rezultatom (številčnim vrednostim) ne sme pripisovati večje teže. Ena od slabosti v primeru preverjanja injektibilnosti z injekcijsko brizgo in pretočnosti s kanalčki na apnenih ploščah je na primer ta, da je pritisk, ki se izvede na bat injekcijske brizge nekontroliran in je od primera do primera (že pri istem operaterju, še bolj pa pri različnih operaterjih) različen. Zaradi velikega vpliva operaterja se lahko rezultati meritev za isto mešanico bistveno razlikujejo (slaba ponovljivost metode). Ti dve metodi smo zato v okviru disertacije bistveno modificirali. Pritisk na bat injekcije je tako bil vedno enak, s pomočjo uteži. Z vpeljano modifikacijo so postali rezultati preiskav v laboratoriju veliko bolj ponovljivi. Predlagano modifikacijo je mogoče uporabiti tudi na terenu.

Pri preverjanju injektabilnosti z injekcijsko brizgo pa so se pojavljale tudi težave z zamašitvijo zožitve injekcijske igle na njenem dnu, zaradi granuliranega materiala, ki se je zgostil v območju zožitve. Za doseganje boljših rezultatov bi bilo treba med injekcijsko konico in granuliranim materialom namestiti fino mrežico, ki bi preprečevala zamašitev zožitve.

V primeru uporabe apnenih kanalčkov pa rezultati veliko bolje odražajo dejanske razmere v stenski sliki, če kanalček zapremo z lepilnim trakom. S tem ponazorimo ozke razpoke in votlinice, ki jih je potrebno zapolniti z injekcijsko mešanico.

3.5 Priprava modelov za simulacijo poškodb stenskih slik

V okviru disertacije smo pripravili posebne modele, ki simulirajo dejansko stanje odstopljenih plasti ometov stenskih poslikav, in sicer:

1. Model apnene plošče s kanalčki, ki omogoča vizualno opazovanje nekaterih sposobnosti tečenja injekcijskih mešanic.
2. Model stenske slike z zračnimi žepi, ki lahko simulira odstopljene plasti ometov na različnih nivojih stenske slike (fini–grobi omet, zid–grobi omet, strop–grobi omet). Preiskave so bile osredotočene na testiranje sprijemne trdnosti in kapilarnega vpivanja vode.
3. Sendvič model, ki simulira odstopljene plasti ometov na poziciji fini–grobi omet. Preiskave so bile osredotočene na preverjanje vpliva pospešenega staranja in delovanje vodotopnih soli na sprijemno trdnost injekcijskih mešanic.
4. Modeli apnenih skodelic (Biçer-Şimsir in Rainer, 2013) za preverjanje krčenja, odpornosti na oblikovanje razpok in vezanja injekcijskih mešanic.
5. Drobljen apneni omet, za preverjanje injektabilnosti in pretočnosti injekcijskih mešanic.

V pripravljene modele, ki simulirajo dejanske materiale in sklope odstopljenih plasti ometov ter razmere v njih, smo vgradili injekcijske mešanice s ciljem ovrednotenja lastnosti, ki so ključne za učinkovito izvedbo nekonstrukcijskega injektiranja.

3.5.1 Priprava apnene plošče s kanalčki

Podlaga za pripravo modela apnene plošče s kanalčki so navodila iz priročnika avtoric Biçer-Simsir in Rainer (2013). Posebnost modela, kot že samo ime pove, so kanalčki, narejeni v apnenem ometu, s katerimi se preverja sposobnost tečenja mešanic.

Na keramično ploščo ali opečnat zidak, velikosti $33 \times 25 \times 2 \text{ cm}^3$, nanesimo omet debeline 2 cm. Omet pripravimo iz hidratiziranega apna, standardnega peska (EN 196-1) in mlete opeke v volumskem

razmerju 1 : 2,5 : 0,5. Pred nanosom ometa ploščo ali zidak močno navlažimo z vodo. Omet na plošči poravnamo, površino pa še zagladimo. Nato vzporedno s krajšo stranico (25 cm) zarezemo kanalčke V-oblike, širine 0,5 cm. Plošča ali zidak z ometom sta nato dva tedna pokrita s plastično folijo. Sledi še 2-tedensko sušenje plošče ali zidaka z ometom brez folije.

V priročniku avtorici Biçer-Simsir in Rainer (2013) uporabljata in predlagata injiciranje injekcijskih mešanic v vertikalne odprte kanalčke z injekcijo.

Model apnene plošče s kanalčki sem modificirala tako, da sem kanalčke v vzdolžni smeri zaprla s prozornim lepilnim trakom, ki omogoča opazovanje tečenja injekcijske mase (slika 3.8). Z zaprtjem vertikalnega kanalčka z lepilnim trakom realneje simuliramo razmere v odstopljenih plasteh ometa ali razpokah stenske slike. Modificirala sem tudi postopek injiciranja injekcijske mešanice v kanalčke. S pomočjo uteži na injekcijskem baty sem zagotovila stalen pritisk v času polnjenja kanalčkov z injekcijsko maso. S tem sem izboljšala ponovljivost testa.



Slika 3.8: Plošča z odprtimi (levo zgoraj) in zaprtim kanalčkom (levo spodaj) V-oblike. Injiciranje mešanice v kanalček s pomočjo uteži na injekcijskem baty (desno).

Figure 3.8: Plastered tile with open (top left) and closed (bottom left) V-shaped channels. Injection of grout into a channel with weight on the plunger of syringe (right).

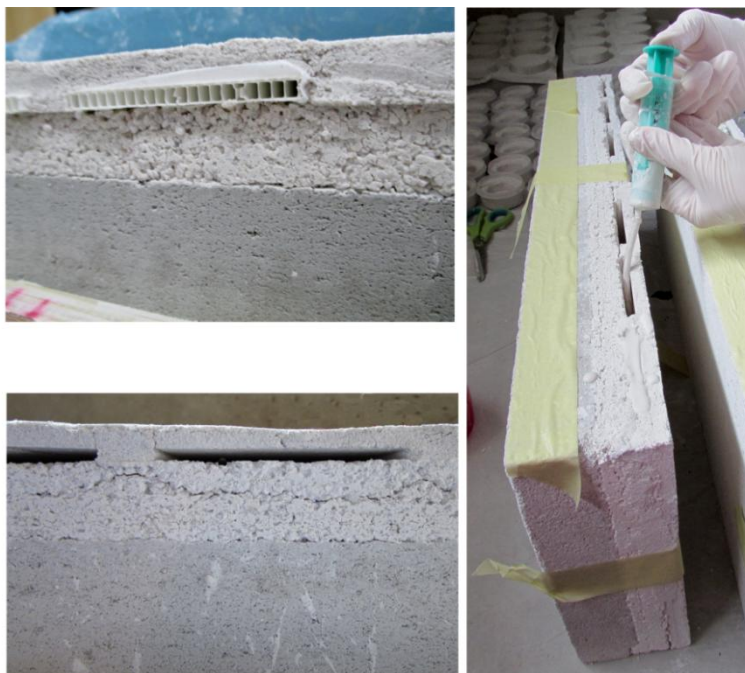
3.5.2 Priprava modela z zračnimi žepi

Ideja in namen modela z zračnimi žepi sta delno povzeta po avtorjih Azeiteiro in sod. (2014). Model simulira odstopljene plasti ometov stenskih slik in omogoča izvedbo preizkusa oprijema injekcijske mešanice ter preverjanje spremembe v vodovpojnosti sistema zaradi injekcijske mešanice, v razmerah, ki so blizu realnim, saj se injekcijska mešanica suši in strjuje v realnih pogojih za stenske slike (slika 3.9, levo spodaj).

Za pripravo modela smo uporabili ploščo iz avtoklaviranega celičastega betona (v nadaljevanju porobeton), dimenzije $63 \times 25 \times 5 \text{ cm}^3$. Plošča je bila nosilec, na katerega smo nanесли najprej plast grobega in nato finega ometa. Med obema plastema ometov smo vstavili PVC ploščice debeline 2 mm ali 5 mm, ki smo jih po strditvi finega ometa izvlekli (slika 3.9, levo zgoraj).

Grobi omet debeline 1,5 cm je pripravljen iz 1 volumskega dela apnenega testa in 3 volumskih delov grobega peska, fini omet debeline 1 cm pa iz 1 volumskega dela apnenega testa in 2 volumskih delov finega peska (lastnosti ometov so podane v poglavju 3.5.5). En model (ena plošča) ima 8 zračnih žepov.

Pripravljeni modeli so zoreli 90 dni pri $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativni zračni vlagi $60 \pm 5 \%$. Po 90-dnevem zorenju ometa smo v zračne žepe višine 2 in 5 mm injicirali izbrane mešanice, po predhodni navlažitvi žepov z vodo (slika 3.9, desno). Žepi, zapolnjeni z injekcijsko mešanico, so ponovno 90 dni zoreli na temperaturi $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativni zračni vlagi $60 \pm 5 \%$.



Slika 3.9: Priprava zračnega žepa, vstavljen PVC vložek debeline 5 mm (levo zgoraj). Model zračnega žepa (levo spodaj). Injiciranje mešanice v zračni žep (desno).

Figure 3.9: Preparation of an air pocket, PVC plate with thickness of 5 mm (top left). The model of an air pocket (bottom left). Injecting the mixture into the air pocket (right).

3.5.3 Priprava sendvič modela

Sendvič model je bil razvit v okviru delovnega sestanka članov RILEM Technical Committee 243-SGM na univerzi SUPSI v Švici. Z njim se je hotelo poenostaviti izdelavo modela odstopljenih plasti ometov (zračnih žepov) stenske slike.

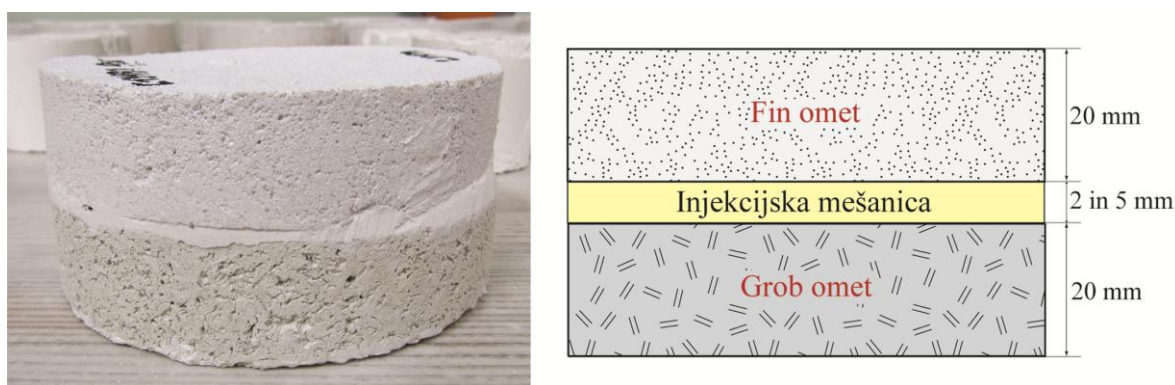
V doktorski disertaciji sem sendvič model uporabila za preučevanje vpliva umetno pospešenega staranja na sprijemno trdnost injekcijske mešanice.

Model temelji na pripravi diskov, premera 10 cm in višine 2 cm, iz grobega in finega ometa. Med diska se injicira plast injekcijske mešanice v višini 2 in 5 mm (slika 3.10).

Sestava grobega in finega ometa je enaka kot pri modelu z zračnimi žepi (lastnosti ometov so podane v poglavju 3.5.5).

Pripravljene diske smo sušili 30 dni na temperaturi 20 ± 2 °C in relativni zračni vlagi 60 ± 5 %. Nato smo dali diske za 10 dni v CO₂ komoro za pospešitev karbonatizacije apna, v okolje z 1 % CO₂ ter temperaturo 20 ± 1 °C in RH = 60 ± 5 % (1 % CO₂ je naveden v standardu SIST EN 13295:2004, pri večjih koncentracijah ne nastaja kalcit, ampak druge oblike kalcijevega karbonata, na primer aragonit). Vzorce smo med pospešeno karbonatizacijo tehtali. Ko so dosegli konstantno maso, smo ocenili, da je karbonatizacija končana. Stanje karbonatizacije smo dodatno preverjali s fenolftalen indikatorjem, ki ob popolni karbonatizaciji ne povzroči obarvanja prereza. Diski so nato še 7 dni odležavali na temperaturi 20 ± 2 °C in RH 60 ± 5 %.

Po končani karbonatizaciji smo med dva diska (grobega in finega) vgradili izbrano injekcijsko maso debeline 2 in 5 mm. Pripravljene sendviči so se 30 dni sušili pri temperaturi 20 ± 2 °C in RH 60 ± 5 %. Nato smo tudi sendviče za 10 dni izpostavili pospešeni karbonatizaciji. Po končani pospešeni karbonatizaciji so sendviči odležavali še sedem dni na temperaturi 20 ± 2 °C in RH 60 ± 5 %.



Slika 3.10: Sendvič (levo) in načrt sendvičev (desno).
Figure 3.10: Sandwich (left) and scheme of sandwiches (right).

3.5.4 Priprava apnenih skodelic

Apnene skodelice sta predlagali avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013) kot pripomoček za in-situ preiskave na terenu. Namenjene so preverjanju prostorninske stabilnosti injekcijske mešanice (obsega krčenja zaradi sušenja in odpornosti na oblikovanje razpok) ter časa sušenja in vezanja injekcijskih mešanic.

Pripravljene so iz apnene malte za omet (1 volumski del apnenega testa in 2 volumska dela peska) in PVC skodelice, ki služi za kalup. PVC skodelico, visoko 30 mm, napolnimo z apneno malto in površino poravnamo z robom skodelice. Na središču vgrajenega materiala vtisnemo 20 mm globoko votel valj premera 55 mm. Iz notranjosti odtisnjene valja odstranimo malto do globine 20 mm in poravnamo dno, da nastane maltna skodelica (slika 3.11, levo).

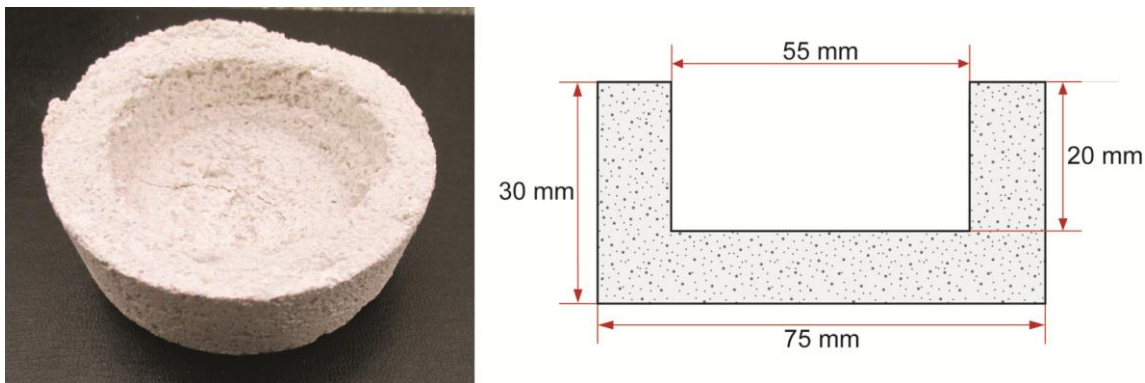
Skodelice iz malte po 14-ih dneh vzamemo iz PVC kalupa in pustimo zoreti 90 dni na temperaturi $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in RH $60 \pm 5 \%$.

Avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013) v navodilih navajata, da je za vsako mešanico potrebno pripraviti dve apneni skodelici, v vsako vgradimo 20 ml injekcijske mešanice. V doktorski disertaciji sem pripravila štiri apnene skodelice za vsako mešanico, in sicer:

- dve suhi apneni skodelici,
- dve predhodno navlaženi apneni skodelici.

S tem smo preverjali vpliv predhodnega vlaženja na lastnosti injekcijskih mešanic.

Lastnosti malte za apnene skodelice so podane v poglavju 3.5.5.



Slika 3.11: Apnena skodelica (levo) in načrt apnene skodelice (desno).

Figure 3.11: Mortar cup (left) and scheme of the cup (right).

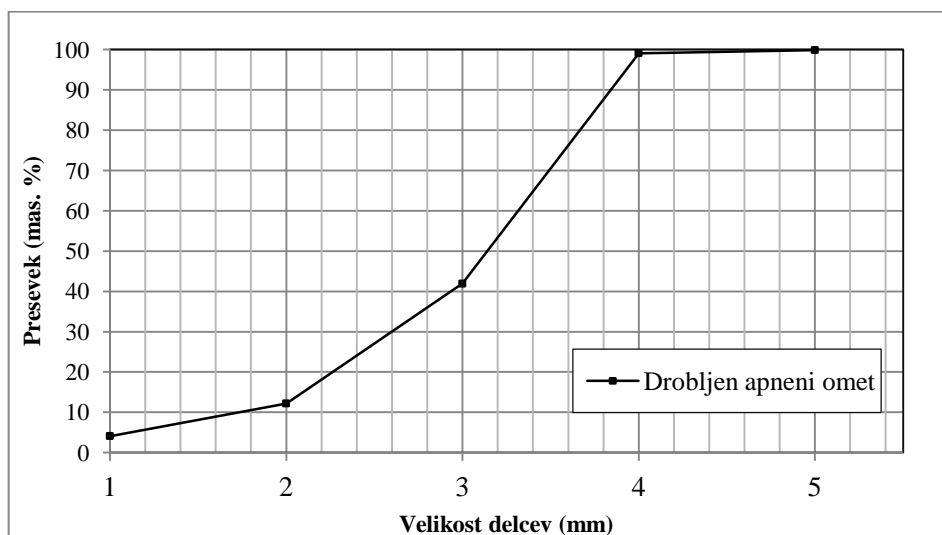
3.5.5 Drobljen apneni omet (za preverjanje injektabilnosti in pretočnosti)

Drobljen apneni omet za preverjanje injektabilnosti in pretočnosti je narejen iz apnenega testa in kalcitnega ter kremenovega peska. Apneni ometi so bili pripravljani leta 2007 v okviru diplomske naloge (Padovnik, 2008).

Standard SIST EN 1771:2004/AC:2005 predvideva uporabo drobljenega kremenovega peska ali zdrobljene cementne malte, granulacije od 0,63 do 1,25 mm. Avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013) predlagata uporabo drobljene opeke, lehnjaka ali apnenega ometa, ki predstavljajo reprezentativne materiale historičnih arhitekturnih struktur dekorativnih ometov, granulacije od 2 do 4 mm.

Glavni razlog za spremembo granuliranega materiala je v sposobnosti kapilarnega vpivanja vode kremenovega peska, saj je njegova vodovpojnost izredno nizka, zato vpliva kapilarnega srka v realnih stenskih slikah s kremenovim peskom ni možno ovrednotiti. Drobljena opeka in lehnjak sta pogosta materiala, iz katerih je sestavljen nosilec (zid) apnenih ometov stenskih slik in imata sposobnost večjega in manjšega kapilarnega vpivanja vode (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013).

Koeficient kapilarnega srka vode apnenega ometa pri 10-ih minutah je $11 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$, stopnja skupne odprte poroznosti pa 27 % (preglednica 3.9). Sejalna krivulja drobljenega ometa je predstavljena na sliki 3.12.

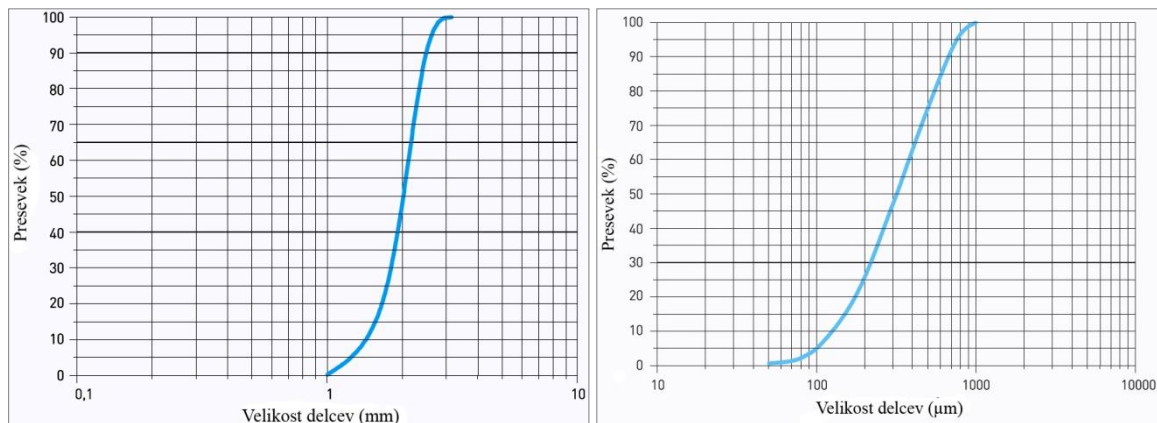


Slika 3.12: Sejalna krivulja drobljenega apnenega ometa, uporabljenega za preizkus injektabilnosti.

Figure 3.12: Grain size distribution of coarse (left) and fine (right) limestone aggregate.

3.5.6 Lastnosti malt in apnenih ometov

Modeli z zračnimi žepi, sendvič modeli in apnene skodelice smo pripravili z apnenimi maltami za omete. Za pripravo malt smo uporabili hidratizirano apno v obliki testa proizvajalca Gnom d. o. o. in kalcitni pesek podjetja Calcit (Calcit d. o. o., Stahovica). Sejalna krivulja za grob in fin pesek je prikazana na sliki 3.13.



Slika 3.13: Grain size distribution of crushed lime mortar for injectability tests.

Figure 3.13: Grain size distribution of coarse (left) and fine (right) limestone aggregate.

V preglednici 3.9 so podane vrednosti za koeficient kapilarnega srka po 10-ih minutah in poroznost za fin in grob omet modelov z zračnimi žepi, sendvič modelov, apnenih skodelic in drobljenega ometa. Najvišjo stopnjo odprte poroznosti (32 %) imata fin in grob omet modela z zračnimi žepi in apnene skodelice. Koeficient kapilarnega srka za fin omet apnene skodelice je $14 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

Nižjo stopnjo odprte poroznosti (25 %) imata grob in fin omet sendvičev, verjetno zaradi višje stopnje karbonatizacije apnenega veziva, saj so bili diski podvrženi pospešeni karbonatizaciji.

Obe plasti ometa imata visoko sposobnost vpijanje vode. Koeficient kapilarnega srka pri 10-ih minutah je za grob omet $25 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{min}})$, medtem ko ima fin omet nekoliko višjo sposobnost vpijanja vode ($26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{min}})$).

Preglednica 3.9: Lastnosti apnenih ometov.

Table 3.9: Properties of lime mortars.

	Koeficient kapilarnega srka po 10-ih minutah $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$	Stopnja skupne odprte poroznosti (%)	Stopnja kapilarnih por (%)	Stopnja zračnih por (%)
Grob omet (sendvič)	25	25	21	3
Fin omet (sendvič)	26	25	18	7
Fin omet (zračni žep, apnena skodelica)	14	32	25	6
Drobljen omet	11	27	26	1

3.6 Povzetek in zaključki tretjega poglavja

Cilj pričujočega poglavja je predstaviti in prikazati izhodišča razvoja kompatibilnih injekcijskih mešanic za nekonstrukcijsko utrjevanje stenskih slik. Utrjevanje odstopljenih plasti ometov je ireverzibilen postopek, s katerim želimo stabilizirati in ponovno vzpostaviti strukturno celovitost in ravnovesje v stenski sliki.

Za doseg teh ciljev je treba uporabiti injekcijsko mešanico, ki bo kompatibilna z originalnimi historičnimi materiali v kemijskem, fizikalnem in mehanskem smislu.

Izhodišče za izbiro materialov novih injekcijskih mešanic temelji na pregledu literature oziroma pregledu slovenske in mednarodne konservatorsko-restavratorske prakse na področju utrjevanja odstopljenih plasti ometov ter na analizah historičnih ometov stenskih slik.

Za vezivo smo izbrali hidratizirano apno v prahu in kalcitno moko kot polnilo. Za izpolnitev zahtev, da morajo imeti injekcijske mešanice čim manjše možno krčenje in čim manjši možen delež vode v svoji sestavi, smo izbrali dva superplastifikatorja, enega na osnovi polikarboksilatnega etra (PCE) in drugega na polifosfonatni (PPh) osnovi. Za zagotovitev majhne lastne teže smo izbrali ultralahko polnilo v obliki votlih mikrokroglic. Ker apno, kot zračno vezivo, za strjevanje s karbonatizacijo zahteva prisotnost zraka in ker je dostop CO₂ do zaprtih zračnih žepov lahko bistveno omejen, smo pri določenih sestavah kot del veziva uporabili pucolanski dodatek tuf.

Injekcijska mešanica mora imeti ustrezne delovne lastnosti, kot so ustrezna injektabilnost, pretočnost in stabilnost, od katerih je odvisna uspešnost utrjevanja zračnih žepov. Za preverjanje lastnosti zasnovanih injekcijskih mešanic v svežem, pa tudi v strjenem stanju, smo zato izbrali standardizirane in nestandardizirane metode, ki smo jih v nekaterih primerih prilagodili, da so primernejše za potrebe preverjanja lastnosti mešanic, namenjenih za nekonstrukcijsko injiciranje in zapolnjevanje zračnih žepov stenskih slik.

Bistvene razlike v preizkusnih metodah med konstrukcijskimi in nekonstrukcijskimi injekcijskimi mešanicami so predvsem v velikosti vzorca, zato smo pri večini standardiziranih metod zmanjšali količino testirane mešanice. Večje spremembe so doživele standardizirane metode, namenjene preverjanju delovnih lastnosti, npr. zmanjšali smo lijak za preizkus pretočnosti. Standardiziranih metod, ki so namenjene preverjanju lastnosti na strjenih mešanicah, nismo modificirali.

V okviru doktorske disertacije sem prevzela in po potrebi modificirala (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013), pa tudi razvila nekatere nove nestandardizirane metode, ki omogočajo dodatna testiranja injekcijskih mešanic v laboratoriju in na terenu. V ta namen sem uporabila predvsem metode, ki bolj ali manj realno simulirajo stanje odstopljenih poroznih ometov stenskih slik, to so:

- plošče s kanalčki za preverjanje pretočnosti injekcijskih mešanic,
- model z zračnimi žepi za preverjanje prijemne trdnosti in vpijanja vode,

- sendviči za preverjanje vpliva pospešenega staranja na sprijemno trdnost,
- apnene skodelice za preverjanje krčenja, nastajanje razpok in določanje časa vezanja,
- drobljen apneni omet, za preverjanje injektabilnosti.

Prilagojena je bila metoda za preverjanje stabilnosti sveže mešanice (v smislu odpornosti na razmešanje sestavin) in razvita metoda za preverjanje stabilnosti mešanice med sušenjem in strjevanjem (v smislu njene odpornosti na krčenje in oblikovanje razpok).

Prva metoda preverja homogenost injekcijske mešanice po 24-ih urah v visokem in ozkem valju, preko določanja prostorninske mase mešanice v treh različnih nivojih po višini valja. Z drugo metodo določamo spremembo prostornine vzorca zaradi krčenja ter ugotavljamo prisotnost razpok in njihovo širino ter število.

Prednosti in-situ metod, namenjenih preverjanju injektabilnosti, pretočnosti in krčenja injekcijskih mešanic na terenu, s strani restavratorjev, je v tem, da so enostavne, vendar dovolj učinkovite za kontrolo kakovosti mešanic na terenu (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013). Ena od prednosti teh metod je tudi možnost njihove prilagoditve glede na situacijo na terenu.

Apnene skodelice in plošče s kanalčki je mogoče pripraviti iz materialov in po recepturah, po katerih so narejeni originalni ometi, ki se jih želi utrditi. Lahko pa se uporabijo in zdrobijo obstoječi ometi, če so na voljo.

Izbrane preizkusne metode imajo svoje dobre in slabe lastnosti. Skozi testiranja injekcijskih mešanic jih je možno izboljševati in prilagajati razmeram na terenu. Cilj vsakega testiranja injekcijskih mešanic, naj bo to v laboratoriju ali na terenu, pa je zagotoviti optimalno sestavo in lastnosti mešanice za utrjevanje točno določene stenske slike. Če bodo torej restavratorji pri zasnovi injekcijske mešanice uporabili predlagane metode, bodo lažje določili najbolj optimalno sestavo mešanice v danem primeru in s tem tudi podaljšali življenjsko dobo restavratorskih posegov, ki ne bodo imeli škodljivih vplivov na original.

In-situ metode so namenjene predvsem kontroli lastnosti injekcijskih mešanic na terenu in preverjanju ponovljivosti teh lastnosti. Z njimi na hiter in enostaven način pridobimo podatke o injektabilnosti, pretočnosti, krčenju in nastajanju razpok med sušenjem, določimo pa lahko tudi čas vezanja injekcijske mešanice.

4 RAZVOJ IN EKSPERIMENTALNE PREISKAVE INJEKCIJSKIH MEŠANIC (IZVEDENE PREISKAVE IN ANALIZE REZULTATOV)

Program raziskav je zasnovan na vrednotenju lastnosti različnih formulacij injekcijskih mešanic, namenjenih stabilizaciji odstopajočih plasti ometov. Glavni kriteriji, ki naj bi jih injekcijske mešanice izpolnjevale, so predstavljeni v poglavju 3.1.

Izvedene preiskave in analize rezultatov različnih formulacij mešanic so razdeljene v štiri sklope (shema 4.1): preliminarne raziskave, razvoj mešanic, lastnosti strjenih mešanic in detajlne preiskave.

V prvem sklopu preliminarnih raziskav je bilo zasnovanih devet injekcijskih mešanic z različnimi razmerji vezivo : polnilo (hidratizirano apno : kalcitna moka) in z ali brez PCE/PPh superplastifikatorja. Namen tega sklopa preiskav je bil določiti razmerje vezivo : polnilo, pri katerem je krčenje injekcijske mešanice najmanjše, ob izpolnjevanju vseh zahtev glede lastnosti mešanice v svežem stanju. V ta namen sta bili uporabljeni dve nestandardizirani metodi za preverjanje prostorninske stabilnosti mešanice v svežem stanju in med sušenjem in strjevanjem.

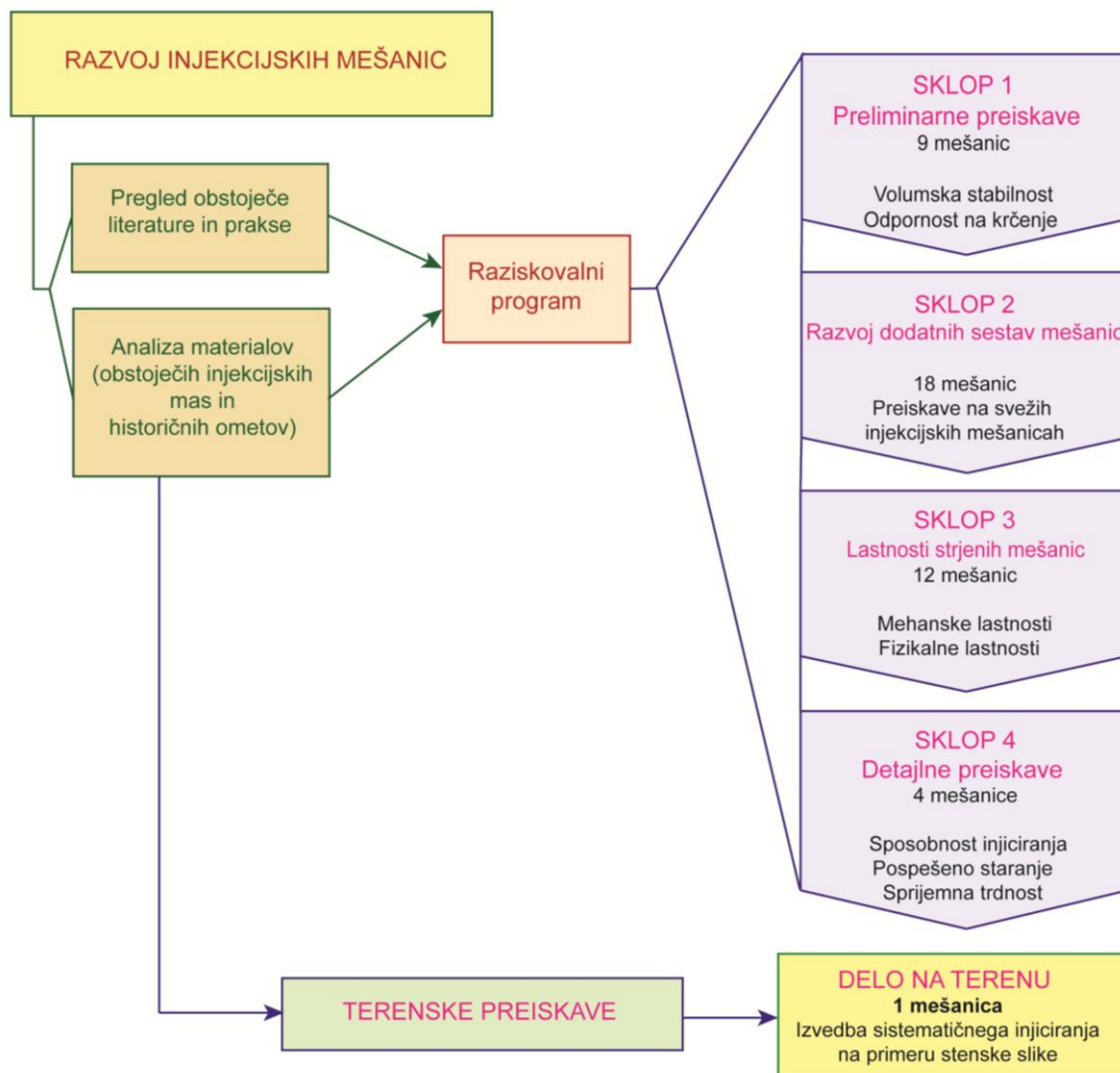
V drugem sklopu smo, na podlagi rezultatov preliminarnih raziskav in pri konstantnem razmerju vezivo : polnilo zasnovali injekcijske mešanice, kjer smo osnovnemu vezivu in polnilu dodali tuf ali ultralahko polnilo, z ali brez PCE/PPh superplastifikatorja. Zasnovali smo sedemnajst injekcijskih mešanic in na njih opravili preiskave v svežem stanju. Velika pozornost je bila usmerjena v preverjanje stabilnosti svežih mešanic, konkretno nas je zanimalo, ali pride do ločevanja posameznih sestavin v mešanici. V ta namen smo uporabili že predstavljen test stabilnosti z visokim in ozkim valjem. Opravili smo še test izločanja vode, mini razlez s posedom in določili prostorninsko maso mešanic. Z in-situ metodami pa smo preverili injektibilnost in pretočnost mešanic.

Na podlagi dobljenih rezultatov in njihove analize smo za tretji sklop izbrali dvanajst mešanic za preiskave fizikalnih in mehanskih lastnosti strjenih mešanic. Določili smo tlačno in cepilno natezno trdnost mešanic ter njihovo poroznost, sposobnost kapilarnega vpijanja vode, paroprepustnost in prostorninsko maso.

V zadnji (četrti) sklop je uvrščenih šest injekcijskih mešanic, ki izpolnjujejo predpisane kriterije za lastnosti, ki smo jih preverjali v tretjem sklopu. V tem sklopu smo uporabili najbolj zahtevne teste za ovrednotenje učinkovitosti injekcijskih mešanic, in sicer: določanje sposobnosti injektiranja s peščenim stolpcem, določanje časa vezanja, meritve sprijemne trdnosti («pull off» test), vpijanja vode s steklenimi cevki na modelih z zračnimi žepi ter na sendvičih, ki oboji simulirajo odstopljene plasti ometov. Prav tako smo izvedli pospešeno starane teste na sendvič modelih.

Eden najpomembnejših rezultatov zadnjega sklopa je izbira injekcijske mešanice, namenjene uporabi na terenu za stabilizacijo odstopljenih plasti ometov stenske slike.

Shema 4.1: Zasnova raziskovalnega programa.
Scheme 4.1: Planning of experimental programme.



4.1 Sklop 1: Preliminarne preiskave

V prvem sklopu preliminarnih preiskav smo izbrali skupino injekcijskih mešanic na podlagi predhodno postavljenih kriterijev, to je minimalno krčenje in dobra odpornost proti oblikovanju razpok med sušenjem. Vse injekcijske mešanice, ki so imele veliko krčenje in so med sušenjem močno razpokale, so bile izločene iz nadaljnjih preiskav.

Eden od ukrepov za zmanjšanje krčenja je pravilna izbira razmerja vezivo : polnilo. Drugi ukrep je manjšanje količine vode v mešanici. Zato smo najprej preverili vpliv treh volumskih razmerij vezivo : polnilo na obseg krčenja, in sicer:

- 1 : 1 (1 del veziva : 1 del polnila), uporabljajo ga tako v slovenski (preglednica 2.3, Masa 4 in 5) kot v tuji (Baglioni in sod., 1997) konservatorsko-restavratorski praksi.

- 1 : 2 (1 del veziva : 2 dela polnila) in 1 : 3 (1 del veziva : 3 dele polnila), povišan delež polnila je izbran z namenom zmanjšati krčenje injekcijske mase.

Preglednica 4.1: Sestava injektcijskih mešanic z različnim razmerjem vezivo : polnilo. Potreba po vodi je izražena v v/m.

Table 4.1: Composition of injection grouts with different binder : filler ratio. Water-binder ratio is expressed in v/m.

Oznaka mešanice /formulacija	Vezivo/polnilo	Vezivo/polnilo	Voda/vezivo	Voda/ vezivo in polnilo	Dodatek PCE /PPh SP	SP/vezivo
	Volumsko razmerje (V:P)	Masno razmerje (V/P)	Masno razmerje (v/v)	Masno razmerje (v/m)	(%)	Masno razmerje
L ₁ S ₁	1 : 1	0,83	1,58	0,71	-	-
L ₁ S ₁ PCE	1 : 1	0,83	1,06	0,48	0,5	0,01
L ₁ S ₁ PPh	1 : 1	0,83	1	0,45	0,75	0,02
L ₁ S ₂	1 : 2	0,41	1,92	0,56	-	-
L ₁ S ₂ PCE	1 : 2	0,41	1,55	0,37	0,5	0,02
L ₁ S ₂ PPh	1 : 2	0,41	1,09	0,32	0,75	0,03
L ₁ S ₃	1 : 3	0,28	2,24	0,49	-	-
L ₁ S ₃ PCE	1 : 3	0,28	1,86	0,41	0,5	0,02
L ₁ S ₃ PPh	1 : 3	0,28	1,66	0,36	0,75	0,03

Opomba: Formulacija mešanice je označena s simboli: L = hidratizirano apno, S = kalcitna moka, PCE = Polikarboksilatni superplastifikator, PPh = polifosfonatni superplastifikator. Volumsko razmerje (hidratizirano apno in kalcitni pesek) je označeno z indeks številkami.

Analizirali smo devet injektcijskih mešanic z različnim razmerjem vezivo : polnilo (hidratizirano apno : kalcitna moka), brez ali z PCE in PPh superplastifikatorjem. Sestava mešanic je podana v preglednici 4.1. Injektcijske mešanice so pripravljene po postopku, opisanem v poglavju 3.3.1.

Delež dodane vode v mešanice je bil minimalen v smislu zagotavljanja ustrezne pretočnosti mešanice, določen s pomočjo preprostega testa z injektcijsko brizgo. Odstotek dodanega superplastifikatorja (0,5 % za PCE in 0,75 % za PPh) je bil izbran na podlagi predhodno opravljenih testov v okviru diplomske naloge Dore Kovač (2014), kjer sem bila somentorica.

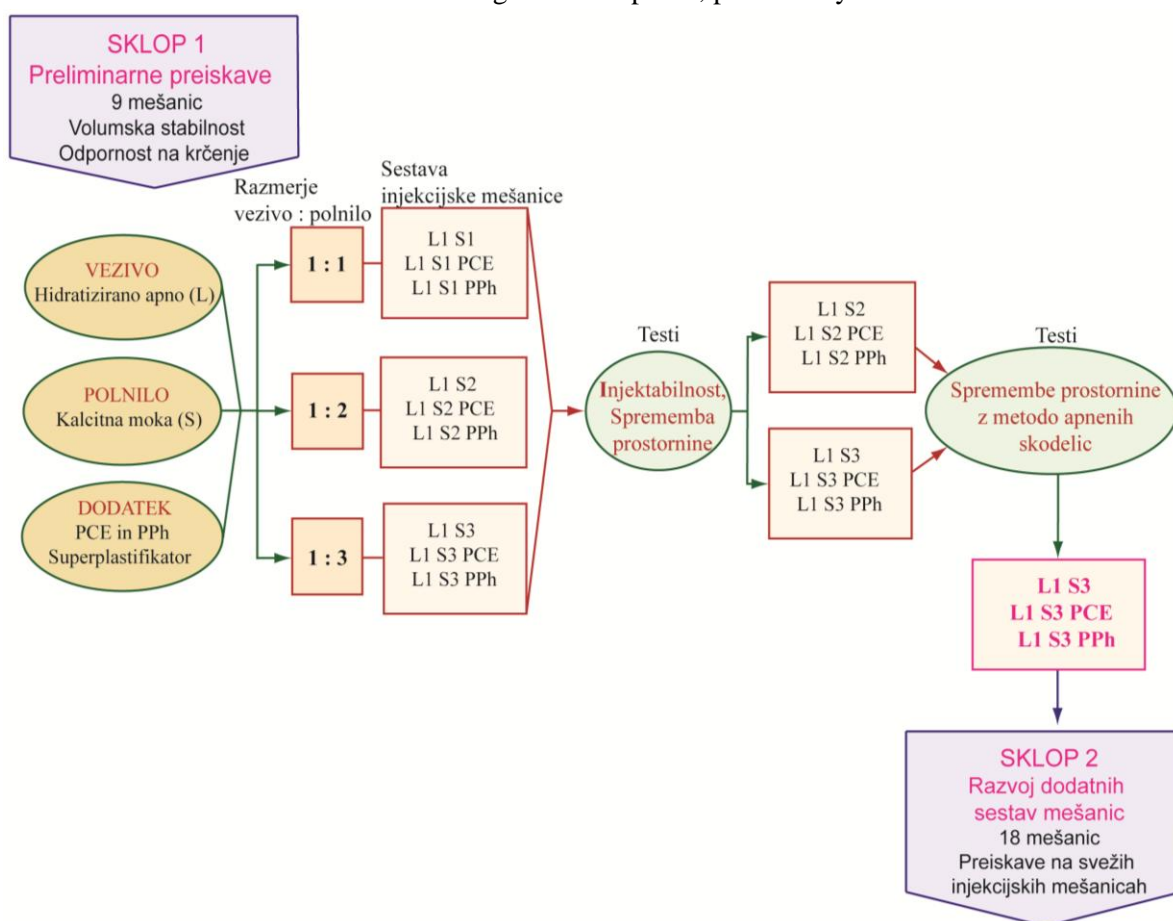
Na shemi 4.2 je predstavljen prikaz zasnove preiskav prvega sklopa, to je preliminarnih preiskav.

Cilj tega sklopa preiskav, opravljenih na devetih mešanicah s tremi različnimi razmerji vezivo : polnilo ter brez ali s PCE/PPh superplastifikatorjem, je s pomočjo preprostih metod preverjanja

stabilnosti prostornine med sušenjem in vezanjem mešanice v plastičnem kalupu ter vizualne ocene velikosti in števila razpok izbrati mešanice, ki so najbolj odporne na krčenje zaradi sušenja in oblikovanje razpok. Na podlagi rezultatov preiskav smo izbrali šest injekcijskih mešanic za nadaljnjo preverjanje odpornosti proti krčenju in nastajanju razpok med sušenjem, z metodo apnenih skodelic, ki sta jo predlagali avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013).

Shema 4.2: Potek 1. sklopa, preliminarne preiskave.

Scheme 4.2: Planning of the 1st phase, preliminary research.



4.1.1 Potreba po vodi

Minimalno vnašanje vlage z injekcijsko mešanico med postopkom injiciranja v zračne žepe odstopljenih plasti ometov je eden od predhodno postavljenih kriterijev. Zato smo stremeli k čim nižjemu deležu dodane vode. Po drugi strani je moral biti delež vode dovolj velik, da smo dosegli ustrezno pretočnost mešanice, ovrednoteno s preprostim testom z injekcijsko brizgo (slika 4.1), ki pa odraža dejanske delovne razmere na terenu.

Na osnovi pregleda literature iz konservatorskega-restavratorskega področja ni bilo moč ugotoviti priporočenega vodovezivnega razmerja (v/v) oziroma količino dodane vode v injekcijskih mešanicah.

Avtorji Baglioni in sod. (1997) navajajo, da se masi doda toliko vode, da postane kašasta zmes. Medtem ko Ferragni in sod. (1984) nekoliko podrobneje opišejo potrebo po vodi, ki mora biti čim nižja, da se zmanjša krčenje, vendar še vedno dovolj velika, da je masa injektabilna in uporabna.



Slika 4.1: Kvalitativni test z injekcijsko brizgo za preverjanje injektabilnosti mešanice.
Figure 4.1: Qualitative test of injectability of grout mixture with syringe.

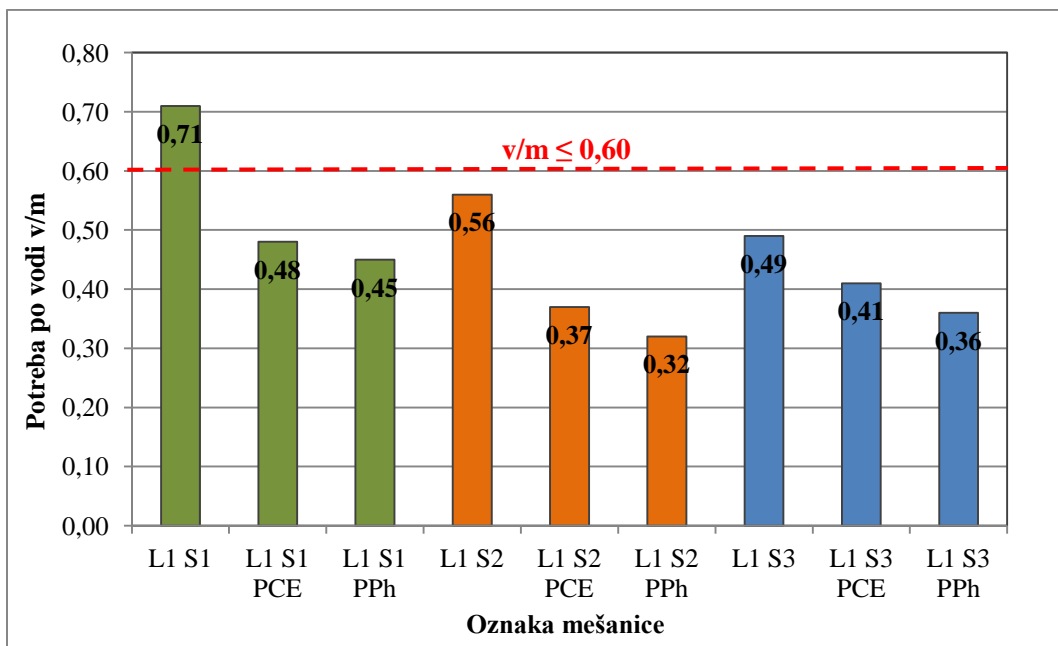
Kvalitativni test z injekcijsko brizgo je uporabljen za preverjanje tečenja injekcijske mešanice pod minimalnim pritiskom z ali brez injekcijske igle (Griffin, 2004, Rousset in sod., 2005), glej sliko 4.1. Z minimalnim pritiskom na bat injekcijske brizge, napolnjene z injekcijsko mešanico, se preverja sposobnost tečenja skozi odprtino brizge ali igle. Mešanice, ki so pod minimalnim pritiskom pritekale iz injekcijske brizge in igle, smo obravnavali kot primerne. Za izpolnitev kriterija glede enostavnega tečenja mešanice pod minimalnim pritiskom skozi injekcijsko brizgo, z ali brez igle, smo masi dodajali vodo, dokler kriterij ni bil izpolnjen. Dodana količina vode je predstavljala minimalno potrebo po vodi za doseganje ustrezne sposobnosti tečenja mešanice.

Potreba po vodi (razmerje med maso vode in maso vseh suhih delcev v mešanici z oznako v/m) za obravnavane injekcijske mešanice (to je delež zamesne vode, ki jo mešanica potrebuje za doseganje ustreznega tečenja pri danih pogojih (Uranjek, 2008)) je prikazana na sliki 4.2.

S pomočjo preverjanja enostavnega tečenja mešanice skozi injekcijsko brizgo in iglo pri minimalnem pritisku smo ugotovili, da se potreba po vodi giblje med 0,32 in 0,71. Manjšo potrebo po vodi imajo mešanice, ki vsebujejo superplastifikator, kar je bil tudi namen uporabe tega kemijskega dodatka.

Največjo potrebo po vodi, $v/m = 0,45-0,71$, imajo mešanice, pripravljene v razmerju vezivo: polnilo 1 : 1, medtem ko ostale mešanice v razmerju 1 : 2 in 1 : 3 dosegajo potrebo po vodi $v/m = 0,32-0,56$.

Izkazalo se je, da za doseganje enostavnega injiciranja skozi injekcijsko brizgo ali iglo mešanice s PPh superplastifikatorjem potrebujejo manj zamesne vode ($v/m = 0,32-0,45$) kot mešanice s PCE superplastifikatorjem ($v/m = 0,37-0,48$). Vendar pa je treba poudariti, da je delež PPh superplastifikatorja v primerljivi mešanici za 50 % večji kot delež PCE superplastifikatorja.



Slika 4.2: Potreba po vodi (v/m) pri pripravi injekcijskih mešanic.

Figure 4.2: Water-binder ratio used for preparation of injection grouts.

Dosežene vrednosti potrebe po vodi mešanic so znotraj okvirjev, ki jih upošteva Uranjek (2008) pri testiranju injekcijskih mešanic za konstrukcijsko injektiranje.

Uranjek (2008) navaja, da se za različne vrste konstrukcijskih injekcijskih mešanic minimalno potrebno pretočnost doseže z vodovezivnim razmerjem med 0,40 in 0,50, maksimalno mejo postavi na 0,60, v izogib neugodnim učinkom na mehanske lastnosti strjene mešanice.

Temu kriteriju $v/m = 0,40-0,50$ ob upoštevanju $\pm 10\%$ tolerance zadostijo vse mešanice (L₁ S₁ PCE, L₁ S₁ PPh, L₁ S₂, L₁ S₂ PCE, L₁ S₂ PPh, L₁ S₃, L₁ S₃ PCE in L₁ S₃ PPh), razen mešanice L₁ S₁.

4.1.2 Sprememba prostornine injekcijskih mešanic

Sprememba prostornine, ki mora biti čim manjša, je pomemben pokazatelj obnašanja mešanice v času sušenja in strjevanja. Osnovni razlog za spremembo prostornine je krčenje zaradi sušenja. Prekomerno krčenje injekcijske mešanice vpliva na zmanjšano prijemnost injekcijske mešanice s podlago ter na oblikovanje razpok, posledično pa tudi na mehanske lastnosti mešanice v strjenem stanju.

Meritve spremembe prostornine injekcijskih mešanic smo izvajali po nestandardizirani metodi na strjenih mešanicah, opisanih v poglavju 3.4.1. Rezultati meritev so podani z natančnostjo 0,1 %, in sicer kot povprečna vrednost meritev na treh vzorcih (preglednica 4.2).

Preglednica 4.2: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic z različnim razmerjem vezivo : polnilo in obseg razpok zaradi sušenja.

Table 4.2: Change in volume of injection grouts with different binder-filler ratio and extent of drying cracks.

Oznaka mešanice	Sprememba prostornine (%)	Obseg razpok
L ₁ S ₁	21	Veliko razpok
L ₁ S ₁ PCE	12	Nekaj razpok
L ₁ S ₁ PPh	7	Veliko razpok
L ₁ S ₂	22	Vidnih nekaj razpok
L ₁ S ₂ PCE	6	Ni vidnih razpok
L ₁ S ₂ PPh	6	Vidne razpoke
L ₁ S ₃	13	Vidnih nekaj razpok
L ₁ S ₃ PCE	5	Ni vidnih razpok
L ₁ S ₃ PPh	5	Vidne razpoke

Pri testiranih mešanicah smo ugotovili visoko vrednost spremembe prostornine v primeru nižjega razmerja vezivo : polnilo (1 : 1) in v primeru mešanic brez superplastifikatorja (L₁ S₁, L₁ S₂ in L₁ S₃).

Vse mešanice brez PCE/PPh imajo dobro tečenje, ugotovljeno z injekcijsko brizgo, vendar imajo prav tako visoko spremembo prostornine (13–22 %) in več vidnih razpok. Mešanici L₁ S₁ in L₁ S₂ imata spremembo prostornine nad 20 %, medtem ko dosega mešanica L₁ S₃ vrednost 13 %.

Več vidnih razpok, nastalih med sušenjem, ima mešanica L₁ S₁, v primerjavi z mešanicami L₁ S₂ in L₁ S₃, kar je vidno na sliki 4.3.

Sprememba prostornine mešanic brez dodanega superplastifikatorja je trikrat večja, kot pri mešanicah z dodanim PCE/PPh superplastifikatorjem.

Učinek zmanjšanja količine vode s PCE/PPh superplastifikatorjem vpliva na zmanjšanje spremembe prostornine mešanice in zmanjšanje vidnih razpok.

Med temi imata mešanici L₁ S₁ PCE (12 %) in L₁ S₁ PPh (7 %) najvišjo spremembo prostornine. Razlog je v višjem razmerju vezivo : polnilo (1 : 1).

Mešanici L₁ S₂ PCE in L₁ S₂ PPh (6 %) imata višjo spremembo prostornine kot mešanici L₁ S₃ PCE in L₁ S₃ PPh (5 %).

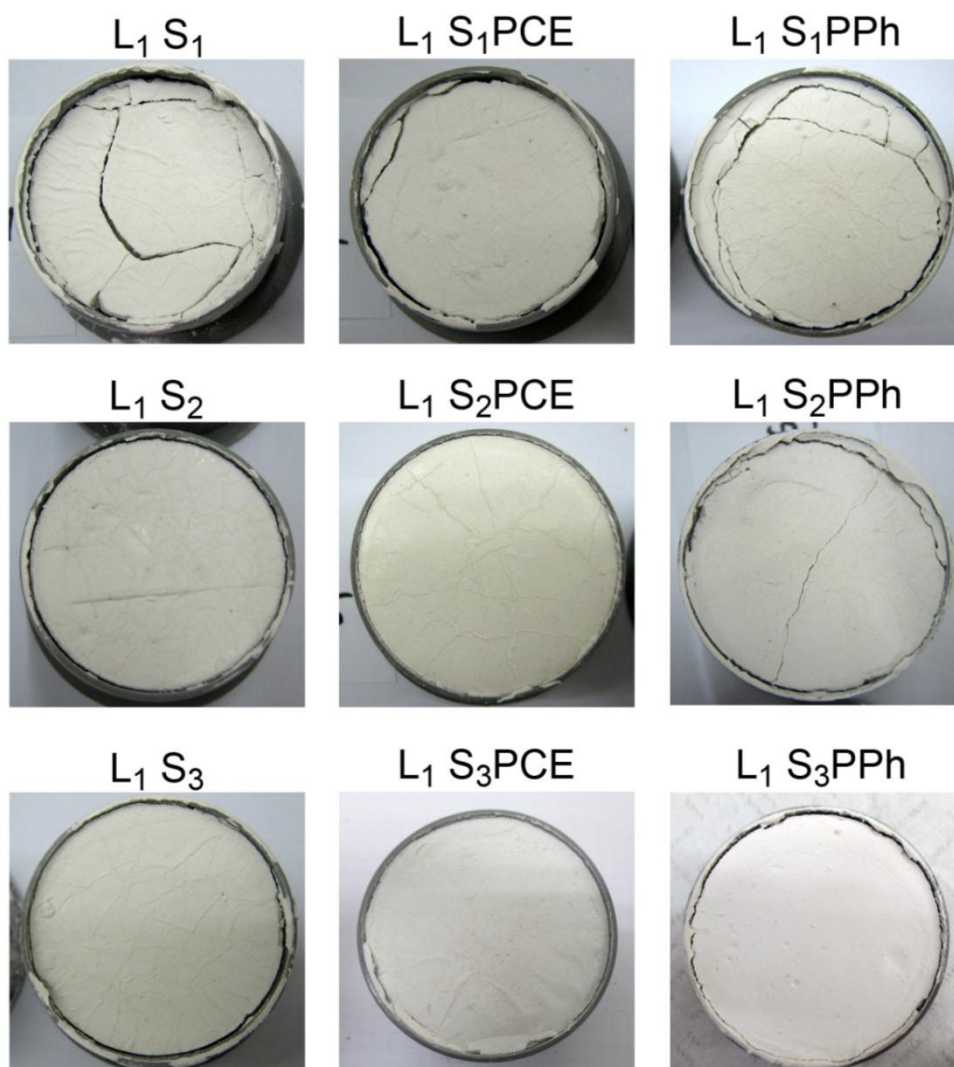
Razpoke, nastale ob sušenju, so vidne na mešanicah L₁ S₁, L₁ S₁ PCE, L₁ S₁ PPh, L₁ S₂ PPh in L₁ S₃ PPh (slika 4.3). Niso pa vidne na mešanicah L₁ S₂ PCE in L₁ S₃ PCE (slika 4.3).

Iz rezultatov je razvidno, da oba superplastifikatorja zmanjšata potrebo po vodi (slika 4.2) in s tem bistveno zmanjšata spremembo prostornine mešanic. V primeru PCE superplastifikatorja se poveča odpornost mase na oblikovanje razpok bolj kot pri mešanicah s PPh superplastifikatorjem, ki imajo manjše vidne razpoke (slika 4.3).

Mešanice z nižjim razmerjem vezivo : polnilo imajo večjo odpornost na krčenje in nastajanje razpok med sušenjem. Razlog za tako obnašanje injekcijskih mešanic je v večjem deležu dodanega polnila. Polnilo z višjo gostoto v primerjavi z gostoto poroznega apnenega veziva v trdnem stanju in v visokem volumskem deležu deluje kot tog del injekcijske mase in reducira krčenje (Ferragni in sod., 1984, Bičer-Simsir in sod., 2009).

Dodan PCE/PPh superplastifikator v primeru vseh treh razmerij vezivo : polnilo občutno zmanjša potrebo po vodi, masa pa ob tem obdrži zadostno pretočnost.

Na podlagi rezultatov preiskav tega sklopa sta bili za nadaljnje testiranje z metodo apnenih skodelic izbrani injekcijski mešanici z razmerjem vezivo : polnilo 1 : 2 in 1 : 3, brez in s PCE/PPh superplastifikatorjem.



Slika 4.3: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic in vidne razpoke.
Figure 4.3: Change in volume of injection grouts and visible drying shrinkage cracks.

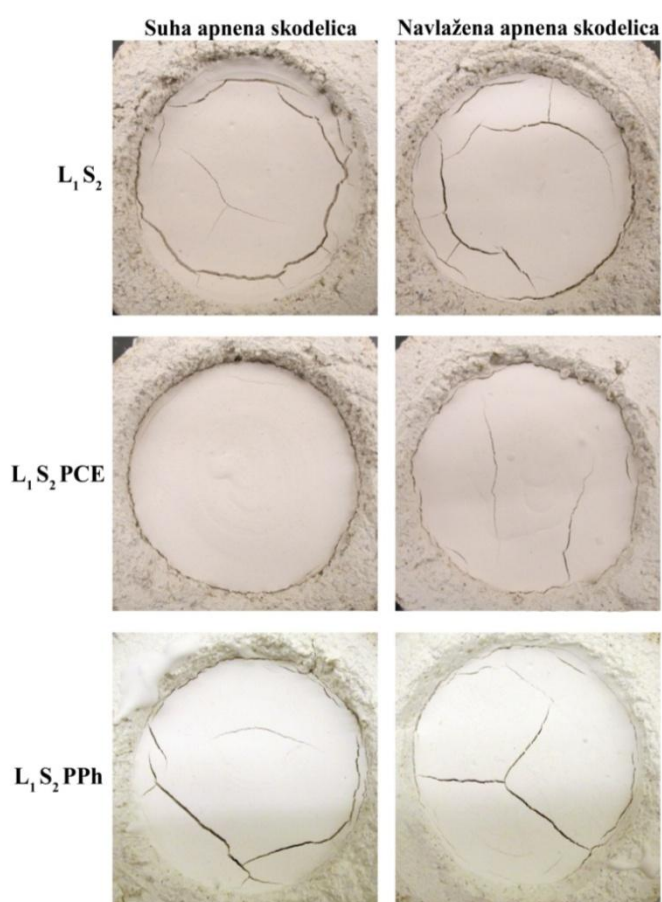
4.1.3 Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic

Preverjanje prostorninske stabilnosti injekcijskih mešanic z nestandardizirano metodo apnenih skodelic, ki jo predlagata avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013), je primerna tako za konservatorje-restavradorje na terenu kot tudi v laboratoriju. Sama metoda pokaže, ali količina vode v injekcijski mešanici vodi k prostorninski nestabilnosti, ki se kaže kot krčenje in nastajanje razpok. Vse mešanice so bile enkrat vgrajene v suhe in drugič predhodno navlažene apnene skodelice.

Rezultati spremembe prostornine z metodo apnenih skodelic so prikazani na sliki 4.4 za mešanice v razmerju vezivo : polnilo 1 : 2.

Mešanici $L_1 S_2$ in $L_1 S_2$ PPh, vgrajeni v suhe in navlažene apnene skodelice; imata na stiku s skodelico 1 mm široko razpoko in 2 mm široke razpoke v sami masi.

Veliko manjše razpoke so opazne pri mešanici $L_1 S_2$ PCE, na stiku s suho apneno skodelico približno 1 mm in v sami masi okrog 0,2 mm. Enaka mešanica ($L_1 S_2$ PCE), vgrajena v predhodno navlaženo apneno skodelico, ima 1 mm široko razpoko na stiku mase in apnene skodelice in večje število razpok, širokih do 1 mm, v sami masi (slika 4.4).



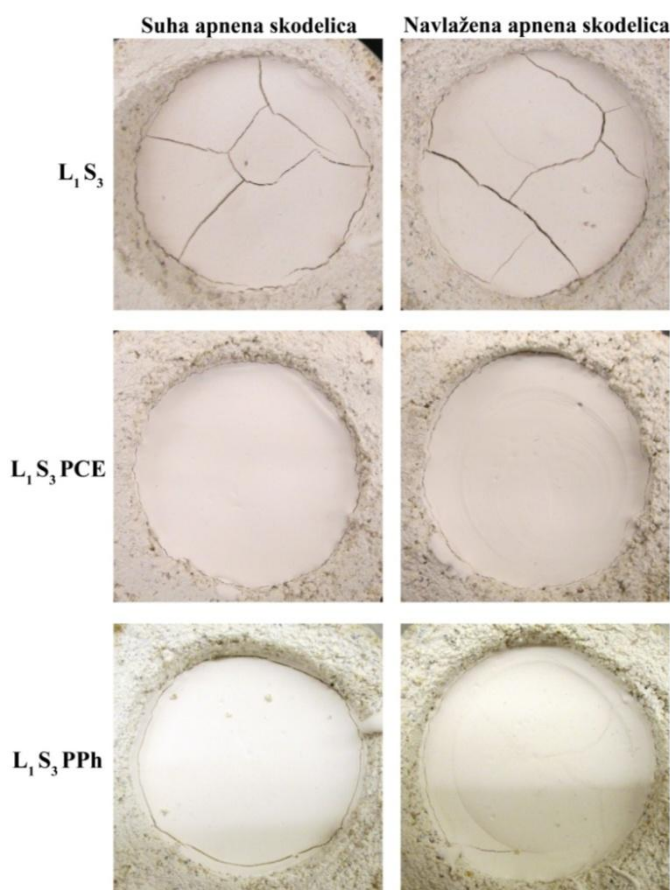
Slika 4.4: Sprememba prostornine mešanic $L_1 S_2$, $L_1 S_2$ PCE in $L_1 S_2$ PPh z metodo apnenih skodelic.
Figure 4.4: Drying shrinkage of injection grouts $L_1 S_2$, $L_1 S_2$ PCE in $L_1 S_2$ PPh with mortar cups.

Spremembe prostornine mešanic v razmerju vezivo : polnilo 1 : 3 v suhih in predhodno navlaženih apnenih skodelicah so prikazane na sliki 4.5.

Najbolj volumsko nestabilna je mešanica $L_1 S_3$ brez superplastifikatorja, vgrajena v suho in navlaženo apneno skodelico. Razpoka na stiku mase in apnene skodelice je široka okrog 1 mm in v sami masi do 2 mm.

Veliko manj sta razpokali mešanici $L_1 S_3$ s PCE in PPh superplastifikatorjem. Na stiku mase $L_1 S_3$ PCE in apnene skodelice je nastala 0,5 mm široka razpoka, v primeru suhe in navlažene skodelice.

Nekoliko širše razpoke, okrog 1 mm, so nastale na stiku mase $L_1 S_3$ PPh in suhe skodelice, ter brez vidnih razpok v sami masi. Enaka mešanica ($L_1 S_3$ PPh), vgrajena v navlaženo apneno skodelico, ima na stiku mase in skodelice 0,5 mm široko razpoko in v sami masi 0,1 mm široke razpoke.



Slika 4.5: Sprememba prostornine mešanic $L_1 S_2$, $L_1 S_2$ PCE in $L_1 S_2$ PPh z metodo apnenih skodelic.

Figure 4.5: Drying shrinkage of injection grouts $L_1 S_2$, $L_1 S_2$ PCE in $L_1 S_2$ PPh with mortar cups.

Z uporabo apnenih skodelic smo ugotovili, da imajo mešanice brez superplastifikatorja in s PPh superplastifikatorjem nižjo odpornost na krčenje zaradi sušenja, kot mešanice z dodanim PCE superplastifikatorjem. Razpoke in/ali separacija na stiku mase in apnene skodelice lahko nakazujejo na preveliko vsebnost vode v injekcijskih mešanicah, kar lahko vpliva na izgubo adhezije med maso in ometom ter na izgubo trdnosti mase (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013).

Apnene skodelice simulirajo vpliv absorpcije poroznega historičnega ometa na injekcijske mešanice in podajo informacijo o sposobnosti zadrževanja vode injekcijske mešanice. Sposobnost zadrževanja vode injekcijske mase je pomembna, saj vpliva na zmanjšanje krčenja in tudi na druge lastnosti, kot ugotavljajo Biçer-Şimşir in sod. (2009).

Iz rezultatov preiskav je razvidno, da ima predhodno vlaženje apnenih skodelic prej negativne kot pozitivne učinke na odpornost injekcijske mešanice proti oblikovanju razpok.

Najboljše lastnosti oziroma največjo prostorninsko stabilnost je pokazala masa $L_1 S_3$ PCE, zaradi kombinacije višjega razmerja vezivo : polnilo (1 : 3) in zmanjšane količine dodane vode zaradi uporabe superplastifikatorja.

4.1.4 Povzetek rezultatov prvega sklopa

V prvem, preliminarnem sklopu je poudarek na preverjanju prostorninske stabilnosti injekcijskih mešanic z različnim razmerjem vezivo : polnilo, saj je minimalno krčenje mešanic nujno za zagotovitev dobre adhezije med maso in ometom.

Prostorninsko stabilnost in odpornost proti oblikovanju razpok med sušenjem smo preverjali z dvema nestandardiziranima metodama, ki sta enostavni in hitri, istočasno pa primerni za izločitev injekcijskih mešanic s prevelikim krčenjem in občutljivostjo na oblikovanje razpok. Obe metodi lahko uporabljajo konservatorji-restavratorji na terenu in v laboratoriju.

Krčenje mešanic iz hidratiziranega apna kot veziva in kalcitne moke kot polnila učinkovito zmanjšamo na dva načina: s povišanjem deleža polnila in zmanjševanjem potrebe po vodi.

Z uporabo treh različnih razmerij vezivo : polnilo 1 : 1, 1 : 2 in 1 : 3 se povišuje delež polnila, kalcitne moke in istočasno zmanjšuje potreba po vodi. Za dodatno, učinkovitejše zmanjšanje potrebe po vodi potrebujemo superplastifikator. Z uporabo PCE ali PPh superplastifikatorja zadržijo mešanice ustrezno pretočnost, ki je pogoj za njihovo kakovostno injiciranje v ozke razpoke in špranje odstopljenih plasti ometov, kljub zmanjšani količini vode.

Obe metodi zmanjševanja krčenja injekcijskih mešanic pa sta učinkoviti le do določene stopnje. Uporaba PCE/PPh superplastifikatorja je od 2- do 3-krat učinkovitejša od večanja deleža polnila. Uporaba PCE superplastifikatorja je učinkovitejša pri zagotavljanju stabilnosti injekcijske mase, v primerjavi z uporabo PPh superplastifikatorja, kar se vidi na primeru apnenih skodelic.

Najboljše rezultate dosega mešanica z najvišjim deležem polnila in s PCE superplastifikatorjem, $L_1 S_3$ PCE. Prostornina mešanice zaradi krčenja se je spremenila za 5 % in je skoraj brez razpok, zaradi

česar je izbrana za nadaljnje načrtovanje in formulacijo mešanic. Velikost krčenja (5 %) je blizu mejne vrednosti (4 %), navedene v preglednici 3.1.

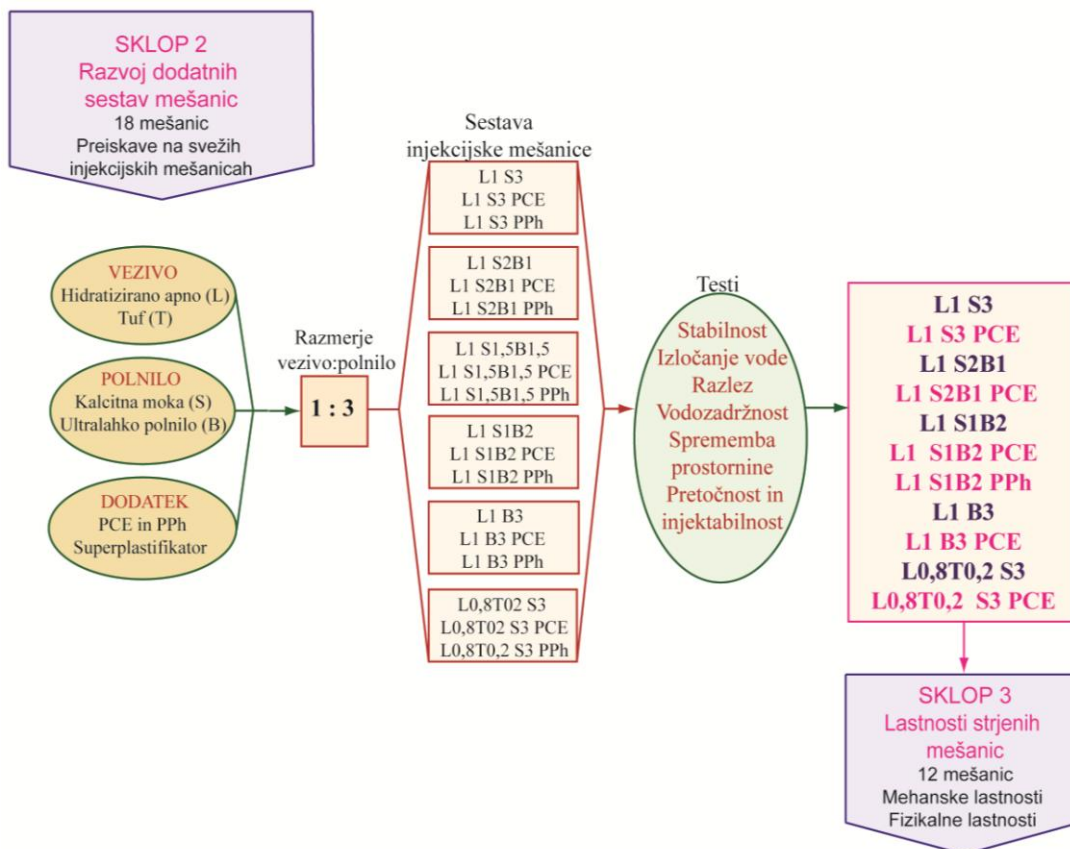
4.2 Sklop 2: Razvoj dodatnih sestav kompatibilnih injekcijskih mešanic

Razvoj kompatibilnih injekcijskih mešanic za stabilizacijo odstopljenih plasti ometov temelji na rezultatih raziskav prvega sklopa, kjer se je kot volumsko najbolj stabilna izkazala mešanica z razmerjem vezivo : polnilo 1:3, z dodanim PCE superplastifikatorjem. Ta mešanica je imela tudi največjo odpornost proti oblikovanju razpok.

V drugem sklopu smo se osredotočili na zasnovo novih injekcijskih mešanic, pri katerih smo del veziva ali polnila zamenjali z novim materialom, in testiranju njihovih lastnosti v svežem stanju. Načrtovanje in potek dela v 2. sklopu sta predstavljena na shemi 4.3.

Shema 4.3: Potek 2. sklopa, razvoj injekcijskih mešanic.

Scheme 4.3: Planning of the 2nd phase, development of injection grouts.



Načrtovanje novih injekcijskih mešanic temelji na osnovni sestavi 1 dela hidratiziranega apna kot veziva in 3 delov kalcitne moke kot polnila, z dodatkom 0,5 % PCE superplastifikatorja. Osnovno sestavi modificiramo tako, da del apna nadomestimo s tufom ali da kalcitno polnilo postopoma

nadomeščamo z ultralahkim polnilom. Z nadomeščanjem kalcitne moke z ultralahkim polnilom se zmanjšuje prostorninska masa injekcijskih mešanic, saj je majhna lastna teža eden od zahtevanih kriterijev.

V skupini mešanic, kjer se delež kalcitne moke manjša in nadomešča z deležem ultralahkega polnila (govora je o volumskih deležih), ostaja delež hidratiziranega apna nespremenjen:

- 3 deli kalcitne moke;
- 2 dela kalcitne moke + 1 del ultralahkega polnila;
- 1,5 dela kalcitne moke + 1,5 dela ultralahkega polnila;
- 1 del kalcitne moke + 2 dela ultralahkega polnila;
- 3 deli ultralahkega polnila.

Za vsako od zgornjih razmerij kalcitna moka : ultra lahko polnilo smo pripravili tri mešanice: prva je brez superplastifikatorja, druga je z dodatkom 0,5 % PCE in tretja z dodatkom 0,75 % PPh superplastifikatorjem. Sestava injekcijskih mešanic je podana v preglednici 4.3.

Preglednica 4.3: Sestava injekcijskih mešanic z dodanim ultralahkim polnilom.

Table 4.3: Composition of injection grouts with ultralight filler.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Vezivo : polnilo (volumsko razmerje)	Vezivo (volumenski del)		Polnilo (volumenski del)		Dodatek Superplastifikator (%)
		Hidratizirano apno	Kalcitna moka	Ultralahko polnilo		
L ₁ S ₃	1 : 3	1	3	0	0	
L ₁ S ₃ PCE	1 : 3	1	3	0	0,5 PCE	
L ₁ S ₃ PPh	1 : 3	1	3	0	0,75 PPh	
L ₁ S ₂ B ₁	1 : 3	1	2	1	0	
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	1 : 3	1	2	1	0,5 PCE	
L ₁ S ₂ B ₁ PPh	1 : 3	1	2	1	0,75 PPh	
L ₁ S _{1,5} B _{1,5}	1 : 3	1	1,5	1,5	0	
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE	1 : 3	1	1,5	1,5	0,5 PCE	
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh	1 : 3	1	1,5	1,5	0,75 PPh	
L ₁ S ₁ B ₂	1 : 3	1	1	2	0	
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	1 : 3	1	1	2	0,5 PCE	
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	1 : 3	1	1	2	0,75 PPh	
L ₁ B ₃	1 : 3	1	0	3	0	
L ₁ B ₃ PCE	1 : 3	1	0	3	0,5 PCE	
L ₁ B ₃ PPh	1 : 3	1	0	3	0,75 PPh	

Superplastifikator polifosfonatnega tipa (PPh), pri katerem je bilo krčenje večje, odpornost na oblikovanje razpok pa manjša, smo izbrali za nadaljnja testiranja izključno zaradi preverjanja obnašanja v kombinaciji z ultralahkim polnilom. Podana količina PCE/PPh superplastifikatorjev je izračunana kot odstotek mase veziva (hidratizirano apno) in polnila (kalcitna moka in ultralahko polnilo).

V zadnji, šesti skupini sestav smo osnovni sestavi spremenili delež hidratiziranega apna in ga nadomestili s tufom. Delež kalcitne moke ostaja nespremenjen. Zasnovani sta dve mešanici, pri katerih smo 20 % delež hidratiziranega apna nadomestili s tufom, brez in z 0,5 % deležem PCE superplastifikatorja. V omenjeni skupini nismo uporabili superplastifikatorja na polifosfonatni osnovi (PPh), ker smo že pri ostalih pridobljenih rezultatih videli slabši vpliv na lastnosti mešanic. Podrobnosti o sestavi injekcijskih mešanic so podane v preglednici 4.4.

Preglednica 4.4: Sestava injekcijskih mešanic z dodanim tufom.

Table 4.4: Composition of injection grouts with trass.

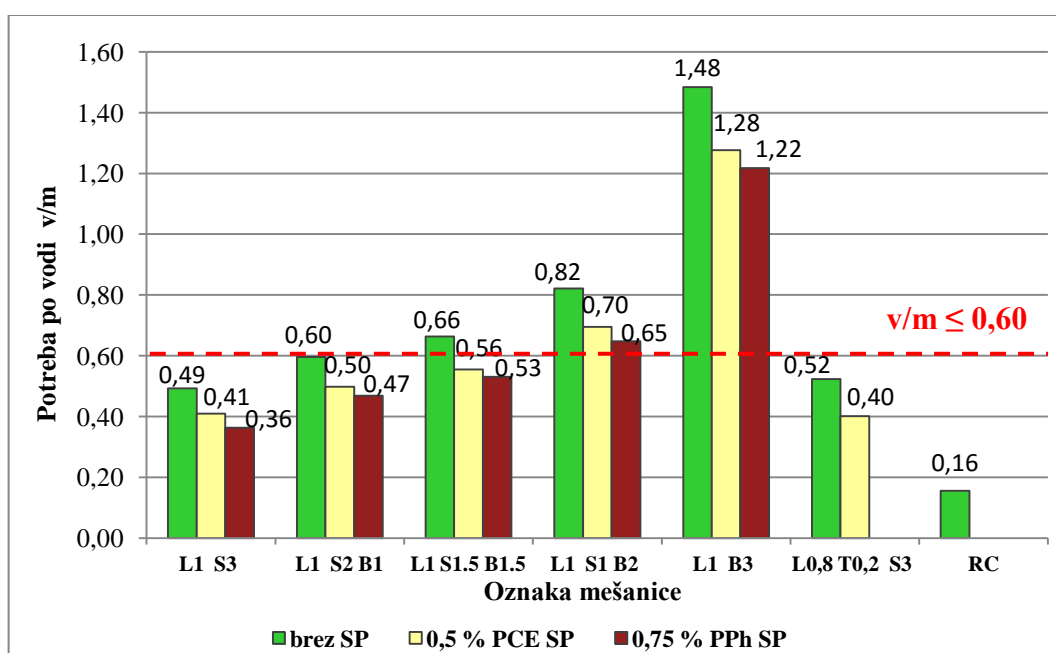
Oznaka mešanice /fomulacija mase	Vezivo:polnilo (volumsko razmerje)	Vezivo (volumenski del)		Polnilo (volumenski del)	Dodatek
		Hidratizirano apno	Tuf	Kalcitna moka	Superplastifikator (%)
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	1 : 3	0,8	0,2	3	0
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	1 : 3	0,8	0,2	3	0,5 PCE

Vzporedno s 17-imi injekcijskimi mešanicami smo pripravili tudi primerjalno mešanico po recepturi, ki jo uporabljajo slovenski konservatorji-restavradorji pri stabilizaciji odstopljenih plasti ometov (ZVKDS, 2014). Injekcijska mešanica, imenovana RC, je sestavljena iz 1 dela apnenega testa, 1 dela kalcitne moke in 0,5 dela vode.

V tem sklopu smo torej analizirali lastnosti 17-ih zasnovanih injekcijskih mešanic in primerjalno mešanico RC v svežem stanju. Vse mešanice so bile pripravljene po postopku, opisanem v poglavju 3.3.1. S pomočjo standardnih ali modificiranih standardnih metod smo preverjali naslednje lastnosti mešanic: prostorninsko maso, mini razlez s posedom, izločanje vode in vodozadržnost. Nestandardizirane metode smo uporabili za preverjanje homogenosti, volumnske stabilnosti, injektibilnosti in pretočnosti z injekcijsko brizgo, opravili pa smo še preizkus tečenja na apnenih ploščah. Tukaj bi še enkrat poudarili, da smo uporabljeno metodo za preverjanje stabilnosti injekcijskih mešanci v svežem stanju oziroma njihove odpornosti proti razmešanju sestavin razvili v okviru disertacije (glej poglavje 3.4.1.).

4.2.1 Potreba po vodi

Zasnova injekcijskih mešanic je tudi v tem sklopu temeljila na čim nižjem deležu dodane vode, ki pa je moral biti dovolj velik za doseg ustreznosti pretočnosti mešanice. Za preverjanje ustreznosti količine vode v mešanicah smo uporabili isto metodo kot v prvem sklopu, to je metodo z injekcijsko brizgo. Potreba po vodi (v/m) je podana glede na masni delež vseh suhih sestavin (vezivo in polnilo) injekcijskih mešanic in prikazana na sliki 4.6 za mešanice brez in s PCE/PPh superplastifikatorjem.



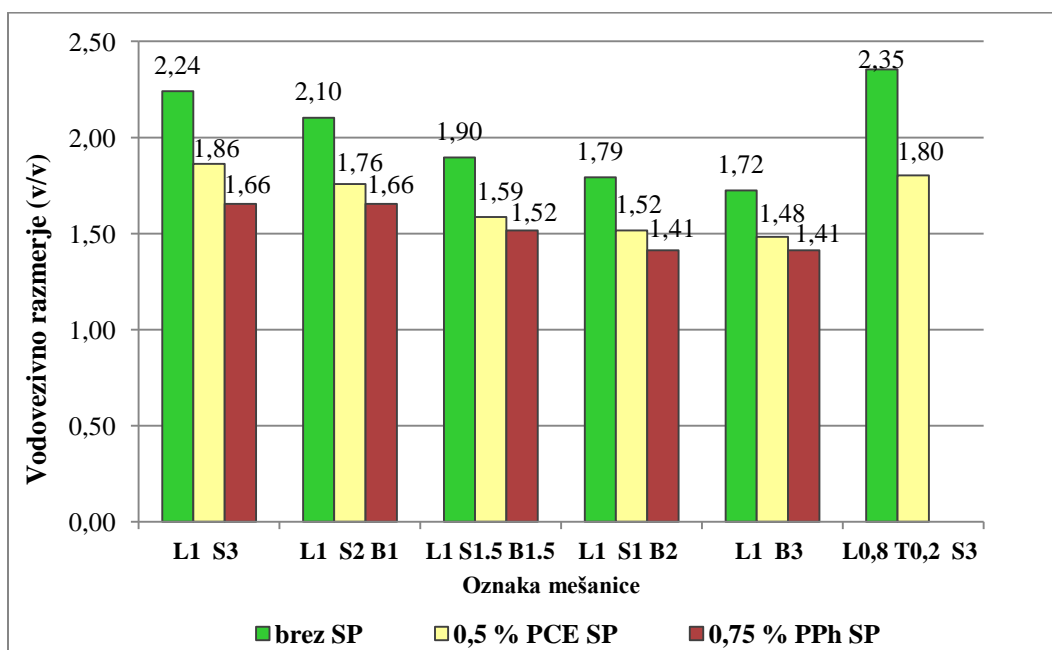
Slika 4.6: Potreba po vodi (v/m) injekcijskih mešanic za doseganje ustreznosti. **Figure 4.6:** Water demand (v/m) of injection grouts in order to achieve adequate fluidity.

Kriteriju $v/m \leq 0,60$ zadoščajo vse mešanice z višjim deležem kalcitne moke, L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₃ PPh, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₂B₁ PPh, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PCE, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh, L_{0,8} T_{0,2} S₃ in L_{0,8} T_{0,2} S₃ PCE. Mešanice z višjim deležem ultralahkega polnila, L₁ S_{1,5}B_{1,5}, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L₁ S₁B₂ PPh, L₁ B₃, L₁ B₃ PCE in L₁ B₃ PPh, presegajo kriterij $v/m \leq 0,60$.

Najnižjo potrebo po vodi ($v/m = 0,16$) ima mešanica RC, sestavljena iz 1 dela apnenega testa in 1 dela kalcitne moke. Razlog za to je apneno testo, ki vsebuje v masnem deležu 47 % vode glede na maso suhega apnenega testa.

S slike 4.6 je razvidno, da imajo mešanice z višjim deležem ultralahkega polnila višjo potrebo po vodi, kar velja za mase brez in s superplastifikatorjem. Najvišjo potrebo po vodi ($v/m = 1,48$) ima mešanica, sestavljena iz 1 dela hidratiziranega apna in 3 delov ultralahkega polnila, L₁ B₃.

V primeru mešanic z dodanim ultralahkim polnilom je bolj reprezentativno razmerje med deležem dodane vode in vezivom, saj se z zamenjavo kalcitne moke z ultralahkim polnilom niža masa polnila. Ker je potreba po vodi izražena kot razmerje med maso vode in maso vseh suhih sestavin mešanice, se že pri isti količini vode v mešanicah potreba po vodi veča za mešanice z ultralahkim polnilom. Vodovezivna razmerja (v/v) mešanic so prikazana na sliki 4.7.



Slika 4.7: Vodovezivno razmerje (v/v) injekcijskih mešanic.
Figure 4.7: Water-binder ratio (v/v) of injection grouts.

Iz podatkov o vodovezivnem razmerju (v/v) mešanic na sliki 4.7 je razvidno, da mešanice z večjim deležem ultralahkega polnila potrebujejo manj zamesne vode od mešanic z večjim deležem kalcitne moke, kar je ravno obratno kot pri v/m razmerju, zaradi zgoraj pojasnjene vpliva ultralahkega polnila na spremembo mase polnila. Gostota ultralahkega polnila je v primerjavi z delci kalcitne moke 22-krat nižja, kar seveda bistveno vpliva na maso polnila, ko se delež ultralahkih delcev v polnilu veča. Z dodajanjem ultralahkega polnila, ki ne vpija vode, se torej zmanjšuje vodovezivno razmerje mešanicam z enako sposobnostjo tečenja, kot jih ima referenčna mešanica L₁ S₃ PCE.

Najmanjšo vodovezivno razmerje (v/v = 1,72-1,41) so imele mešanice s 3 deli ultralahkega polnila, L₁ B₃, L₁ B₃ PCE in L₁ B₃ PPh.

Oba superplastifikatorja bistveno zmanjšata potrebo po vodi obravnavanih mešanic, vendar je PPh SP pri tem nekoliko učinkovitejši, saj so deleži dodane vode manjši kot pri PCE superplastifikatorju.

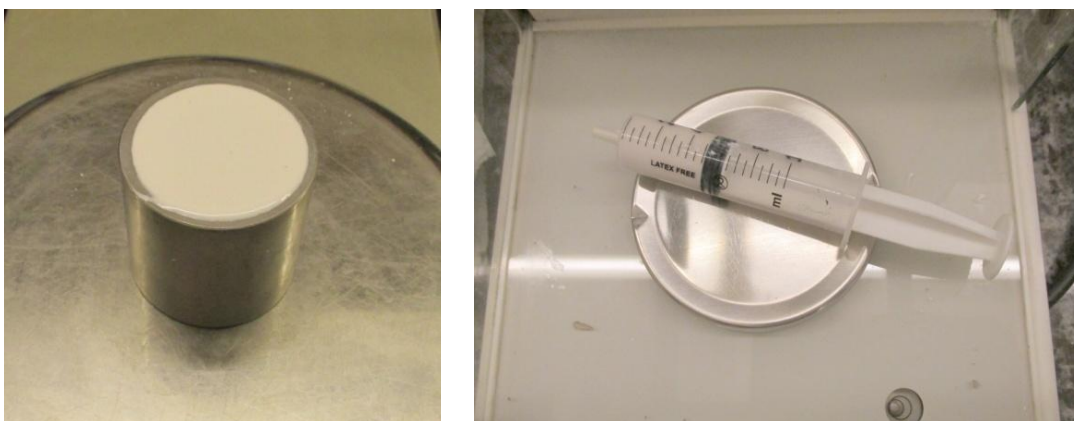
Zdaleč največje vodovezivno razmerje imata mešanica L₁ S₃ (v/v = 2,24) in mešanica z deležem tufa L_{0,8} T_{0,2} S₃ (v/v = 2,35). Pri mešanicah s pucolanskim dodatkom, tufom (L_{0,8} T_{0,2} S₃ in L_{0,8} T_{0,2} S₃ PCE_{0,5}), je upoštevana njegova vodovpojnost, zato je voda povečana za količino, ki jo vpije suh tuf.

4.2.2 Prostorninska masa svežih injekcijskih mešanic

Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice je pomembna lastnost, saj se pri zapolnjevanju zračnih žepov ne sme vnašati dodatne teže, ker lahko težka injekcijska mešanica povzroči nove poškodbe na odstopljenih plasteh ometov stenske slike.

Ker gre za injekcijske mešanice, namenjene nekonstrukcijskemu injektiranju, smo prostorninsko maso svežih mešanic določali po prilagojenem standardu SIST EN 1015-6:1998. Pri tem smo uporabili kovinsko cilindrično posodo prostornine 100 ml (slika 4.8, levo).

Vzporedno s standardiziranim testom smo izvajali tudi »in-situ« metoda z 10 ml injekcijsko brizgo (Bičer-Šimšir in Rainer, 2013) (slika 4.8, desno).



Slika 4.8: Cilindrična posoda, napolnjena z injekcijsko mešanico (levo). Injekcijska brizga, napolnjena z injekcijsko mešanico (desno).

Figure 4.8: Cylindrical cup filled with injection grout (left). Syringe filled with grout (right).

Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice ρ_{sv} (g/cm^3) je določena po enačbi (4.1):

$$\rho_{sv} = \frac{(m_2 - m_1)}{V_c} \quad (4.1)$$

kjer je m_1 masa prazne posode (g), m_2 masa posode skupaj z mešanico (g) in V_c prostornina posode (ml).

Rezultati meritev so prikazani v preglednici 4.5 za obe metodi določanja prostorninske mase svežih mešanic.

Sveže pripravljene mešanice brez ultralahkega polnila, L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₃ PPh, L_{0,8}T_{0,2} S₃, L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE in RC dosežejo prostorninsko maso med 1,74 in 1,82 g/cm^3 .

Mešanicam z ultralahkim polnilom, L₁ B₃, L₁ B₃ PCE in L₁ B₃ PPh, se zmanjša prostorninska masa za 50 % ($\rho_{sv} = 0,83\text{--}0,86 \text{ g}/\text{cm}^3$), v primerjavi z mešanicami s kalcitno moko.

Z nadomeščanjem kalcitne moke z ultralahkim polnilom se prostorninska masa mešanicam zmanjša na 1,14–1,48 g/cm^3

Preglednica 4.5: Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice.**Table 4.5:** Bulk density of freshly prepared injection grouts.

Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice						
Oznaka mešanice /formulacija mase	Cilindrična posoda (g/cm ³)	stdev (g/cm ³)	Relativna napaka (%)	Injekcijska brizga (g/cm ³)	stdev (g/cm ³)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	1,74	0,02	1	1,72	0,09	6
L ₁ S ₃ PCE	1,78	0,03	2	1,73	0,05	3
L ₁ S ₃ PPh	1,82	0,02	2	1,80	0,03	2
L ₁ S ₂ B ₁	1,48	0,01	1	1,46	0,02	1
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	1,54	0,01	1	1,51	0,04	2
L ₁ S ₂ B ₁ PPh	1,54	0,02	2	1,54	0,02	1
L ₁ S _{1,5} B _{1,5}	1,36	0,02	2	1,33	0,03	2
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE	1,35	0,01	1	1,31	0,03	2
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh	1,33	0,01	1	1,32	0,06	5
L ₁ S ₁ B ₂	1,14	0,02	2	1,12	0,02	2
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	1,19	0,05	5	1,14	0,06	5
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	1,19	0,06	5	1,15	0,05	5
L ₁ B ₃	0,86	0,01	2	0,84	0,02	3
L ₁ B ₃ PCE	0,84	0,01	2	0,82	0,02	2
L ₁ B ₃ PPh	0,83	0,01	2	0,80	0,01	1
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	1,74	0,01	1	1,72	0,09	5
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	1,81	0,01	1	1,76	0,05	3
RC	1,75	0,08	5	1,84	0,1	8

Po pričakovanju dosegajo najvišjo prostorninsko maso mešanice brez ultralahkega polnila (L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₃ PPh, L_{0,8}T_{0,2} S₃, L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE in RC). Najmanjšo prostorninsko maso dosegajo mešanice iz hidratiziranega apna in ultralahkega polnila brez ali s PCE/PPh superplastifikatorjem.

Primerjava dobljenih rezultatov med standardno preiskavo in nestandardizirano »in-situ« metodo ni pokazala bistvenih razlik. Predlagana in-situ metoda je torej primerna za preverjanje prostorninske mase injekcijskih mešanic na terenu, pa tudi v laboratoriju.

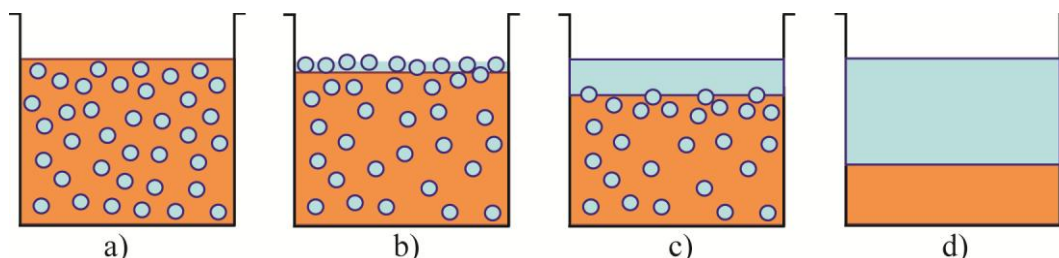
4.2.3 Preverjanje homogenosti/stabilnosti injekcijskih mešanic

Injekcijske mase morajo biti pretočne, injektibilne, pri tem pa se ne smejo razmešati. To pomeni, da morajo zadržati homogenost med mešanjem, med postopkom injiciranja ter vse do konca sušenja/strjevanja mase. Če pride kadarkoli v tem procesu do segregacije delcev mešanice in prevelikega izločanja vode, konsolidacija zračnih žepov ne bo uspešna.

Miltiadou-Fezans in Tassios (2013) kot prevladujoč vpliv na stabilnost mešanic navajata vodovezivno razmerje, specifično površino zrn in delež ultrafinega materiala.

V suspenziji injekcijske mase so delci trdnih snovi dispergirani v vodi v obliki majhnih delcev in njihova prostorska razporeditev je določena z delovanjem sil težnosti in trenja, pa tudi odbojnih sil med posameznimi delci. Ločimo lahko štiri različna stanja (Miltiadou-Fezans in Tassios, 2013):

- Stabilna injekcijska masa, ki ohranja homogenost do strditve (slika 4.9, a).
- Počasno posedanje delcev ali izločanje vode na površini (slika 4.9, b). V takšnem primeru so sile med posameznimi delci dovolj močne, da držijo strukturo delcev na mestu, brez večjih sprememb. Injekcijsko mešanico se lahko obravnava kot stabilno in uporabi za injiciranje, saj je izločanje vode manjše od določene mejne vrednosti.
- Povečano izločanje vode nad mejno vrednostjo, kar je posledica izrazite heterogenosti mase (slika 4.9, c).
- Ločevanje posameznih delcev v injekcijski masi, kjer se posamezni trdni delci glede na svojo težo in velikost razvrstijo v različne plasti (bliže dnu so delci z večjo gostoto), kar se imenuje segregacija (slika 4.9, d). V primeru segregacije sile med posameznimi delci niso dovolj velike, da bi zadržale začetno porazdelitev delcev v mešanici na svojem mestu. Takšna masa je neuporabna.



Slika 4.9: Shematski prikaz razporeditve delcev v suspenziji: a) stabilna suspenzija; b) počasno posedanje delcev ali izločanje vode na površini; c) povečano izločanje vode; d) ločevanje posameznih delcev v suspenziji – segregacija.

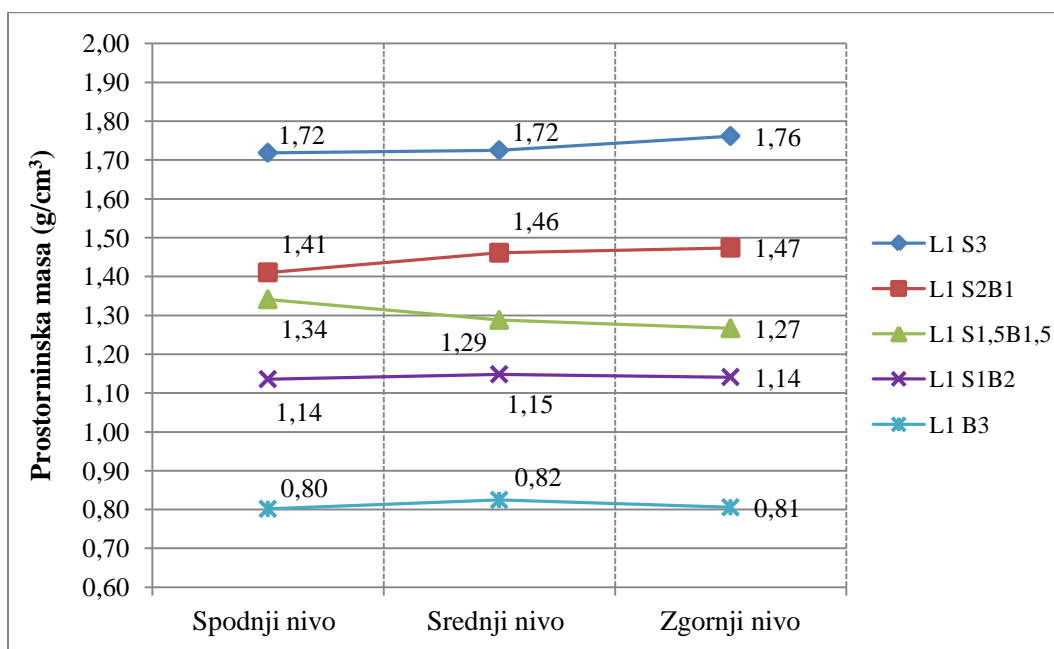
Figure 4.9: Schematic presentation of suspension equilibrium: a) perfectly stable; b) slight bleeding; c) excessive bleeding; d) segregation.

Pri zasnovi novih injekcijskih mešanic je potrebno zagotoviti, da je injekcijska mešanica stabilna. Segregacija ali povečano izločanje vode lahko vplivata na injektibilnost, nesposobnost zapolnjevanja zračnih žepov, strukturno homogenost injekcijske mase, trdnost in nižjo obstojnost.

Avtorja Miltiadou-Fezans in Tassios (2013) navajata primer preverjanja segregacije delcev v injekcijski mešanici. Po mešanju mešanico nalijemo v prosojno (na primer stekleno) cilindrično posodo s premerom 10 cm in višino 15 cm. Po 15-ih minutah opazujemo dno valja, kjer je možno zaznati jasno sedimentacijo težjih delcev. Izmerimo debelino usedle plasti in če presega vrednost 1 mm, takšno mešanico obravnavamo kot nestabilno.

Mi smo za kontrolo homogenosti ali stabilnosti injekcijske mešanice uporabili drugačno metodo, metodo s cilindrično posodo, opisano v poglavju 3.4.1, ki smo jo prilagodili v okviru disertacije. Prostorninsko maso mešanice iz posameznih nivojev smo določali s pomočjo injekcijske brizge, po enačbi (4.1).

Rezultati stabilnosti injekcijskih mešanic $L_1 S_3$, $L_1 S_2B_1$, $L_1 S_{1,5}B_{1,5}$, $L_1 S_1B_2$ in $L_1 B_3$ brez superplastifikatorja so podani na sliki 4.10.



Slika 4.10: Stabilnost injekcijskih mešanic brez superplastifikatorja.

Figure 4.10: Stability of injection grouts without superplasticizer.

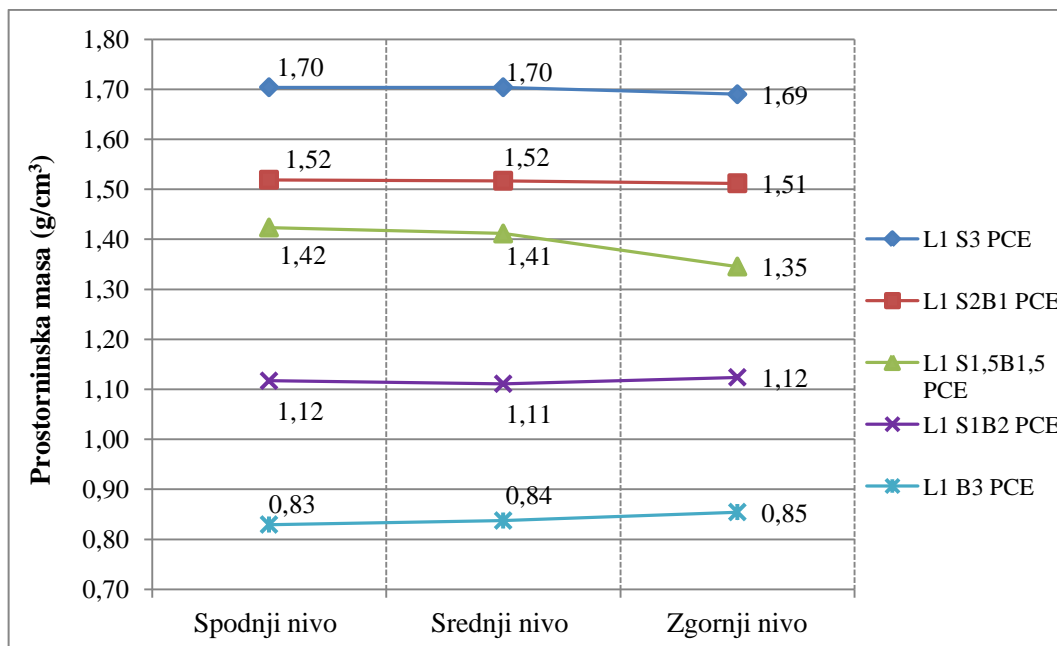
Mešanici s prevladujočim deležem ultralahkega polnila, $L_1 S_1B_2$ in $L_1 B_3$, imata minimalne razlike v prostorninski masi z različnih nivojev cilindra, ki se gibljejo od 0,01 do 0,02 g/cm³, in se ju lahko označi kot stabilne.

Mešanice $L_1 S_3$, $L_1 S_2B_1$ in $L_1 S_{1,5}B_{1,5}$ s prevladujočim deležem kalcitne moke so manj stabilne, saj so razlike med prostorninsko maso posameznih nivojev od 0,05 do 0,07 g/cm³.

V primeru mešanice $L_1 S_{1,5}B_{1,5}$ je razvidna segregacija težjih in lažjih delcev; večja prostorninska masa 1,34 g/cm³ v spodnjem nivoju valja, ki se proti vrhu zmanjšuje (1,27 g/cm³), kar je lahko posledica ločevanja ultralahkega polnila.

Mešanici $L_1 S_3$ in $L_1 S_2B_1$ imata v spodnjem nivoju manjšo prostorninsko maso od zgornjega nivoja, verjetno gre za vpliv povečanega izločanja vode.

Rezultati stabilnosti mešanic s PCE superplastifikatorjem so podani na sliki 4.11 ($L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_{1,5}B_{1,5}$ PCE, $L_1 S_1B_2$ PCE in $L_1 B_3$ PCE).



Slika 4.11: Stabilnost injekcijskih mešanic s PCE superplastifikatorjem.

Figure 4.11: Stability of injection grouts with PCE superplasticizer.

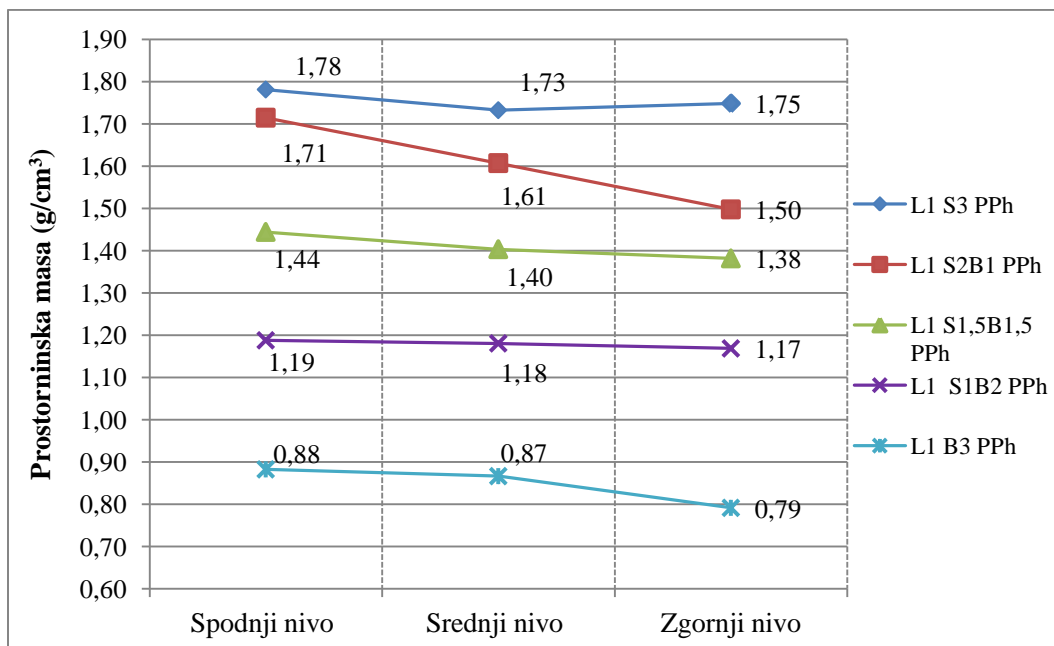
Stabilnost mešanic $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_{2B_1}$ PCE se z uporabo PCE superplastifikatorja izboljša, kot je to razvidno na sliki 4.11.

Mešanicam $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_{2B_1}$ PCE, $L_1 S_{1B_2}$ PCE in $L_1 B_3$ PCE se prostorninska masa med spodnjim in zgornjim nivojem minimalno spremeni, od 0,01 do 0,02 g/cm^3 , kar lahko pripišemo izločanju vode. Stabilnost mešanice $L_1 S_{1,5B_{1,5}}$ PCE pa se je poslabšala, saj prostorninska masa proti vrhu cilindra upada, kar lahko pripišemo segregaciji ultralahkega polnila.

Rezultati stabilnosti injekcijskih mešanic s PPh superplastifikatorjem so podani na sliki 4.12.

Preverjanje stabilnosti injekcijskih mešanic s PPh superplastifikatorjem je pokazalo, da mešanice $L_1 S_3$ PPh, $L_1 S_{2B_1}$ PPh, $L_1 S_{1,5B_{1,5}}$ PPh, in $L_1 B_3$ PPh niso stabilne. V vseh primerih pride do segregacije posameznih delcev glede na njihovo težo, kar se odraža v višji prostorninski masi v spodnjem nivoju in njenim upadanjem v zgornjem nivoju. Nestabilnost mešanic se lahko pripiše neustrezni koncentraciji dodanega PPh superplastifikatorja ali pa prevelikemu vplivu superplastifikatorja na viskoznost, ki jo bistveno zmanjša.

Kot stabilno lahko označimo le injekcijsko maso $L_1 S_{1B_2}$ PPh, saj v prostorninski masi med posameznimi nivoji pri tej mešanici ni večjih razlik.



Slika 4.12: Stabilnost injekcijskih mešanic s PPh superplastifikatorjem.

Figure 4.12: Stability of injection grouts with PPh superplasticizer.

Pridobljeni rezultati z nestandardizirano metodo preverjanja stabilnosti oziroma homogenosti mešanic, s pomočjo njihove prostorninske mase v različnih nivojih cilindra kažejo, da mešanice L₁ S₃, L₁ S₂B₁, L₁ S_{1,5}B_{1,5}, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PCE, L₁ S₃ PPh, L₁ S₂B₁ PPh, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh in L₁ B₃ PPh niso stabilne.

Nestabilnost mešanic L₁ S₃ PPh, L₁ S₂B₁ PPh, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh in L₁ B₃ PPh se lahko pripiše preveliki koncentraciji dodanega PPh superplastifikatorja ali njegovemu neustreznemu učinku za izbran način uporabe – za pripravo injekcijskih mešanic.

Ostale mešanice, L₁ S₁B₂, L₁ B₃ L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE, L₁ B₃ PCE in L₁ S₁B₂ PPh, pri katerih so minimalne razlike od 0,01 do 0,02 g/cm³ v prostorninski masi med posameznimi nivoji, lahko obravnavamo kot stabilne. Vidimo, da je z vidika homogenosti mešanic PCE superplastifikator bistveno boljša izbira kot PPh superplastifikator.

4.2.4 Izločanje vode

Izločanje vode kaže na ločevanje vode od ostalih delcev v mešanici in lahko vodi do segregacije delcev veziva in polnila, kar vpliva na lastnosti injekcijske mešanice. V praksi pomeni, da zgornji del injiciranega prostora v zračnem žepu ne bo ustrezno konsolidiran (Uranjek, 2008).

Meritve izločanja vode so potekale po prilagojenem standardu ASTM C 940. Volumen testirane injekcijske mešanice smo z 800 ± 10 ml zmanjšali na 80 ± 1 ml. Izločanje vode je določeno po enačbi (4.2):

$$Izločanje\ vode\ (\%) = \frac{V_1}{V} 100 \quad (4.2)$$

kjer je V prostornina mešanice pred pričetkom merjenja (ml) in V_1 prostornina vode nad mešanico po preteku 3 ur (ml).

Rezultati izločanja vode po 3 urah so podani v preglednici 4.6 za injekcijske mešanice brez in s PCE/PPh superplastifikatorjem.

Preglednica 4.6: Izločanje vode v % po 3 urah.

Table 4.6: Bleeding in % after 3 hours.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Izločanje vode (%)	stdev (%)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	4,6	0,4	8
L ₁ S ₃ PCE	1,5	0,3	19
L ₁ S ₃ PPh	1,5	0,9	61
L ₁ S ₂ B ₁	2,1	0,4	19
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	1,7	0,3	17
L ₁ S ₂ B ₁ PPh	1,4	0,7	52
L ₁ S _{1,5} B _{1,5}	0,8	0,1	11
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE	1,7	0,3	18
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh	1,2	0,0	0,1
L ₁ S ₁ B ₂	1,0	0,2	23
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	0,6	0,2	41
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	0,7	0,1	16
L ₁ B ₃	0,1	0,2	17
L ₁ B ₃ PCE	0,1	0,0	3
L ₁ B ₃ PPh	0,1	0,0	0
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	5,7	1,3	22
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	2,3	0,3	15
RC	0,8	0,0	2

Biçer-Şimşir in Rainer (2013) predlagata mejo za izločanje vode enako 0,4 %. Standard EN 447 (1996) pa omejuje izločanje vode na 2,0 % začetne prostornine mešanice po preteku 3 ur. Pri naših preiskavah smo izbrali zadnji kriterij za izločanje vode, torej izločanje vode $\leq 2,0$ % po preteku 3 ur (EN 447:1996).

Mešanice brez superplastifikatorja so dosegle izločanje vode od 0,8 do 5,7 %. Mejno vrednost 2 % so presegle mešanice L₁S₃, L₁S₂B₁ in L_{0,8}T_{0,2}S₃, medtem ko mešanici L₁S_{1,5}B_{1,5} in L₁S₁B₂ mejne vrednosti nista preseгли (0,8 in 1,0 %).

Izjema je mešanice $L_1 B_3$, ki po preteku 3 ur ni imela izločene vode na površini mase, verjetno zaradi segregacije ultralahkega polnila.

Z uporabo PCE ali PPh superplastifikatorja se izločanje vode zmanjša pod 2 % v vseh primerih, razen pri mešanici $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE, kjer je 2,3 %.

Izločanje vode pri mešanicah z večjim deležem kalcitne moke in PCE superplastifikatorjem (L_1S_3 PCE, $L_1S_2B_1$ PCE in $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PCE) se giblje od 1,5 do 1,7 %. Mešanici z večjim deležem ultralahkega polnila in PCE superplastifikatorjem, $L_1S_1B_2$ PCE in $L_1 B_3$ PCE, sta dosegli nižje izločanje vode, s pripadajočima vrednostima 0,1 in 0,6 %.

Z dodajanjem PPh superplastifikatorja se mešanicam L_1S_3 PPh, $L_1S_2B_1$ PPh, $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PPh, $L_1S_1B_2$ PPh in L_1B_3 PPh vrednosti izločanja vode zmanjšajo na 0,1 do 1,4 %. Vrednosti pod 1 %, ki so jih dosegle mešanice z večjim deležem ultralahkega polnila, $L_1S_1B_2$ PPh in L_1B_3 PPh, so lahko tudi nerealne in posledica segregacije ultralahkega polnila na površini. To smo potrdili z vizualnim pregledom vzorcev, na katerih se je jasno videlo območje ultralahkega polnila na površini vzorca.

Po opravljenih preiskavah izločanja vode lahko zaključimo, da so stabilne naslednje mešanice: L_1S_3 PCE, L_1S_3 PPh, $L_1S_2B_1$ PCE, $L_1S_2B_1$ PPh, $L_1 S_{1,5}B_{1,5}$ PCE, $L_1S_1B_2$, $L_1S_1B_2$ PCE, $L_1 B_3$, $L_1 B_3$ PCE in $L_1 B_3$ PPh. Nestabilne mešanice so: $L_1 S_{1,5}B_{1,5}$, $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PPh in $L_1S_1B_2$ PPh.

4.2.5 Mini razlez s posedom svežih injekcijskih mešanic

Za določanje konsistence svežih injekcijskih mešanic smo uporabili metodo mini razleza s posedom (v nadaljevanju razlez), po prilagojenem standardu SIST EN 1015-3:2001. Tudi s to metodo lahko ocenimo, ali delci v masi segregirajo. Dobljeni rezultati so podani v preglednici 4.7.

Razlez mešanic brez superplastifikatorja, L_1S_3 , $L_1S_2B_1$, $L_1S_{1,5}B_{1,5}$, $L_1S_1B_2$, L_1B_3 , $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ in RC, je med 117 do 217 mm. Višji razlez dosegajo mešanice s PCE/PPh superplastifikatorjem, med 236 in 217 mm. PPh superplastifikator je učinkovitejši, glede na manjše vodovezivno (v/v) razmerje.

Mešanicam z večjim deležem ultralahkega polnila, $L_1S_1B_2$, $L_1S_1B_2$ PCE, $L_1S_1B_2$, PPh, L_1B_3 , L_1B_3 PCE in L_1B_3 PPh, vrednost razleza upada, kar je posledica manjšega vodovezivnega razmerja in vpliva ultralahkega polnila na lastno težo mešanice. Pri preiskavi mini razleza s posedom se injekcijska mešanice razleze izključno zaradi delovanja lastne teže. Manjša lastna teža mešanice pomeni torej manjši razlez.

Obnašanje mešanic $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PCE, $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PPh in L_1B_3 PPh med samimi izvajanji meritev razleza kaže na nestabilnost: težji delci se posedajo, lažji delci pa splavajo na površino.

Nestabilno obnašanje mešanic $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PCE, $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PPh in L_1B_3 PPh lahko potrdimo tudi z višjimi vrednostmi koeficienta variacije (5–7 %), medtem ko se koeficient variacije za ostale mešanice giblje med 1 in 4 %.

Preglednica 4.7: Meritve razleza injekcijskih mešanic.

Table 4.7: Results of mini slump for injection grouts.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Razlez (mm)	stdev (mm)	Relativna napaka(%)
$L_1 S_3$	203	4	2
$L_1 S_3$ PCE	263	5	2
$L_1 S_3$ PPh	253	1	1
$L_1 S_2B_1$	216	2	1
$L_1 S_2B_1$ PCE	279	6	2
$L_1 S_2B_1$ PPh	297	3	1
$L_1 S_{1,5}B_{1,5}$	204	5	2
$L_1 S_{1,5}B_{1,5}$ PCE	238	16	7
$L_1 S_{1,5}B_{1,5}$ PPh	284	18	6
$L_1 S_1B_2$	210	5	2
$L_1 S_1B_2$ PCE	236	10	4
$L_1 S_1B_2$ PPh	261	8	3
$L_1 B_3$	217	5	2
$L_1 B_3$ PCE	217	8	4
$L_1 B_3$ PPh	215	12	5
$L_{0,8}T_{0,2} S_3$	178	1	1
$L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE	290	4	1
RC	200	0	0

4.2.6 Sposobnost zadrževanja vode injekcijskih mešanic

Injekcijske mešanice so med samim postopkom injiciranja in po njem v zračnih žepih podvržene večji ali manjši izgubi vode, zaradi kapilarnega srka okoliških poroznih materialov. V praksi na stopnjo izgube vode sveže injekcijske mase ne vpliva samo njena sposobnost zadrževanja vode (vodozadržnost), ampak tudi sposobnost vpijanja vode okoliških materialov zaradi kapilarnega srka.

Sposobnost zadrževanja vode injekcijskih mešanic je pomembna, saj lahko izguba vode vpliva na poslabšanje injektabilnosti, tečenja in poslabšanje mehanskih lastnosti. Posledično vpliva na nezadostno adhezijo med injekcijsko maso in ometom (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013).

Injekcijske mase z visoko sposobnostjo zadrževanja vode so še posebej uporabne v primerih, kjer imajo okoliški materiali visoko sposobnost vpijanja vode.

Meritve sposobnosti zadrževanja vode smo izvedli po standardu PSIST prEN 1015-8:2001, metoda je opisana v poglavju 3.4.1.

Preglednica 4.8: Sposobnost zadrževanja vode injekcijskih mešanic.

Table 4.8: Water retentivity of injection grouts.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Sposobnost zadrževanja vode (%)	Stdev (%)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	78	3	4
L ₁ S ₃ PCE	83	1	1
L ₁ S ₃ PPh	88	0	0,1
L ₁ S ₂ B ₁	78	1	0,2
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	80	2	3
L ₁ S ₂ B ₁ PPh	80	9	11
L ₁ S _{1,5} B _{1,5}	79	1	2
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE	81	3	4
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh	88	1	0,1
L ₁ S ₁ B ₂	77	1	1
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	81	1	0,3
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	85	2	2
L ₁ B ₃	75	1	0,1
L ₁ B ₃ PCE	82	2	2
L ₁ B ₃ PPh	81	1	1
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	73	1	0,2
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	82	1	0,4
RC	83	3	4

Rezultati sposobnosti zadrževanja vode so podani v preglednici 4.8.

Najnižjo sposobnost zadrževanja vode so dosegle mešanice brez superplastifikatorja, med 73 in 79%.

Sposobnost zadrževanja vode mešanic z dodanim PCE superplastifikatorjem se poveča za 2 do 8 % (80–83%) in v primeru PPh superplastifikatorja za 1 do 10 % (80–88 %).

Najvišjo sposobnost zadrževanja vode dosegata mešanici L₁ S₃ PPh (88 %) in L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh (88 %), najnižjo pa L_{0,8}T_{0,2} S₃ (73 %) in L₁ B₃ (75 %).

Že manjše spremembe v sestavi injekcijskih mešanic vplivajo na sposobnost zadrževanja vode, kar ugotavljajo avtorji Ince in sod. (2011) in navajajo, da imajo na vodozadržnost injekcijskih mešanic pomemben vpliv razmerje vezivo : polnilo, granulacija polnila in delež zamesne vode. S

proučevanjem različnih vplivov na sposobnost zadrževanja vode apnenih malt so ugotovili, da čim bolj fino je polnilo, tem večja je sposobnost zadrževanja vode apnenih malt (Ince in sod., 2011).

Iz rezultatov v preglednici 4.8 je opazen vpliv sestave polnila na sposobnost zadrževanja vode. Kalcitna moka pozitivno vpliva na vodozadržnost in jo povečuje, medtem ko ultralahko polnilo, ki nima sposobnosti adsorbiranja vode, zmanjšuje mešanici njeno sposobnost zadrževanja vode.

Mešanice z večjim deležem kalcitne moke, L₁S₃, L₁S₃ PCE, L₁S₃ PPh, L₁S₂B₁, L₁S₂B₁ PCE, L₁S₂B₁ PPh, L₁S_{1,5}B_{1,5}, L₁S_{1,5}B_{1,5} PCE in L₁S_{1,5}B_{1,5} PPh, kažejo tendenco po večjem zadrževanju vode od mešanic s prevladujočim deležem ultralahkega polnila.

Najslabšo sposobnost zadrževanja vode so dosegle mešanice brez kalcitne moke, L₁B₃, L₁B₃ PCE in L₁B₃ PPh (od 75 do 81 %).

Eden od vzrokov za tako obnašanje injekcijskih mešanic z večjim deležem kalcitne moke je tako imenovani »efekt polnila«, ki so ga opisali avtorji Ince in sod. (2014). Polnilo z ustrežno zrnastostno sestavo optimalno zapolni prostor, zato je v injekcijski mešanici na voljo manj proste (fizikalno nevezane) vode, ki se pri preiskavi najlažje in najprej izloči iz mešanice.

Prav tako je opazno poslabšanje sposobnosti zadrževanja vode v primeru mešanice s tufom, L_{0,8}T_{0,2} S₃ (73 %), ki je pucolanski dodatek, produkt katerega so hidravlične komponente v strjenem vezivu. Isti avtorji Ince in sod. (2011) ugotovljajo, da hidravlične lastnosti vplivajo na poslabšanje vodozadržnosti apnenih ometov.

Na izboljšanje sposobnosti zadrževanja vode (približno 10 %) pri mešanicah z dodanim PCE in PPh superplastifikatorjem pa ne vpliva samo vrsta in granulacija polnila ampak tudi vpliv superplastifikatorjev na zmanjšanje zmesne vode. Zaradi manjše količine vode v mešanici, so te bolj kohezivne (imajo večjo viskoznost), kar seveda poveča njihovo sposobnost zadrževanja vode. Injekcijska mešanica L₁ S₃ PCE dosega najvišjo sposobnost zadrževanja vode (83 %), glede na ostale mešanice.

4.2.7 Sprememba prostornine injekcijskih mešanic

Dobra injekcijska mešanica mora zagotoviti prostorninsko stabilnost v času sušenja/strjevanja. Sprememba prostornine mora biti čim manjša, da se zagotovi ustrezna adhezija s podlogo in prepreči oblikovanje razpok. Na krčenje injekcijske mase vplivajo različni dejavniki: sestava in razmerje vezivo : polnilo, količina dodane vode, adsorpcija vode na vezivo in polnilo, reakcija med vodo in apnom, temperatura in vlažnost okoliškega prostora med sušenjem/strjevanjem (Bass, 1998).

Prostorninsko stabilnost injekcijskih mešanic smo testirali z nestandardizirano metodo, opisano v poglavju 3.4.1. Prav tako smo ponovili testiranje injekcijskih mešanic L₁ S₃, L₁ S₃ PCE in L₁ S₃ PPh.

V okviru preliminarnih raziskav smo dosegli najmanjšo spremembo prostornine enako $\Delta V = 5\%$. To vrednost izberemo kot mejno vrednost v tem sklopu preiskav.

Rezultati spremembe prostornine injekcijskih mešanic so podani v preglednici 4.9 in prilogi C.

Preglednica 4.9: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic.

Table 4.9: Change in volume of injection grouts.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Sprememba prostornine (%)	Stdev (%)	Relativna napaka (%)	Razpoke
L ₁ S ₃	13	3	33	Vidnih nekaj razpok
L ₁ S ₃ PCE	5	1	9	Ni vidnih razpok
L ₁ S ₃ PPh	5	0,4	8	Vidne razpoke
L ₁ S ₂ B ₁	11	3	23	Vidne razpoke
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	5	1	20	Ni vidnih razpok
L ₁ S ₂ B ₁ PPh	7	2	22	Vidne razpoke
L ₁ S _{1,5} B _{1,5}	10	2	23	Vidne razpoke
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE	4	1	38	Vidnih nekaj razpok
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh	4	1	17	Vidnih nekaj razpok
L ₁ S ₁ B ₂	9	0,4	4	Vidne razpoke
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	5	1	24	Ni vidnih razpok
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	5	1	27	Vidne razpoke
L ₁ B ₃	10	1	13	Vidne razpoke
L ₁ B ₃ PCE	6	1	17	Vidnih nekaj razpok
L ₁ B ₃ PPh	5	0,2	5	Vidne razpoke
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	10	0,4	4	Vidne razpoke
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	6	1	18	Vidnih nekaj razpok
RC	13	2	19	Vidne razpoke

Mejne vrednosti spremembe prostornine (5 %) niso presegle naslednje mešanice: L₁ S₃ PCE, L₁ S₃ PPh, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PCE, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh, L₁ S₁B₂ PCE L₁ S₁B₂ PPh in L₁ B₃ PPh.

Mešanice L₁ S₃, L₁ S₂B₁, L₁ S_{1,5}B_{1,5}, L₁ S₁B₂, L₁ B₃, L_{0,8}T_{0,2} S₃ in RC, to je vse mešanice brez superplastifikatorja, presegajo mejno vrednost 5%. Njihove vrednosti se gibljejo med 9 in 13 %, kar je za 1,6- do 3-krat več kot za mešanice s PCE in PPh superplastifikatorjem.

Povečanje spremembe prostornine pri mešanicah brez dodanega superplastifikatorja vpliva tudi na nastajanje vidnih razpok.

Visoko vrednost spremembe prostornine 13 % ima mešanica RC iz apnenega testa in kalcitne moke, ki jo uporabljajo slovenski restavratorji pri zapolnjevanju zračnih žepov stenske poslikave.

Injekcijske mešanice $L_1S_2B_1$ PCE, $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE imajo nižje prostorninsko krčenje (4–6 %) kot mešanice $L_1S_2B_1$ PPh, $L_1S_{1,5}B_{1,5}$ PPh in $L_1 S_1B_2$ PPh (4–7 %).

Učinek zmanjševanja vodovezivnega razmerja s PCE/PPh superplastifikatorjem vpliva na zmanjšanje krčenja injekcijske mešanice in oblikovanje vidnih razpok (glej prilogo C).

Razpoke, ki nastanejo ob sušenju, so vidne na vseh mešanicah, razen na $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE. Razlog za takšno obnašanje mešanic je v vodovezivnem razmerju in delovanju superplastifikatorja. Višji kot je delež kalcitne moke, višje je vodovezivno razmerje in večja je sprememba prostornine mešanice ($L_1S_2B_1$, $L_1S_2B_1$ PCE in $L_1S_2B_1$ PPh). In obratno, večji kot je delež ultralahkega polnila, manjše je vodovezivno razmerje in posledično manjša prostorninska sprememba ($L_1 S_1B_2$ in $L_1 S_1B_2$ PCE).

Kot je bilo že ugotovljeno v prvem sklopu, PCE/PPh superplastifikatorja ne zmanjšata le potrebe po vodi, ampak zmanjšata tudi krčenje injekcijske mešanice, v primeru PCE superplastifikatorja pa se poviša tudi odpornost mase na nastajanje razpok.

4.2.8 Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic

Nestandardizirana metoda preverjanja spremembe prostornine injekcijskih mešanic z apnenimi skodelicami je opisana v poglavju 4.3.2.

Injekcijske mešanice smo injicirali najprej v suhe, potem pa v predhodno navlažene apnene skodelice. Rezultati preiskav so podani v preglednici 4.10 in prilogi D.

Največ razpok imajo mešanice $L_1 S_2B_1$, $L_1 S_{1,5}B_{1,5}$, $L_1 S_1B_2$, $L_1 B_3$, $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ in RC, to so mešanice brez superplastifikatorja, vgrajene v suhe ali predhodno navlažene skodelice.

V primeru suhih apnenih skodelic so razpoke, nastale na stiku z mešanicami in v samih masah, širine od 0,5 do 1,5 mm.

Predhodno vlaženje apnenih skodelic ni imelo posebnega učinka na zmanjšanje nastajanja razpok pri mešanicah brez superplastifikatorja, razen pri mešanici $L_1 B_3$, ki je brez razpok.

Najslabše odporna na spremembo prostornine je injekcijska mešanica RC, vgrajena v suhe in predhodno navlažene apnene skodelice.

Injekcijske mešanice s PCE in PPh superplastifikatorjem, vgrajene v suhe in predhodno navlažene apnene skodelice, imajo bistveno manjše krčenje in so bolj odporne na oblikovanje razpok, kot mešanice brez superplastifikatorja.

Opazna je razlika med mešanicami s PCE superplastifikatorjem, ki imajo manjše krčenje in so bolj odporne na oblikovanje razpok, kot mešanice s PPh superplastifikatorjem.

Mešanice $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_1 B_3$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, vgrajene v suhe apnene skodelice, imajo na stiku s skodelicami širino razpok od 0,2 do 1 mm. Manjše razpoke v sami masi, od 0,2 do 0,5 mm, so med sušenjem nastale pri mešanicah $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE. Mešanici $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE in $L_1 B_3$ PCE sta brez razpok v sami masi.

Ugoden vpliv na zmanjševanje krčenja in nastajanje razpok med sušenjem ima predhodno vlaženje apnenih skodelic pri mešanicah $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_1 B_3$ PCE. V primeru mešanic $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE se razpoke formirajo samo na stiku in imajo širino 0,1 mm, medtem ko je mešanica $L_1 B_3$ PCE brez vidnih razpok tako na stiku kot v sami masi.

Predhodno vlaženje apnenih skodelic pa nima vpliva na nastajanje razpok med sušenjem pri mešanici $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, širina razpok je od 0,2 do 0,5 mm.

Slabše odporne na oblikovanje razpok med sušenjem so mešanice s PPh superplastifikatorjem, vgrajene v suhe in v predhodno navlažene apnene skodelice. Razpoke, nastale na stiku s suhimi apnenimi skodelicami, so široke od 0,5 do 1 mm, v primeru navlaženih apnenih skodelic pa so široke od 0,1 do 1 mm.

Opazen je neugoden vpliv predhodnega vlaženja apnenih skodelic pri mešanicah $L_1 S_2 B_1$ PPh, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PPh in $L_1 S_1 B_2$ PPh, saj so nastale razpoke v sami masi širine od 0,1 do 0,5 mm.

Preglednica 4.10: Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic.

Table 4.10: Drying shrinkage of injection grouts with mortar cups.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Suha apnena skodelica		Navlažena apnena skodelica	
	Razpoke na stiku	Razpoke v masi	Razpoke na stiku	Razpoke v masi
$L_1 S_3$	1	2	1	2
$L_1 S_3$ PCE	0,5	-	0,5	-
$L_1 S_3$ PPh	1	-	0,5	0,1
$L_1 S_2 B_1$	0,5	1	0,5	1
$L_1 S_2 B_1$ PCE	0,2	0,5	0,2	0,5
$L_1 S_2 B_1$ PPh	0,5	-	0,2	0,2
$L_1 S_{1,5} B_{1,5}$	1,5	1,5	0,2	0,1
$L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE	1	-	0,1	-
$L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PPh	0,5	-	0,1	0,1

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 4.9

L ₁ S ₁ B ₂	1	-	0,1	-
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	1	0,5	0,1	-
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	1	-	0,3	-
L ₁ B ₃	1	0,5	-	-
L ₁ B ₃ PCE	0,5	-	-	-
L ₁ B ₃ PPh	0,5	-	1	0,5
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	1	1	0,5	0,5
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	0,5	0,2	0,5	0,5
RC	1,5	1,5	1,5	1,5

Preverjanje nastajanje razpok med sušenjem mešanic z nestandardizirano metodo apnenih skodelic je učinkovita metoda, saj na nek način simulira stanje v zračnih žepih odstopljenih poroznih plasti ometov.

Z uporabo apnenih skodelic se pri večini testiranih injekcijskih mešanicah pojavijo razpoke na stiku in v sami masi. Opazili smo več vrst razpok (preglednica 4.11 in priloga D), in sicer:

- Ravne, globoke razpoke v masi, ki potekajo v eno smer, širine do 1,5 mm. Pojavijo se pri mešanicah brez superplastifikatorja, ki so vgrajene v suhe in predhodno navlažene apnene skodelice.
 - Ravne, ozke razpoke v masi, potekajo v eno smer, širine od 0,1 do 0,5 mm. Pojavijo se pri mešanicah s superplastifikatorjem, ki so vgrajene v suhe in predhodno navlažene apnene skodelice.
 - Mrežaste razpoke, širine od 0,5 do 1,5 mm. Pojavijo se pri injekcijskih mešanicah brez superplastifikatorja.
 - Globoke razpoke na stiku, širine od 1 do 1,5 mm. Pretežno se pojavijo v primeru vgradnje mešanic v suhe skodelice.
 - Ozke razpoke na stiku, širine od 0,3 do 0,5 mm. Pojavijo se pri mešanicah, ki so bile vgrajene v suhe in v predhodno navlažene apnene skodelice.
 - Ozke plitke razpoke na stiku, širine od 0,1 do 0,2 mm. Pojavijo se pri mešanicah, ki so bile vgrajene v predhodno navlažene apnene skodelice.
- Injekcijske mešanice, kjer nismo opazili razpok, so bile mešanice s PCE in PPh superplastifikatorjem, vgrajene v predhodno navlažene apnene skodelice.

Pojav razpok in/ali separacije med ometom apnene skodelice in maso lahko kaže na preveliko vsebnost vode in/ali na slabo sposobnost zadrževanja mešanic. Zaradi prehitrega izločanja vode iz mešanice lahko pride do izgube adhezije med injekcijsko mešanico in ometom ter s tem do poslabšanja utrditve.

Rezultati so pokazali, da imajo mešanice brez superplastifikatorja nižjo odpornost na krčenje in nastajanje razpok, kot mešanice s superplastifikatorjem.

Predhodno vlaženje apnenih skodelic ima pozitivne učinke pri masah z večjim deležem ultralahkega polnila in PCE superplastifikatorjem ($L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE in $L_1 B_3$ PCE), saj zmanjša pojavljanje razpok med sušenjem.

Večja stabilnost mešanic z večjim deležem ultralahkega polnila je posledica manjše količine dodane vode, ki je bila potrebna za zagotavljanje ustrezne pretočnosti pod minimalnim pritiskom z injekcijo.

Mešanice z večjim deležem kalcitne moke ($L_1 S_3$ in $L_1 S_2 B_1$) in tufom ($L_{0,8} T_{0,2} S_3$) so se izkazale za manj stabilne in manj odporne na krčenje.

Preglednica 4.11: Razporeditev injekcijskih mešanic glede na vrste razpok, nastale med sušenjem v apnenih skodelicah.

Table 4.11: Arranging of the injection grouts according to the type of cracks generated during drying in mortar cups.

Vrsta razpoke	Širina razpoke	Suha apnena skodelica	Navlažena apnena skodelica
Ravne, globoke razpoke v masi,	1–1,5 mm	$L_1 S_3$, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$, $L_1 B_3$ in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$	$L_1 S_3$ in $L_1 S_2 B_1$
Ravne, ozke razpoke v masi	0,5 mm	$L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_1 B_3$	$L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 B_3$ PPh in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE
Mrežaste razpoke v masi	0,5–1,5 mm	$L_1 S_3$ in RC	$L_1 S_3$, $L_1 B_3$ in RC
Brez razpok v masi	-	$L_1 S_2 B_1$ PPh, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PPh, $L_1 S_1 B_2$, $L_1 S_1 B_2$ PPh, $L_1 B_3$ PCE in $L_1 B_3$ PPh	$L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE, $L_1 S_1 B_2$, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PPh, $L_1 B_3$ in $L_1 B_3$ PCE
Globoke razpoke na stiku	1–1,5 mm	$L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PPh, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE, $L_1 S_1 B_2$, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PPh, $L_1 B_3$, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ in RC	$L_1 S_3$, $L_1 B_3$ PPh in RC
Ozke razpoke na stiku	0,3–0,5 mm	$L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_2 B_1$ PPh, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PPh, $L_1 B_3$ PCE, $L_1 B_3$ PPh $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE	$L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_3$ PPh, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_1 B_2$ PPh in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE
Ozke, plitke razpoke	0,1–0,2 mm	$L_1 S_2 B_1$ PCE	$L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PPh, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PCE, $L_1 S_{1,5} B_{1,5}$ PPh, $L_1 S_1 B_2$ in $L_1 S_1 B_2$ PCE
Brez razpok na stiku	-	-	$L_1 B_3$, $L_1 B_3$ PCE In $L_{0,8} T_{0,2} S_3$

4.2.9 Preizkušanje injektabilnosti injekcijskih mešanic z injekcijsko brizgo

Preverjanje injektabilnosti mešanic z nestandardizirano metodo pokaže sposobnost tečenja in zapolnjevanja majhnih razpok skozi suh in predhodno navlažen drobljen apneni omet, granulacije od 2 do 4 mm.

Preverjanje injektabilnosti z injekcijsko brizgo je nestandardizirana metoda, ki jo predlagata in opisujeta avtorici Biçer-Simsir in Rainer (2013). Test preizkušanja injektabilnosti mešanic z injekcijsko brizgo je namenjen predvsem preverjanju sposobnosti zapolnitve medprostorov v drobljenem suhem ali predhodno navlaženem materialu različne granulacije na terenu, saj je njego uporaba enostavna in hitra.

Za preiskavo injektabilnosti z injekcijsko brizgo je potrebno 60 ml brizgo napolniti z 20 ml granuliranega materiala (drobljena opeka, lehnjak ali apneni omet) granulacije od 2 do 4 mm (slika 3.13). Lastnosti granuliranega apnenega ometa so podane v poglavju 3.5.5.

V primeru predhodne navlažitve granuliranega materiala pred injiciranjem mešanice injiciramo 20 ml vode in pustimo 5 min, da ostanek vode odteče.

V brizgo, napolnjeno z granuliranim materialom, dodamo 20 ml injekcijske mešanice in vstavimo bat brizge. Na bat pritiskamo z rahlim pritiskom dlani, dokler mešanica ne preneha teči. Z merilom odmerimo doseženo razdaljo prodora mešanice.

Glede na rezultate lahko mešanice razvrstimo v tri skupine (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013):

- *enostavno* (easy – E), če mešanica priteče iz konice injekcijske brizge, med pritiskanjem na bat injekcije,
- *izvedljivo* (feasible – F), če mešanica doseže konico brizge, vendar ne priteče iz nje, med pritiskom na bat injekcije,
- *težavno* (difficult – D), če se mešanica ustavi, preden doseže konico brizge, med pritiskom na bat injekcije.

Čim daljšo razdaljo mešanica doseže, tem boljša je njena injektabilnost. Dobljeni rezultati so podani v preglednici 4.12 in prilogi E.

Rezultati pokažejo, da se injektabilnost mešanic poslabša v primeru uporabe suhega drobljenega ometa. Vzrok je lahko v ne dovolj visoki vodozadržnosti mešanic, s čimer prihaja do zmanjšanja pretočnosti injicirane mase in tvorbe kep. Posledica izgube vode iz mešanice, do katere pride zaradi kapilarnega srka poroznega drobljenega ometa, je nezadostno zapolnjevanje razpok in predčasno prenehanje tečenja mase skozi razpoke.

Preglednica 4.12: Razvrstitev injekcijskih mešanic glede na injektabilnost z injekcijsko brizgo.
Table 4.12: Classification of injectability of injection grouts with syringes.

Klasifikacija	Suh drobljen omet	Navlažen drobljen omet
Enostavno (E) > 30 mm	L ₁ S ₂ B ₁ L ₁ S _{1,5} B _{1,5}	L ₁ S ₃ , L ₁ S ₃ PCE, L ₁ S ₃ PPh, L ₁ S ₂ B ₁ , L ₁ S ₂ B ₁ PCE, L ₁ S ₂ B ₁ PPh, L ₁ S _{1,5} B _{1,5} , L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE, L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh, L ₁ S ₁ B ₂ , L ₁ S ₁ B ₂ PCE, L ₁ S ₁ B ₂ PPh L ₁ B ₃ , L ₁ B ₃ PCE, L ₁ B ₃ PPh, L _{0,8} T _{0,2} S ₃
Izvedljivo (F) = 30 mm	L _{0,8} T _{0,2} S ₃	RC
Težavno (D) < 30 mm	L ₁ S ₃ , L ₁ S ₃ PCE, L ₁ S ₃ PPh L ₁ S ₂ B ₁ PCE, L ₁ S ₂ B ₁ PPh, L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE, L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh, L ₁ S ₁ B ₂ , L ₁ S ₁ B ₂ PCE, L ₁ S ₁ B ₂ PPh, L ₁ B ₃ , L ₁ B ₃ PCE, L ₁ B ₃ PPh, L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE, RC	L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE

Izboljšanje injektabilnosti in pretočnosti mešanic skozi razpoke dosežemo s predhodno navlažitvijo drobljenega apnenega ometa. V vseh primerih je masa stekla iz konice injekcije, razen pri mešanicah L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE in RC.

S predhodnim injiciranjem vode zmanjšamo izgubo vode iz mas in posledično zadržimo dovolj visoko sposobnost tečenja.

Iz rezultatov je tudi razvidno (priloga E), da se injektabilnost mešanic poslabša z dodajanjem superplastifikatorjev.

Injekcijske mešanice brez superplastifikatorjev (L₁ S₃, L₁ S₂B₁, L₁ S_{1,5}B_{1,5}, L₁ S₁B₂, L₁ B₃ in L_{0,8}T_{0,2}S₃) dosejajo boljše rezultate, ne glede na slabše rezultate doseženih razlezov, v primerjavi z mešanicami z dodanim PCE in PPh superplastifikatorjem.

Slabše rezultate dosejajo mešanice z dodanim PPh superplastifikatorjem (L₁ S₃ PPh, L₁ S₂B₁ PPh, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh, L₁ S₁B₂ PPh in L₁ B₃ PPh), v primerjavi z mešanicami z dodanim PCE superplastifikatorjem (L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PCE, L₁ S₁B₂ PCE in L₁ B₃ PCE).

Glede na dosedanje rezultate preiskav smo pričakovali, da so mešanice L₁ S₃ PPh, L₁ S₂B₁ PPh, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh, L₁ S₁B₂ PPh in L₁ B₃ PPh z večjim doseženim razlezom (od 215 do 297 mm) bolj injektabilne od mešanic z manjšim razlezom. Ker to ne drži, lahko zaključimo, da slaba injektabilnost mešanic L₁ S₃ PPh, L₁ S₂B₁ PPh, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh, L₁ S₁B₂ PPh in L₁ B₃ PPh nakazuje na njihovo nestabilnost.

Sama metoda je primerna pri konservatorsko-restavratorskem delu, saj poda okvirno oceno o sposobnosti injiciranja mešanic. Slabost metode je, da se lahko z granuliranim materialom zamaši konica injekcije in s tem prepreči injiciranje skozi granulirani material. Za doseganje boljših rezultatov bi bilo potrebno med injekcijsko konico in granulirani material vstaviti mrežico, ki bi preprečevala zamašitev konice.

4.2.10 Preizkušanje pretočnosti injekcijskih mešanic z injekcijsko brizgo

Preverjanje pretočnosti z injekcijsko brizgo je nestandarizirana metoda, ki jo predlagata in opisujeta avtorici Biçer-Simsir in Rainer (2013). Namen testa je primerjati sposobnosti tečenja oziroma prehajanja injekcijske mase med ovirami in zapolnjevanje ozkega medprostora suhega in predhodno navlažen drobljenega materiala pod vplivom lastne teže.

Postopek same priprave injekcijske brizge z granuliranim materialom je enak kot pri prejšnji metodi preverjanja injektabilnosti z injekcijsko brizgo. V pokončno stoječo injekcijsko brizgo z granuliranim materialom dodamo 20 ml injekcijske mešanice in po petih minutah izmerimo razdalja, do katere mešanica penetrira v granulirani material.

Glede na dobljene rezultate mešanice razvrstimo v tri skupine (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013):

- *enostavno* (easy – E), če masa priteče iz injekcijske konice po petih minutah ali prej,
- *izvedljivo* (feasible – F), če masa doseže konico injekcije, vendar ne priteče iz nje,
- *težavno* (difficult – D), če se masa ustavi, preden doseže konico injekcije.

Daljša kot je dosežena razdalja, boljša je pretočnost mešanice. Dobljeni rezultati so podani v prilogi F.

Vse mešanice, razen $L_1 S_3$ PPh, pripadajo skupini težavnih injekcijskih mas (D), saj se penetracija ustavi, še preden doseže konico injekcije.

Najslabše rezultate so dosegle mešanice brez superplastifikatorja. Z dodanim PCE in PPh superplastifikatorjem se je pretočnost injekcijskih mas izboljšala.

Injekcijske mase s PPh superplastifikatorjem imajo tendenco boljšega penetriranja oziroma tečenja, tako v suhem kot v predhodno navlaženem drobljenem ometu.

Izjema je injekcijska mešanica $L_1 S_{15}B_{15}$ PPh, injicirana v suh drobljen omet, z doseženo krajšo razdaljo od mešanic $L_1 S_{15}B_{15}$ in $L_1 S_{15}B_{15}$ PCE. V tem primeru lahko pripišemo slabšo penetracijo nestabilnosti mešanice $L_1 S_{15}B_{15}$ PPh.

Predhodna navlažitev drobljenega apnenega ometa vpliva na izboljšanje tečenja oziroma prehajanja mase med ovirami in ozkimi razpokami. Najboljši rezultat pretočnosti doseže mešanica $L_1 S_3$ PPh v primeru predhodno navlaženega drobljenega apnenega ometa, saj je del mase pritekel iz injekcije, zato jo uvrščamo v skupino E.

4.2.11 Preizkušanje tečenja na apnenih ploščah s kanalčki

Preizkušanje tečenja na apnenih ploščah s kanalčki je nestandardizirana metoda, ki jo opisujeta avtorici Biçer-Simsir in Rainer (2013). S testom se primerja sposobnost tečenja različnih injekcijskih mešanic skozi vertikalne kanalčke.

Dosežena razdalja ponazarja sposobnost tečenja mešanice skozi mrežo razpok ali votlin. Test se lahko uporablja na terenu kot enostaven način za preverjanje in primerjavo sposobnosti tečenja različnih injekcijskih mešanic.

Postopek priprave apnene plošče s kanalčki in modifikacije metode so opisani v poglavju 4.5.1.

Za preizkušanje pretočnosti je potrebno postaviti apneno ploščo s kanalčki v vertikalni položaj. Nato injekcijsko brizgo z 10 ml injekcijske mešanice postavimo na vrh kanalčka. V kanalček injiciramo 10 ml injekcijske mase pod konstantnim pritiskom. V primeru predhodne navlažitve kanalčkov pred injiciranjem mešanice injiciramo 20 ml vode in pustimo 5 min, da ostanek vode odteče. Injekcijske mešanice injiciramo v odprte in zaprte kanalčke.

Ko masa preneha teči po vertikalnih kanaljih, z merilom izmerimo doseženo razdaljo. Rezultati so podani v preglednici 4.13 in prilogi G.

Glede na dobljene rezultate lahko mešanice razvrstimo v tri skupine (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013):

- *krajša razdalja* (L), če injekcijska masa doseže krajšo razdaljo od 100 mm,
- *srednja razdalja* (M), če injekcijska masa doseže krajšo razdaljo od 200 mm,
- *daljša razdalja* (H), če injekcijska masa doseže daljšo razdaljo od 200 mm.

Daljša je razdalja, boljša je sposobnost tečenja injekcijske mešanice. Pomembno je prav tako zabeležiti, če se masa nabere pod kanalčkom.

Najboljše rezultate so dosegle mešanice, injicirane v suhe in v predhodno omočene odprte kanalčke. Vse mešanice so presegle razdaljo 200 mm, kar jih uvršča v skupino H, razen mešanic $L_1 S_1 B_2$, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ in RC.

Mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_3$ PPh med postopkom injiciranja v suhe in navlažene odprte kanalčke teh nista napolnili, saj je vsa masa odtekla in se nabrala pod kanalčki (slika 4.13).

Veliko bolj reprezentativni so rezultati, dobljeni v primeru injiciranja v suhe ali predhodno navlažene zaprte kanalčke. Zaprti kanalčki mnogo bolj realno simulirajo stanje odstopljenih plasti ometov.

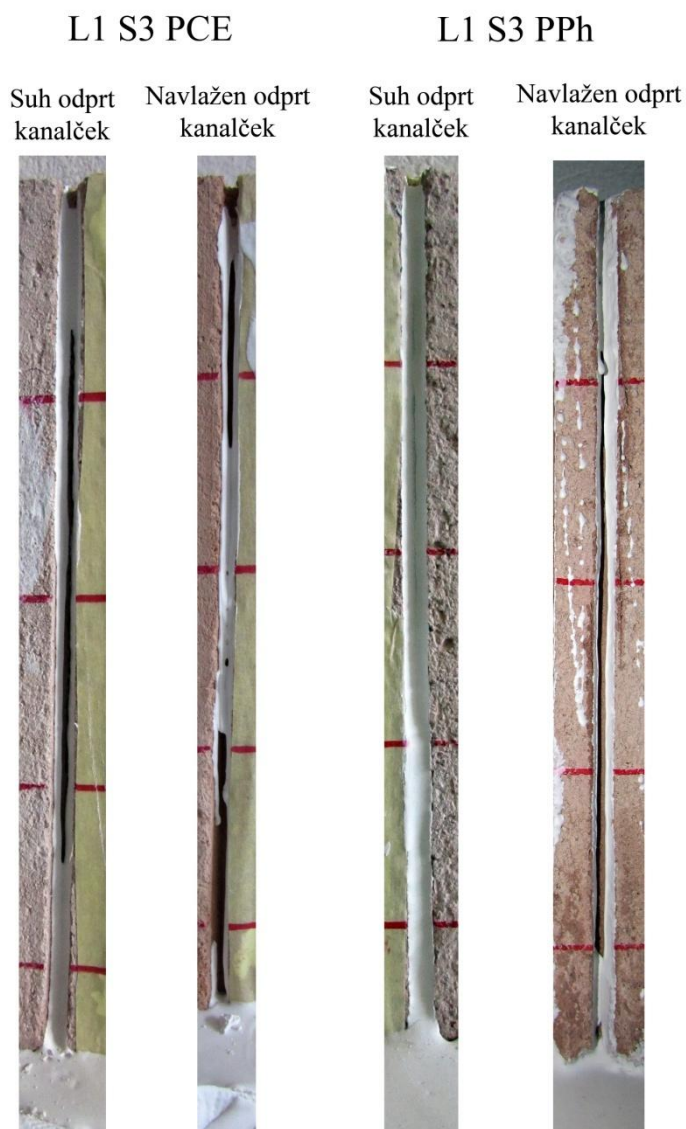
Po pričakovanjih so mešanice dosegle krajše razdalje kot v odprtih kanalčkih.

Najboljše rezultate so dosegle mešanice $L_1 S_3$ PPh, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, injicirane v suhe in navlažene zaprte kanalčke in so uvrščene v skupino H.

Najslabše rezultate so dosegle mešanice $L_1 S_3$, $L_1 S_2 B_1$ PPh, $L_1 S_1 B_2$, $L_1 S_1 B_2$ PPh, $L_1 B_3$ in RC, z doseženo razdaljo med 41 in 100 mm, kar jih uvršča v skupino L.

Ostale mešanice, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁₅B₁₅, L₁ S₁₅B₁₅ PCE, L₁ S₁₅B₁₅ PPh, L₁ B₃ PCE, L₁ B₃ PPh in L_{0,8}T_{0,2} S₃, injicirane v suhe in predhodno navlažene zaprte kanalčke, so uvrščene v skupino M, saj so dosegle razdaljo med 104 in 178 mm.

Injekcijske mešanice z dodanim PCE superplastifikatorjem dosegajo boljše rezultate od mešanic brez ali z dodanim PPh superplastifikatorjem. Predhodno vlaženje ima ugodne učinke na povečanje tečenja mešanic.



Slika 4.13: Injekcijski mešanici L₁ S₃ PCE in L₁ S₃ PPh sta odtekli iz suhih in navlaženih odprtih kanalčkov in se nabrali pod kanalčki.

Figure 4.13: The grouts L1 S3 PCE and L1 S3 PPh are collected at the bottom of open dry and pre-wetted channels.

Preglednica 4.13: Razvrstitev injekcijskih mešanic glede na tečenje na apnenih ploščah s kanalčki.**Table 4.13:** Classification of the flow of injection grouts on plastered tile with channels.

Klasifikacija	Suh odprt kanalček	Suh zaprt kanalček	Navlažen odprt kanalček	Navlažen zaprt kanalček
Razdalja L ≤ 100 mm	RC	L ₁ S ₃ , L ₁ S ₂ B ₁ PPh, L ₁ S ₁ B ₂ , L ₁ S ₁ B ₂ PPh, L ₁ B ₃ , L _{0,8} T _{0,2} S ₃ , RC	RC	L ₁ S ₃ , L ₁ S ₂ B ₁ PPh, L ₁ S ₁ B ₂ , L ₁ S ₁ B ₂ PPh, L ₁ B ₃ , RC
Razdalja M 100 mm < ≥ 200 mm	L ₁ S ₁₅ B ₁₅ , L ₁ S ₁ B ₂ , L _{0,8} T _{0,2} S ₃	L ₁ S ₃ PCE, L ₁ S ₂ B ₁ , L ₁ S ₂ B ₁ PCE, L ₁ S ₁₅ B ₁₅ , L ₁ S ₁₅ B ₁₅ PCE, L ₁ S ₁₅ B ₁₅ PPh, L ₁ B ₃ PPh	L ₁ S ₁ B ₂ , L ₁ B ₃ PCE, L _{0,8} T _{0,2} S ₃	L ₁ S ₃ PCE, L ₁ S ₂ B ₁ , L ₁ S ₂ B ₁ PCE, L ₁ S ₁₅ B ₁₅ , L ₁ S ₁₅ B ₁₅ PPh, L ₁ B ₃ PCE, L ₁ B ₃ PPh, L _{0,8} T _{0,2} S ₃
Razdalja H > 200 mm	L ₁ S ₃ L ₁ S ₃ PCE, L ₁ S ₃ PPh, L ₁ S ₂ B ₁ , L ₁ S ₂ B ₁ PCE, L ₁ S ₂ B ₁ PPh, L ₁ S ₁₅ B ₁₅ PCE, L ₁ S ₁₅ B ₁₅ PPh, L ₁ S ₁ B ₂ PCE, L ₁ S ₁ B ₂ PPh, L ₁ B ₃ , L ₁ B ₃ PCE, L ₁ B ₃ PPh, L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	L ₁ S ₃ PPh, L ₁ S ₁ B ₂ PCE, L ₁ B ₃ PCE, L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	L ₁ S ₃ , L ₁ S ₃ PCE, L ₁ S ₃ PPh, L ₁ S ₂ B ₁ , L ₁ S ₂ B ₁ PCE, L ₁ S ₂ B ₁ PPh, L ₁ S ₁₅ B ₁₅ , L ₁ S ₁₅ B ₁₅ PCE, L ₁ S ₁₅ B ₁₅ PPh, L ₁ S ₁ B ₂ PCE, L ₁ S ₁ B ₂ PPh, L ₁ B ₃ , L ₁ B ₃ PPh, L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	L ₁ S ₃ PPh, L ₁ S ₁₅ B ₁₅ PCE, L ₁ S ₁ B ₂ PCE, L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE

4.2.12 Povzetek rezultatov in ocena mešanic ter izbira mešanic za nadaljnje raziskave

Cilj drugega sklopa je bil na podlagi dobljenih rezultatov izločiti vse injekcijske mešanice, ki ne dosega postavljenih kriterijev.

Poudarek je bil na preverjanju lastnosti svežih mešanic, kot so: prostorninska masa sveže mešanice (ρ_{sv}), njena stabilnost (Sta), izločanje vode (IzV), razlez, sposobnost zadrževanja vode (WRV), preverjanje prostorninske stabilnosti, injektibilnosti, pretočnosti in sposobnosti tečenja vzdolž kanalčkov.

Vseh osemnajst mešanic smo, glede na rezultate in kriterije, uvrstili v pripadajoče kakovostne razrede. Uvrstitev mešanic v posamezne razrede je prikazana v preglednicah 4.14 in 4.15.

Za lažjo izbiro ustreznih oziroma izločitev neprimernih mešanic, ki ne dosega kriterijev, smo posamezne lastnosti ocenili s pomočjo klasifikacije:

- zelo dobro (++), če so lastnosti mešanic nadpovprečno dobre,

- dobro (+), če so lastnosti mešanic dosegle postavljene kriterije,
- slabo (-), če lastnosti mešanic niso dosegle postavljenih kriterijev,
- zelo slabo (--), če so dosežene lastnosti injekcijskih mešanic nadpovprečno slabe.

Preglednica 4.14: Povzetek rezultatov in klasifikacija lastnosti sveže pripravljenih injekcijskih mešanic.

Table 4.14: Summary of results and classification of working properties.

Oznaka mešanice /formulacija mase	ρ_{sv}	Sta	IzV	Razlez	WRV	Krčenje	Krčenje z metodo apnenih skodelic	
	$0,80 \leq x$ $\geq 1,20$		$x \leq 2$ %		$\geq 80\%$	$\leq 5\%$	Suho	Mokro
L ₁ S ₃	--	--	--	-	-	--	--	--
L ₁ S ₃ PCE	--	++	-	+	+	+	-	-
L ₁ S ₃ PPh	--	--	++	+	++	-	-	-
L ₁ S ₂ B ₁	+	--	--	-	-	--	--	--
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	+	++	-	+	+	+	-	-
L ₁ S ₂ B ₁ PPh	+	--	-	++	+	-	-	-
L ₁ S _{1,5} B _{1,5}	+	--	+	-	-	--	--	-
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE	+	--	-	+	+	+	-	++
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh	+	--	-	++	++	+	-	+
L ₁ S ₁ B ₂	++	++	+	-	-	--	--	+
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	++	++	+	+	+	+	--	+
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	++	+	+	++	+	-	--	-
L ₁ B ₃	++	+	++	--	--	--	--	++
L ₁ B ₃ PCE	++	+	++	+	+	-	-	++
L ₁ B ₃ PPh	++	--	++	+	+	-	-	--
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	--		--	--	--	--	--	++
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	--		--	++	+	-	-	--
RC	--		++	--	+	--	--	--

Najslabše lastnosti so dosegle mešanice brez superplastifikatorja, medtem ko se z dodajanjem PCE in PPh superplastifikatorja lastnosti mešanic izboljšajo. Na izboljšanje lastnosti mešanic pa ne vpliva samo zmanjšanje količine dodane vode s pomočjo superplastifikatorjev, ampak tudi nadomeščanje deleža kalcitne moke z ultralahkim polnilom.

Nadomeščanje hidratiziranega apna s tufom pri svežih mešanicah ni prineslo zelenih izboljšav.

Količina dodane vode je bila v vseh masah zadostna in zagotavlja ustrezno pretočnost pod minimalnim pritiskom z injekcijsko brizgo.

Mešanice z večjim deležem ultra lahkega polnila (L₁ S_{1,5}B_{1,5}, L₁ S₁B₂ in L₁ B₃) potrebujejo manj zamesne vode od mešanic z večjim deležem kalcitne moke (L₁ S₃, L₁ S₂ B₁ in L_{0,8}T_{0,2}S₃).

Zdaleč največjo potrebo po vodi imajo mešanice s prevladujočim deležem kalcitne moke ($L_1 S_3$ in $L_1 S_2 B_1$) in tufom ($L_{0,8} T_{0,2} S_3$) nad $v/v = 2,10$, kar vpliva na znižanje obstojnosti, na krčenje in nastajanje razpok med sušenjem mase.

Manjšo potrebo po vodi imajo mešanice s prevladujočim deležem ultralahkega polnila, $L_1 S_{15} B_{15}$, $L_1 S_1 B_2$ in $L_1 B_3$.

Sprememba prostornine je pomemben pokazatelj obnašanja mešanic v času strjevanja in mora biti čim manjša. Vse mešanice brez superplastifikatorja dosegajo vrednost krčenja nad 9 %.

Z dodajanjem superplastifikatorja zmanjšamo delež dodane vode in posledično izboljšamo nekatere lastnosti mešanic, na primer bistveno zmanjšamo krčenje (do 50 %) in nastajanje razpok med sušenjem.

PPh superplastifikator je pri zniževanju deleža vode bolj učinkovit kot PCE superplastifikator, vendar je to posledica večje količine dodanega PPh superplastifikatorja. Injekcijske mešanice z dodanim PPh superplastifikatorjem imajo manjše vodovezivno razmerje, vendar imajo kljub temu večje krčenje in nastajanje razpok. Medtem ko imajo mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_1 B_3$ PCE nekoliko višje vodovezivno razmerje, so pa po drugi strani bolj odporne proti krčenju in nastajanju razpok med sušenjem.

Z dodajanjem oziroma nadomeščanjem deleža kalcitne moke z ultralahkim polnilom bistveno vplivamo na zmanjšanje prostorninske mase injekcijskih mešanic. Najnižjo prostorninsko maso so dosegle injekcijske mešanice iz hidratiziranega apna in ultralahkega polnila, brez ali s PCE/PPh superplastifikatorjem, in sicer od 0,83 do 0,86 g/cm³.

Najvišjo prostorninsko maso so dosegle mešanice iz hidratiziranega apna, kalcitne moke ($L_1 S_3$) in tufa ($L_{0,8} T_{0,2} S_3$), brez ali s superplastifikatorjem – od 1,74 do 1,82 g/cm³.

Višjo prostorninsko maso je dosegla tudi primerjalna injekcijska masa RC, in sicer 1,75 g/cm³.

Velika pozornost je bila posvečena preverjanju stabilnosti oziroma preverjanju segregacije veziva, polnila in vode v zasnovanih mešanicah. Sinteza različnih metod testiranja mešanic od izločanja vode do vodozadržnosti, skupaj s prilagojeno metodo, je podala končno oceno o sposobnosti zadrževanja homogene strukture posameznih mas.

Injekcijske mešanice morajo biti stabilne oziroma morajo obdržati svojo homogenost od končanega mešanja do sušenja oziroma strjevanja mase, saj v nasprotnem primeru utrjevanje zračnih žepov ne bo uspešno.

Na nestabilnost mešanic vpliva v večini primerov previsoka koncentracija PPh superplastifikatorja ($L_1 S_3$ PPh, $L_1 S_2 B_1$ PPh, $L_1 S_{15} B_{15}$ PPh in $L_1 B_3$ PPh). V teh primerih so mešanice segregirale, težji delci so se posedli na dno, lažji delci ultralahkega polnila pa so se izločili na površje mase.

Segregacija ultralahkega polnila je opazna pri preverjanju izločanja vode, kjer se vidi ujeta voda med plastjo izločenega ultralahkega polnila na vrhu in preostalo mešanico, pri mešanicah L₁ S₃ PPh in L₁ B₃ PPh. Kot posledica je izmerjena količina izločene vode zelo nizka, kar ni realen rezultat.

Stabilne mešanice so mešanice L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L₁ S₁B₂ PPh, L₁ B₃ in L₁ B₃ PCE. Vrednosti izločanja vode pri mešanicah z večjim deležem kalcitne moke so 1,5–1,7 %, pri mešanicah z večjim deležem ultralahkega polnila pa 0,1–0,7 % (L₁ S₁B₂ PCE, L₁ S₁B₂ PPh, L₁ B₃ in L₁ B₃ PCE). Vzrok za manjše izločanje vode pri mešanicah z večjim deležem ultralahkega polnila je manjša količina vode v mešanici.

Rezultati sposobnosti zadrževanja vode in razleza lahko prav tako nakazujejo na nestabilnost injekcijskih mešanic. Rezultati v primeru nestabilnosti mešanic zelo variirajo.

Sposobnost zadrževanja vode nad 80 % so dosegle mešanice L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L₁ S₁B₂ PPh, L₁ B₃ in L₁ B₃ PCE (81–83 %). Primerjalna mešanica RC je dosegla vrednost 83 %.

Nerealno visoko sposobnost zadrževanja vode, nad 85 %, imata mešanici L₁ S₃ PPh in L₁ S₁₅B₁₅ PPh. Tak rezultat lahko pomeni segregacijo polnila (ultralahkega polnila in kalcitne moke), kar prepreči izločanje vode, saj se voda ujame med plastmi polnila.

Z uporabo apnenih skodelic smo pokazali, da imajo mešanice brez superplastifikatorja in s PPh superplastifikatorjem večje krčenje od mešanic z dodanim PCE superplastifikatorjem. Zelo slabo odporna na krčenje in nastajanje razpok je primerjalna mešanica RC.

Predhodno vlaženje apnenih skodelic ima prej negativne kot pozitivne učinke pri mešanicah z večjim deležem kalcitne moke (L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₃ PPh, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE in L₁ S₂B₁ PPh).

Najbolj prostorninsko stabilne so se izkazale mešanice z večjim deležem ultralahkega polnila in dodanim PCE superplastifikatorjem v predhodno navlaženih apnenih skodelicah (L₁ S₁₅B₁₅ PCE, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L₁ B₃ in L₁ B₃ PCE).

Povzetki rezultatov in-situ testov injektibilnosti in pretočnosti so prikazani v preglednici 4.15. Rezultati, pridobljeni z nestandardnimi metodami preverjanja injektibilnosti in pretočnosti, niso imeli posebnega vpliva na ovrednotenje in izločitev slabih mešanic. Vzrok za to so pomanjkljivosti teh testov.

Poudariti je treba, da so kljub pomanjkljivostim nestandardizirane metode primerne za hitro in učinkovito preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic na terenu.

Preglednica 4.15: Povzetek rezultatov in klasifikacija lastnosti in-situ testov injektabilnosti in pretočnosti.

Table 4.15: Summary of results and classification of in-situ method for injectability and flow.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Preizkušanje injektabilnosti z injekcijo		Preizkušanje pretočnosti z injekcijo		Preizkušanje tečenja na apnenih ploščah			
	Suho	Mokro	Suho	Mokro	Odrto suho	Zaprto suho	Odprto mokro	Odprto mokro
L ₁ S ₃	-	+	--	--	+	--	+	--
L ₁ S ₃ PCE	-	+	--	--	++	+	++	+
L ₁ S ₃ PPh	+	++	-	+	++	++	++	++
L ₁ S ₂ B ₁	+	+	--	--	+	++	+	-
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	-	+	--	--	+	+	+	+
L ₁ S ₂ B ₁ PPh	--	+	--	--	+	--	+	-
L ₁ S _{1,5} B _{1,5}	+	++	--	--	+	-	+	-
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PCE	+	+	--	--	+	+	+	+
L ₁ S _{1,5} B _{1,5} PPh	-	+	--	--	+	-	+	-
L ₁ S ₁ B ₂	-	++	--	--	-	--	-	-
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	-	+	--	--	+	+	+	+
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	--	+	--	--	+	--	+	--
L ₁ B ₃	-	+	--	--	++	--	++	--
L ₁ B ₃ PCE	-	+	--	--	+	-	+	-
L ₁ B ₃ PPh	-	+	--	--	++	+	++	+
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	+	++	--	--	+	--	+	-
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	-	-	--	--	++	+	++	+
RC	-	+	--	--	--	--	--	--

Rezultati nestandardiziranih metod preverjanja injektabilnosti in pretočnosti z injekcijsko brizgo so pokazali, da se injektabilnost in pretočnost mešanic (L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₂B₁ PPh, L₁ S_{1,5}B_{1,5} PPh, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L₁ S₁B₂ PPh, L₁ B₃, L₁ B₃ PCE, L₁ B₃ PPh L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE in RC) poslabšata v primeru uporabe suhega poroznega drobljenega ometa.

Najslabše rezultate so mešanice dosegle pri testu pretočnosti pod vplivom lastne teže, kjer so bile podvržene tečenju med ovirami in zapolnjevanju medprostorov med zrnji drobljenega suhega ali predhodno navlaženega materiala.

Injiciranje mešanic v suhe in navlažene odprte kanalčke apnenih plošč ni pokazalo bistvene razlike v doseženih razdaljah med suhimi in navlaženimi odprtimi kanalčki.

Veliko bolj reprezentativni so rezultati z zaprtimi suhimi in predhodno navlaženimi kanalčki, saj deloma posnemajo stanje odstopajočih plasti ometov.

Najboljše rezultate pri injiciranju v suhe ali navlažene zaprte kanalčke so dosegle mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_3$ PPh, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_{15} B_{15}$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_1 B_3$, $L_1 B_3$ PCE, $L_1 B_3$ PPh in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE. V primeru uporabe PPh superplastifikatorja se je injektibilnost mešanicam poslabšala.

Vzroki za slabšo injektibilnost in pretočnost mešanic so v slabi vodozadržnosti, kar vpliva na zmanjšanje pretočnosti injicirane mase in tvorbo kep med samim postopkom injiciranja v suh ali navlažen omet. Zaradi kapilarnega srka poroznega ometa pride do izgube vode iz injekcijske mešanice, kar se odraža kot nezadostno zapolnjevanje razpok in predčasno prenehanje tečenja mase skozi razpoke.

Izboljšanje injektibilnosti in pretočnosti mešanic skozi razpoke lahko dosežemo s predhodno navlažitvijo drobljenega apnenega ometa. S predhodnim injiciranjem vode se je tako zmanjšala izguba vode iz mas in posledično vzdrževala dovolj visoka sposobnost tečenja mas.

Na podlagi dobljenih rezultatov in analiz sedemnajstih zasnovanih injekcijskih mešanic smo za nadaljnje analize izbrali mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PPh in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE. Te so najbolj stabilne, imajo dobro sposobnost zadrževanja vode in minimalno izločanje vode, dosegajo najnižje krčenje in so injektibilne. Zaradi primerjave so bile za nadaljnje preiskave izbrane tudi relevantne mešanice brez superplastifikatorja, $L_1 S_3$, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_1 B_2$, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ ter referenčna mešanica RC.

4.3 Sklop 3: Preiskave na strjenih injekcijskih mešanicah

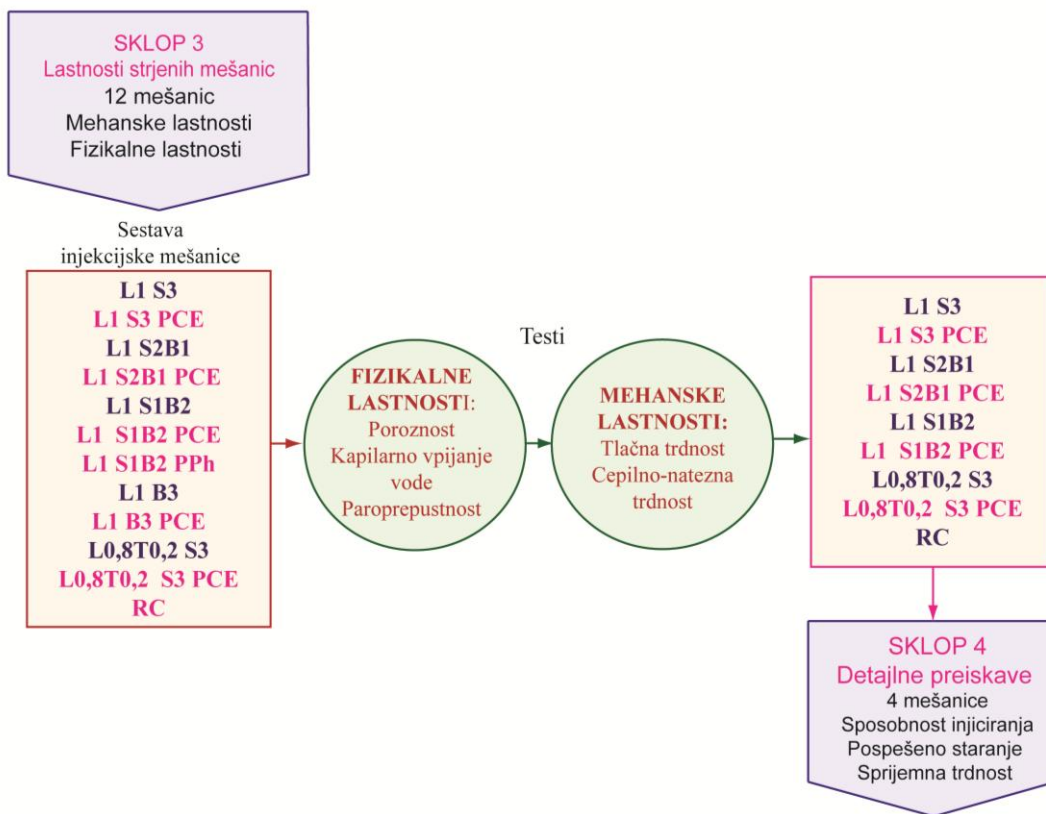
Stabilne injekcijske mešanice z minimalnim izločenjem vode, ustrezno vodozadržnostjo, minimalnim krčenjem in ustrezno konsistenco ter injektibilnostjo so bile izbrane za preverjanje karakteristik strjenih mešanic v tretjem sklopu.

Iz drugega sklopa preiskav se je za nadaljnja testiranja uvrstilo dvanajst injekcijskih mešanic brez in s superplastifikatorjem $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PPh, $L_1 B_3$, $L_1 B_3$ PCE, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE ter mešanica RC.

V tretjem sklopu preiskav je poudarek na preverjanju mehanskih in fizikalnih lastnosti strjenih mešanic. Potek dela je prikazan na shemi 4.4.

Injekcijske mešanice so bile pripravljene s kuhinjskim mešalnikom in vgrajene v ustrezne kalupe. Preskušance smo negovali 90 dni, v primeru tlačne trdnosti pa tudi 365 dni, pri temperaturi 18 ± 1 °C in relativni vlagi 60 ± 10 %. Podroben opis priprave preskušencev je v poglavju 3.3.2.

Shema 4.4: Potek 3. sklopa, karakteristika strjenih injekcijskih mešanic.
Scheme 4.4: Planning of the 3rd phase, characteristics of injection grouts.



4.3.1 Prostorninska masa strjenih injekcijskih mešanic

Prostorninsko maso strjenih injekcijskih mešanic smo določili po standardu SIST EN 1015-10:2001/A1:2007 pri starosti 90 dni. Rezultati so podani v preglednici 4.16. Prostorninska masa je določena po enačbi 4.3:

$$\rho_{st} = \frac{m}{V_{st}} \quad (4.3)$$

kjer je ρ_{st} prostorninska masa strjenega preskušanca (g/cm^3), m masa strjenega preskušanca (g) in V_{st} prostornina preskušanca (m^3).

Po pričakovanju dosegajo višjo prostorninsko maso mešanice z višjim deležem kalcitne moke in tufom, brez ali s superplastifikatorjem (L1 S3, L1 S3 PCE, L1 S2B1, L1 S2B1 PCE, L0,8T0,2 S3, L0,8T0,2 S3 PCE in RC1), in sicer od 1,36 do 1,49 g/cm^3 .

Pri mešanicah, ki vsebujejo večji delež ultralahkega polnila, L1 S1B2, L1 S1B2 PCE in L1 S1B2 PPh, je prostorninska masa znašala od 0,78 do 0,85 g/cm^3 .

Najvišjo prostorninsko maso je dosegla primerjalna mešanica RC iz apnenega testa in kalcitne moke, in sicer 1,49 g/cm³.

Prostorninska masa mešanic z dodanim PCE superplastifikatorjem se poviša za 5 do 10 %, glede na prostorninsko maso mešanic brez superplastifikatorja.

Preglednica 4.16: Prostorninska masa strjenih injekcijskih mešanic pri starosti 90 dni.

Table 4.16: Bulk density of hardened injection grouts at the age of 90 days.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Prostorninska masa (g/cm ³)	Stdev (g/cm ³)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	1,38	0,01	0,51
L ₁ S ₃ PCE	1,45	0,01	0,46
L ₁ S ₂ B ₁	1,11	0,01	0,51
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	1,20	0,02	1,55
L ₁ S ₁ B ₂	0,78	0,01	1,58
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	0,85	0,00	0,25
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	0,79	0,22	27,51
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	1,36	0,02	1,25
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	1,44	0,01	0,59
RC	1,49	0,01	0,41

4.3.2 Poroznost

Poroznost je eden najpomembnejših dejavnikov, ki vpliva na mehansko-fizikalne lastnosti gradbenih materialov. Poroznost je razmerje prostornine por proti prostornini celotne snovi (enačba 4.4).

$$n = \frac{V_p}{V_c} \quad (4.4)$$

kjer je n stopnja skupne poroznosti (%), V_p prostornina por in V_c prostornina snovi.

Trdni gradbeni materiali (kamen, opeka, apnene in cementne malte) vsebujejo določen volumen praznega prostora, ki je razporejen v obliki por, votlinic in razpok različnih oblik ter velikosti, od nanometra do nekaj milimetrov. V porah gradbenega materiala poteka transport tekočin in plinov, ki je bistvenega pomena za njegovo trajnost in obstojnost.

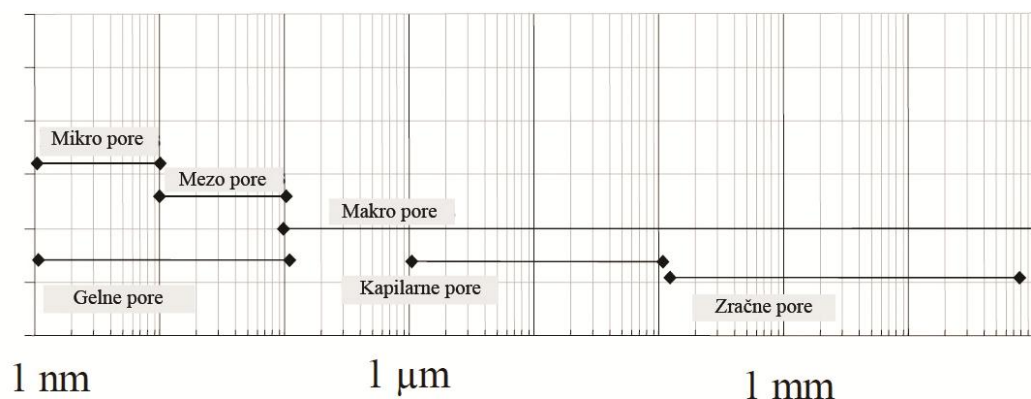
Na poroznost apnenih malt vplivajo različni faktorji, od tehnologije priprave malte (vrsta veziva, razmerje vezivo : agregat, vrsta in granulacija agregata, razmerje voda : vezivo, način mešanja malte, način nanašanja malte) do samega vpliva okolja, saj nima statične forme in se lahko spremeni pod vplivom časa (Stefanidou, 2010). Avtorici Papayianni in Stefanidou (2006) ugotavljata, da se pod vplivom časa poroznost apnenih ometov zmanjšuje.

Na poroznost gradbenih materialov lahko skozi čas vpliva okolje s kemičnimi in mehanskimi procesi (Stefanidou, 2010, Thomson in sod., 2004b). Porozni gradbeni materiali so izpostavljeni različnim okoljskim pogojem. Zaradi kapilarnega srka absorbirajo vodo z vodotopnimi solmi oziroma imajo pomembno vlogo pri transportu vlage, kar je povezano z obstojnostjo oziroma propadanjem materialov.

Prepustnost materiala je definirana z volumnom tekočine, ki preide skozi enoto površine materiala v enoti časa in je odvisna od medsebojno povezanih por, njihove geometrije in volumskega deleža.

Glede na velikost in nastanek lahko pore v apnenih maltah razdelimo na (Thomson in sod., 2004a) (slika 4.14):

- makro pore; zračne pore (votlinice), ki imajo neposreden vpliv na trdnost materiala, in kapilarne pore, ki vplivajo na lastnosti prepustnosti materiala;
- mezo pore in mikro pore; gelne pore, odgovorne za absorpcijo.



Slika 4.14: Velikost por; gelne pore, kapilarne pore in zračne pore (Thomson in sod., 2004a: str. 77).

Figure 4.14: Pore size classification. The pore ranges of sorption, capillary and coarse pores are illustrated (Thomson et al., 2004a: p 77).

Gelne pore so v maltah na osnovi apna prisotne samo v vezivu, so manjše od $1 \mu\text{m}$ in so v omejenem številu. Formirajo se v notranjosti kristalne mreže apnenega veziva in so del trdnega skeleta. Gelne pore so majhne in različnih oblik. Število in ureditev teh por vplivata na obstojnost kristalne mreže in na njeno razpadanje. Pomembno vplivajo na krčenje veziva.

Kapilarne pore, velikosti od $0,1$ do $100 \mu\text{m}$, se formirajo v matrici veziva in nastanejo v: procesu karbonatizacije; procesu sušenja; med izhlapevanjem vode v procesu strjevanja (Thomson in sod., 2004b). Na kapilarno poroznost materiala lahko vplivata razmerje vezivo : polnilo in vodovezivno razmerje. Višje vodovezivno razmerje in nižji delež dodanega polnila vplivata na višjo končno poroznost (Thomson in sod., 2004b).

Na poroznost injekcijskih mešanic vpliva absorpcija okoliškega ometa. Injekcijski mešanici na stiku z ometom z visoko stopnjo absorpcije se stopnja končne poroznosti zmanjša, v primerjavi z mešanico na stiku z ometom nižje sposobnosti absorpcije vode.

Kapilarne pore predstavljajo velik del por v malti in imajo vpliv na prepustnost. Voda v kapilarah je gibljiva, pri čemer je kapilarni srk ključni transportni mehanizem (Hanzic in sod., 2005).

Makro ali zračne pore velikosti nad 100 μm do nekaj milimetrov imajo zelo velik vpliv na trdnost in obstojnost apnenih malt. Zračne pore in razpoke se načeloma formirajo (Thomson in sod., 2004a):

- z vnašanjem zraka med mešanjem mase in nezadostnim zgoščanjem med vgrajevanjem apnene malte. Zračne pore lahko najdemo na stiku z agregatom ali v matrici veziva. Na stenah zračnih por se lahko pojavijo razpoke, ki omogočajo lažji prehod zraka ali vode;
- z načrtnim vnosom z aeranti (po navadi so okrogle oblike);
- razpoke, nastale zaradi krčenja mase.

Razpoke so posledica krčenja ali različnega deformiranja različnih komponent malte med sušenjem materiala. Razpoke, nastale zaradi krčenja, se povečajo v primeru večje količine vode v malti. Razpoke so nepravilno orientirane v apneni strukturi. Makro razpoke prispevajo k povišanju vsebnosti vode in poslabšanju mehanskih lastnosti.

Pore v trdni snovi so lahko odprte ali zaprte. Odprte pore, ki so medsebojno povezane, dovoljujejo transport tekočin in plinov. So torej prepustne in imajo običajno stik z okolico. Zaprte pore so izolirane v strukturi, zmanjšujejo gostoto snovi, transport tekočin po njih pa ni možen.

Kombinacija odprtih in zaprtih por je popolna poroznost materiala.

Poroznost injekcijskih mešanic smo določali po standardu SIA 262/1, dodatek A, 2008. Stopnja skupne poroznosti je določena po enačbi (4.5), stopnja kapilarnih por po enačbi (4.6) in zračnih por po enačbi (4.7):

$$n = \frac{m_{TOTo} - m_{110}}{\rho_w V_E} 100 \quad (4.5)$$

kjer je n stopnja skupne poroznosti (%), m_{TOTo} masa mokrega vzorca po izsesanem zraku iz eksikatorja (g), m_{110} masa suhega vzorca po končanem testu (g), ρ_w gostota vode (g/cm^3) in V_E volumen preskušanca (cm^3).

$$U_E = \frac{m_{Eo} - m_{110}}{\rho_w V_E} \quad (4.6)$$

kjer je U_E stopnja kapilarnih por (%), m_{Eo} masa mokrega vzorca po 96-ih urah potopitve v vodi (g), m_{110} masa suhega vzorca po končanem testu (g), ρ_w gostota vode (g/cm^3) in V_E volumen preskušanca (cm^3).

$$LP = n - U_E \quad (4.7)$$

kjer je LP stopnja zračnih por (%), n stopnja poroznosti (%) in U_E stopnja kapilarnih por (%).

V preglednici 4.17 so za injekcijske mešanice podane vrednosti skupne poroznosti ter delež kapilarnih in zračnih por.

Preglednica 4.17: Stopnja poroznosti injekcijskih mešanic pri starosti 90 dni negovanja.

Table 4.17: Porosity characteristics of injection grouts at the age of 90 days.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Stopnja skupne poroznosti (%)	Stdev (%)	Relativna napaka (%)	Stopnja kapilarnih por (%)	Stdev (%)	Relativna napaka (%)	Stopnja zračnih por (%)	Stdev (%)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	45	1	2	44	1	2	2	0	12
L ₁ S ₃ PCE	40	1	2	38	1	3	2	1	34
L ₁ S ₂ B ₁	49	2	4	44	1	1	5	2	39
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	42	2	4	40	0,4	1	2	1	71
L ₁ S ₁ B ₂	50	1	2	42	0,4	1	9	1	10
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	48	1	1	38	0,2	1	9	1	6
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	41	2	5	35	1	2	5	2	43
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	46	1	1	44	0,4	1	2	0	3
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	41	0,4	1	38	1	2	3	0	8
RC	37	2	6	35	2	6	2	0	15

Vloga poroznosti pri mešanicah je pomembna z vidika transporta vlage, mehanskih lastnosti ter obstojnosti in kompatibilnosti z ostalimi gradbenimi materiali.

Avtorji Arandigoyen in sod. (2005) ugotavljajo, da ima enega od večjih vplivov na poroznost in obstojnost injekcijskih mešanic količina dodane vode in posledično vodovezivno razmerje, s tem količina vode v mešanici vpliva na razvoj trdnosti injekcijskih mešanic. Do podobnih ugotovitev sta prišli avtorici Papayianni in Stefanidou (2001), ki navajata, da na poroznost vplivajo vrsta uporabljenega veziva in agregata (granulacija, oblika zrn) ter razmerje vezivo : agregat. Isti avtorici ugotavljata, da imajo stare apnene malte večinoma okrogle pore in razpoke, z visoko stopnjo odprte poroznosti 20–40 %.

Avtorji Balen in sod. (2005) navajajo, da se morata poroznost in velikost por novih in starih ometov ujemati, kolikor je le mogoče, saj to pripomore h kompatibilnosti transportnih lastnosti in izloči vpliv meje med novimi in starimi materiali.

Minimalni pogoj odprte (kapilarne) poroznosti je bil postavljen na 20 %.

Glede na rezultate v preglednici 4.17 so vse mešanice presegle vrednost kapilarne poroznosti 20 %, saj se vrednosti gibljejo med 35 in 44 %.

Iz rezultatov v preglednici (4.17) je razvidno, da na stopnjo poroznosti vplivata delež ultralahkega polnila in vodovezivno razmerje. Mešanice z večjim deležem ultralahkega polnila imajo višjo stopnjo poroznosti, delež kapilarnih por in zračnih por.

Višjo stopnjo skupne poroznosti, nad 45 %, so dosegle mešanice brez superplastifikatorja ($L_1 S_3$, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_1 B_2$ in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$). Iste mešanice so dosegle višjo stopnjo poroznosti tudi zaradi razpok, nastalih pri sušenju.

Mešanicam $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PPh in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE se je z dodajanjem superplastifikatorja posledično zmanjšala količina zmesne vode, kar seveda vpliva na zmanjšanje skupne poroznosti in vsebnosti kapilarnih por.

Med razvitimi mešanicami je najnižjo stopnjo skupne poroznosti, 40 %, in deleža kapilarnih por, 38 %, dosegla mešanica $L_1 S_3$ PCE. Stopnja poroznosti se pri mešanicah s PCE superplastifikatorjem zvišuje na račun dodajanja ultralahkega polnila.

Referenčna mešanica RC je dosegla najnižjo stopnjo skupne poroznosti, 37 %, in najmanjši delež kapilarnih por, 35 %.

Kapilarna poroznost se formira iz prostorov, v katerih se je nahajala voda, dodana ob mešanju injekcijskih mešanic. Ko je ob sušenju in karbonatizaciji voda izhlapela, so ostale prazne povezane pore (Arandigoyen in sod., 2005, Sahu in sod., 2004).

Injekcijske mešanice brez superplastifikatorja z višjim vodovezivnim razmerjem imajo višjo vsebnost kapilarnih por, od 42 do 44 %. Delež kapilarnih por v mešanicah s superplastifikatorjem je od 35 do 40 %.

Razlika med skupno poroznostjo in stopnjo kapilarnih por je delež zračnih por, v katerih je ujet zrak. Zračne pore so nepravilnih oblik in njihov delež lahko predstavlja do 8 %, glede na poroznost apnenih ometov (Thomson in sod., 2004b).

Stopnja zračnih por v posameznih mešanicah se giblje od 2 do 9 %. Delež zračnih por, manjši od 8 %, so dosegle mešanice brez ali z manjšim deležem ultralahkega polnila, $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE in RC. Mešanice z večjim deležem ultralahkega polnila, $L_1 S_1 B_2$, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PPh, imajo delež zračnih por nad 8 %.

Na povišanje stopnje zračnih por lahko vpliva ultralahko polnilo samo ali njegov vpliv na zajemanje zraka med mešanjem. Poleg tega ne smemo zanemariti tudi vpliva vrste mešalca. Mešanice smo v tem sklopu pripravili s kuhinjskim mešalnikom, ki ima oblikovane metlice za vnašanje zraka v maso.

V referenčnem vzorcu RC je delež zračnih por 2 %.

4.3.3 Koeficient kapilarnega srka vode

Lastnosti kapilarnega vpivanja vode strjenih injekcijskih mešanic morajo biti podobne kot pri poroznih apnenih ometih, da se zagotovi homogeno prehajanje vode skozi različne sloje materialov. S tem se prepreči lokalno nabiranje vode v določenih conah poroznega materiala, kar je pogost vzrok za pospešeno degradacijo originalnih materialov (Arizzi in Cultrone, 2014).

Večina poškodb na stenskih slikah je povezanih s prisotnostjo vode, ki prodira v gradbene materiale z absorpcijo. Nekateri procesi propadanja pripomorejo k povečanju kapilarnega vpivanja vode.

Koeficient kapilarnega vpivanja vode po 24-ih urah smo določili po priporočilu RILEM št. testa II.6 (RILEM, 1980b) in enačbi (4.8):

$$A = \frac{m}{\sqrt{t}} \quad (4.8)$$

kjer je A koeficient kapilarnega srka vode ($\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$), m kapilarni srk na enoto površine (kg/m^2) in t čas, ki ga podamo v minutah.

V preglednici 4.18 so podane vrednosti koeficienta kapilarnega srka mešanic po 24-ih urah s pripadajočo vrednostjo kapilarnega srka. Na sliki 4.15 pa so podane razlike med začetno maso preskušanca in maso preskušanca, določeno v različnih časovnih intervalih, in sicer 0 min (suh vzorec), 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, po dveh urah, treh urah, 4-ih urah, 5-ih urah, 6-ih urah in po 24-ih urah.

Preglednica 4.18: Rezultati meritev kapilarnega srka (kg/m^2) s pripravljajočim koeficientom kapilarnega srka ($\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$).

Table 4.18: Results of water absorption (kg/m^2) with water absorption coefficient ($\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$).

Oznaka mešanice /formulacija mase	Kapilarni srk po 24-ih urah (kg/m^2)	stdv (kg/m^2)	Relativna napaka (%)	Koeficient kapilarnega srka po 24-ih urah ($\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$)
L ₁ S ₃	19,1	0,7	3	0,5
L ₁ S ₃ PCE	17,6	1,0	5	0,5
L ₁ S ₂ B ₁	17,4	0,6	3	0,5
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	16,8	0,8	4	0,4
L ₁ S ₁ B ₂	17,2	0,2	1	0,5
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	16,0	0,2	1	0,4
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	15,0	0,3	2	0,4
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	18,0	0,5	3	0,5
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	17,0	0,7	4	0,5
RC	11,2	3,2	29	0,3

Pri izbiri ustreznih injekcijskih mešanic je predhodno dobro poznati lastnosti odstopljenih apnenih ometov stenskih poslikav.

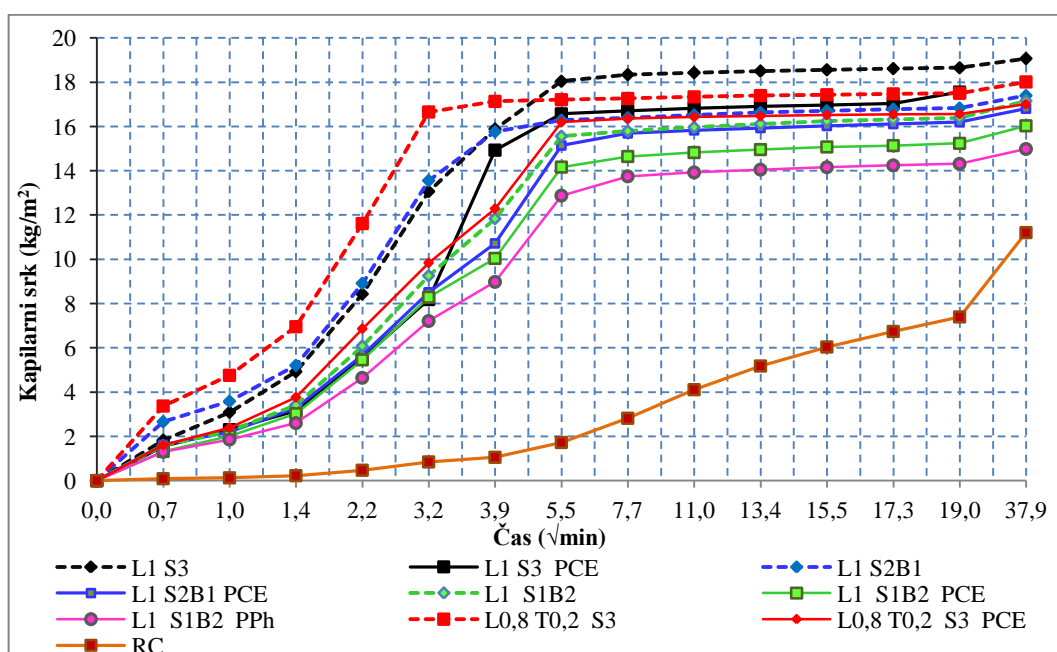
V raziskavi avtorja Valek in Matas (2010) ugotavljata, da apneni ometi na osnovi hidratiziranega apna dosežejo vrednosti koeficienta kapilarne srka od 0,9 do 3,0 kg/(m²√min), medtem ko apneni ometi na osnovi apnenega testa dosežejo vrednosti med 2,0 in 3,5 kg/(m²√min).

Splošno usmeritev glede lastnosti novih apnenih malt in ometov za popravilo historičnih zgradb podaja avtorica Veiga (2012) in navaja vrednosti koeficienta kapilarne srka med 1,0 in 1,5 kg/(m²√min) po 24-ih urah. Glede na usmeritve lahko ugotovimo, da naj bi apnene injekcijske mešanice dosegle podobne vrednosti koeficienta kapilarne srka kot apneni ometi.

Za vse obravnavane mešanice, L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L_{0,8}T_{0,2} S₃ in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE, se vrednosti koeficienta kapilarne srka po 24-ih urah gibljejo v območju med 0,3 in 0,5 kg/(m²√min). Vrednosti koeficienta kapilarne srka mešanic so pod predpisanimi vrednostmi za apnene malte, ki se gibljejo od 1,0 do 1,5 kg/(m²√min), če upoštevamo podatke v Veiga, 2012.

Najnižjo vrednost koeficienta kapilarne srka je dosegla mešanica RC z 0,3 kg/(m²√min).

Nižje vrednosti koeficienta kapilarne srka po preteku 24-ih ur dosegajo mešanice z dodanim PCE superplastifikatorjem, med 0,4 in 0,5 kg/(m²√min), medtem ko dosegajo mešanice brez superplastifikatorja vrednost 0,5 kg/m²√min.



Slika 4.15: Rezultati meritve kapilarne srka injekcijskih mešanic v različnih časovnih obdobjih.

Figure 4.15: Results of water absorption in different time periods.

Vse zasnovane mešanice so dosegle vrednosti kapilarnega vpivanja vode po 24-ih urah med 16,0 in 19,1 kg/m².

Največjo sposobnost kapilarnega vpivanja vode ima mešanica L₁ S₃, in sicer 19,1 kg/m², najmanjšo pa primerjalna mešanica RC, 11,2 kg/m². Glede na hitrost vpivanja vode pri mešanici RC, prikazani na sliki 4.15, lahko zaključimo, da bi mešanica dosegla vsaj enako vrednost kapilarnega vpivanja vode kot ostale mešanice, vendar po daljšem času (več kot 24 ur).

Avtorji Jornet in sod. (2012) ugotavljajo, da so reprezentativne meritve kapilarnega srka v krajših časovnih obdobjih (večinoma že po 10-ih min), kar daje veliko zanesljivejše rezultate hitrosti absorbiranja vode s kapilarno močjo. Meritve kapilarnega srka po 24-ih urah so večinoma odvisne od debeline vzorca.

S slike 4.15 je razvidno, da mešanice brez superplastifikatorja (L₁ S₃, L₁ S₂B₁ in L₁ S₁B₂) največ vode vpijejo v času 30 min od začetka preiskave, do cca. 90 %, nato se vpivanje upočasni. Mešanica z dodanim tufom (L_{0,8}T_{0,2}S₃) 90 % vode vpije že v prvih 15-ih min, nato se vpivanje upočasni.

V zadnjih 18-ih urah se je vsem mešanicam brez superplastifikatorja masa absorbirane vode povišala le za 5 %.

Do večjih razlik prihaja pri mešanici RC na osnovi apnenega testa. S slike 4.16 je razvidno, da mešanica RC prvih 30 minut zelo počasi absorbira vodo, vpije zgolj 15 % končne mase vode. Med 6-to in 24-to uro testa se masa absorbirane vode v mešanici RC zviša za 34 %.

Rezultati kažejo, da mešanice s superplastifikatorjem (L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE in L₁ S₁B₂ PPh) po 60-ih min dosegajo cca. 90-odstotno zasičenost vzorca z vodo. Izjema je vzorec L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE, kjer je cca 90-odstotna zasičenost vzorca z vodo dosežena že po 30-ih min. V začetni fazi testiranja, v prvih 10-ih min, ne prihaja do večjih razlik v vpivanju vode med mešanici L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE, L₁ S₁B₂ PPh in L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE.

4.3.4 Ugotavljanje lastnosti za prehod vodne pare – paroprepustnost

Paroprepustnost je pojav, ko v gradbeni konstrukciji poteka difuzija vodne pare vzdolž gradienta delnega tlaka vodne pare, iz plasti z večjim delnim tlakom k plasti z manjšim delnim tlakom vodne pare (Medved, 2010). Pogoji za vzpostavitev difuzijskega toka molekul vodne pare med dvema področjema je razlika v specifični vlažnosti zraka. Ta se prekine, ko se v področjih izenačita vlažnosti zraka in delna tlaka vodne pare.

Difuzija vodne pare skozi zunanje stene je posledica razlike delni tlakov vodne pare na obeh straneh stene. Poznana sta dva primera prehoda vodne pare (Medved, 2010):

- vodna para prehaja skozi vse plasti konstrukcije, do izločanja ne pride v nobeni izmed plasti;
- vodna para se kondenzira v enem ali več slojih materialov konstrukcije.

Zaželeno je, da vodna para prehaja skozi vse plasti in uhaja iz konstrukcije, tako da ne pride do njenega zadrževanja v kateri izmed plasti stenske slike, kjer bi kondenzirala in povzročila nove poškodbe historičnega materiala.

Prav tako pa je paroprepustnost oziroma prehod vodne pare skozi gradbene materiale (injekcijske mase, kamen, opeko, omet) odvisen od mikrostrukturnih lastnosti oziroma poroznosti (velikost por in njihova oblik) materiala (Arizzi in Cultrone, 2014).

Meritve prehoda vodne pare skozi injekcijske mešanice smo izvajali po standardu ISO 12572:2000, z metodo čaš in kalcijevim kloridom (CaCl_2).

Analize se izvajajo v klimatiziranem prostoru (komori) s konstantno relativno vlago $50 \pm 5 \%$ in temperaturo $22 \pm 1^\circ\text{C}$. Zaradi razlike parnih tlakov (986 Pa) se prične difuzija vodne pare skozi injekcijske mešanice. Vodna para je difundirala iz komore, kjer je višja relativna zračna vlažnost, v čašo z nižjo vlažnostjo zraka. Preiskava je trajala 24 dni oziroma toliko časa, da se je vzpostavil stalen difuzijski tok vodne pare.

Difuzijska upornost prehoda vodne pare μ je določena z enačbo (4.9):

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (4.9)$$

kjer je μ difuzijska upornost prehoda vodne pare z enoto 1, δ_a difuzijski koeficient vodne pare v zraku ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$) in δ difuzijska prepustnost materiala za vodno paro ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$).

Difuzijska upornost prehoda vodne pare μ se uporablja za merjenje prepustnosti gradbenih materialov na difuzijski tok molekul vodne pare in je brezdimenzijsko število. Je snovna lastnost materiala, ki pove, kolikokrat je difuzijski upor v zidu večji kot je ta upor v zračni plasti enake debeline (difuzijski upor zraka je 1). Višja kot je vrednost μ , večja je parozapornost materiala.

Vendar samo difuzijska upornost prehoda vodne pare μ ne zadostuje za opis neprepustnosti za difuzijo vodne pare posameznih plasti materialov oziroma samega materiala. Za boljše razumevanje stopnje odpornosti na difuzijo vodne pare morata biti poznana tako vrsta materiala kot njegova debelina.

Z metodo suhih čaš (»dry cup«) je ocenjena sposobnost difuzije oziroma prepustnosti vodne pare skozi strjeno injekcijsko maso pri nižji relativni zračni vlažnosti. Rezultati za difuzijsko upornost (μ) so podani v preglednici 4.19.

Preglednica 4.19: Difuzijska upornost (μ).**Table 4.19:** Factor of resistance to water vapour diffusion (μ).

Oznaka mešanice /formulacija mase	μ (-)	Stdv (-)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	14	0	3
L ₁ S ₃ PCE	16	0	7
L ₁ S ₂ B ₁	15	1	10
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	15	0	6
L ₁ S ₁ B ₂	11	1	7
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	12	0	2
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	13	0	4
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	11	0	5
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	15	0	6
RC	20	0	4

Difuzija vodne pare skozi strjene mešanice mora odgovarjati originalnim materialom oziroma historičnim apnenim ometom, da se zagotovi kompatibilnost in nemoten prehod vodne pare skozi vse plast. V nasprotnem primeru pride do kondenzacije vodne pare v/na notranjih sekundarnih površinah injekcijskih mešanic.

Zato je potrebno upoštevati paroprepustne lastnosti historičnih materialov, ki imajo dokaj visoko stopnjo difuzijskega prehoda vodne pare skozi omete.

Iz rezultatov je razvidno, da mešanice brez superplastifikatorja dosežejo nižje vrednosti oziroma so bolj paroprepustne, $\mu = 11$ do 15. Višjo difuzijsko upornost prehoda vodne pare dosežejo mase z dodanim superplastifikatorjem $\mu = 12-16$.

Najvišjo stopnjo parozapornosti dosega primerjalna mešanica RC, $\mu = 20$.

4.3.5 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost je ena od pomembnejših lastnosti strjenih injekcijskih mešanic, saj se uporabljajo kot vezni element odstopljenih plasti ometov stenskih slik. Poleg tlačne trdnosti je za injekcijsko mešanico pomembna tudi duktilnost. V primeru sistematičnega zapolnjevanja zračnih žepov odstopljenih plasti ometov so lahko mehanske lastnosti injekcijske mešanice boljše kot mehanske lastnosti obstoječega veziva v ometu, kar vpliva na povečanje togosti celotne strukture (Uranjek, 2011). Če želimo ohraniti do neke mere duktilno obnašanje historičnih ometov, ki jih utrjujemo, se morajo tlačne trdnosti injekcijskih mešanic gibati v okvirih tlačnih trdnosti obstoječih historičnih veziv.

Na tlačno trdnost injekcijskih mas vplivajo: starost vzorcev, delež zračnih por, sestava injekcijske mešanice, pogoji nege, vrsta polnila, stopnja karbonatizacije, vodovezivno razmerje itd.

Preiskavo tlačne trdnosti smo izvedli po standardu EN 1015-11:1999 pri starosti 90 in 365 dni, tlačna trdnost pa je določena po enačbi (4.10)

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (4.10)$$

kjer je f_c tlačna trdnost preskušanca (MPa), F maksimalna dosežena sila (kN) in A obremenjena površina preskušanca (mm²).

Glede na zahtevo po ohranitvi duktilnosti in mehanske kompatibilnosti s historičnimi ometi je potrebno najprej preiskati mehanske lastnosti odstopljenih plasti ometov, na podlagi katerih je nato mogoče določiti kriterije mehanskih lastnosti injekcijskih mešanic.

Avtorji Biçer-Simsir in sod. (2009) predlagajo, da morajo mešanice doseči podobno ali manjšo tlačno trdnost od originalnih odstopljenih historičnih ometov. Tavares in sod. (2010) prav tako predlagajo, da naj bo tlačna trdnost injekcijskih mas 60 % tlačne trdnosti odstopajočih plasti ometov ali manj.

Za medsebojno primerjavo analiziranih mešanic smo kriterij tlačne trdnosti povzeli po Veiga (2012), ki predlaga tlačne trdnosti v razponu od 0,4 do 2,5 MPa. Tlačne trdnosti mešanic so podane v preglednici 4.20.

Preglednica 4.20: Rezultati preiskav tlačne trdnosti injekcijskih mešanic pri starosti 90 in 365 dni.

Table 4.20: Compressive strength of injection grouts at the age of 90 and 365 days.

Oznaka mešanice /formulacija mase	f_{c90} (MPa)	Stdev (MPa)	Relativna napaka (%)	f_{c365} (MPa)	Stdev (MPa)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	0,9	0,4	43	1,2	0,6	50
L ₁ S ₃ PCE	3,5	1,7	49	3,8	0,4	8
L ₁ S ₂ B ₁	0,6	0,1	19	0,9	0,2	22
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	1,8	0,2	12	2,1	0,6	29
L ₁ S ₁ B ₂	0,7	0,1	12	0,8	0,1	14
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	1,4	0,1	6	1,4	0,1	8
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	1,2	0,7	55	-	-	-
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	1,1	0,3	27	1,4	0,6	43
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	1,6	0,5	31	2,2	0,9	41
RC	1,1	0,2	16	3,1	1,2	37

Vsi preskušanci dosegajo vrednosti tlačnih trdnosti v območju postavljenega kriterija ($f_c = 0,6\text{--}1,8$ MPa), razen mešanica L₁ S₃ PCE, ki je presegla mejo 2,5 MPa ($f_c = 3,5$ MPa).

Mešanice brez superplastifikatorja dosegajo nižje vrednosti tlačne trdnosti, od 0,6 do 1,1 MPa, kot mešanice s superplastifikatorjem, $f_c = 1,2\text{--}3,5$ MPa.

Na nižje vrednosti tlačne trdnosti pri mešanicah brez superplastifikatorja vpliva višje vodovezivno razmerje oziroma večja količina dodane vode, ki rezultira v večji poroznosti.

Z dodajanjem superplastifikatorja se posledično zmanjša količina dodane vode in s tem poroznost strjene mešanice, kar vpliva na povečanje trdnosti mešanic od 30 do 70 %.

Velik vpliv na trdnost ima vrsta polnila, na kar opozarjata avtorja Lanas in Alvarez (2003). Na trdnost mešanic vplivajo velikost, oblika, kemična in mineraloška sestava polnila.

Tovrsten vpliv opazimo na primeru mešanic s kalcitnim polnilom, ki dosegajo do 50 % višje tlačne trdnosti od mešanic z ultralahkim polnilom.

Preskušane L₁ S₃ dosega večjo trdnost, saj vsebuje mleto kompaktno karbonatno kamnino, zrna pa so ostroroba. Poleg tega je površina zrn vsaj fino hrapava, vsako zrno pa vpije tudi nekaj vode. Posledica je dobra sprijemna trdnost med vezivom in polnilom pri kalcitnem polnilu. Po drugi strani vsebuje preskušane L₁ S₁B₂ velik delež votlih zrn ultralahkega polnila. Ultralahko polnilo z gladko, nevpojno površino zrn ima relativno slabo sprijemnost z vezivom, poleg tega pa votla zrna delujejo podobno kot zaprte pore, zmanjšajo trdnost. Zato je nižja trdnost injekcijskih mešanic z ultralahkim polnilom pričakovana.

V skladu s pričakovanji ima velik vpliv na trdnost injekcijske mešanice pucolanski dodatek tuf, ki veže s kalcijevim hidroksidom in pri tem nastaja hidravlična komponenta veziva, C-S-H gel. Zaradi C-S-H gela vezivo hitreje pridobiva na trdnosti. Kljub pucolanskemu dodatku pa je mešanica L_{0,8}T_{0,2} S₃ dosegla le za spoznanje večjo tlačno trdnost po 90-ih in 365-ih dneh (1,1 in 1,4 MPa) kot mešanica L₁ S₃ (0,9 in 1,2 MPa). Tlačne trdnosti mešanice L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE pri obeh starostih pa so bile nižje (1,6 in 2,2 MPa) kot pri mešanici L₁ S₃ PCE (3,5 in 3,8 MPa). Kar se tiče tlačne trdnosti to pomeni, da je zmanjšana količina vode zaradi uporabe superplastifikatorja bolj učinkovit ukrep kot zamenjava dela apna s tufom.

Mešanice z večjim deležem kalcitne moke in mešanice s tufom, brez in s superplastifikatorjem (L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L_{0,8}T_{0,2} S₃ in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE), dosegajo pri starosti 90 dni višjo tlačno trdnost, v območju od 0,9 do 3,5 MPa. Mešanice z večjim deležem ultralahkega polnila (L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE in S₁B₂ PPh) pa dosegajo nižjo tlačno trdnost, $f_c = 0,7-1,8$ MPa. Razmerja so enaka tudi pri starosti 365 dni.

V primeru uporabe dveh različnih superplastifikatorjev je za 12 % večjo tlačno trdnost dosegla mešanica s PCE superplastifikatorjem.

Tlačne trdnosti mešanic L₁ S₃, L₁ S₂B₁, L₁ S₁B₂ in L_{0,8}T_{0,2} S₃ dosegajo pri starosti 365 dni vrednosti $f_c = 0,8-1,4$ MPa. Pri isti starosti so tlačne trdnosti bistveno višje za mešanice s superplastifikatorjem, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE, ki dosegajo vrednosti med 1,4 in 3,8 MPa.

Primerjava tlačnih trdnosti mešanic z apnenim vezivom in PCE superplastifikatorjem, starih 90 in 365 dni, pokaže povečanje tlačne trdnosti s starostjo med 5 in 15 %. Pri primerljivih sestavah brez superplastifikatorja se povečanje giblje med 10 in 60 %.

4.3.6 Cepilna natezna trdnost

Cepilna natezna trdnost je, poleg sprijemne trdnosti, pomemben pokazatelj sposobnosti injekcijske mešanice, da zagotovi kakovostno medsebojno povezavo posameznih odstopljenih historičnih plasti ometov (Uranjek, 2008). Avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013) ocenjujeta, da sta za ovrednotenje injekcijskih mešanic, namenjenih za stabilizacijo historičnih ometov, cepilna in strižna trdnost pomembnejši od tlačne trdnosti.

Preiskavo cepilne natezne trdnosti smo izvedli po standardu ASTM C496 na 90 dni starih preskušancih. Cepilno natezno trdnost smo določili po enačbi (4.11)

$$f_{st} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (4.11)$$

kjer je f_{st} cepilna natezna trdnost preskušanca (MPa), F maksimalna dosežena sila (kN), d premer preskušanca (mm) in l dolžina preskušanca (mm).

Cepilna natezna trdnost bi morala biti enaka ali manjša trdnosti originalnih odstopajočih historičnih ometov, v izogib nastajanju novih razpok v ometu (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013). Ferragni in sod. (1984) predlagajo mejne vrednosti cepilne natezne trdnosti v razponu od 0,3 do 1,2 MPa, vendar velja kriterij za mešanice s hidravličnim apnom. Kljub temu smo za naše mešanice, čeprav so pripravljene s hidratiziranim apnom, izbrali kriterij $f_{st} = 0,3-1,2$ MPa. V preglednici 4.20 so podane vrednosti cepilne natezne trdnosti za mešanice pri starosti 90 dni.

Preglednica 4.21: Rezultati preiskav cepilne natezne trdnosti injekcijskih mešanic pri starosti 90 dni.

Table 4.21: Splitting tensile strength of injection grouts at the age of 90 days.

Oznaka mešanice /formulacija mase	f_{st} (MPa)	Stdev (MPa)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	0,07	0,02	22
L ₁ S ₃ PCE	0,16	0,04	24
L ₁ S ₂ B ₁	0,07	0,01	20
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	0,11	0,07	65
L ₁ S ₁ B ₂	0,10	0,03	34
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	0,08	0,02	20

se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 4.21

L ₁ S ₁ B ₂ PPh	0,08	0,02	20
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	0,08	0,03	35
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	0,09	0,03	27
RC	0,11	0,02	13

Niti ena testirana mešanica ni izpolnila kriterija $f_{st} = 0,3-1,2$ MPa, dosežene vrednosti se gibljejo med 0,04 in 0,16 MPa. Spodnji meji se je najbolj približala mešanica L₁ S₃ PCE z 0,16 MPa.

Tako kot pri tlačni trdnosti so mešanice dosegle višje cepilne natezne trdnosti pri večjem deležu kalcitne moke, z dodanim superplastifikatorjem in tufom (L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE), in sicer med 0,09 in 0,16 MPa.

Primerjalna mešanica RC je dosegla $f_{st} = 0,11$ MPa.

Mešanice z dodanim superplastifikatorjem so dosegle od 30 do 60 % višjo vrednost cepilne natezne trdnosti, kot mešanice brez superplastifikatorja. Izjema je sestava z večjim deležem ultralahkega polnila, kjer je cepilna natezna trdnost manjša pri mešanici s superplastifikatorjem.

4.3.7 Stopnja karbonatizacije injekcijskih mešanic

Na tlačno in cepilno natezno trdnost mešanice pomembno vpliva stopnja karbonatizacije apnenega veziva. Stopnjo karbonatizacije smo preverjali na površini razcepljenih preskušancev (po opravljenih preiskavah cepilne natezne trdnosti), starih 90 in 365 dni, s fenolftaleinskim indikatorjem (0,1 wt% v etanolu in vodi (70 + 30)).

Kjer apno še ni karbonatizirano, se površina obarva vijolično, pretežno karbonatiziran del pa ostane bel. Kot rezultat tega poskusa dobimo globino karbonatizacije preskušancev, kot je prikazano na sliki 4.16.

S slike 4.16 je razvidno, da mešanice z dodanim superplastifikatorjem in večjim deležem ultralahkega polnila dosega višjo stopnjo karbonatizacije od mešanic brez superplastifikatorja in z višjim deležem kalcitne moke.

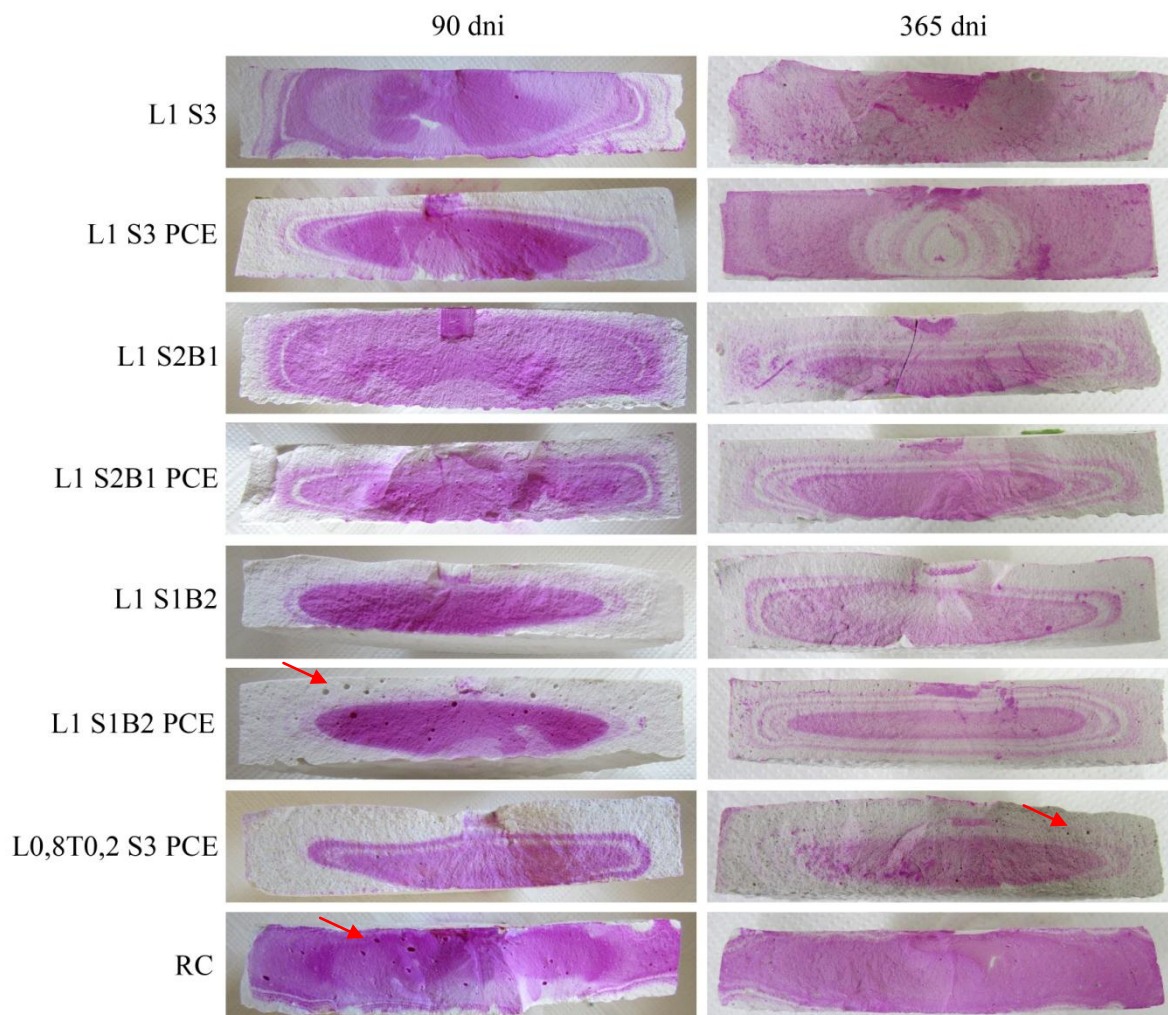
Razlike v stopnji karbonatizacije so prav tako opazne med 90 in 365 dni starimi preskušanci. Mešanice L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE po 365-ih dneh dosega višjo stopnjo karbonatizacije kot pri starosti 90 dni.

Pri mešanici RC ni večje razlike v debelini neobarvanega pasu vzdolž oboda preskušanca med starostjo 90 in 365 dni, je pa opazna razlika v odtenku vijolične barve. Pri starosti 365 dni je pH

vrednost vzorca nižja kot pri starosti 365 dni, kar kaže na potek karbonatizacije tudi v tem vzorcu. To še dodatno potrjuje izrazit porast tlačne trdnosti mešanice med 90 in 365, z 1,1 na 3,1 MPa.

Pregled površin razcepljenih valjev pokaže, da je struktura mešanic homogena in brez razpok.

Pri mešanicah L₁ S₁B₂ PCE, L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE in RC1 so opazni zračni mehurčki, ki so bili vnešeni med mešanjem s kuhinjskim mešalnikom (rdeča puščica).



Slika 4.16: Določitev stopnje karbonatizacije injekcijskih mešanic pri starosti 90 in 365 dni.

Figure 4.16: Determination of the carbonation degree of injection grouts at the age of 90 and 365 days.

4.3.8 Povzetek rezultatov in ocena mešanic tretjega sklopa

V tretjem sklopu smo analizirali devet mešanic (L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L₁ S₁B₂ PPh, L_{0,8}T_{0,2}S₃ in L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE) in dodatno primerjalno mešanico RC.

Preverjali smo naslednje lastnosti: prostorninska masa strjene mešanice, stopnje poroznosti, koeficient kapilarnega vpijanja vode, paroprepustnost ter tlačno in cepilno natezno trdnost.

Vseh deset mešanic se je, glede na rezultate preiskav in predhodno postavljene kriterije, ponovno uvrstilo v pripadajoče kakovostne razrede. Uvrstitev mešanic v posamezne razrede je prikazana v preglednici 4.22.

Za lažjo izločitev neprimernih mešanic, ki ne dosegajo zadovoljivih rezultatov, se posamezne lastnosti ocenjujejo na podlagi klasifikacije:

- zelo dobro (++), če lastnosti mešanic dosegajo nadpovprečno dobre rezultate;
- dobro (+), če lastnosti mešanic dosegajo minimalne postavljene kriterije;
- slabo (-), če dosežene lastnosti mešanic, ne dosegajo postavljenih kriterijev in
- zelo slabo (--), če so dosežene lastnosti mešanic nadpovprečno slabe.

Preglednica 4.22: Povzetek kriterijev in klasifikacija lastnosti strjenih injekcijskih mešanic.

Table 4.22: Summary of criteria and classification of hardened properties.

Oznaka mešanice /formulacija mase	ρ_{st}	n	A	μ	f_c	f_{st}
		20–40 %	1,0–1,5 kg/m ² √min	8–12	0,4–2,5 MPa	0,3–1,2 MPa
L ₁ S ₃	-	++	+	-	-	--
L ₁ S ₃ PCE	--	+	+	-	++	-
L ₁ S ₂ B ₁	+	++	++	-	-	--
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	+	++	++	-	+	-
L ₁ S ₁ B ₂	++	++	++	+	-	-
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	++	++	++	+	+	--
L ₁ S ₁ B ₂ PPh	++	++	++	-	+	--
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	-	++	+	+	+	--
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	--	+	++	-	+	-
RC	--	+	+	--	+	-

Če primerjamo lastnosti obravnavanih mešanic s postavljenimi kriteriji, vidimo, da so bile fizikalne lastnosti mešanic brez superplastifikatorja boljše kot pri mešanicah s superplastifikatorjem, predvsem na račun količine vode in s tem porznosti mešanic. Ravno nasprotno pa je pri mehanskih lastnostih, kjer so trdnosti višje pri mešanicah s superplastifikatorjem. Opravka imamo z dvema nasprotujočima si učinkoma porznosti, zato seveda ne moremo zagotoviti visoke porznosti in ustrezne porazdelitve por ter visokih trdnosti, če kot vezivo uporabimo hidratizirano apno. Rešitev je, da najdemo ravnotežje med fizikalnimi lastnostmi in trdnostmi.

Prostorninska masa strjenih mešanc je za 15–30 % nižja od prostorninske mase svežih mešanic, kar je predvsem posledica izhlapele vode. Razmerja med mešanicami pa se ohranijo. Podobno kot sveže so tudi strjene mešanice z višjim deležem kalcitne moke dosegle višjo prostorninsko maso, 1,36–1,45

g/cm^3 . Nadomeščanje kalcitne moke z ultralahkim polnilom pozitivno vpliva na zmanjšanje prostorninske mase, vrednosti se gibljejo med $0,78$ in $1,20 \text{ g/cm}^3$.

Stopnja poroznosti je pomemben dejavnik, ki vpliva na fizikalne in mehanske lastnosti injekcijskih mešanic, mora pa se ujemati kolikor je le mogoče s poroznostjo in velikostjo por apnenih ometov.

Stari apneni ometi imajo visoko stopnjo poroznosti, od 20 do 40 % (Papayianni in Stefanidou, 2001).

Pri preučevanju stopnje poroznosti posameznih mešanic smo ugotovili, da na poroznost vplivajo: vodovezivno razmerje, vrsta polnila, način priprave oziroma mešanja mešanic in način negovanja vzorcev oziroma vplivi okolja.

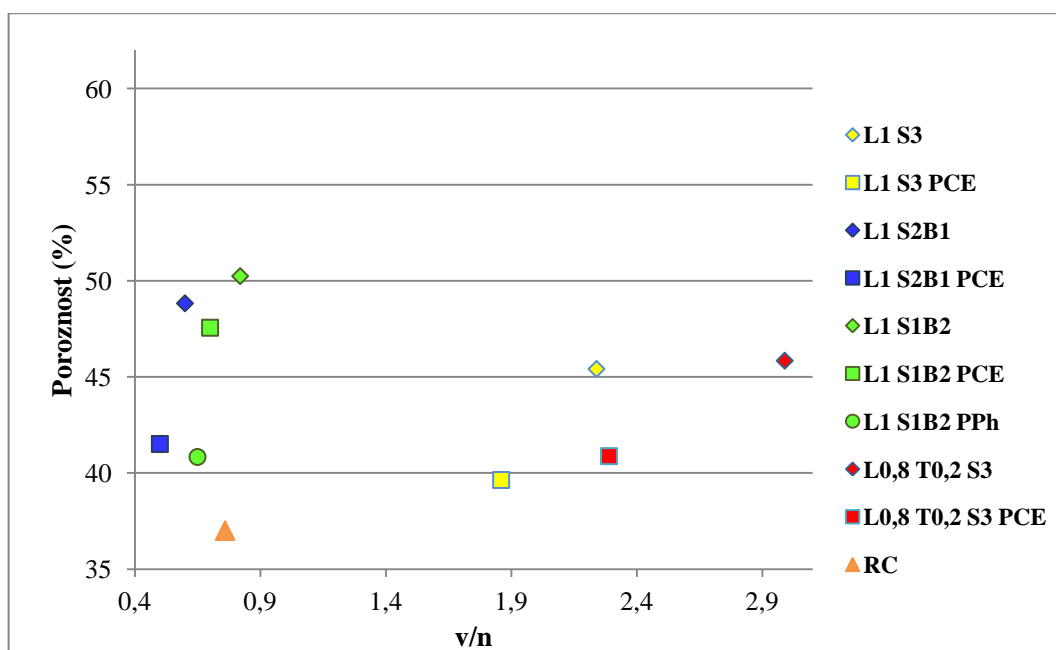
Injekcijske mešanice pri starosti 90 dni, ki so bile negovane pri temperaturi $18 \pm 1^\circ\text{C}$ in relativni vlažnosti $60 \pm 10\%$, imajo visoko stopnjo odprte poroznosti, od 37 do 50 %, in presegajo minimalno zahtevo 20 % celotne poroznosti.

Najnižjo stopnjo celotne poroznosti, 37 %, je dosegla primerjalna mešanica RC na osnovi apnenega testa in kalcitne moke.

Na sliki 4.17 je prikazano razmerje med potrebo po vodi in celotno poroznostjo mešanic.

Mešanice z višjo potrebo po vodi (v/n) oziroma brez superplastifikatorja dosegajo višjo stopnjo poroznosti (45–58 %) kot mešanice z nižjo potrebo po vodi oziroma z dodanim superplastifikatorjem (40–58 %).

Že majhna sprememba količine dodane vode lahko vpliva na poroznost.



Slika 4.17: Razmerje med potrebo po vodi (v/n) in stopnjo odprte poroznosti injekcijskih mešanic.
Figure 4.17: Relationship between water/(binder+filler) ratio and open porosity of injection grouts.

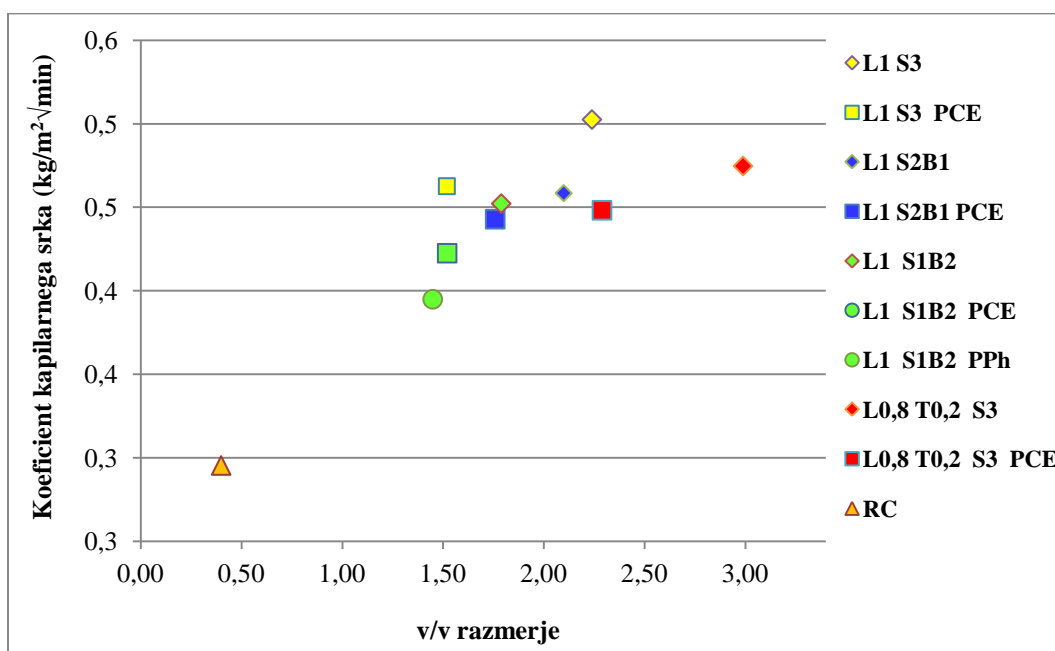
Nadomeščanje kalcitne moke z ultralahkim polnilom prav tako vpliva na poroznost mešanic (slika 4.17). Mešanice z deležem ultralahkega polnila ($L_1 S_1 B_2$, $L_1 S_1 B_2$ PCE) dosegajo do 10 % višjo stopnjo poroznosti od mešanic s kalcitno moko ($L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE). Prav tako lahko na poroznost vpliva način mešanja.

Lastnosti kapilarnega vpivanja vode strjenih mešanic so odvisne od stopnje kapilarnih por in bi morale biti primerljive z lastnostmi zgodovinskih apnenih ometov.

Ker sta stopnja kapilarnih por in verjetno tudi njihova velikost v posameznih mešanicah podobna, ne prihaja pri rezultatih koeficienta kapilarnega srka do večjih razlik med posameznimi masami (slika 4.19).

Količina vode, ki jo je vzorec vpil zaradi kapilarnega srka, je pri mešanicah brez superplastifikatorja hitro naraščala prvih 30 min, pri mešanicah s superplastifikatorjem pa prvih 60 minut. Nato se je vpivanje vode umirilo.

Na sliki 4.18 je prikazano razmerje med vodovezivnim razmerjem in koeficientom kapilarnega srka. Koeficient kapilarnega srka narašča z naraščanjem vodovezivnega razmerja mešanic.



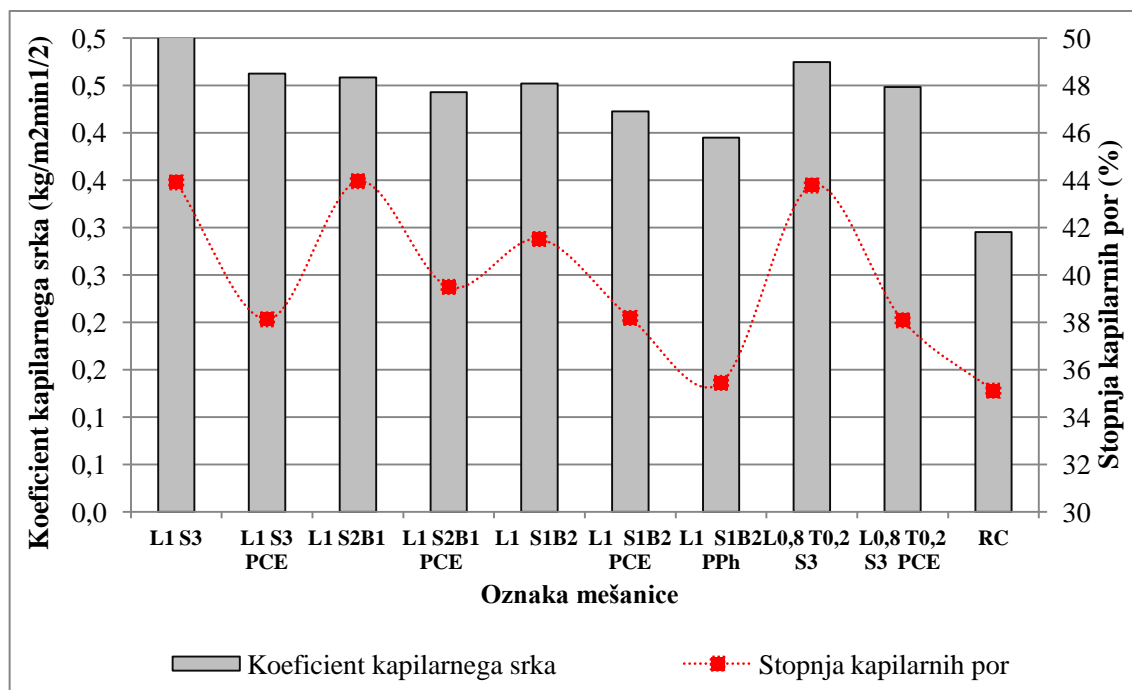
Slika 4.18: Razmerje med vodovezivnim razmerjem (v/v) in koeficientom kapilarnega srka.

Figure 4.18: Relationship between water/binder ratio and water absorption coefficient.

Razmerje med stopnjo kapilarnih por in koeficientom kapilarnega srka je prikazano na sliki 4.19. Mešanice brez superplastifikatorja dosežejo višjo stopnjo kapilarnih por in višjo vodovezivno razmerje (slika 4.18), kar povzroči da te iste mešanice dosegajo višji koeficient kapilarnega srka.

Z dodajanjem superplastifikatorja v mešanice zmanjšamo vodovozivno razmerje, kar vpliva na nižjo stopnjo kapilarnih por in nižji koeficient kapilarnega srka.

Višja končna vrednost kapilarnega srka kaže na mešanice z večjimi porami, ki so lahko podvržene hitrejšemu propadanju, zaradi lažjega vstopa škodljivih snovi v strukturo materiala.



Slika 4.19: Razmerje med stopnjo kapilarnih por in koeficientom kapilarnega srka injekcijskih mešanic.

Figure 4.19: Relationship between capillary porosity and water absorption coefficient of injection grouts.

Poznavanje termo-higrometrijskih lastnosti gradbenih materialov je pomembno za izogib nastajanju in zadrževanju kondenzirane vode med posameznimi plastmi ometov in injektiranimi sloji.

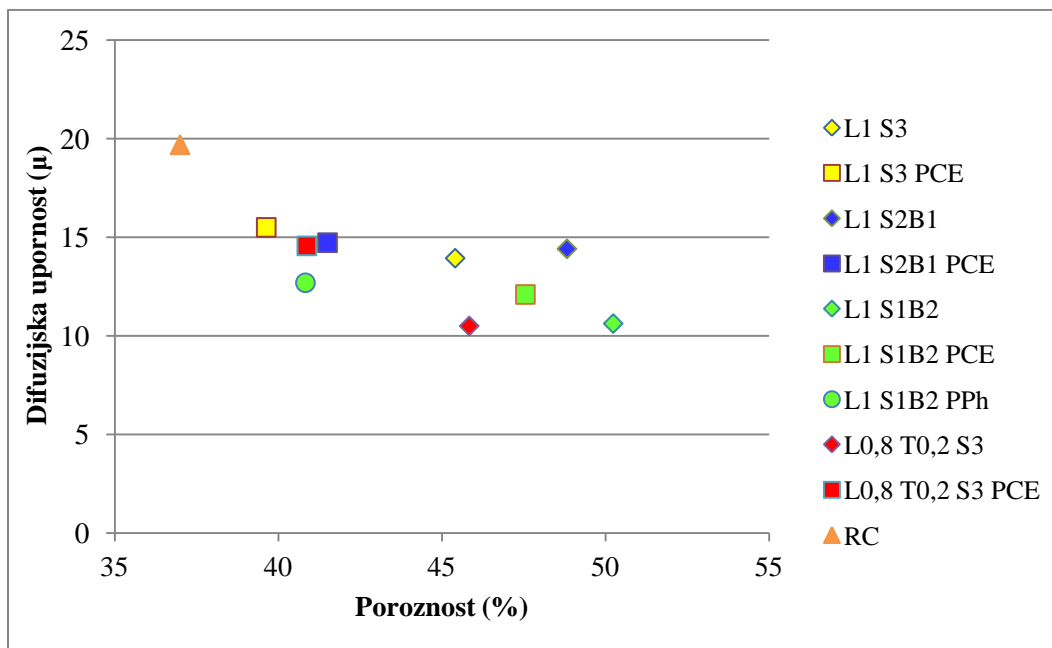
Zadrževanje vode se lahko pojavi pri procesu prehoda ali difuzije molekul vodne pare skozi konstrukcijo, zaradi okoljskih vplivov in/ali lastnosti materialov v konstrukcijskih elementih (npr. vlaga iz zraka, kapilarni dvig).

Difuzija vodne pare skozi materiale (kamen, opeka, omet) je odvisna predvsem od njihovih mikrostrukturnih karakteristik, posebej od porozne strukture posameznih materialov, in sicer od velikosti in oblike por (Arizzi in Cultrone, 2014), pa tudi od kemičnih dodatkov.

Apneni ometi običajno dosežejo vrednost difuzijske upornosti $\mu = 8-12$, (Jornet in Romer, 2008, Jornet in sod., 2012).

Injekcijske mešanice L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PPh in L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE presegajo kriterij za difuzijsko upornost do 30 %, z izjemo mešanic L₁ S₁B₂ in L_{0,8}T_{0,2}S₃.

Mešanica L₁ S₁B₂ PCE s pripadajočo vrednostjo $\mu = 12$ presega zgornjo mejo kriterija le za 2,5 %, zato privzamemo, da kriterij izpolnjuje.



Slika 4.20: Razmerje med stopnjo skupne poroznosti in difuzijsko upornostjo (μ) injekcijskih mešanic.

Figure 4.20: Relationship between open porosity and factor of resistance to water vapour diffusion (μ) of injection grouts.

Difuzijska upornost prehoda vodne pare je odvisna od poroznosti materiala, kar je razvidno na sliki 4.20. Nižja kot je stopnja skupne poroznosti, slabša je sposobnost prehajanja vodne pare skozi mešanico, ki je najslabša pri injekcijski mešanici RC. S slike 4.20 je tudi razvidno, da uporaba superplastifikatorja poslabša sposobnost prehajanja vodne pare, zaradi vpliva na poroznost.

Injekcijske mešanice, namenjene stabilizaciji odstopljenih plasti ometov stenskih slik, morajo doseči podobne oziroma manjše tlačne in cepilne natezne trdnosti, kot originalni materiali stenske slike. Iz preglednice 4.22 je razvidno, da mešanice v primeru tlačne trdnosti dosegajo postavljene kriterije, medtem ko za cepilno natezno trdnost postavljenih kriterijev ne dosegajo. Pomembno je poudariti, da so kriteriji za cepilno natezno trdnost v literaturi na voljo le za hidravlične injekcijske mešanice, ki dosegajo mnogo višje trdnosti.

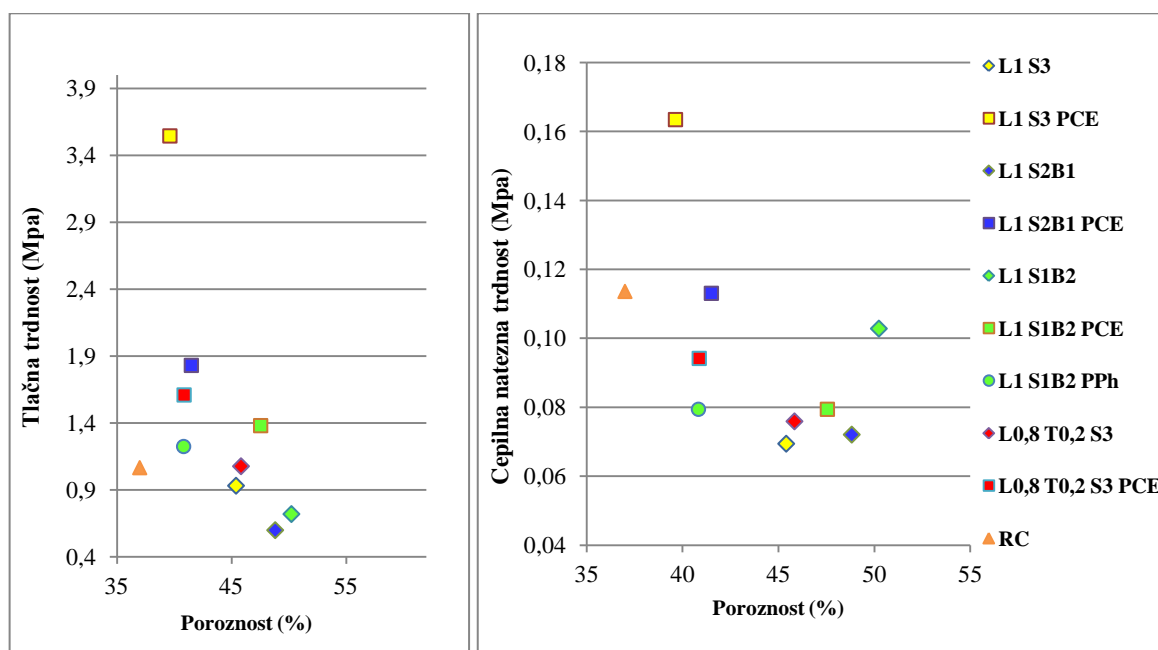
Kriterij tlačne trdnosti je povzet po kriteriju za sanacijske malte, namenjene sanaciji historičnih apnenih ometov in je v razponu od 0,4 do 2,5 MPa (Veiga, 2012). Vse mešanice dosegajo vrednosti tlačne trdnosti po 90-ih dneh v zahtevanem območju, in sicer se vrednosti gobljejo od 0,44 do 1,83 MPa. Izjema je mešanica L₁ S₃ PCE, ki je za 40 % presegla kriterij, s pripadajočo vrednostjo $f_c = 3,5$ MPa.

Po 365-ih dneh mešanice brez superplastifikatorja (L₁ S₃, L₁ S₂B₁, L₁ S₁B₂, L_{0,8}T_{0,2} S₃) dosegajo vrednosti $f_c = 0,8$ –1,4 MPa, mešanice s superplastifikatorjem (L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE) pa vrednosti $f_c = 1,4$ –3,8 MPa.

Za cepilno natezno trdnost injekcijskih mešaníc je kriterij povzet po avtorjih Ferragni in sod. (1984), ki predlagajo cepilne natezne trdnosti injekcijskih mešaníc v razponu od 0,3 do 1,2 MPa. Kot smo navedli zgoraj, veljajo ti kriteriji za hidravlične apnene mešanice. Postavljenega kriterija za cepilno natezno trdnost ni dosegla nobena mešanica. Vrednosti, ki jih mešanice dosežajo, so od 50 do 90 % nižje od spodnje meje kriterija.

Najvišjo cepilno natezno trdnost je dosegla mešanica L₁ S₃ PCE, s pripadajočo vrednostjo $f_{st} = 0,16$ MPa.

Iz posameznih rezultatov tlačne in cepilne natezne trdnosti lahko razberemo, da ima na posamezno trdnost velik vpliv vrsta uporabljenega polnila (kalcitna moka ali ultralahko polnilo), saj mešanice z višjim deležem kalcitne moke dosežejo višjo trdnost od mešaníc z višjim deležem ultralahkega polnila. Prav tako pa na trdnost vpliva dodan superplastifikator, ki posledično zmanjša vodovozivno razmerje.



Slika 4.21: Razmerje med stopnjo skupne poroznosti in tlačno trdnostjo pri starosti 90 dni (levo).

Razmerje med stopnjo skupne poroznosti in cepilno natezno trdnostjo pri starosti 90 dni (desno).

Figure 4.21: Relationship between open porosity and compressive strength at the age of 90 days (left).

Relationship between open porosity and splitting tensile strength at the age of 90 days (right).

Obstaja korelacija med celotno poroznostjo injekcijske mešanice in njegovo trdnostjo. Na sliki 4.21 je prikazano razmerje med stopnjo skupne poroznosti in tlačno oziroma cepilno natezno trdnostjo mešaníc pri starosti 90 dni. Trdnost mešaníc se manjša z višjo skupno poroznostjo.

Na podlagi opravljenih analiz v tretjem sklopu (s poudarkom na fizikalnih in mehanskih lastnostih injekcijskih mešaníc) smo za nadaljnje testiranje v četrtem sklopu (preglednica 4.22) izbrali naslednje štiri injekcijske mešanice: L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE in L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE.

Zaradi primerjave lastnosti so bile vključene v testiranje tudi pripadajoče mešanice brez superplastifikatorja, $L_1 S_3$, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_1 B_2$, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$, ter mešanica RC.

4.4 Sklop 4: Detajlne preiskave injekcijskih mešanic

V detajlne preiskave četrtega sklopa so vključene vse tiste analize, ki preverjajo specifične lastnosti injekcijskih mešanic in so ključnega pomena za zagotavljanje uspešne konsolidacije odstopljenih plasti ometov stenskih slik. V četrti sklop detajlnih preiskav so uvrščene naslednje mešanice: $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE ter RC.

Potek dela v četrtem sklopu je prikazan na shemi 4.5. Detajlne preiskave so razdeljene na tri dele.

V prvem delu se na sveže pripravljenih mešanicah preverja pretočnost in injektibilnost na podlagi standardiziranih testov. Ustrezna pretočnost in injektibilnost zagotavljata uspešno zapolnitev zračnih žepov odstopljenih plasti ometov in razpok.

Preverjali smo tudi čas sušenja/vezanja mešanic po standardizirani in nestandardizirani metodi. Čas sušenja mešanic je pomemben v primeru, ko je treba odstraniti podporni sistem, ki ga namestimo za podporo in preprečitev dodatnih poškodb med samim postopkom injiciranja in po njem.

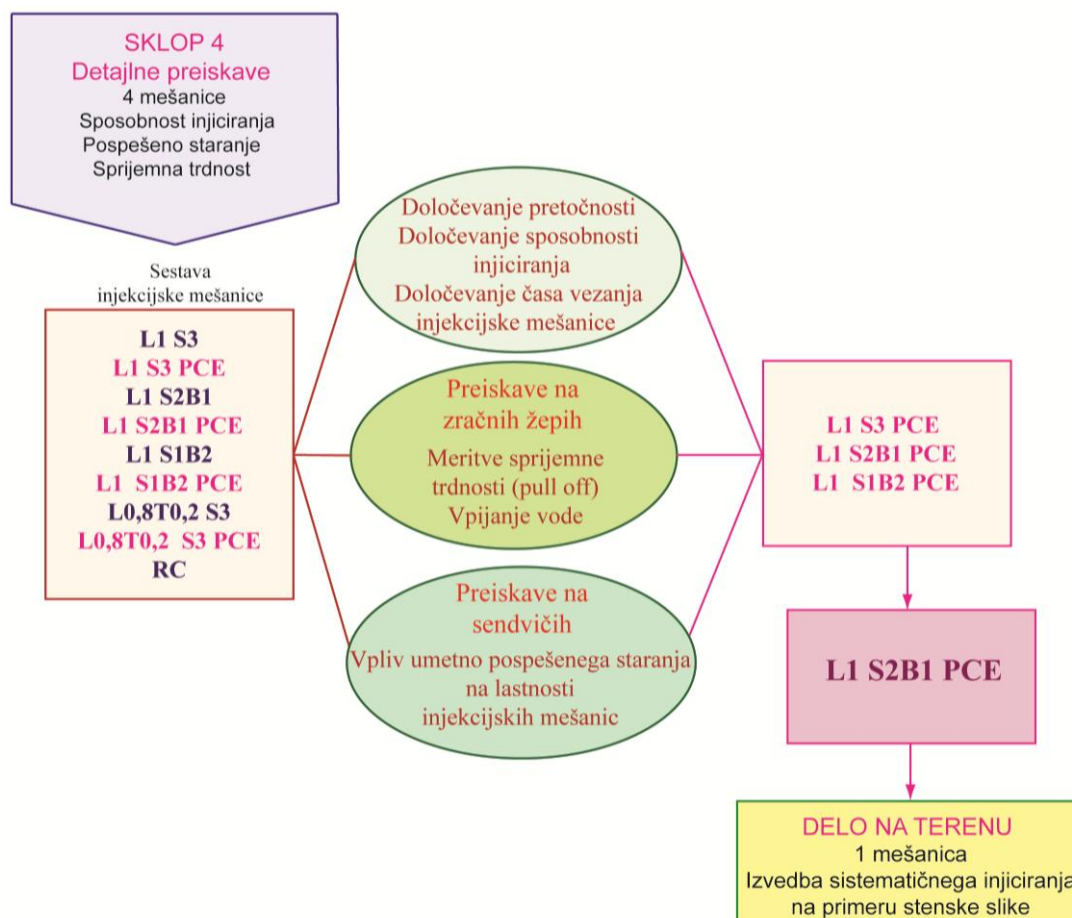
Drugi del raziskav je osredotočen na preverjanje sprijemne trdnosti mešanic na predhodno pripravljenih modelih z zračnimi žepi, ki simulirajo odstopljene plasti ometov (glej poglavje 3.5.2).

V tretjem, zadnjem delu smo preučevali vpliv staranja in vodotopnih soli na lastnosti preskušancev in sendvičev, predvsem na tlačno in sprijemno trdnost. Oboji, preskušanci in sendviči, so bili podvrženi ponavljajočim ciklom zmrzovanja/tajanja, segrevanja/ohlajanja in vlaženja/sušenja, s predhodnim namakanjem v destilirani vodi ali 3 % raztopini natrijevega klorida (NaCl).

Na podlagi dobljenih rezultatov četrtega sklopa smo kot ustrezne za nekonstrukcijsko injektiranje ovrednotili tri injekcijske mešanice, vendar je bila le ena od teh primerna za konsolidacijo odstopljenih plasti ometov stenske slike v kapelici pri Lenartu.

Shema 4.5: Potek 4. sklopa, detaljne preiskave injekcijskih mešanic.

Scheme 4.5: Planning of the 4th phase, detailed research of injection grouts.

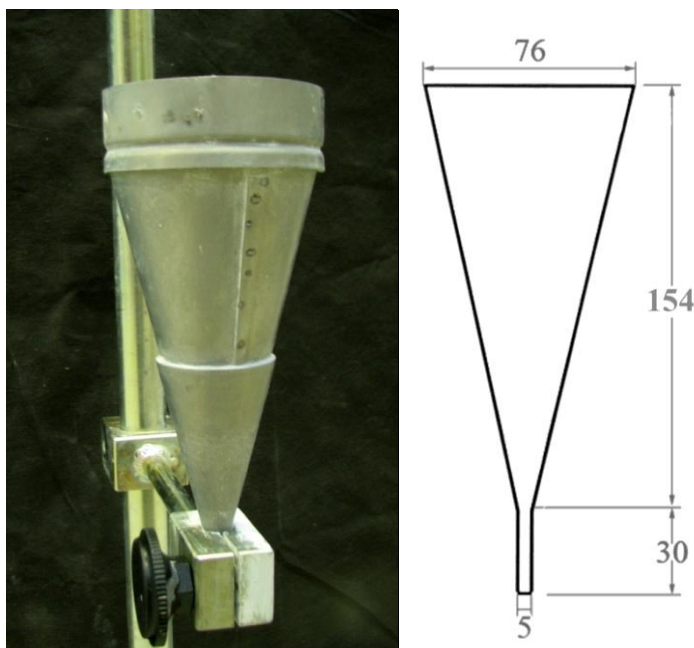


4.4.1 Pretočnosti injekcijskih mešanic

Ustrezna pretočnost mešanice je ključnega pomena za učinkovito utrditev odstopljenih plasti ometov stenskih slik in zagotavlja, da lahko zračne žepe in razpoke v ometih tudi pri morebitnih nižjih delovnih pritiskih kakovostno zapolnimo.

Meritve pretočnosti se izvajajo s pomočjo Marshevega lijaka po standardu SIST EN 445:2008, ki predvideva merjenje pretočnosti mešanic z lijakom prostornine $1,7 \text{ l} \pm 10 \%$ in velikosti spodnje odprtine 1 cm. Metoda se uspešno uporablja za ovrednotenje pretočnosti mešanic za konstrukcijsko injektiranje.

Ker se za injiciranje mešanic v zračne žepe odstopljenih plasti ometov stenskih poslikav uporabljajo bistveno manjše količine materiala kot za konstrukcijsko injektiranje (injektira se s pomočjo injekcijskih brizgalk, ki se uporabljajo v zdravstvu, praviloma s prostornino 20–60 ml), smo standardno metodo modificirali tako, da smo zmanjšali prostornino in premer spodnje odprtine lijaka. Uporabili smo modificiran Marshev lijak s prostornino 0,25 l in spodnjo odprtino premera 0,5 cm (slika 4.22).



Slika 4.22: Modificiran lijak za merjenje pretočnosti injekcijske mešanice (levo) z dimenzijami v mm (desno).

Figure 4.22: Modified Marsh cone for measuring fluidity of injection grouts (left), with dimensions in mm (right).

V preglednici 4.23 so podani rezultati pretočnosti mešanic takoj po zamešanju in po preteku 30 minut. Pri meritvah pretočnosti nismo upoštevali nobenega kriterija, saj so vsi kriteriji podani za standardne dimenzije Marshevega lijaka, ki omejujejo čas pretočnosti na ≤ 25 sekund, po zamešanju in po poteku 30 min.

Preglednica 4.23: Izmerjene vrednosti pretočnosti injekcijskih mešanic takoj po zamešanju in preteku 30 min.

Table 4.23: Measured values of fluidity of injection grouts immediately after preparation and after 30 min.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Takoj po zamešanju (s)	Po 30 min (s)
L ₁ S ₃	> 300	> 300
L ₁ S ₃ PCE	90	110
L ₁ S ₂ B ₁	360	360
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	53	60
L ₁ S ₁ B ₂	> 300	> 300
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	92	104
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	> 450	> 450
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	420	420
RC	-	-

Iz preglednice 4.23 je razvidna razlika med pretočnostjo mešanic brez in s superplastifikatorjem. Mešanice brez superplastifikatorja ($L_1 S_3$, $L_1 S_2 B_1$, $L_1 S_1 B_2$ in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$) dosegajo čas pretočnosti nad 300 s in 450 s, takoj po zamešanju in prav tako po 30-ih min.

Pretočnost mešanic se izboljša z dodajanjem superplastifikatorja. Najnižji čas pretočnosti 53 s dosega mešanica $L_1 S_2 B_1$ PCE takoj po mešanju, medtem ko najvišji čas pretočnosti dosega mešanica $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, in sicer $t = 420$ s. Ostali dve mešanici, $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE, dosežeta čas pretočnosti 90 in 92 s takoj po mešanju.

Vsem mešanicam s superplastifikatorjem ($L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE) se čas pretočnosti po 30-ih min poslabša, kar kaže bodisi na vpliv izhlapele vode na to lastnost ali pa superplastifikator s časom izgublja na učinkovitosti.

Med obema meritvama, takoj po zamešanju in po 30-ih min, je bilo pri mešanici $L_1 S_3$ PCE 18 % razlike, pri $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE pa do 12 % razlike med rezultati.

Primerjalna mešanica RC nima sposobnosti tečenja skozi lijak.

4.4.2 Določanje injektabilnosti injekcijskih mešanic

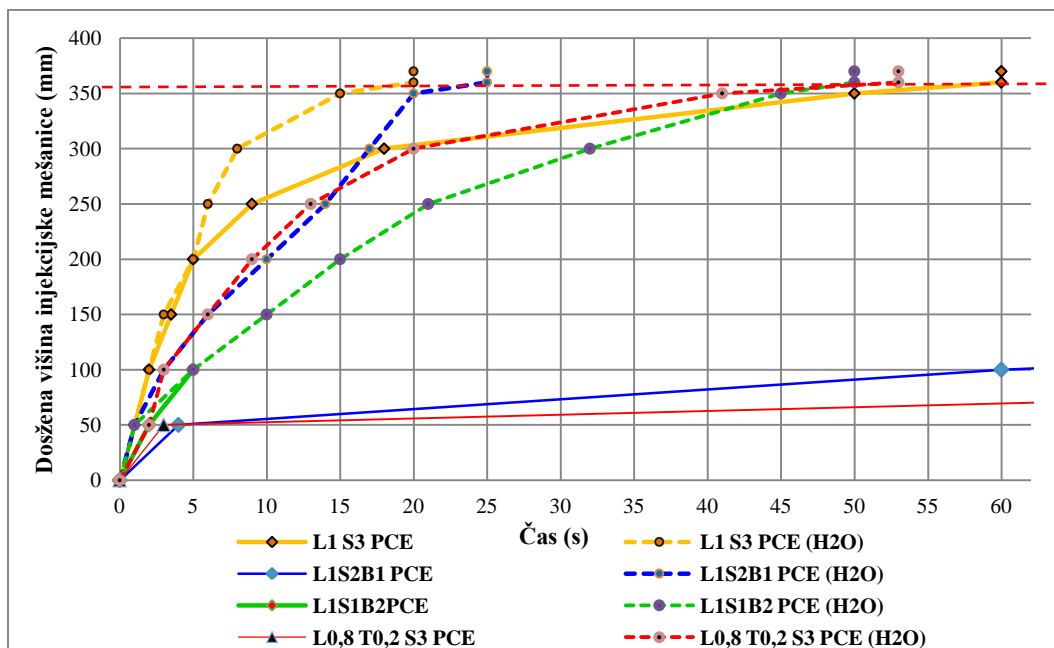
Preiskava injektabilnosti temelji na določanju sposobnosti zapolnjevanja medprostora med zrni granuliranega materiala, ki je v suhem ali predhodno omočenem stanju, pod konstantnim pritiskom. Za avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013) je injektabilnost ključna lastnost injekcijskih mešanic, ki mora biti ustrezna, če želimo, da mešanica zapolni vse razpoke in zračne žepe.

Preiskavo sposobnosti injektiranja smo izvajali skladno s standardom SIST EN 1771:2004/AC:2005, z aparatom za injektabilnost pod konstantnim pritiskom 0,075 MPa. Injiciranje je potekalo od spodaj navzgor v valjasto transparentno cev, dolžine 400 mm in premera 20 mm, napolnjeno z granuliranim suhim ali predhodno navlaženim drobljenim apnenim ometom granulacije od 2 do 4 mm. Sejalna krivulja zdrobljenega ometa je podana v poglavju 3.5.5, na sliki 3.13.

Razdaljo, ki jo injekcijska mešanica doseže v določenem času, se uporabi za grafični prikaz merjenja injektabilnosti preiskovanih mešanic.

Za preverjanje vpliva mešanja na sposobnost injiciranja smo mešanice pripravili s standardnim in s kuhinjskim mešalnikom.

Rezultati injektabilnosti mešanic $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, pripravljenih s kuhinjskim mešalnikom, so prikazni na slikah 4.23 in 4.24, za predhodno navlažen in suh drobljen apneni omet.



Slika 4.23: Injektabilnost injekcijskih mešanic, pripravljenih s kuhinjskim mešalnikom.
Figure 4.23: Injectability curves for injection grouts prepared with kitchen mixer..

Test injektabilnosti združuje simultano preverjanje pretočnosti in penetracije mešanice skozi drobljen apneni omet granulacije od 2 do 4 mm, kar predstavlja približno od 0,3 do 0,6 mm široke razpoke ali poškodbe.

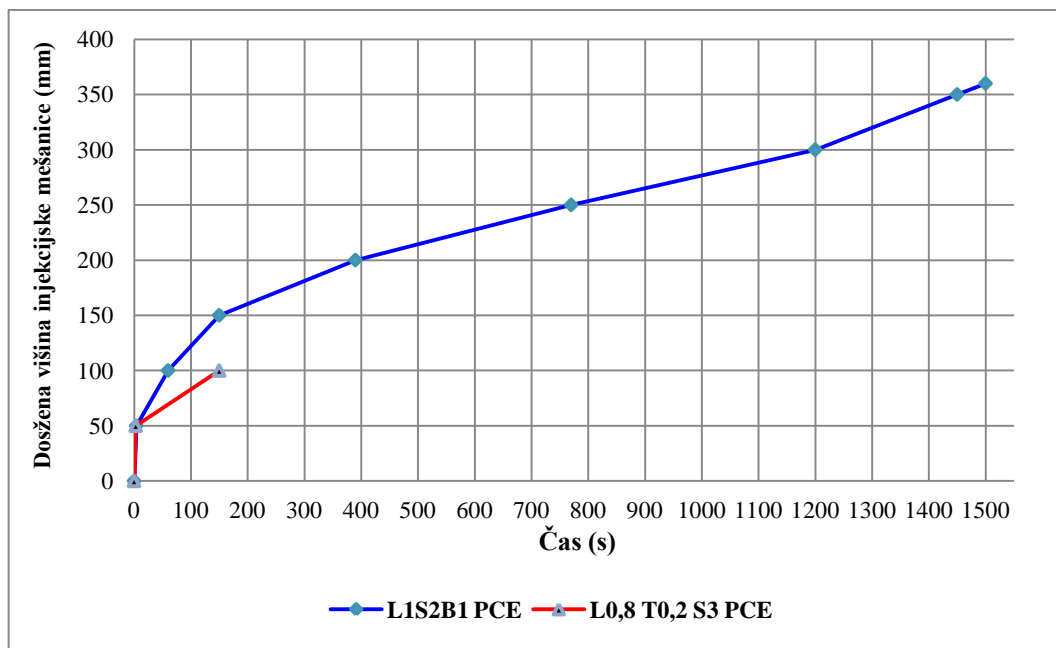
Z diagrama na sliki 4.23 je razvidno, da vse mešanice s superplastifikatorjem ($L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$ PCE in $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE) v primeru predhodne navlažitve drobljenega apnenega ometa dosežajo zgornjo mejo (360 mm – označuje mejo s črtkano črto na diagramu slike 4.23) v času med 20 in 54 sekund.

Prav tako sta mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE, injicirani v suh drobljen apneni omet, dosegli zgornjo mejo, s pripadajočima časoma 60 in 1500 sekund.

V vseh navedenih primerih so mešanice pritekale iz valja in napolnile čašo z 20 ml mešanice.

Slabše rezultate dosežata mešanici $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE, injicirani v suh drobljen omet (Slika 4.24). Mešanica $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE je dosegla višino 100 mm v 5-ih sekundah, nato se je penetriranje ustavilo.

V primeru injiciranja mešanice $L_1 S_2B_1$ PCE v suh drobljen omet je mešanica dosegla zgornji nivo 360 mm, vendar v veliko daljšem času, po 1500 sekundah.



Slika 4.24: Injektabilnost injekcijskih mešanic $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE, pripravljenih s kuhinjskim mešalnikom.

Figure 4.24: Injectability curves for injection grouts $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE prepared with kitchen mixer.

Na podlagi klasifikacije, povzete po avtoricah Biçer-Şimşir in Rainer (2013), se lahko mešanice razvrsti v tri skupine in sicer:

- $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$ PCE in $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE, injicirane v predhodno navlažen drobljen omet, in $L_1 S_3$ PCE, injicirana v suh drobljen omet, se uvrščajo v skupino E (enostavno) – dosežena predpisana višina in napolnjena 20-mililitrska čaša.
- $L_1 S_2B_1$ PCE, injicirana v suh omet, se uvršča v skupino F (izvedljivo) – z doseženo predpisano višino, vendar čaša ni napolnjena.
- $L_1 S_1B_2$ PCE in $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE, injicirani v suh omet, se uvrščata v skupino D (težavno) – ni dosežena predpisana višina.

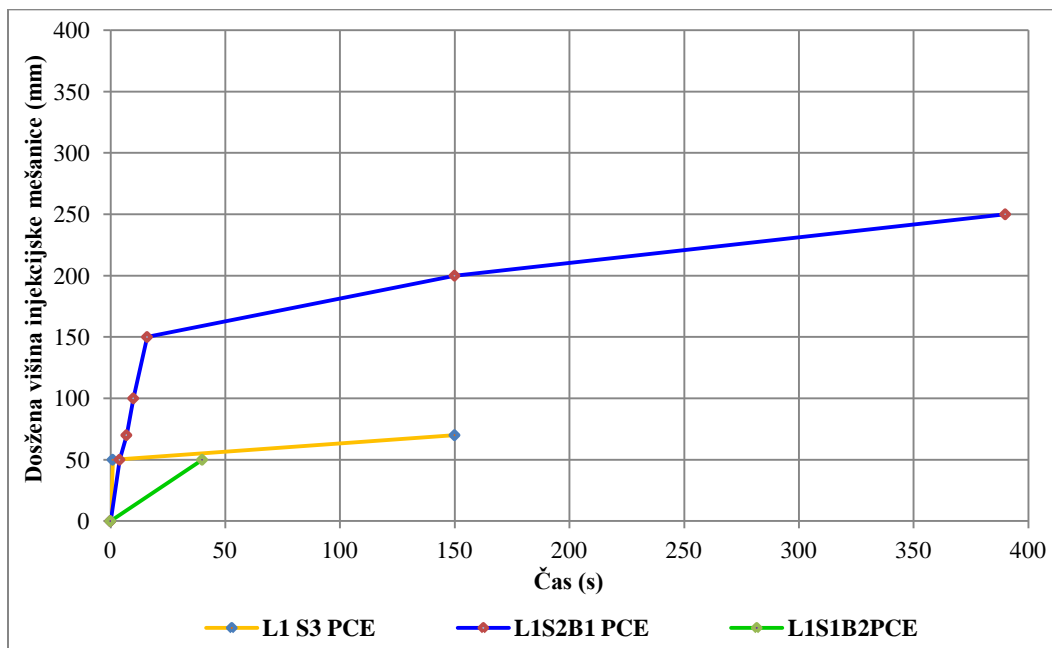
V skupino neinjektibilnosti se uvrščajo mešanice brez superplastifikatorja, saj niso bile sposobne zapolniti valja, napolnjenega z drobljenim ometom pod konstantnim pritiskom.

Na sliki 4.25 so prikazani rezultati mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE, ki smo jih zamešali s standardnim laboratorijskim mešalcem in injicirali v suh drobljen omet.

Uporaba standardnega mešalca pri pripravi mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE je vplivala na poslabšanje sposobnosti penetriranja in injektabilnosti v suh drobljen omet, kar je prikazano na sliki 4.25. Nobena mešanica ni dosegla predpisanega nivoja. Najvišjo višino 250 mm je dosegla mešanica $L_1 S_2B_1$ PCE, in to v 390-ih sekundah.

Mešanica $L_1 S_3$ PCE je dosegla višino 70 mm v 150-ih minutah in mešanica $L_1 S_1B_2$ PCE 50 mm v 40-ih sekundah.

Ugotovimo, da se z uporabo standardnega laboratorijskega mešalca vse mešanice uvrstijo v skupino D (težavno). Ta ugotovitev je izrednega pomena, saj potrjuje, da ima način mešanja ključen vpliv na lastnosti injekcijske mešanice v svežem stanju, zato je treba izbrati mešalo, ki bo omogočalo optimalno pripravo mešanice na terenu. Kuhinjski mešalnik je ena izmed možnih rešitev.



Slika 4.25: Injektabilnost injekcijskih mešanice, pripravljene s standardnim Hobart mešalnikom.

Figure 4.25: Injectability curves for injection grouts prepared with Hobart mixer.

Injektabilnost mešanic pa je lastnost, ki ni odvisna samo od lastnosti mešanice, ampak tudi od lastnosti historičnih ometov, kateri se utrjujejo.

Znano je, da sposobnost kapilarnega srka in stopnja vlažnosti poroznih materialov stenske slike pomembno vplivata na injektabilnost.

Zato smo v okviru preiskav uporabili drobljen apneni omet, z visoko stopnjo absorpcije vode, kar simulira dejansko stanje odstopljenih plasti ometov stenske slike. Koeficient kapilarnega srka drobljenega apnenega ometa po 10-ih minutah je $11 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$, stopnja njegove celotne poroznosti je 27%, delež kapilarnih por pa 26 % (poglavje 3.5.5, Preglednica 3.9).

Iz rezultatov je razvidno, da se je v primeru predhodnega vlaženja apnenega ometa injektabilnost vsem mešanice izboljšala. Predhodno vlaženje poroznega apnenega ometa namreč zmanjša srkanje vode iz injekcijske mešanice med postopkom injektiranja, kar omogoča boljšo injektabilnost.

V nasprotnem primeru, če se injicira v suh drobljen omet, se lahko injektabilnost mešanice bistveno poslabša. Taka mešanica ima slabo sposobnost zadrževanja vode v primeru delovanja visoko poroznih in vpojnih materialov.

Glede na rezultate imata mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE dobro injektibilnost tako v suhem kot tudi v predhodno navlaženem drobljenem ometu. To pomeni, da imata obe mešanici dobro sposobnost zadrževanja vode, in se ju zato lahko uporablja za utrjevanje odstopajočih plasti ometov, občutljivih na vodo. Pri takih ometih je predhodno omočenje ometa z vodo škodljivo.

Prav tako na injektibilnost vpliva način mešanja oziroma hitrost mešanja. V primeru uporabe kuhinjskega mešalnika, ki se večinoma uporablja pri pripravi mešanic na terenu, so dosežene višje hitrosti mešanja kot s standardnim laboratorijskim mešalcem (z dvema nivojema hitrosti). Mešanice, pripravljene s kuhinjskim mešalnikom dosegajo bistveno boljšo injektibilnost kot mešanice, pripravljene s standardnim laboratorijskim mešalcem.

Hitrost mešanja namreč vpliva na konsistenco injekcijskih mešanic. Višje hitrosti mešanja vplivajo na boljšo povezavo med delci veziva, polnila in molekulami vode, kar izboljša mikrostrukturo in poroznost svežih pripravljenih mešanic (Bras in Henriques, 2009).

Do podobnih ugotovitev sta prišli avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013), ki navajata, da imajo mešanice, pripravljene pri višjih hitrostih mešanja, boljšo sposobnost injektibilnosti in penetriranja, kar se je potrdilo tudi v našem primeru.

4.4.3 Določanje časa vezanja injekcijskih mešanic

Končni čas vezanja injekcijskih mešanic je posebej pomemben za področja, kjer je nujno hitro vezanje mešanic (kot so krhki ometi, oboki, večje površine zračnih žepov) ali v primeru odstranitve različnih podpornih sistemov, za preprečitev nastajanja novih poškodb med postopkom utrjevanja.

Zaželen čas vezanja naj bi se določal individualno, od primera do primera, na podlagi obstoječih razpok, zračnih žepov itd.

Določanje končnega časa vezanja injekcijskih mešanic je potekalo po modificiranem standardu SIST EN 196-3:2005, ki predpisuje uporabo koničnega kalupa zgornjega premer 65 mm, spodnjega premera 75 mm in višine 40 mm. V okviru disertacije smo modificirali dimenzije in obliko kalupa, in sicer je nov kalup valj premera 50 mm in višine 20 mm. Pomanjšan kalup se napolni z 20 ml mešanice (slika 4.26, levo).

Namesto kalupa smo vzporedno uporabili tudi apneno skodelico, ki smo jo prav tako napolnili z 20 ml injekcijske mešanice (slika 4.26, desno).



Slika 4.26: Vicatova metoda, merjenje končnega časa vezanja injekcijskih mešanic z modificiranim kalupom (levo) in apneno skodelico (desno).

Figure 4.26: Vicat method, measuring the final setting time of injection grouts with modified mould (left) and mortar cup (right).

Končni čas vezanja mešanic $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE je prikazan na sliki 4.27, po standardiziranem postopku s prilagojenim kalupom ter z apneno skodelico.

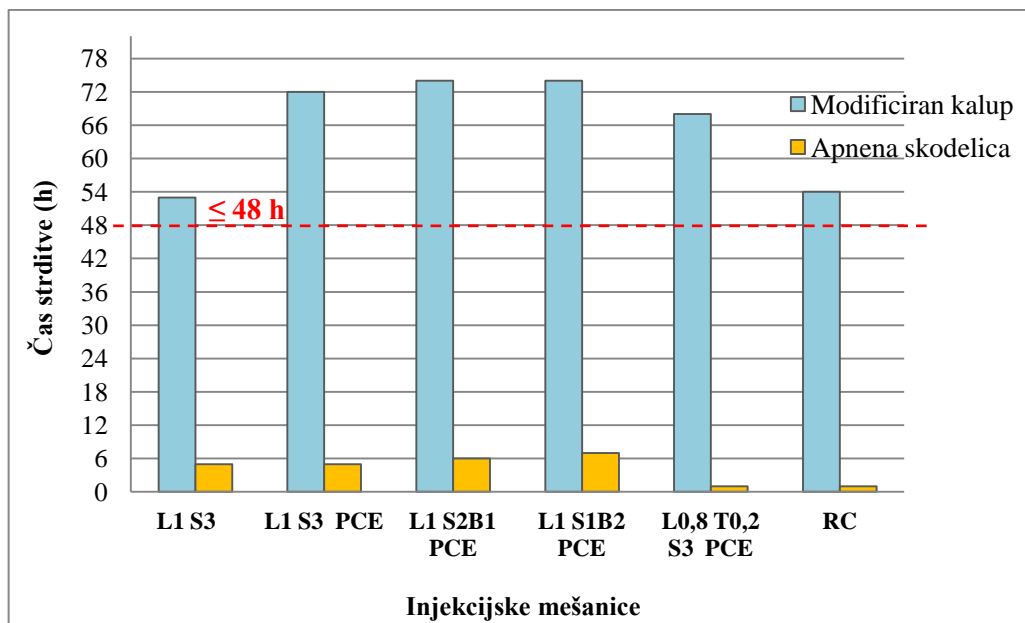
Avtorji Ferragni in sod. (1984) predlagajo kriterij za konec vezanja injekcijskih mešanic, in sicer v ≤ 48 -ih urah. Ta kriterij smo privzeli tudi v okviru naših preiskav.

Glede na postavljeno zahtevo se nobena od testiranih mešanic, $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE in RC, ni posušila/zvezala znotraj časovnega okvirja 48 ur, ko smo uporabili nevpojen kalup. Kriterij je bil presežen za 5 do 26 ur. Najdaljši končni čas vezanja 74 ur sta dosegli mešanici $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE, medtem ko je mešanica $L_1 S_3$ potrebovala za vezanje 53 ur.

Merjenje končnega časa vezanja z Vicatovo metodo za mešanice, vgrajene v apnene skodelice, pokaže, da se mešanice posušijo/zvežejo v krajšem času kot po metodi s prilagojenim kalupom.

Na krajši čas vezanja vpliva porozen apneni omet skodelic, ki absorbira vodo iz mešanic in s tem pospeši vezanje. Mešanice v apnenih skodelicah za sušenje/vezanje potrebujejo od 1 do 7 ur.

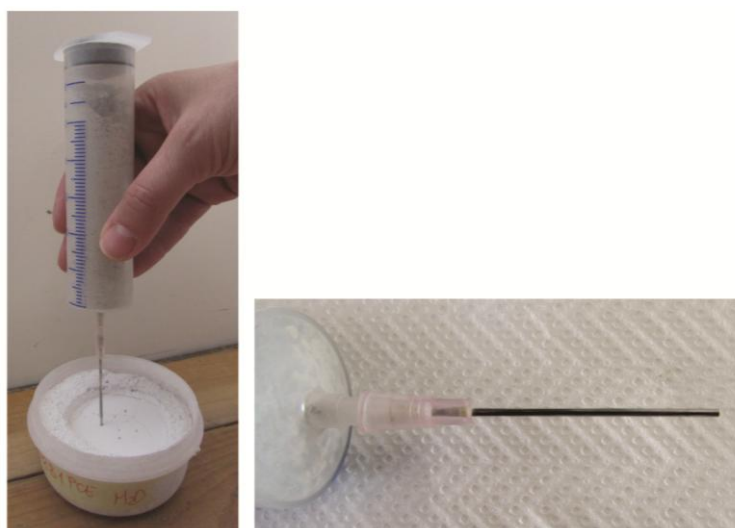
Najkrajši čas vezanja, 1 ura, sta dosegli mešanici $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE in RC, medtem ko ponovno najdaljši čas dosejata mešanici $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE, in sicer 6 in 7 ur.



Slika 4.27: Čas vezanja injekcijskih mešanic po standardizirani metodi s prilagojenim kalupom in apneno skodelico.

Figure 4.27: Vicat method, final setting time of injection grouts with modified mould and mortar cup.

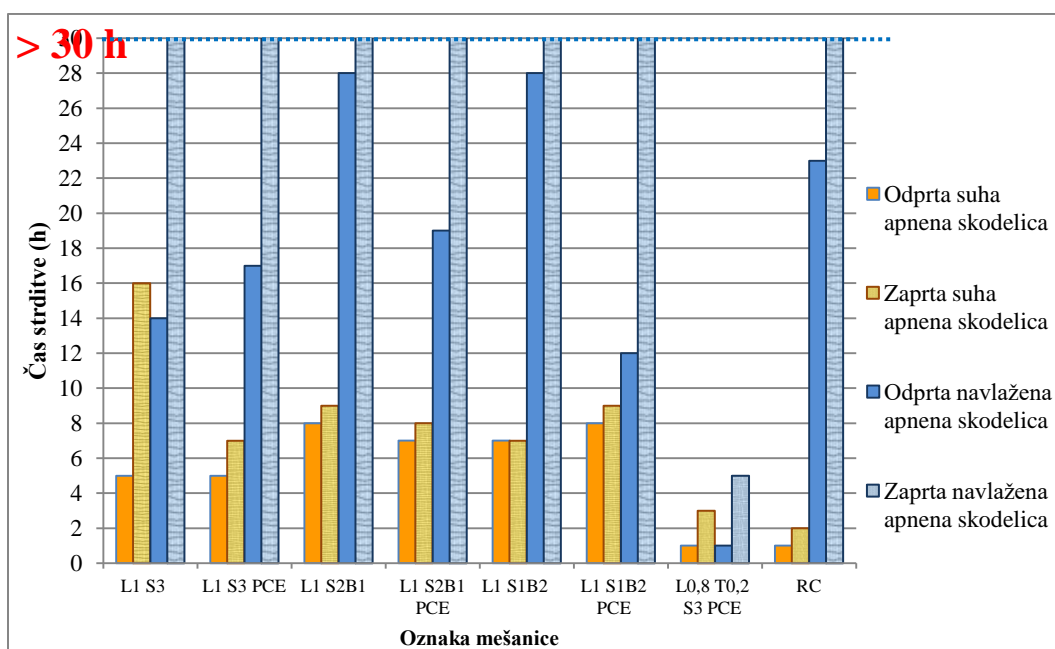
S pomočjo in-situ metode apnenih skodelic, ki jo predlagata avtorici Biçer-Şimşir in Rainer (2013), se končni čas vezanja mešanic meri s pomočjo injekcijske brizge in igle brez konice (Slika 4.28). V odprte/zaprte suhe in predhodno navlažene apnene skodelice smo injicirali 20 ml injekcijske mešanice. Injekcijska brizga za merjenje je bila napolnjena s 100 g peska.



Slika 4.28: In-situ metoda (levo), merjenje končnega časa vezanja injekcijskih mešanic s pomočjo injekcijske brizge in igle brez konice (desno).

Figure 4.28: Field method (left), measuring the final setting time of injection grouts with syringe with blunt cannula (right).

Rezultati časa vezanja mešanic v odprtih suhih/navlaženih in zaprtih suhih/navlaženih apnenih skodelicah so podani na sliki 4.29.



Slika 4.29: In-situ metoda časa strjevanja injekcijskih mešanic, vgrajenih v odprte suhe/navlažene in zaprte suhe/navlažene apnene skodelice.

Figure 4.29: Field method, final setting time of injection grouts injected into open dry/pre-wetted and close dry/pre-wetted mortar cups.

Mešanice L₁ S₃, L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE in RC, ki so vgrajene v odprte suhe apnene skodelice, vežejo med 1 in 8 urami, medtem ko v zaprtih suhih apnenih skodelicah med 2 in 16 urami.

S predhodno navlažitvijo odprtih skodelic se je podaljšal končni čas vezanja vsem mešanicam, za od 1 do 28 ur.

V zaprtih navlaženih skodelicah nobena od mešanic z apnenim vezivom ni zvezala v času 30 dni, kolikor so trajale meritve. Zvezala pa je mešanica s tufom, L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE, in to v 5-ih urah.

Razvidno je, da se končni čas vezanja mešanic v apnenih skodelicah, merjen z Vicatovo iglo in injekcijsko iglo, razlikuje od rezultatov, pridobljenih s prilagojeno standardizirano metodo z nevpojnim kalupi.

Vzrok za to je vpliv okoliškega poroznega apnenega ometa, ki s kapilarnim srkom srka vodo iz mešanice, kar povzroči hitro sušenje in s tem hitrejšo vezanje.

Predhodno vlaženje apnenih skodelic podaljša čas vezanja mešanic, saj prepreči poroznim apnenim ometom, da s kapilarnim srkom učinkovito posrkajo vodo iz mešanice. S tem več vode ostane v mešanici.

Vežanje apnenih mešanic je predvsem posledica njihovega sušenja, to je izločanja vode. Šele na daljši rok pa tudi posledica kemične reakcije, pri kateri apno reagira s CO₂ in se pretvori v karbonat (CaCO₃). Čim bolj je mešanica porozna, tem hitreje CO₂ prodira iz zraka v mešanico in reagira z apnom.

Pri strjevanju apnene injekcijske mešanice je potreben dotok CO₂. Apnenim skodelicam se lahko omeji dotok zraka. Z zaprtjem skodelic s pokrovom se prepreči dotok CO₂ in bistveno upočasni izhlapevanje vode, saj je bila relativna vlaga zraka v zaprtih skodelicah relativno visoka (RH 80 ± 5 %). V tem primeru zato končnega vežanja ni bilo možno izmeriti in vprašanje je, ali bi mešanice z vezivom iz hidratiziranega apna v takšnih razmerah sploh zvezale.

Test z apnenimi skodelicami lahko podaja nekoliko realnejši čas vežanja mešanic, saj posnema realne pogoje kapilarnega srka s strani poroznih materialov v stenski sliki. To ne velja za standardizirano metodo z nevpojnim kalupom.

Končni časi vežanja mešanic, vgrajenih v apnene skodelice, pa se ne razlikujejo, če primerjamo meritve z Vicatovo iglo in z injekcijsko brizgo. Zaključimo lahko, da je metoda z injekcijsko iglo primerna za merjenje končnega časa vežanja mešanic na terenu.

4.4.4 Meritve sprijemne trdnosti – »pull off« test

Dobra sprijemnost s podlago je bistvenega pomena za kakovostno sanacijo odstopajočih plasti ometov stenskih poslikav.

Sprijemna trdnost med injekcijsko mešanico in plastmi ometov, ki jih utrjujemo, je odvisna tudi od stanja površin v notranjosti odstopljenih ometov in zidu. Gladke in prašnate površine zmanjšujejo adhezijo med mešanico in odstopljenimi plastmi ometov.

Sprijemno trdnost smo preskušali po standardu SIST EN 1015-12:2001. V ta namen smo pripravili model z zračnimi žepi dimenzij 10/5/2 in 10/5/5 mm, v katere smo injicirali mešanice. Priprava apnenih žepov je opisana v poglavju 3.5.2.

Meritve sprijemne trdnosti smo opravili pri starosti 90 dni, po negi pri T = 18 ± 1°C in RH 65 ± 5 %. Sprijemno trdnost določimo po enačbi (4.12):

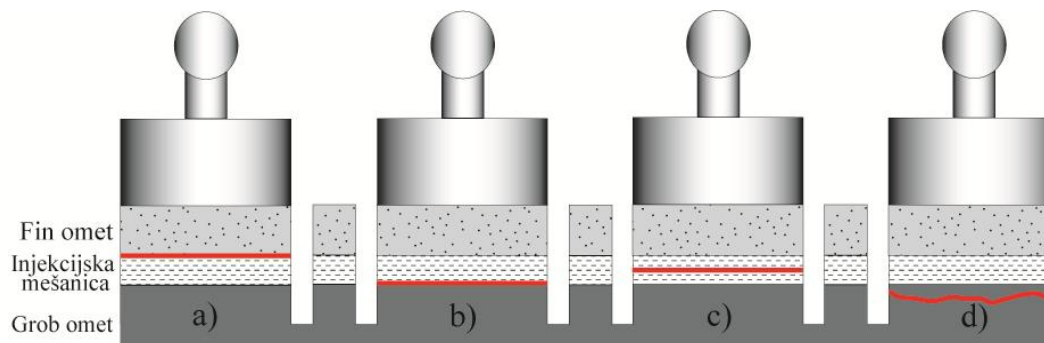
$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (4.12)$$

kjer je f_u sprijemna trdnost (MPa), F_u sila pri porušitvi (N) in A testna površina (mm²).

Pri meritvah sprijemne trdnosti so možni trije načini porušitve:

- adhezijska porušitev na stiku mešanice in podlage, dejanska sprijemna trdnost je enaka izmerjeni vrednosti (slika 4.30, a in b);

- kohezijska porušitev v mešanici, dejanska sprijemna trdnost je večja od izmerjene vrednosti (slika 4.30, c);
- kohezijska porušitev v podlagi, dejanska sprijemna trdnost je večja od izmerjene vrednosti (slika 4.30, d);



Slika 4.30: Prikaz načina porušitve (rdeča linija): a) in b) adhezijska porušitev na stiku mešanice in podlage; c) kohezijska porušitev v mešanici; d) kohezijska porušitev v podlagi.

Figure 4.30: Fracture pattern (red line): a) and b) Adhesion fracture, at the interface between grout and substratum; c) Cohesion fracture in the grout itself; d) Cohesion fracture in the substratum mortar.

Avtorji Tavares in sod. (2010) predlagajo minimalno mejo še zadovoljive sprijemne trdnosti apnenih injekcijskih mešanic pri 0,10 MPa. Za medsebojno primerjavo sprijemnih trdnosti analiziranih mešanic smo privzeli predlagani kriterij $\geq 0,10$ MPa.

Vrednosti sprijemne trdnosti mešanic $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$ PCE, $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE in RC so podane v preglednici 4.24 in njihovi načini porušitve v prilogi H.

Preglednica 4.24: Meritve sprijemne trdnosti na modelih zračnih žepov pri starosti 90 dni.

Table 4.24: Adhesive strength on the models of air pockets at the age of 90 days.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Višina žepa (mm)	f_u (MPa)	Stdev (MPa)	Relativna napaka (%)	Opomba
$L_1 S_3$	2	0,04	0,02	57	Masa ni v celoti zalila žepa.
	5	0,00	0,00	0	Vzorci so se uničili med pripravo.
$L_1 S_3$ PCE	2	0,10	0,02	18	
	5	0,05	0,03	52	Dva vzorca sta se uničila med pripravo.
$L_1 S_2B_1$ PCE	2	0,08	0,02	36	
	5	0,05	0,01	10	
$L_1 S_1B_2$ PCE	2	0,07	0,01	22	
	5	0,00	0,00	0	Vzorci so se uničili med pripravo.
$L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE	2	0,10	0,05	46	
	5	0,06	0,03	58	
RC	2	0,08	0,05	61	Masa ni v celoti zalila žepa.
	5	0,00	0,00	0	Vzorci so se uničili med pripravo.
Omet	-	0,15	0,02	6	

Iz preglednice 4.24 je razvidno, da mešanice, injicirane v 2 mm visoke zračne žepe, dosežajo višje sprijemne trdnosti, kot mešanice v 5 mm visokih zračnih žepih. Prav tako mešanice z večjim deležem kalcitne moke ($L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE) dosežejo višje sprijemne trdnosti, kot mešanica z višjim deležem ultralahkega polnila $L_1 S_1 B_2$ PCE.

Zdaleč najvišjo sprijemno trdnost dosežata mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, injicirani v 2 mm visoke žepe, in sicer 0,10 MPa.

Način porušitve mešanic $L_1 S_3$ PCE poteka deloma skozi mešanico (60 %) in deloma po stiku mešanice in zgornjega finega ometa (40 %), kar kaže na to, da je kohezijska trdnost injekcijske mešanice večja od 0,10 MPa, kljub omejenemu dostopu CO_2 .

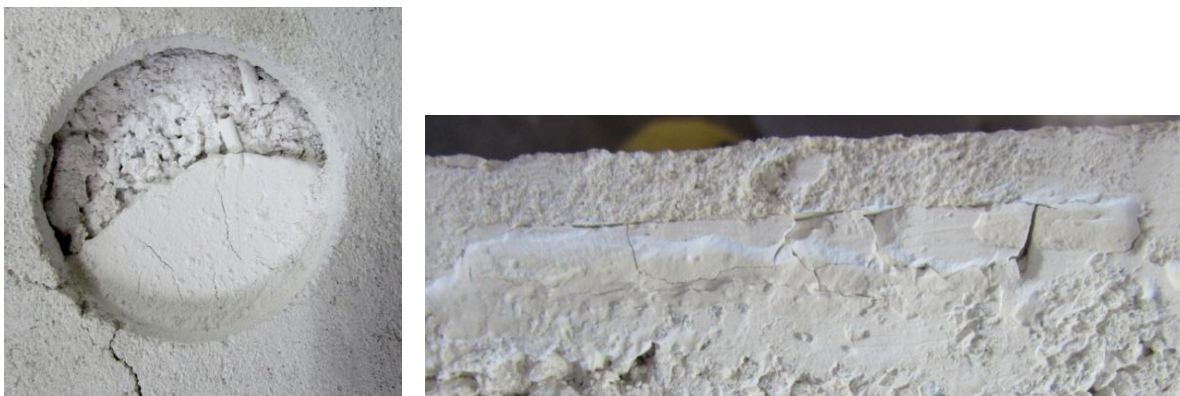
Tudi pri $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE je porušitev vzorca potekala deloma skozi mešanico (20 %) in deloma po stiku mešanice in zgornjega finega ometa (80 %), kar kaže na višjo kohezijsko trdnost $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, v primerjavi z $L_1 S_3$ PCE.

Mešanice $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in RC, injicirane v 2 mm visok žep, so dosegle sprijemne trdnosti od 0,07 do 0,08 MPa, kar je sicer manj, kot je privzet kriterij, vendar relativno visoko za mešanice s krhkim in votlim polnilom v obliki steklenih mikrogranul.

Porušitev pri mešanici $L_1 S_2 B_1$ PCE poteka deloma skozi mešanico (15 %), po stiku mešanice in spodnjega grobega ometa (80 %) ter deloma po grobem ometu (5 %). V primeru mešanice $L_1 S_1 B_2$ PCE porušitev vzorca poteka po stiku mešanice in spodnjega grobega ometa (95 %) in deloma v grobem ometu (5 %). Pri mešanici RC pa se je v celoti porušil stik mešanice in zgornjega finega ometa.

Najslabše rezultate je dosegla mešanica $L_1 S_3$, vgrajena v 2 mm (0,04 MPa) in 5 mm visoke zračne žepe (porušitev je potekala po stiku mešanice in zgornjega finega ometa). Na nizko sprijemno trdnost vplivajo slaba sposobnost zadrževanja vode ($WR = 77,84$ %), visoka stopnja krčenja (13,20 %) in nastajanje razpok med sušenjem (slika 4.31, desno).

V primeru vgradnje v 2 mm visoke zračne žepe mešanici $L_1 S_3$ in RC nista zapolnili celotnega zračnega žepa, in sicer zaradi previsoke viskoznosti (slika 4.31, levo).



Slika 4.31: Mešanica RC, ki ni zapolnila 2 mm visokega zračnega žepa (levo). Nastale razpoke med sušenjem mešanice $L_1 S_3$ (desno).

Figure 4.31: The RC grout not filling the whole 2 mm high air pocket (left). Drying shrinkage cracks of the grout $L_1 S_3$ (right).

Iz rezultatov je razvidno, da so vrednosti sprijemne trdnosti mešanic $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE, $L_1 S_1 B_2$ PCE in RC, injiciranih v 2 mm visoke žepe, od 1,1- do 1,8-krat manjše od vrednosti cepilne natezne trdnosti istih mešanic (preglednica 4.21).

V primeru mešanice $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, vgrajene v 2 mm visoke zračne žepe, je sprijemna trdnost 1,1 kratnik njene cepilne natezne trdnosti.

Kot smo že omenili, večja višina zračnega žepa vpliva na zmanjšanje sprijemne trdnosti injekcijskih mešanic. Mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, injicirane v 5 mm visoke zračne žepe dosežajo vrednosti sprijemne trdnosti od 0,05 do 0,06 MPa, kar je do 2-krat manj kot pri 2 mm visokih žepih. Porušitev mešanice $L_1 S_3$ PCE je potekala deloma skozi maso (20 %), v večjem obsegu pa po stiku mešanice in spodnjega grobega ometa (80 %).

Pri mešanici $L_1 S_2 B_1$ PCE porušitveni stik poteka deloma v masi (35 %), po stiku mešanice in spodnjega grobega ometa (60 %) ter v spodnjem grobem ometu (5 %).

Mešanica $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE ima porušitveni stik deloma v masi (30 %) in po stiku spodnjega grobega ometa (70 %).

Glede na ravnino porušitve mešanic $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE, ki smo jih injicirali v 5 mm visoke žepe, imajo mešanice manjšo trdnost od kohezijske trdnosti apnenega ometa.

Med samo pripravo vrtin so se vzorci mešanic $L_1 S_3$, $L_1 S_1 B_2$ PCE in RC, vgrajeni v 5 mm visoke žepe, poškodovali, zato niso bili primerni za nadaljnje testiranje sprijemne trdnosti.

Med procesom sušenja so vse mešanice, vgrajene v 5 mm visoke zračne žepe, razpokale. Razpoke se pojavijo v horizontalni (na stiku z grobim ali finim ometom) in vertikalni smeri, kar je lahko glavni vzrok za nizke vrednosti sprijemnih trdnosti.

Večji vpliv na poslabšanje sprijemne trdnosti imajo horizontalne razpoke na stiku ometa in mešanice.

Vidne horizontalne in vertikalne razpoke se pojavijo tudi pri mešanica $L_1 S_3$, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE in RC1, ki so bile vgrajene v 2 mm visoke zračne žepe. Po drugi strani ima mešanica $L_1 S_1 B_2$ PCE le nekaj vertikalnih razpok. Brez vidnih razpok sta mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE, vgrajeni v 2 mm visoke zračne žepe.

Obstaja korelacija med oblikovanjem razpok pri testu prostorninske stabilnosti z apnenimi skodelicami ter oblikovanjem med sušenjem modelov z zračnimi žepi.

Avtorji Azeiteiro in sod. (2014) so v svoji študiji injicirali apnene mešanice z dodatkom pucolanskega materiala (metakaolina) v 5 mm visoke zračne žepe in dosegli veliko nižje vrednosti sprijemne trdnosti, okrog 0,015 MPa po 60-dnevnem negovanju, kljub uporabljenemu kemijskemu dodatku za povečanje sprijemne trdnosti (akrilna smola).

Preverjanje sprijemne trdnosti vgrajenih mešanic na osnovi apnenega testa, hidravličnega apna in dodatkov (apnene moke in pucolanskih dodatkov) v 5 mm visoke zračne žepe po 90-ih dneh negovanja so izvedli avtorji Tavares in sod. (2010). Vrednosti sprijemne trdnosti mešanice na osnovi apnenega testa so okrog 0,04 MPa, 0,06 MPa pa v primeru mešanice na osnovi hidravličnega veziva. Za mešanice na osnovi apnenega testa, kalcitne moke in pucolanskih dodatkov ni podanih vrednosti sprijemne trdnosti, saj so se vzorci poškodovali med pripravo.

V primerjavi z rezultati avtorjev Tavares in sod. (2010) so mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE na osnovi hidratiziranega apna dosegle primerljive vrednosti sprijemne trdnosti za 5 mm zračne žepe.

Če povzamemo, lahko zaključimo, da so mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE primerne za učinkovito utrditev stenskih slik, kjer so votli predeli odstopajočih ometov ali razpoke širine do 2 mm. S temi mešanicami se vzpostavi stanje, ki je blizu razmer v nepoškodovanem delu stenske slike.

Mešanice $L_1 S_3$, $L_1 S_1 B_2$ PCE in RC za utrditvene posege na stenskih slikah niso primerne, zaradi prevelikega krčenja oziroma nastajanja horizontalnih (na stiku) in vertikalnih razpok med procesom sušenja. V primeru večjih zračnih žepov višine 5 mm so posegi z injektiranjem mešanic $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE manj učinkoviti, kot pri 2 mm žepih, vendar so dosežene sprijemne trdnosti primerljive s tistimi v literaturi za enako višino zračnih žepov (Tavares in sod., 2010).

Za izboljšanje sprijemne trdnosti mešanic, injiciranih v 5 mm visoke zračne žepe, bi bilo potrebno povišati delež polnila in/ali izbrati polnilo z večjim največjim zrnom, kar bi omogočilo dodatno zmanjšanje krčenja injekcijske mešanice.

4.4.5 Vodovpojnost injekcijskih mešanic v zračnih žepih

Zaradi visoke stopnje poroznosti stenskih slik oziroma apnenih ometov je stenska slika prepustna za pline, vodno paro in vodo. Z zapolnitvijo zračnih žepov z injekcijsko mešanico ne smemo bistveno spremeniti transportnih mehanizmov poroznega sistema stenske slike. V okviru disertacije smo transportne lastnosti poroznega sistema izven zračnih žepov in v območju zračnih žepov primerjali s pomočjo metode, ki jo priporoča RILEM: RILEM priporočilo številka II. 4 (RILEM, 1980a). S testom preverjamo vpivanje vode pri nizkem pritisku. Z graduirano stekleno cevko z razširjeno bazo, pritrjeno na apneno površino nad zračnimi žepi višine 2 in 5 mm, merimo vpivanje vode v različnih časovnih intervalih in sicer 0 min (suh vzorec), 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min in 60 min.

Za določitev koeficienta vpivanja vode po 15-ih minutah smo uporabili enačbo (4.13):

$$k = \frac{m_v/s}{\sqrt{t}} \quad (4.13)$$

kjer je k koeficient vodovpojnosti ($\frac{\text{g/cm}^2}{\sqrt{\text{min}}}$), m_v masa vpite vode, s površina, skozi katero omet vpija vodo ($4,91 \text{ cm}^2$), t čas po standardu (15 minut).

Rezultati vpivanja vode v posameznih časovnih intervalih na področjih z zračnimi žepi višine 2 in 5 mm in na področju brez žepov so prikazani na sliki 4.32.

Področja z zračnimi žepi imajo večjo sposobnost vpivanja vode od področij z osnovnim grobim in finim ometom. Tako so področja z mešanicami, vgrajenimi v 2 in 5 mm visoke zračne žepe, po 60-ih minutah vsrkala od 7 do 45 % več vode kot področja z osnovnim finim in grobim ometom.

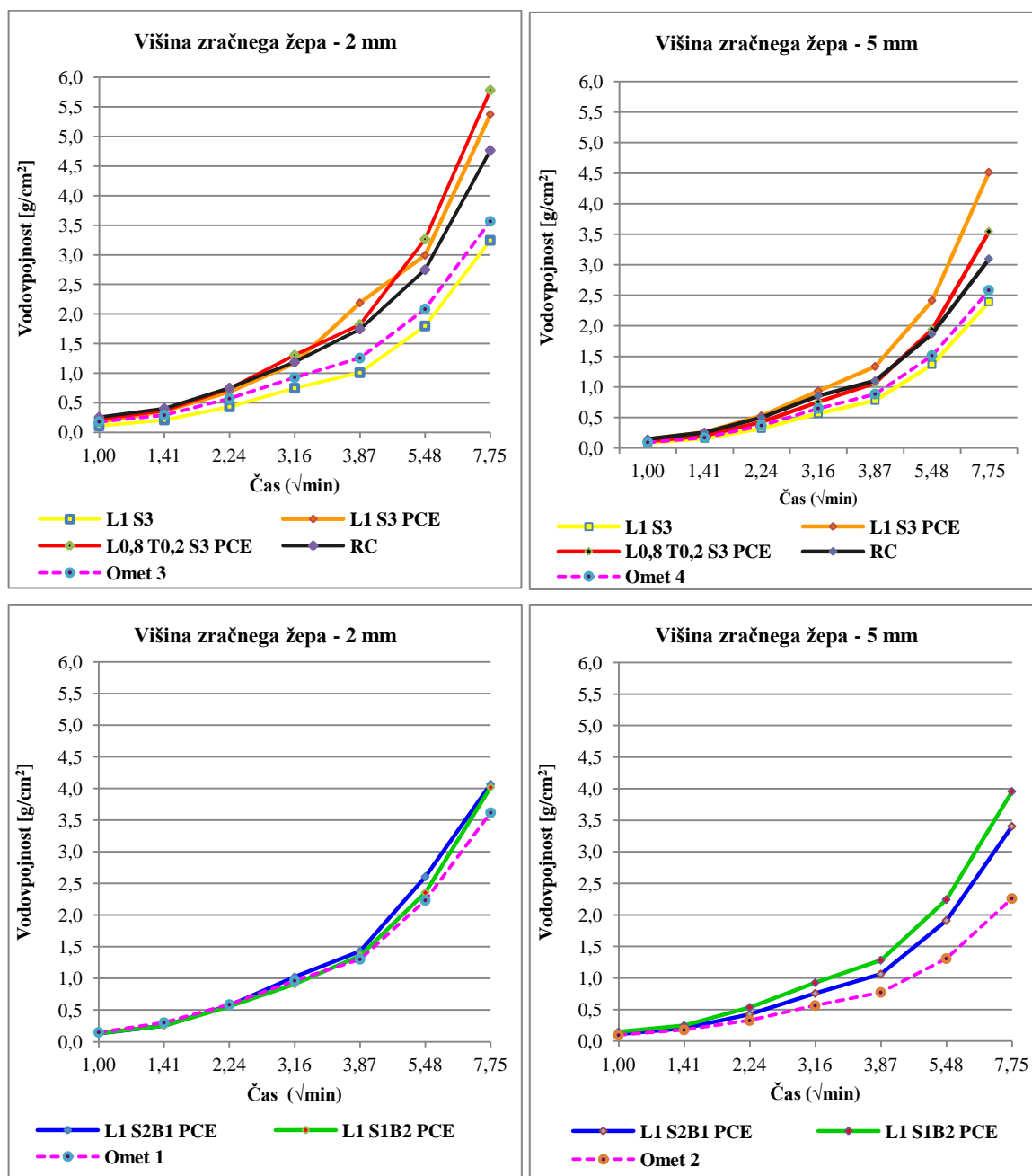
Prve razlike v vpivanju vode med področjem z osnovnim ometom in področjem z mešanicami $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE in RC, vgrajenimi v 2 in 5 mm visoke zračne žepe, se pojavijo že po dveh minutah testiranja. To velja tudi za mešanici $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE v zračnih žepih višine 5 mm.

V primeru mešanic $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE, vgrajenih v 2 mm visoke zračne žepe, se razlika pojavi pri 5-ih in 15-ih minutah, glede na vpivanje vode v območju nepoškodovanih ometov.

Najmanjšo sposobnost vpivanja vode ima mešanica $L_1 S_3$, vgrajena v 2 in 5 mm visoke zračne žepe, in sicer 3,3 in $2,4 \text{ g/cm}^2$ po 60-ih minutah.

Visoko sposobnost vpivanja vode, od 4,8 do $5,8 \text{ g/cm}^2$ po 60-ih minutah, imajo področja z mešanicami $L_1 S_3$ PCE, $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE in RC, vgrajenimi v 2 mm visoke zračne žepe. Po drugi strani sta mešanici $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE, vgrajeni v 2 mm visoke zračne žepe, po 60-ih minutah dosegli vrednosti od 4,0 do $4,8 \text{ g/cm}^2$.

Področja s 5 mm visokimi zračnimi žepi z vgrajenimi mešanici L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE, L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE in RC so dosegla vrednosti vpijanja vode od 3,1 do 4,5 g/cm² po 60-ih minutah.



Slika 4.32: Vodovpojnost injekcijskih mešanic v zračnih žepih višine 2 in 5 mm.

Figure 4.32: Water absorption of injection grouts in 2 mm and 5 mm high air pockets.

V preglednici 4.25 so podane vrednosti koeficienta vodovpojnosti pri 15-ih minutah za področja z vgrajenimi mešanici v 2 in 5 mm visoke zračne žepe in področja s finim in grobim ometom.

Višji koeficient vodovpojnosti po 15-ih minutah dosegajo področja z vgrajenimi mešanici v 2 mm visokih zračnih žepih, od 0,3 do 0,6 g/(cm²√min), in področja (omet 1 in omet 3) s finim in grobim ometom, od 0,2 do 0,3 g/(cm²√min).

Področja z vgrajenimi mešanici v 5 mm visoke zračne žepe dosegajo po 15-ih minutah nižji koeficient vodovpojnosti, od 0,2 do 0,3 $\text{g}/(\text{cm}^2\sqrt{\text{min}})$, in področja brez mešanic med 0,2 in 0,2 $\text{g}/(\text{cm}^2\sqrt{\text{min}})$.

Preglednica 4.25: Koeficient vodovpojnosti injekcijskih mešanic v zračnih žepih višine 2 in 5 mm po 15-ih minutah.

Table 4.25: Water absorption coefficient of injection grouts in 2mm and 5 mm high air pockets after 15 minutes.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Višina zračnega žepa – 2mm			Višina zračnega žepa – 5mm		
	Koeficient vodovpojnosti ($\text{g}/(\text{cm}^2\sqrt{\text{min}})$)	Stdev ($\text{g}/(\text{cm}^2\sqrt{\text{min}})$)	Relativna napaka (%)	Koeficient vodovpojnosti ($\text{g}/(\text{cm}^2\sqrt{\text{min}})$)	Stdev ($\text{g}/(\text{cm}^2\sqrt{\text{min}})$)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃	2,6	0,1	54	2,0	0,0	8
L ₁ S ₃ PCE	5,7	0,1	18	3,4	0,0	11
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	3,7	0,0	10	2,7	0,2	59
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	3,5	0,0	6	3,3	0,0	12
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	4,7	0,1	17	2,7	0,1	21
RC	4,5	0,1	15	2,8	0,1	29
Omet 1	3,4	0,0	11	-	-	-
Omet 2	-	-	-	2,0	0,2	86
Omet 3	3,2	0,1	25	-	-	-
Omet 4	-	-	-	2,3	0,1	30

Razlike v rezultatih vpivanja vode in vrednostih koeficienta vodovpojnosti za področja brez mešanic (Omet 1, Omet 2, Omet 3 in Omet 4) kažejo na vpliv obdelave površine finih ometov na rezultate. Med področji z ometom je prišlo do 28–38 % razlik med rezultati preiskav.

Obdelava površine finih ometov pa lahko vpliva tudi na rezultate vodovpojnosti v okviru zračnih žepov, zapoljenih z injekcijskimi mešanici. Drugačna obdelava površine na modelih je verjetno tudi glavni vzrok za razlike v vrednosti koeficienta vodovpojnosti med 2 mm in 5 mm visokimi žepi. Zato je realnejša relativna primerjava rezultatov – sprememba vpivanja vode glede na rezultat, dobljen izven območja zračnih žepov.

Večjo sposobnost vpivanja vode imajo mešanice s kalcitno moko, L₁ S₃ PCE, L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE in RC, za kar 10 do 40 %, v primerjavi z mešanici, pri katerih je delež kalcitne moke nadomeščen z ultralahkim polnilom, L₁ S₂B₁ PCE in L₁ S₁B₂ PCE. Slednji imata pri 2-milimetrskih žepih tudi enako vpivanje vode kot omet izven območja žepov.

4.4.6 Vpliv pospešenega staranja na lastnosti injekcijskih mešanic

Skozi čas lahko različni vplivi okolja, posredno ali neposredno, povzročijo propadanje injekcijskih mešanic v zračnih žepih in posledično ogrozijo celotno stensko sliko. Vzroki za to so lahko med drugim tudi ekstremna nihanja v temperaturi in relativni vlagi ter prisotnost soli v nosilcu, ometu ali v okolju. Tovrstne vplive praviloma preverjamo s pospešenimi cikličnimi testi, kot so ciklično močenje in sušenje, zmrzovanje in tajanje, segrevanje in ohlajanje, v kombinaciji z vodotopnimi solmi.

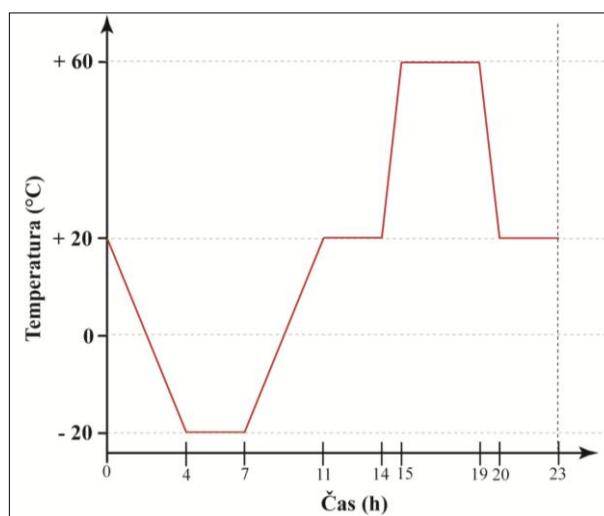
V kakšnem obsegu bodo injekcijske mešanice propadale zaradi prej naštetih vzrokov, je odvisno od njihovih lastnosti, kot so vrsta veziva in polnila, razmerje vezivo : polnilo, poroznost, prepustnost, sposobnost vpijanja vode s kapilarnim srkom, prisotnost dodatkov itd.

S pospešenim staranjem preizkušancev in sendvič modelov smo ugotavljali vpliv ciklov zmrzovanja/tajanja, segrevanja/ohlajanja in vlaženja/sušenja v kombinaciji z ali brez vodotopnih soli na lastnosti mešanic ter njihovo obstojnost.

S primerjavo lastnosti preskušancev, podvrženim intenzivnim temperaturnim razlikam in vlažnostnim obremenitvam, ter preskušancev, ki so bili izpostavljeni idealnim pogojem okolja, je bilo mogoče oceniti obstojnost injekcijske mešanice za izbrane primere ekstremnih podnebnih razmer in agresivnih vplivov okolja.

Pospešeno staranje smo izvedli po prilagojenem priporočilu RILEM CIF test (Setzer in sod., 2004), na preskušancih in sendvičih, ki so bili izpostavljeni 14-im ciklom zmrzovanje/tajanje/segrevanje/ohlajanje z vključenim vlaženjem/sušenjem v kombinaciji z destilirano vodo in 3 % raztopino NaCl.

Posamezen cikel traja 23 ur in je prikazan na sliki 4.33, s temperaturni ekstremi pri -20°C in $+60^{\circ}\text{C}$.



Slika 4.33: Cikel zmrzovanja/tajanja in segrevanja/ohlajanja.

Figure 4.33: Freezing-thawing and heating-cooling cycles.

Pred vsakim posameznim ciklom se preskušanci in sendviči postavijo za 30 min v 3% raztopino NaCl ali destilirano vodo višine 5 mm. Posamezni cikel je sestavljen iz sledečih faz (slika 4.33):

- faza ohlajanja v časovnem intervalu 4 ure do temperature $-20 \pm 1^\circ\text{C}$,
- faza zmrzovanja v trajanju 3 ure pri temperaturi $-20 \pm 1^\circ\text{C}$,
- faza tajanja v časovnem intervalu 3 ure do temperature $+20^\circ\text{C}$ in $\text{RV} \approx 60 \pm 5\%$,
- faza sušenja vzorcev v trajanju 3 ure pri temperaturi $+20^\circ\text{C}$ in $\text{RV} \approx 50 \pm 5\%$,
- faza segrevanja vzorcev do temperature $+60 \pm 1^\circ\text{C}$ v trajanju 1 ure,
- faza visoke temperature v trajanju 4 ure pri temperaturi $+60 \pm 1^\circ\text{C}$
- faza ohlajanja v časovnem intervalu 1 ure do temperature $+20^\circ\text{C}$ in $\text{RV} \approx 60 \pm 5\%$,
- faza sušenja v trajanju 3 ure pri temperaturi $+20^\circ\text{C}$ in $\text{RV} \approx 50 \pm 5\%$.

Preskušancem višine 5 cm in premera 2 cm ter sendvičem z 2 in 5 mm visokimi zračnimi žepi stranskih robov nismo zaščitili z epoksi smolo.

Po končanem pospešenem staranju (po 14-ih ciklih) smo najprej ocenili stanje preskušancev na podlagi vizualnega pregleda (priloga I). Pri mešanicah $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$, $L_1 S_1B_2$ PCE, $L_{0,8}T_{0,2} S_3$, in $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE smo določili tudi tlačno trdnost, rezultati so podani v preglednici 4.26.

Preskušanci $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$ PCE, $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ in $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE, izpostavljeni destilirani vodi, po 14-ih ciklih ohranijo prvotno obliko in praktično ne kažejo večjih znakov poškodb na površini vzorcev.

Najmanj obstojne na različne klimatske pogoje v primeru predhodne izpostavitve destilirani vodi so se izkazale mešanice $L_1 S_3$, $L_1 S_1B_2$ in RC, to je mešanice s čistim apnenim vezivom in brez superplastifikatorja. Prve poškodbe, razpoke in odpadanje delcev materiala na spodnjem predelu preskušancev se je na mešanicah $L_1 S_3$ in RC začelo pojavljati že po drugem ciklu pospešenega staranja, pri mešanici $L_1 S_1B_2$ pa so se razpoke in odpadanje manjših delcev materiala, vendar na zgornjem delu preskušancev, pričeli pojavljati po četrtem ciklu pospešenega staranja.

V primeru predhodne izpostavitve preskušancev 3 % raztopini NaCl so mešanice manj obstojne, saj kažejo preskušanci večje znake poškodb (prašenje, nabrekanje, luščenje, odpadanje) in izločanje ter kristalizacijo soli na površini vzorca.

Vidne poškodbe, prašenje in nabrekanje se začnejo na preskušancih, $L_1 S_2B_1$, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$, $L_1 S_1B_2$ PCE, $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ in $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE pojavljati po šestem ciklu pospešenega staranja, ko je NaCl dosegel zgornjo površino vzorca. Po prvih poškodbah prašenja in nabrekanja se poškodbe z nadaljevanjem ciklov stopnjujejo v odpadanje in luščenje delov materiala.

Najmanj obstojne na pospešeno staranje so mešanice L₁ S₃, L₁ S₃ PCE in RC, predhodno izpostavljene 3 % raztopino NaCl. Razpadati so pričele po drugem ciklu pospešenega staranja.

Slabše obstojne na destruktivno delovanje raztopine NaCl in destilirane vode pod vplivom cikličnega tajanja/zmrzovanja, hlajenja/segrevanja in vlaženja/sušenja so mešanice brez superplastifikatorja, L₁ S₃, L₁ S₂B₁, L₁ S₁B₂, L_{0,8}T_{0,2} S₃ in RC. Mešanice z dodanim superplastifikatorjem, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE, pa kažejo večjo obstojnost na različne klimatske vplive.

Zaradi uničenja preskušancev po 14-ih ciklih pospešenega staranja, v kombinaciji z destilirano vodo in raztopino NaCl, na mešanicah L₁ S₃ in RC tlačne trdnosti nismo mogli določiti. Isto velja za mešanico L₁ S₃ PCE, ki je bila predhodno nasičena z raztopino NaCl.

Preglednica 4.26: Rezultati preiskav tlačne trdnosti pospešeno staranih injekcijskih mešanic.

Table 4.26: Compressive strength of injection grouts after accelerated ageing.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Pospešeno starani (destilirana voda)			Pospešeno starani (3 % NaCl)		
	f_c (MPa)	Stdev (MPa)	Relativna napaka (%)	f_c [MPa]	Stdev (MPa)	Relativna napaka (%)
L ₁ S ₃ PCE	2,7	0,7	28	0,00	0,00	0,00
L ₁ S ₂ B ₁	1,4	0,1	5	0,7	0,1	21
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	2,1	0,3	16	1,4	0,3	23
L ₁ S ₁ B ₂	0,5	0,1	22	0,5	0,1	9
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	1,5	0,1	4	0,9	0,2	16
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	0,9	0,1	9	0,7	0,4	55
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	2,2	0,3	13	1,0	0,1	13

Mešanice L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂, L₁ S₁B₂ PCE, L_{0,8}T_{0,2} S₃, in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE po 14-ih ciklih pospešenega staranja, z destilirano vodo, dosegajo vrednosti tlačne trdnosti med 0,5 in 2,7 MPa. Tlačne trdnosti mešanicam, ki so bile nasičene z raztopino NaCl, po 14-ih ciklih upadejo do 53 % glede na vrednosti pri destilirani vodi, trdnosti se gibljejo med 0,5 in 1,4 MPa.

Tudi v tem primeru so višje tlačne trdnosti dosegle mešanice z višjim deležem kalcitne moke in s superplastifikatorjem.

Obnašanje apnenih injekcijskih mešanic med zmrzovanjem/tajanjem, segrevanjem/ohlajanjem in vlaženjem/sušenjem je odvisno od notranjih vplivov (struktura por v mešanici, vsebnost vode itd.) in zunanjih vplivov (stopnja zmrzovanja, segrevanja, trajanje zmrzovanja/segrevanja, temperatura zmrzovanja/segrevanja itd.).

Poškodbe, ki so se pojavile na apnenih mešanicah po končanem staranju, so nastale zaradi:

- hidravličnega pritiska, ki nastane zaradi zamrznitve vsrkane vode, prisotne v porah, kot posledica povečanja prostornine pri prehodu vode v led,
- osmoze, ki povzroča transport vode v področja z večjo koncentracijo soli, zaradi vzpostavitve enakega profila koncentracij po preskušancu – večja zasičenost z vodo pomeni večje pritiske v času zamrzovanja,
- nastajanja pritiska v porah zaradi kristalizacije soli čez kritično mejo koncentracije solne raztopine,
- različnih koeficientov temperaturnega raztezka sestavin,
- temperaturnih razlik in
- kemične reakcije soli.

Količina vsrkane vode (destilirane ali raztopine NaCl) je odvisna od poroznosti mešanic, kar ugotavljajo avtorji Lubelli in sod. (Lubelli in sod., 2006). Manjša kot je stopnja odprte poroznosti mešanic, manjša je stopnja kapilarne srka, s tem posledično manjši transport vlage v masi in potovanja soli na površje. Med sušenjem soli NaCl potujejo v smeri izhlapevanja, to je proti površini, kjer se kopičijo in kristalizirajo.

Višja stopnja poškodovanosti injekcijskih mešanic brez superplastifikatorja je posledica večje poroznosti teh mešanic po eni strani ter nižje trdnosti veziva in večje nehomogenosti strukture po drugi strani. Pri mešanicah s superplastifikatorjem, z nižjo stopnjo poroznosti in večjo stopnjo homogenosti ter trdnosti veziva, je struktura sposobna prevzeti večje pritiske, ki so posledica prehoda vode v led in kristalizacije soli.

Potovanje vlage skozi zidove, injekcijske mešanice in plasti ometov, ki predstavljajo heterogeno celoto, je odvisno predvsem od poroznosti oziroma velikosti por in sposobnosti vpijanja vode posameznih plasti.

Avtorji Groot in sod. (2009) navajajo, da je razporeditev velikosti por ključnega pomena pri transportu vlage med posameznimi plastmi materialov. Ometi z majhnimi porami bodo z lahkoto absorbirali vlago z vodotopnimi solmi iz predhodne plasti z večjimi porami, ker je kapilarni srk večjih por manjši. V primeru če imajo spodnje plasti manjše pore kot zgornje, bo vlaga z vodotopnimi solmi v veliki meri ostajala v spodnjih plasteh, ker je kapilarni srk v spodnjih plasteh višji kot v zgornjih plasteh. Nabiranje soli na mejnih ploskvah posameznih plasti lahko povzroči resnejše poškodbe plasti ometov.

Z namenom ugotavljanja vpliva pospešenega staranja v kombinaciji z delovanjem vodotopnih soli natrijevega klorida (NaCl) na sprijemne trdnosti injekcijskih mešanic smo pripravili sendvič modele (glej poglavje 3.5.3). Sendvič modeli ponazarjajo prerez utrjenih odstopljenih plasti ometov – odstopljena plast med grobim in finim ometom, v katero je vgrajena injekcijska mešanica debeline 2 in 5 mm.

Obe plasti ometa imata podobno poroznost in visoko sposobnost vpijanje vode (glej poglavje 3.5.5).

Za vsako mešanico ($L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$ PCE, $L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE in RC1) in vsako višino žepa (2 mm in 5 mm) smo pripravili tri sendviče. Po en sendvič za vsako sestavo injekcijske mešanice je bil negovan v običajnih pogojih (kot referenca), dva pa sta bila podvržena pospešenemu staranju v kombinaciji z delovanjem raztopine NaCl.

Pred pričetkom pospešenega staranja so bili vsi sendviči 10 dni izpostavljeni pospešeni karbonatizaciji, v komori z 1 % koncentracijo CO_2 pri temperaturi 20 ± 1 °C ter $RH = 60 \pm 5$ %. Postopek pospešene karbonatizacije je opisan v poglavju 3.5.3.

Ker lahko pri pospešeni karbonatizaciji apnenega veziva nastanejo drugačni karbonatni kristali, poleg kalcita, smo mineraloško sestavo pospešeno karbonatiziranih injekcijskih mešanic preveril z RAMAN mikroskopijo (priloga K). Analiza karbonatizirane injekcijske mešanice z RAMAN mikroskopijo ni pokazala nastajanja karbonatnega minerala aragonita, ki lahko vpliva na trdnost oziroma obstojnost mešanic.

Rezultati sprijemne trdnosti referenčnih in pospešeno staranih sendvičev so podani v preglednici 4.27 in njihov način porušitve v prilogi J.

Preglednica 4.27: Sprijemna trdnost referenčnih in pospešeno staranih sendvičev.

Table 4.27: Adhesive strength of sandwiches without and after accelerated ageing.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Višina žepa (mm)	Negovani v običajnih pogojih		Pospešeno starani (3 % NaCl)		
		f_u (MPa)	Stdev (MPa)	f_u (MPa)	Stdev (MPa)	Relativna napaka (%)
$L_1 S_3$	2	0,00	Testiral se je samo en sendvič.	0,14	0,10	71
	5	0,00		0,00	-	-
$L_1 S_3$ PCE	2	0,00		0,28	0,19	68
	5	0,45		0,32	0,01	2
$L_1 S_2B_1$ PCE	2	0,29		0,38	0,11	30
	5	0,18		0,31	0,09	30
$L_1 S_1B_2$ PCE	2	0,19		0,28	0,07	25
	5	0,43		0,23	0,19	81
$L_{0,8}T_{0,2} S_3$ PCE	2	0,29		0,24	0,08	31
	5	0,00		0,37	0,13	35
RC	2	0,08		0,00	-	-
	5	0,15		0,22	0,08	37

Na podlagi vizualne ocene sendvičev po končanih 14-ih ciklih pospešenega staranja v kombinaciji z raztopino NaCl so največje poškodbe (prašenje, luščenje, odpadanje) nastale na finem ometu. Primerjava koeficienta vpijanja vode pokaže, da imajo injekcijske mešanice do 4,7-krat manjšo sposobnost vpijanja vode od grobega in finega ometa.

Med vizualnim pregledom sendvičev ni bilo opaziti zadrževanja oziroma kristalizacije soli v območju mejne ploskve med grobim ometom in injekcijsko mešanico.

Fini omet z visoko zmožnostjo absorpcije vode s pomočjo kapilarnega srka omogoči potovanje raztopine NaCl skozi plasti sendviča. Ko voda izhlapeva na površini ometa (stranski in zgornji ploskvi), se soli akumulirajo na površini, kjer kristalizirajo in povzročijo manjše poškodbe površine (slika 4.34).

To nakazuje, da je sistem sposoben transportirati vodo in paro, skupaj z raztopljenimi solmi, na površino vzorcev, brez zadrževanja vode in/ali soli v območju ploskev med ometom in injekcijsko mešanico. Če bi injekcijska plast delovala kot neke vrste hidroizolacija, bi najverjetneje prišlo do poškodb v okviru stika, zaradi pritiskov, ki so posledica kristalizacije soli in zmrzovanja vode.



Slika 4.34: Pospešeno staran sendvič z mešanico L₁ S₂B₁ PCE (levo). Akumulacija in eflorescenca soli na zgornji (desno zgoraj) in stranski (desno srednje) ploskvi finega ometa. Razpadanje ometa zaradi eflorescence vodotopnih soli (desno spodaj).

Figure 4.34: Sandwich with the injection grout L₁ S₂B₁ PCE after accelerated ageing (left). Accumulations and efflorescences of salts at the upper and side surface of fine plaster (right upper, middle). Degradation of plaster because of efflorescences of salts (right bottom).

Edino pri mešanici RC smo zasledili akumulacijo in kristalizacijo soli med mejno ploskvijo grobega ometa in mešanico (slika 4.35). Že primerjava koeficienta vpijanja vode pokaže, da ima mešanica RC kar 47-krat manjšo sposobnost vpijanja vode kot grobi in fini omet, zato deluje relativno kot neke vrste hidroizolacija, ki ovira transport vode z raztopljenimi solmi preko mešanice v fini sloj ometa.



Slika 4.35: Pospešeno staran sendvič z mešanico RC (levo). Akumulacija in eflorescenca soli med mejno ploskvijo grobega ometa in RC mešanico (desno).

Figure 4.35: Sandwich with the RC injection grout after accelerated ageing (left). Accumulations and efflorescences of salts at the rough plaster-injection mixture RC interface (right).

Vpliv cikličnega izmenjavanja zmrzovanja/tajanja, segrevanja/ohlajanja in vlaženja/sušenja v kombinaciji z raztopino NaCl poslabša sprijemne trdnosti mešanic $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE v 5 mm visokih žepih in $L_{0,8} T_{0,2} S_3$ PCE ter RC mešanic v 2 mm visokih žepih sendvičev. Po drugi strani pa so sprijemne trdnosti ostalih pospešeno staranih mešanic višje kot pri referenčnih mešanicah, ki so bile negovane v običajnih pogojih.

Ker pa smo za vsako injekcijsko mešanico za običajne pogoje nege preizkusili le en sendvič, je težko zaključiti, da so dobljene višje sprijemne trdnosti po zaključenem pospešenem testu pravilo. Vsekakor bi bilo treba teste ponoviti na večjem številu sendvičev (vsaj na treh za vsako mešanico in pogoje preizkušanja). Kljub temu pa se kaže trend povečanja trdnosti pri cikličnem vlaženju in sušenju ter zmrzovanju in tajanju, ki ga lahko pripišemo pospešeni karbonatizaciji v takšnih razmerah.

Referenčni sendviči z mešanicama $L_1 S_3$ in $L_1 S_3$ PCE ter pospešeno starani z mešanico RC, ki so bile vgrajene v 2 mm visoke žepe, so se med pripravljanjem vrtin poškodovale, zato vrednosti sprijemnih trdnosti niso podane. Način porušitve pri vseh treh injekcijskih mešanicah, $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE in RC poteka po stiku finega ometa in mešanice, kar kaže na adhezijsko porušitev.

Predhodna pospešena karbonatizacija je verjetno vplivala na povišane rezultate sprijemne trdnosti mešanic, ki so bistveno presegle spodnjo mejo kriterija, 0,1 MPa.

Po 14-ih ciklih izmenjajočih se različnih klimatskih vplivov, v kombinaciji z raztopino NaCl, so sendviči z mešanicami $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE v 2 mm visokih žepih dosegli vrednosti sprijemne trdnosti od 0,14 do 0,38 MPa, kar je za 25 % več od vrednosti pri referenčnih mešanicah, negovanih v normalnih pogojih ($f_u = 0-0,29$ MPa).

Ciklično izmenjevanje zmrzovanja/tajanja, segrevanja/ohlajanja in vlaženja/sušenja, v kombinaciji z raztopino NaCl je poslabšalo sprijemne trdnosti pri mešanicah $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE in RC, vgrajenih v 2 mm visoke žepe, za 17 % ($f_u = 0,24$ in 0 MPa), glede na referenčne mešanice, ki so dosegle sprijemne trdnosti med 0,29 in 0,08 MPa.

Najvišjo sprijemno trdnost, 0,38 MPa, je dosegla pospešeno starana mešanica $L_1 S_2B_1$ PCE, vgrajena v 2 mm visok žep sendviča.

Način porušitve vzorcev pospešeno staranih mešanic $L_1 S_3$, $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE, vgrajenih v 2 mm visoke žepe sendvičev, kaže, da je kohezijska trdnost mešanic večja od trdnosti apnenega ometa.

Medtem ko je pri sendviču z mešanico $L_1 S_2B_1$ PCE, vgrajeno v 2 mm visok žep, kohezijska trdnost mešanice manjša kot pri apnenem ometu.

V primeru 5 mm visokih zračnih žepov sta referenčni mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE dosegli višjo sprijemno trdnost, 0,43 in 0,45 MPa, kot pospešeno starani mešanici, pri katerih se je s staranjem sprijemna trdnost sposlabšala za 29 % in 47 %. Kohezijska trdnost mešanic $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE pa je v obeh primerih manjša kot pri ometih.

Pospešeno starane mešanice $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE in RC, vgrajene v 5 mm visoke žepe sendvičev, imajo od 42 do 50 % višjo sprijemno trdnost od referenčnih mešanic. Je pa tudi kohezijska trdnost manjša, kot pri ometih.

Primerjava rezultatov pospešeno staranih mešanic, vgrajenih v 2 in 5 mm visoke žepe, kaže, da se je mešanicam $L_1 S_3$, $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE z višanjem zračnega žepa sprijemna trdnost poslabšala do 18 %.

Na poslabšanje sprijemne trdnosti mešanic $L_1 S_3$, $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE v 5 mm visokih žepih sendvičev bi lahko vplivalo oblikovanje razpok na stiku in v injekcijski mešanici. Iste mešanice $L_1 S_3$, $L_1 S_2B_1$ PCE in $L_1 S_1B_2$ PCE, vgrajene v 2 mm visoke žepe sendvičev, nimajo vidnih razpok na stiku ali v sami masi.

4.4.7 Povzetek rezultatov in ocena mešanic četrte faze

Cilj četrtega sklopa je bil na podlagi modificiranih standardiziranih in nestandardiziranih metod preiskav detajlno preiskati lastnosti injekcijskih mešanic, kot so: pretočnost in injektabilnost, določiti čas vezanja, sprijemno trdnost in preveriti obstojnost na ciklično izmenjevanje zmrzovanja/tajanja, segrevanja/ohlajanja in vlaženja/sušenja, s sočasnim delovanjem soli.

Analizirali smo mešanice $L_1 S_3$ PCE, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$ PCE in $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE ter zaradi primerjave rezultatov in preverjanja vpliva superplastifikatorja še mešanice $L_1 S_3$, $L_1 S_2B_1$, $L_1 S_1B_2$, $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ in RC.

Vse testirane mešanice so bile ponovno ovrednotene glede na predhodno postavljene kriterije (preglednica 4.28 in 4.29).

Za lažjo izbiro ustreznih oziroma izločitev neprimernih mešanic, ki ne dosegajo kriterijev, smo posamezne lastnosti ocenili na podlagi klasifikacije:

- zelo dobro (++), če so lastnosti mešanic dosegle nadpovprečno dobre rezultate,
- dobro (+), če so lastnosti mešanic dosegle postavljene kriterije,
- slabo (-), če dosežene lastnosti mešanic, niso dosegle postavljenih kriterijev,
- zelo slabo (--), če so lastnosti mešanic dosegle nadpovprečno slabe rezultate.

Preglednica 4.28: Povzetek rezultatov in klasifikacija lastnosti injekcijskih mešanic detajlnih preiskav.

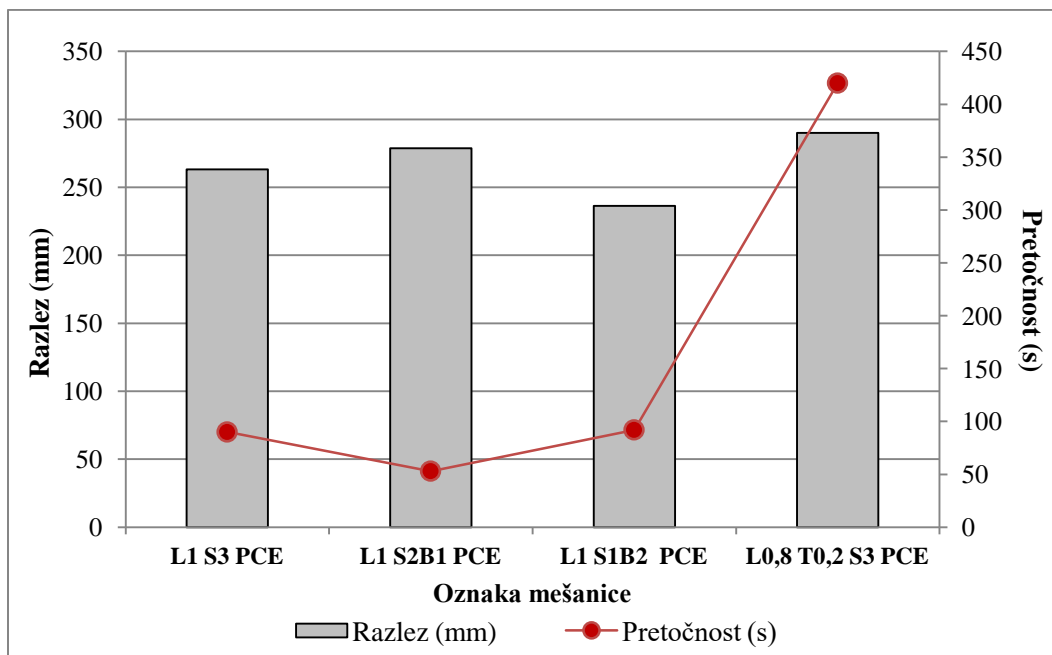
Table 4.28: Summary of results and classification of detail properties of injection grouts.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Pretočnost	Injektabilnost		Vikat	Določanje časa sušenja z apneno skodelico			
	50–90 s	Suh drobljen omet	Navlažen drobljeni omet	≤ 48 h	Odrpta suha	Zaprta suha	Odrpta navlažena	Zaprta navlažena
L ₁ S ₃	--	---	---	--	++	+	-	--
L ₁ S ₃ PCE	+	++	++	--	++	+	-	--
L ₁ S ₂ B ₁	--	---	---		+	+	-	--
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	++	+	++	--	+	+	-	--
L ₁ S ₁ B ₂	--	--	--		+	+	-	--
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	+	-	+	-	+	+	-	--
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	--	---	---		+	+	-	--
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	--	-	+	--	++	++	-	--
RC	--	--	---	--	++	++	-	--

Mešanice brez superplastifikatorja (L₁ S₃, L₁ S₂B₁, L₁ S₁B₂, L_{0,8}T_{0,2} S₃ in RC) imajo razlez med 176 in 217 mm in so zelo slabo pretočne (čas pretočnosti je nad 300 s), prav tako pa so se izkazale za neinjektabilne.

Ravno nasprotno pa imajo mešanice s superplastifikatorjem (L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE in L₁ S₁B₂ PCE), z razlezom 236–279 mm, nižji čas pretočnosti (t = 53–92 s) in so injektabilne. Razmerje med razlezom in pretočnostjo mešanic s PCE superplastifikatorjem je prikazano na sliki 4.37.

Mešanica L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE je dosegla razlez 290 mm, vendar ima najslabši čas pretočnosti, 420 s, in je zelo slabo injektabilna. Na poslabšanje pretočnosti in injektabilnost vplivata fino mlet pucolanski dodatek tuf, saj potrebuje za popolno oblitje zelo finih delcev večjo količino vode (Uranjek, 2008), ki jo veže na sebe med in po mešanju.



Slika 4.36: Razmerje med razlezom in pretočnostjo injekcijskih mešanic s superplastifikatorjem.

Figure 4.36: Relationship between mini slump and fluidity of grouts with superplasticizer.

Injektabilnost mešanic smo preverjali s pomočjo uporabe suhega in navlaženega drobljenega apnenega ometa, granulacije od 2 do 4 mm, kar predstavlja 0,3 do 0,6 mm široke razpoke.

V primeru predhodno navlaženega drobljenega ometa so mešanice L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE in L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE dosegle predpisan nivo, kar jih uvršča v skupino E – enostavno injektabilne.

Z uporabo suhega drobljenega ometa se je injektabilnost najbolj poslabšala mešanicama L₁ S₁B₂ PCE in L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE, verjetno zaradi višjega deleža ultralahkega polnila in pucolanskega dodatka tufa.

Zadovoljive rezultate pri zapolnjevanju 0,3–0,6 mm razpok sta dosegli mešanici L₁ S₃ PCE in L₁ S₂B₁ PCE, injicirani v suh drobljen omet. Mešanici L₁ S₃ PCE in L₁ S₂B₁ PCE bi se lahko, zaradi dobre vodozadržnosti, uporabljali za utrjevanje odstopljenih plasti ometov, ki so občutljivi na dodatno vlaženje.

Primerjava injektabilnosti mešanic L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁ PCE in L₁ S₁B₂ PCE, ki smo jih injicirali v suh zdrobljen omet in pripravili s standardnim laboratorijskim mešalcem (Hobart) in kuhinjskim mešalnikom, je pokazala, da mešanice, pripravljene s kuhinjskim mešalnikom dosegajo boljšo injektabilnost. Vzrok za to je lahko hitrost mešanja, ki je pri kuhinjskem mešalniku večja.

Iz rezultatov je mogoče zaključiti, da na izboljšanje injektabilnosti lahko vplivamo s predhodnim vlaženjem in načinom mešanja – višja je hitrost mešanja, boljša je injektabilnost.

Standardizirana in nestandardizirana metoda merjenja časa vezanja ne dajeta primerljivih rezultatov. Čas vezanja je v primeru standardizirane metode 4-krat daljši kot pri nestandardizirani metodi z apnenimi skodelicami, kjer so pogoji bližje tistim v stenski sliki.

Po nestandardizirani metodi so se mešanice vgradile v suhe/navlažene odprte in zaprte apnene skodelice. V suhih odprtih/zaprth apnenih skodelicah so mešanice zvezale v 5–16-ih urah, medtem ko so mešanice, vgrajene v navlažene odprte skodelice, potrebovale za to do 28 ur. Mešanice, vgrajene v navlažene zaprte apnene skodelice, niso zvezale niti po 30-ih dneh, zaradi prevelike vlage in blokiranja dostopa CO₂.

Najboljše rezultate je dosegla mešanica s pucolanskim dodatkom tufom L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE, ki je skrajšal čas vezanja in omogočil vezanje tudi v vlažni apneni zaprti skodelici.

V okviru četrtega sklopa so bili uporabljeni tudi modeli z zračnimi žepi in sendviči, za testiranje sprijemne trdnosti in vpliva pospešenega staranja na izbranih mešanicah. V preglednici 4.29 so ovrednotene sprijemne trdnosti mešanic na zračnih žepih in sendvičih z 2 in 5 mm visokimi žepi, ki simulirajo odstopljen fini omet od grobega ometa.

Mešanice L₁S₃ PCE, L₁S₂B₁ PCE, in L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE, vgrajene v 2 mm visoke zračne žepe pri starosti 90 dni dosežejo sprijemno trdnost med 0,04 in 0,1 MPa, medtem ko se z višanjem zračnega žepa (5 mm) sprijemna trdnost poslabša, vrednosti se gibljejo od 0,05 do 0,06 MPa.

Na poslabšanje sprijemne trdnosti mešanic, vgrajenih v 5 mm visoke zračne žepe, vpliva krčenje in nastajanje razpok med sušenjem. Mešanice L₁S₃, L₁S₁B₂ PCE in RC, vgrajene v 5 mm visoke zračne žepe, so se poškodovale med samo pripravo vzorcev.

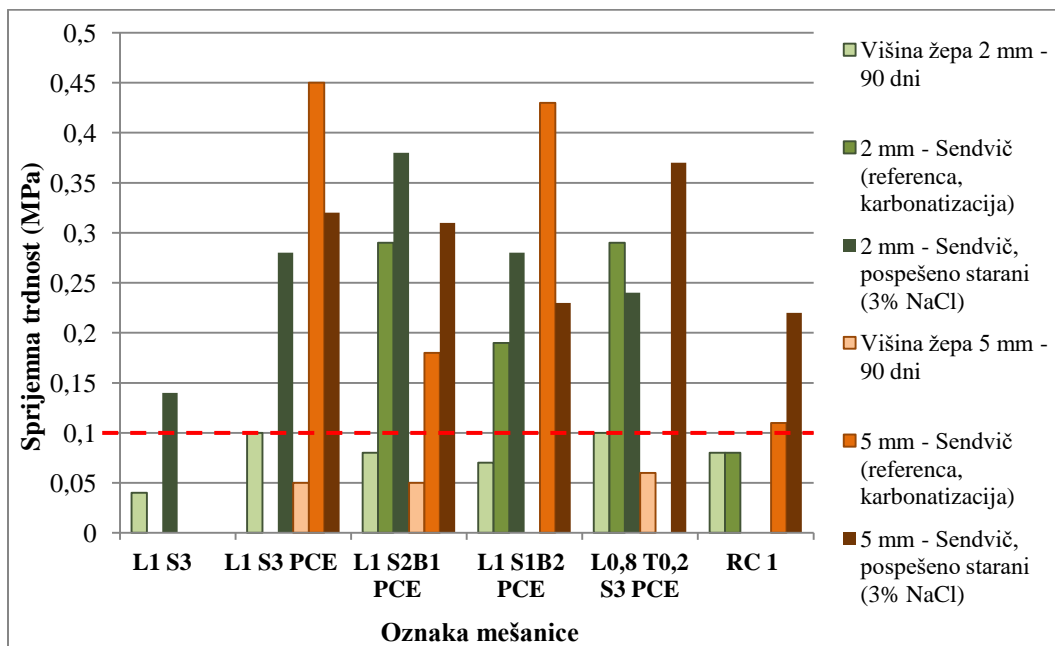
Preglednica 4.29: Povzetek rezultatov in klasifikacija sprijemne trdnosti injekcijskih mešanic na zračnih žepih in sendvičih.

Table 4.29: Summary of results and classification of adhesive strength of injection grouts on the models of air pockets and sandwiches.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Preskušanci – normalni pogoji 90 dni				Pospešeno staranje – sendviči (14 ciklov) (predhodno podvrženi CO ₂ komori)			
	Sprijemna trdnost (≥ 0,10 MPa)		Kapilarno vpijanje		Sprijemna trdnost (≥ 0,10 MPa)			
	2 mm	5 mm	2 mm	5 mm	Normalni pogoji 2 mm	3 % NaCl 2 mm	Normalni pogoji 5 mm	3 % NaCl 5 mm
Višina zračnega žepa								
L ₁ S ₃	+	--	++	++	--	++	--	--
L ₁ S ₃ PCE	++	+	-	+	--	++	++	++
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	+	+	++	+	++	++	++	++
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	+	--	++	+	++	++	++	++
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	++	+	+	+	++	++	--	++
RC	+	--	+	+	+	--	++	++

Vpliv pospešenega staranja na sprijemno trdnost mešanic smo ocenjevali z metodo sendvičev z višino žepov 2 ali 5 mm, ki so bili predhodno izpostavljeni CO₂ v komori, za pospešitev karbonatizacije apnenega veziva v mešanicah. Na podlagi RAMAN mikroskopije nismo zaznali nastajanja mineralnih faz aragonita v vezivu, kar bi lahko vplivalo na trdnost mešanic.

Primerjava rezultatov sprijemne trdnosti mešanic v zračnih žepih pri 90-ih dneh zorenja in sendvičev, ki so bili predhodno izpostavljeni CO₂ v komori in potem pospešeno starani, je prikazana na sliki 4.37.



Slika 4.37: Primerjava sprijemne trdnosti na 90 dni starih mešanicah, vgrajenih v zračne žepce, in na sendvičih.

Figure 4.37: Comparison of adhesive strength on the models of air pockets at the age of 90 days and sandwiches.

Iz diagrama na sliki 4.37 je razvidno, da so mešanice pri starosti 90 dni v običajnih pogojih dosegle znatno manjše sprijemne trdnosti od mešanic, ki so bile predhodno v CO₂ komori in nato zasičene s 3 % raztopino NaCl ter pospešeno starane.

Vse mešanice v sendvičih so presegle postavljen minimalni kriterij za sprijemno trdnost, 0,1 MPa, medtem ko sta v primeru zračnih žepov samo L₁S₃PCE in L_{0,8}T_{0,2}S₃PCE dosegli kriterij.

Razlike v rezultatih sprijemnih trdnosti med zračnimi žepi in sendviči se lahko pripišejo:

- v primeru zračnih žepov je dostop CO₂ otežen, kar posledično vpliva na počasno karbonatizacijo apnenega veziva in s tem na slabšo trdnost mešanic. Medtem ko so bili sendviči podvrženi pospešeni karbonatizaciji, kar je vplivalo na povišanje sprijemne trdnosti;

- pripravi oziroma vgradnji mešanic v modele zračnih žepov in sendvičev. Vgradnja mešanic se je v primeru zračnih žepov in sendvičev razlikovala. Izdelava zračnih žepov ne dovoljuje pritiska na odstopljene plasti ometov med vgradnjo mešanic. Prav tako so bile plošče z zračnimi žepi postavljene vertikalno in lastna teža finega ometa ni mogla pritiskati na injicirano mešanico.

Po drugi strani pa je vgradnja mešanic v sendviče potekala horizontalno in se je, zaradi rahlega pritiska na plast finega ometa, lahko izboljšal stik med mešanico in ometom. Med sušenjem mešanice

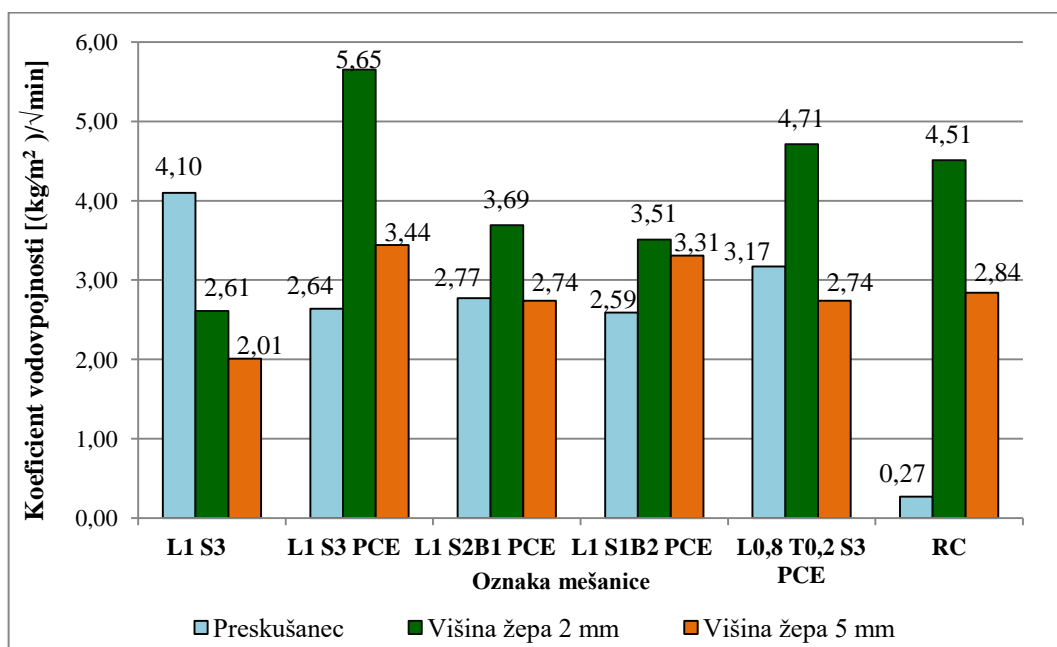
so sendviči v horizontalni legi in lahko lastna teža finega ometa pritiskala na mešanico, kar izboljša oprijem med mešanico in ometom.

Vizualni pregled sendvičev po pospešenem staranju ni pokazal nabiranja soli na mejnih ploskvah, kar bi vplivalo na poslabšanje sprijemne trdnosti mešanic. Vzrok za to je visoka poroznost mešanic in ometov. Izjema je primerjalna mešanica RC, kjer je prišlo zaradi razlik v poroznosti med ometi in mešanico do akumulacije soli v območju mejne ploskve med grobim ometom in mešanico.

Simulacija zračnih žepov na ploščah omogoča tudi merjenje kapilarnega vpivanja vode na območjih z in brez vgrajenih mešanic. Primerjava rezultatov koeficienta kapilarnega srka na preskušancih in zračnih žepih višine 2 in 5 mm po 15-ih minutah je prikazana na sliki 4.38.

Med posameznimi vrednosmi koeficienta vodovpojnosti preskušancev in mešanic po 15-ih minutah ni večjih razlik, če se upošteva, da so vrednosti vpivanja vode na zračnih žepih povišane zaradi vpivanja poroznega apnenga ometa.

Večje razlike, okrog 40 %, v vrednostih koeficienta vodovponjnosti med mešanicami, vgrajenimi v 2 in 5 mm visoke zračne žepe, se lahko pripiše sposobnosti vpivanja vode apnenga ometa in njegovi obdelavi površine (bolj ali manj zaglajena površina). Med posameznimi ploščami je prišlo na površinah brez žepov do 30–40 % razlike med rezultati koeficienta vodovpojnosti apnenga ometa.



Slika 4.38: Primerjava koeficienta vodovpojnosti preskušancev in injekcijskih mešanic, vgrajenih v 2 in 5 mm visoke zračne žepe pri 15-ih minutah.

Figure 4.38: comparison of water absorption coefficient of samples and injection grouts in 2 mm and 5 mm high air pockets at the time of 15 minutes.

Preglednica 4.30 prikazuje povzetek vizualne ocene in tlačne trdnosti pospešeno staranih preskušancev, predhodno nasičenih z destilirano vodo in 3 % raztopino NaCl.

Preglednica 4.30: Povzetek in ovrednotenje pospešeno staranih preskušancev.
Table 4.30: ummary of compressive strength results and classification of injection grouts after accelerated ageing.

Oznaka mešanice /formulacija mase	Pospešeno starani preskušanci			
	Vizualna ocena propadanja		Tlačna trdnost	
	H ₂ O	raztopina NaCl	H ₂ O	raztopina NaCl
L ₁ S ₃	--	--	--	--
L ₁ S ₃ PCE	++	--	++	--
L ₁ S ₂ B ₁	+	-	++	-
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	++	-	++	+
L ₁ S ₁ B ₂	-	-	+	-
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	+	-	++	-
L _{0,8} T _{0,2} S ₃	+	-	+	-
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	+	-	++	-
RC	--	--	--	--

Preskušanci imešanic L₁ S₃ PCE, L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE, L_{0,8}T_{0,2} S₃ in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE predhodno nasičeni z destilirano vodo in podvrženi različnim klimatskim vplivom so veliko bolj obstojni na propadanje, kot mešanice L₁ S₃, L₁ S₁B₂ in RC starane pod istimi pogoji.

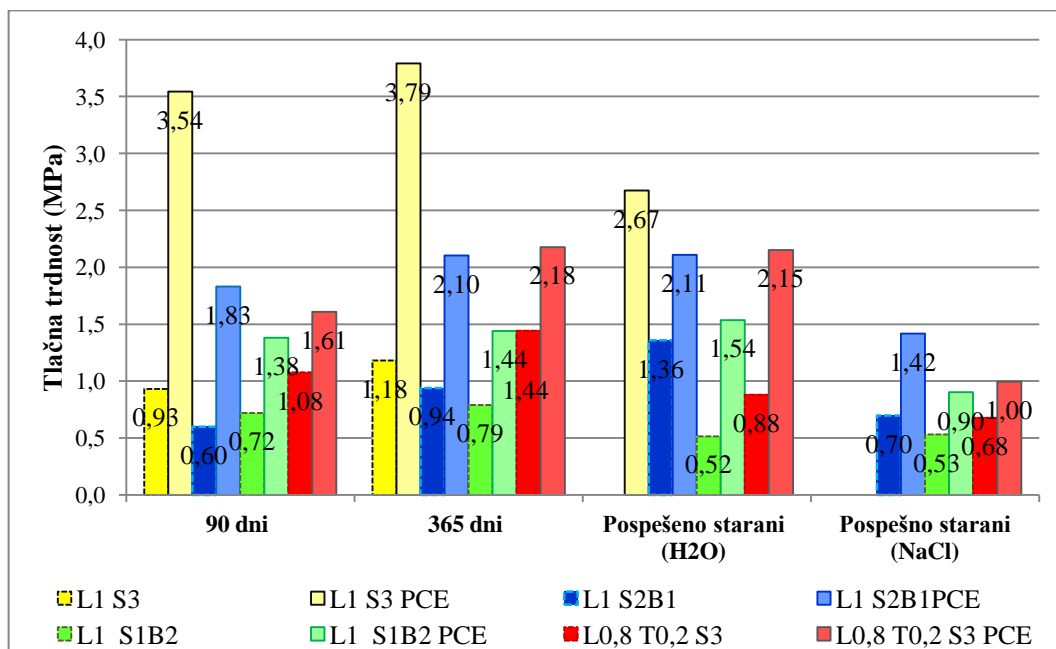
Najslabše obstojne na vpliv razopine NaCl v različnih klimatskih pogojih so mešanice L₁ S₃, L₁ S₃ PCE in RC. Po drugi strani pa mešanice L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE, L₁ S₁B₂ PCE, L_{0,8}T_{0,2} S₃ in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE, z deležem ultralahkega polnila in tufa, kažejo veliko večjo odpornost na delovanje raztopine NaCl in cikličnega menjavanja zmrzovanja/tajanja, segrevanja/ohlajanja in vlaženja/sušenja.

Na sliki 4.39 so povzeti rezultati tlačne trdnosti preskušancev pri starosti 90 in 365 dni v normalnih pogojih ter za pospešeno starane mešanice.

Vse mešanice, negovane v normalnih pogojih in pospešeno starane, dosegajo vrednosti znotraj izbranega kriterija, od 0,4 do 2,5 MPa, oziroma ga presegajo. Mešanici L₁ S₃ in RC, zasičeni z destilirano vodo in raztopino NaCl, sta med pospešenim staranjem razpadli, in prav tako mešanica L₁ S₃ PCE zasičena z raztopino NaCl.

Mešanicam L₁ S₂B₁, L₁ S₂B₁ PCE in L₁ S₁B₂ PCE, ki so bile zasičene z destilirano vodo in pospešeno starane, se je povprečna tlačna trdnost povečala do 45 %, v primerjavi s 365 dni starimi preskušanci v normalnih pogojih. Mešanicam L₁ S₃ PCE, L₁ S₁B₂, L_{0,8}T_{0,2} in L_{0,8}T_{0,2} S₃ PCE pa se je povprečna

tlačna trdnost zmanjšala do 40 %, v primerjavi s povprečno tlačno trdnostjo pri starosti 365 dni v normalnih pogojih.



Slika 4.39: Primerjava tlačnih trdnosti injekcijskih mešanic, starih 90 in 365 dni ter pospešeno staranih mešanic.

Figure 4.39: Comparison of compressive strength of injection grouts at the age of 90 and 365 days and injection grouts after accelerated ageing.

Mešanicam $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$, $L_1 S_1B_2$ PCE, $L_{0,8}T_{0,2}S_3$, in $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE, ki so bile izpostavljene zasičenju z raztopino NaCl in pospešeno starane, so se povprečne tlačne trdnosti zmanjšale za 22–38 %, v primerjavi z mešanicami, starimi 90 dni, in za 32–54 % glede na povprečno tlačno trdnost, doseženo pri starosti 365 dni za normalno starane preskušence.

Prirast tlačne trdnosti preskušancev $L_1 S_2B_1$, $L_1 S_2B_1$ PCE, $L_1 S_1B_2$ PCE in $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ PCE, zasičenih z destilirano vodo in izpostavljenih različnim klimatskim pogojem, je najverjetneje posledica ugodnejših pogojev za karbonatizacijo apnene mešanice, kar ugotavlja tudi avtor Uranjek (2011). Velik vpliv pa ima tudi višja stopnja poroznosti mešanic in njihova nižja difuzijska upornost, ki omogočata boljše prepustnost mešanic in s tem vnos CO_2 .

Manjše tlačne trdnosti pospešeno staranih mešanic $L_1 S_3$ PCE, $L_{0,8}T_{0,2}S_3$ se lahko pripišejo poškodbam zaradi zmrzovanja/tajanja, ohlajevanja/segrevanja in vlaženja/sušenja.

Na podlagi rezultatov četrtega sklopa sta se kot najbolj primerni mešanici izkazali $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE. Injekcijski mešanici imata: dobro pretočnost in injektabilnost v suhem ali predhodno navlaženem zdrobljenem apnenem ometu, zadovoljivo sprijemno trdnost v primeru 2 mm visokega zračnega žepa in ne povzročata akumulacije soli med mejnimi ploskvami.

Obe mešanici sta uspešno povezali odstopljene plasti ometov tako pri 2 mm kot pri 5 mm žepih. So pa bile dosežene sprijemne trdnosti bistveno nižje pri 5 mm žepih, zato se za večja odstopanja priporoča uporaba nižjega razmerja vezivo : polnilo (na primer 1 : 4) in/ali večje največje zrno polnila (na primer 0,5 mm). Oba ukrepa še dodatno zmanjšata krčenje in s tem nagnjenost k oblikovanju razpok.

4.5 Zaključki

Eksperimentalni del zasnove in testiranja injekcijskih mešanic je razdeljen v štiri sklope, ki so glede na predhodne postavljene kriterije izključevali mešanice z najslabšimi doseženimi lastnostmi. Zasnovali smo 17 injekcijskih mešanic, na podlagi predhodnih preliminarnih analiz, kjer se je kot kritična lastnost preverjala njihova prostorninska stabilnost. Najbolj prostorninsko stabilne mešanice, tudi z najmanj nastalimi razpokami zaradi sušenja, so bile mešanice z razmerjem vezivo : polnilo 1 : 3. Zato smo s tem razmerjem zasnovali 17 mešanic, z vezivom iz hidratiziranega apna in v dveh primerih tudi mineralnega dodatka tufa, in polnilom iz kalcitne moke in/ali ultralahkega polnila. Približno polovica mešanic je vsebovala tudi superplastifikator (PCE ali PPh). Preverjali smo različne lastnosti mešanic v svežem in strjenem stanju.

Na podlagi celotnega pregleda analiz in sinteze rezultatov lahko izpostavimo dve mešanici, $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE, ki sta dosegli postavljene kriterije, predstavljene v 3. poglavju. Obe injekcijski mešanici imata zadovoljive delavne, mehanske in fizikalne lastnosti, ki smo jih preverjali po standardiziranih in nestandardiziranih metodah.

Kvalitetna sanacija odstopajočih plasti ometov je odvisna najprej od dobrih delovnih lastnosti, kot so: stabilnost, čim manjše izločanje vode, ustrezna vodozadržnost, volumska stabilnost mešanice, dobra injektabilnost in pretočnost ter zadovoljiv čas sušenja.

Prostorninska masa strjenih mešanic $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE je za cca. 20 % manjša od sveže pripravljenih mešanic. Podobno kot pri sveže pripravljene mešanici, mešanica brez ultralahkega polnila, $L_1 S_3$ PCE, doseže višjo prostorninsko maso, $1,45 \text{ g/cm}^3$. Nadomeščanje kalcitne moke z ultralahkim polnilom pozitivno vpliva na zmanjšanje prostorninske mase, ki je pri mešanici $L_1 S_2 B_1$ PCE enaka $1,20 \text{ g/cm}^3$.

Prilagojena metoda preverjanja stabilnosti svežih mešanic je pokazala, da sta obe mešanici stabilni, s homogeno strukturo, kar vpliva na samo injektabilnost oziroma pretočnost, trdnost, obstojnost na zunanje vplive in nenazadnje na samo uspešnost/neuspešnost konsolidacije zračnih žepov.

Po treh urah ima mešanica $L_1 S_3$ PCE oziroma $L_1 S_2 B_1$ PCE 1,5 % oziroma 1,7 % izločene vode, kar je pod postavljenim kriterijem 2 %.

S preverjanjem vodozadržnosti smo analizirali sposobnosti zadrževanja vode mešanic, podvrženih kapilarnemu srku poroznih apnenih ometov med in po procesu injiciranja v zračne žepe. Sposobnost zadrževanja vode pa ima, poleg vpliva na injektabilnosti in pretočnost ter mehanske lastnosti, tudi vpliv na volumsko stabilnost mešanic in nastajanje razpok med sušenjem.

Višjo sposobnost zadrževanja vode ima mešanica $L_1 S_3$ PCE (83 %) s kalcitno moko kot edinim polnilom, medtem ko ima mešanica $L_1 S_2B_1$ PCE nekoliko slabšo vodozadržnost (80 %).

Na slabšo vodozadržnost mešanice $L_1 S_2B_1$ PCE in povišano vrednost izločene vode lahko vpliva ultralahko polnilo, zaradi nesposobnosti vezanja vode na površino mikrogranul.

Volumska stabilnost mešanic je ena od ključnih lastnosti, od katere je odvisna adhezija med mešanico in podlago. Čim manjše je krčenje in nastajanje razpok med sušenjem, tem boljša je trdnost. Na volumsko stabilnost injekcijske mešanice vpliva več dejavnikov: razmerje vezivo : polnilo, vodovezivno razmerje, reakcija med vodo in apnom, adsorbcija vode na vezivo in polnilo, vodozadržnost, temperatura in vlažnost okolja med sušenjem.

Spremembo prostornine smo določili s pomočjo nestandardizirane metode, kot kriterij pa izbrali maksimalno vrednost $\Delta V = 5\%$ brez vidnih razpok. Kriterij smo postavili na podlagi rezultatov prvega sklopa testiranj. Injekcijski mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE nista presegli maksimalne vrednosti in sta brez vidnih razpok.

Podobne rezultate je podala metoda z apnenimi skodelicami, ki predvsem pokaže obseg krčenja in nastajanje razpok med sušenjem mešanic v poroznih apnenih skodelicah. Z vidika prostorninske stabilnosti in oblikovanja razpok pri porozni podlagi ima slabše lastnosti mešanica $L_1 S_2B_1$ PCE, z razpoko na stiku s skodelico in v masi, širine 0,2 do 0,5 mm, kar kaže na slabšo vodozadržnost mešanice.

Ugotovimo lahko, da boljša sposobnost zadrževanja vode in manjše izločanje vode vplivata na boljšo prostorninsko stabilnost mešanice $L_1 S_3$ PCE.

Vlaženje apnenih skodelic se je izkazalo za neučinkovito, saj ne izboljša prostorninske stabilnosti obravnavanih mešanic.

Preverjanje injektabilnosti s peščenim stolpcem pod konstantnim pritiskom je pokazalo, da se injektabilnost poveča s predhodnim vlaženjem drobljenega poroznega apnenega ometa, medtem ko se pri suhem apnenem ometu injektabilnost poslabša.

Podobne rezultate smo dobili s pomočjo nestandardiziranih metod, ki jih predlagata avtorici (Biçer-Şimşir and Rainer, 2013), z injekcijsko brizgo in apnenimi ploščami s kanalčki.

Vsem metodam je skupno, da se injektabilnost in pretočnost poslabšata v primeru uporabe suhega drobljenega poroznega ometa oziroma suhega kanalčka.

Najboljše rezultate sta tudi tokrat dosegli mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE, v mokrem in suhem drobljenem ometu. Obe mešanici bi se lahko uporabilo v primerih, kjer so ometi oziroma stenska slika

občutljivi za prekomerno vlaženje in vnašanje vode. Prav tako ima predhodno vlaženje pri obeh mešanicah celo negativne učinke, ko nas zanima nastajanje razpok, kar se je pokazalo z vlaženjem apnenih skodelic.

Primerjava mešanic, pripravljenih z različnima mešalnikoma – standardnim mešalnikom Hobart in kuhinjskim mešalnikom – je pokazala pomemben vpliv mešanja na injektibilnost: večja kot je hitrost mešanja, boljša je injektibilnost mešanic.

Uspešna konsolidacija odstopajočih plasti ometov je odvisna tudi od mehansko-fizikalnih lastnosti injekcijskih mešanic v strjenem stanju. Stopnja poroznosti je pomemben dejavnik, ki vpliva na kapilarno vpijanje vode, paroprepustnost oziroma prehod vodne pare skozi sloje stenske slike, ter mehanske lastnosti (tlačna in cepilna natezna trdnost) in stopnjo karbonatizacije.

Visoko stopnjo celotne poroznosti sta dosegli obe mešanici, $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE, s pripadajočima vrednostma 40 in 42 %, kar pa se lahko, zaradi počasne karbonatizacije apnenega veziva, skozi čas spremeni oziroma zmanjša.

Dejavniki, ki vplivajo na stopnjo poroznosti so: vodovozivno razmerje (Arandigoyen in sod., 2005), vrsta veziva in polnila ter njuno razmerje (Papayianni in Stefanidou, 2001).

Kapilarne pore predstavljajo velik del por v injekcijski mešanici in imajo velik vpliv na prepustnost. Voda oziroma vlaga v kapilarah je gibljiva, pri čemer je kapilarni srk ključni transportni mehanizem.

Delež kapilarnih por pri mešanici $L_1 S_3$ PCE je 38 %, medtem ko je pri $L_1 S_2B_1$ PCE 40 %.

Primerjava rezultatov deleža kapilarnih por in koeficienta kapilarnega vpijanja vode nakazuje, da ima mešanica $L_1 S_2B_1$ PCE z višjim delež kapilarnih por in nižjim koeficientom kapilarnega srka večje kapilarne pore kot mešanica $L_1 S_3$ PCE, ob predpostavki da voda omoči stene por v obeh sistemih pod enakim kotom.

Zaželeno je, da vodna para prehaja skozi vse plasti in uhaja iz stenske slike, tako ne pride do njenega zadrževanja v kateri izmed plasti, kjer bi kondenzirala in povzročila nove poškodbe. Paroprepustnost strjenih mešanic bi morala odgovarjati originalnim apnenim ometom, da se zagotovi nemoten prehod vodne pare skozi vse plasti stenske slike.

Mešanici $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE sta dosegli vrednosti difuzijske upornosti prehoda vodne pare, $\mu = 16$ in 15, kar je nekoliko več kot pri apnenih ometih.

Tlačne trdnosti injekcijskih mešanic morajo biti v okviru trdnosti apnenih ometov, da se zagotovi ustrezna duktilnost sistema. V nasprotnem primeru lahko višje mehanske lastnosti mešanic vplivajo na lokalno povečanje togosti utrjene strukture.

Vrednosti tlačne trdnosti imešanic $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE pri starosti 90 dni se gibljejo v predpisanem območju, in sicer sta povprečni tlačni trdnosti 3,5 in 1,8 MPa.

Povprečni tlačni trdnosti mešanic $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE pri starosti 365 dni sta 3,8 in 2,1 MPa in sta se v primerjavi z vrednostmi pri starosti 90 dni povečali do 17 %.

Pri preizkusu cepilne natezne trdnosti gre za indirektni natezni preizkus, s katerim se oceni obremenitev, pri kateri nastanejo razpoke v masi. Tako kot na tlačno ima tudi na cepilno natezno trdnost velik vpliv poroznost in sama sestava mešanic. Višja kot je poroznost materiala, nižja je trdnost materiala. Nobena mešanica ni dosegla kriterija 0,3–1,2 MPa, vrednosti se gibljejo med 0,11 in 0,16 MPa.

Podobno kot pri tlačni trdnosti je na cepilno natezno trdnost vplivala vrsta polnila.

V primeru pospešenega staranja z destilirano vodo preskušancev mešanice $L_1 S_2 B_1$ PCE je povprečna tlačna trdnost 1,2-kratnik vrednosti, izmerjene na 90 dni starih vzorcih v normalnih pogojih. Preskušancem $L_1 S_2 B_1$ PCE, ki so bili predhodno zasičeni s 3 % raztopino NaCl, pa je tlačna trdnost upadla za 22 %, glede na vrednosti pri 90-ih dneh.

Najslabše obstojna pri pospešenem staranju je bila mešanica $L_1 S_3$ PCE, saj so se v primeru zasičenja s 3 % raztopino NaCl preskušanci popolnoma razgradili, medtem ko je v primeru zasičenja z vodo tlačna trdnost upadla za 25 %, v primerjavi z vrednostjo pri 90 dni starih normalno staranih preskušancih.

Modeli z zračnimi žepi in sendviči, ki simulirajo odstopljene plasti ometov višine 2 in 5 mm, so se izkazali za zelo primerne in učinkovite, predvsem za testiranje sprijemne trdnosti in kapilarnega srka sistema, ki simulira razmere v stenski sliki.

Mešanici $L_1 S_3$ PCE, in $L_1 S_2 B_1$ PCE sta dosegli $f_u = 0,08$ – $0,1$ MPa pri starosti 90 dni, ko sta bili injicirani v 2 mm visoke zračne žepe, kljub oteženemu dostopu CO_2 .

Z višjim, 5 mm zračnim žepom se je sprijemna trdnost v primeru mešanice $L_1 S_3$ PCE zmanjšala za polovico.

Sendvičem z mešanico $L_1 S_2 B_1$ PCE, vgrajeno v 2 mm zračne žepe, ki so bili predhodno izpostavljeni pospešeni karbonatizaciji, se je sprijemna trdnost povečala do 5-krat ($f_u = 0,29$ MPa), v primerjavi s sprijemno trdnostjo pri 90-ih dneh v normalnih pogojih.

Pri 5 mm visokih zračnih žepih je sprijemna trdnost na sendvičih povečana do 9-krat pri mešanicah $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_1 B_2$ PCE.

Stopnja karbonatizacije apnenega veziva vpliva na povišanje sprijemne trdnosti mešanic, zato bi bilo v prihodnje priporočljivo teste sprijemne trdnosti ponoviti po enem letu. Prav tako pa postaviti modele zračnih žepov v različne klimatske pogoje, da se preveri vpliv različnih pogojev okolja (temperature in relativne vlage) na adhezijo mešanic.

V primeru uporabe sendvičev se priporoča uporaba večjega števila modelov za natančnejšo analizo vpliva pospešenega staranja z delovanjem raztopine NaCl na sprijemne trdnosti mešanic. Vendar pa glede na pridobljene podatke lahko zaključimo, da mešanice ne poslabšajo razmer v sistemu, z zadrževanjem vlage in akumulacije soli med plastmi, kar bi lahko vplivalo na obstojnost utrditvenih

ukrepov in posledično na nastajanje poškodb oziroma na poslabšanje adhezije med plastmi ometa in injekcijske mešanice.

Naraščanje tlačne in sprijemne trdnosti injekcijskih mešanic $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE je lahko posledica cikličnega menjavanja vlažnih in suhih obdobij in s tem pospešene karbonatizacije. Za potrditev predpostavke bi bilo potrebno opraviti usmerjene preiskave in analize.

Obe injekcijski mešanici, $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2B_1$ PCE, sta primerni za konsolidacijo zračnih žepov višine do 2 mm. Nekoliko bolj obstojna na različne klimatske vplive je mešanica $L_1 S_2B_1$ PCE.

V primeru višjih zračnih žepov, 5 mm, bi bila konsolidacija uspešna samo v primeru ustreznih pogojev, kot je dostop CO_2 , ki je potreben za karbonatizacijo apna.

Pogojno se lahko uporabi tudi mešanica $L_1 S_1B_2$ PCE, za posebne primere, kjer je potrebna lahka mešanica. Uporabimo jo lahko v primeru krhkih in uničenih odstopljenih plasti ometov, kjer je nemoten dostop CO_2 , saj se s karbonatizacijo izboljšuje sprijemna trdnost mešanice.

5 IN-SITU PREISKAVE STENSKE SLIKE IN IZVEDBA INJEKTIRANJA

5.1 Izhodišča in namen preiskav

Stabilizacija odstopajočih plasti ometov stenskih slik z nekonstrukcijsko metodo injiciranja mase z injekcijsko brizgo je poznana in uveljavljena restavratorska praksa. Namen stabilizacije odstopljenih plasti ometov z injekcijsko maso pa je ohraniti, stabilizirati in preprečiti nadaljnje poškodbe ter ponovno vzpostaviti strukturno celovitost na ločenih delih stenske slike.

Pogoj za uspešno konsolidacijo je celoviti pristop h konserviranju-restavriranju (v nadaljevanju kons.-rest.) stenskih slik, ki zahteva poznavanje tehnologij izdelave in lastnosti večslojnih zgodovinskih materialov ter njihovega medsebojnega delovanja.

Zato je treba pred pričetkom dela opraviti pregled stanja in analizo poškodb ometov ter barvnih plasti. Iz dobljenih rezultatov preiskav se pridobijo pomembni podatki o tehnologiji izdelave in starosti, ki služijo za kasnejšo izbiro sanacijskih materialov.

Iz pregleda literature in prakse je razvidno, da se uporablja veliko različnih injekcijskih mas na osnovi apnenega veziva, vendar se v zadnjih letih praviloma posega po komercialno dostopnih, v obratih pripravljenih masah.

Avtorji Mora in sod. (Mora in sod., 1984) navajajo, da je pri izbiri ustrezne injekcijske mešanice potrebno uporabiti kritični pogled, zato v praksi restavratorji sprejemajo odločitve glede na izkušnje iz preteklih posegov in njihove uspešnosti.

Namen tega poglavja je na primeru stenske slike prikazati celovit pristop k sanaciji odstopljenih plasti ometov, od predhodnih raziskav na terenu in detekcije problematičnih mest, do njihove sanacije oziroma stabilizacije. V ta namen smo uporabili v okviru disertacije razvito injekcijsko mešanico na osnovi hidratiziranega apna, kalcitne moke, ultralahkega polnila in superplastifikatorja.

Dele ometa, ki odstopajo od zidu, smo preiskali s pomočjo nedestruktivnih in-situ metod, kot so: metoda s trkanjem, termografske meritve in mikroskopska analiza z metodo HIROX. Opravili smo tudi raziskave obstoječih ometov in apliciranih materialov v laboratoriju, ki so podlaga za izbiro ustrezne injekcijske mešanice v smislu mehanske in fizikalne kompatibilnosti z originalnimi materiali. Po končanem postopku utrjevanja odstopajočih plasti ometov smo določene nedestruktivne in-situ metode ponovno uporabili za ovrednotenje uspešnosti sanacijskega posega.

Posebna pozornost je bila posvečena tudi pripravi injekcijske mešanice. Tehnologija v laboratoriju omogoča pripravo vedno enake injekcijske mase s ponovljivimi lastnostmi in tako ne reflektira dejanskega stanja na terenu. Priprava injekcijske mase na terenu se izvaja pri različnih pogojih okolja,

kar ne omogoča vedno doseganja enakih lastnosti kot v laboratoriju. Zato lahko pride do večje ali manjše razlike v rezultatih preiskav iste lastnosti.

Izbrano mešanico smo pripravili na terenu pred samim posegom in po končanem mešanju preverili njeno pretočnost in injektibilnost z in-situ metodami.

5.2 Opis stenske slike

In-situ preiskave so bile opravljene na stenski sliki v Kapeli na gmajni v Šetarovi pri Lenartu v Slovenskih goricah. Kapela je bila zgrajena v prvi četrtini 20. stoletja v postbaročnem slogu (slika 5.1, levo). Leta 1992 je bila razglašena za spomenik lokalnega pomena (EŠD 23544). Kapela z zvonikom ima čebulasto streho in je profilirana na vogalih in pod streho. Okni sta rahlo zašiljeni. Kapelo so v preteklosti vaščani večkrat obnovili, zadnja celovita obnova kapele je bila leta 2014.



Slika 5.1: Kapela na gmajni v Šetarovi pri Lenartu v Slovenskih goricah, rdeč kvadrat označuje mesto stenske slike v notranjosti (levo). Notranjost kapele: na levi strani je sv. Lenart, na desni strani pa sv. Frančišek (desno).

Figure 5.1: Chapel in Šetarova at Lenart in Slovenske gorice, red square indicates the position of the wall painting in the interior (left). The interior of the chapel: St. Leonard on the left, St. Francis on the right (right).

V notranjosti je lesen kip Marije in na vsaki strani oltarne mize stenska poslikava, izvedena v secco tehniki. Na desni strani oltarne mize je poslikava svetega Lenarta in na levi strani svetega Frančiška (slika 5.1, desno). Na podlagi sondiranja, izvedenega pred pričetkom obnove kapele, je bilo ugotovljeno, da je celotna kapela v notranjosti poslikana z dekorativnimi vzorci, ki so bili pri kasnejših obnovah prebarvani (priloga L, točka 1). Stenska slika se je nahajala tudi na zunanji strani, v trikotnem čelu nad vrati, vendar je bila zaradi kasnejših prenov in klimatskih vplivov uničena.

V notranjosti je na opečnati zid nanese plast ometa debeline do 1,5 cm. S sondiranjem je bilo ugotovljeno, da je omet, na katerem je naslikana stenska slika, nanesen naknadno. Vidni so stični robovi oziroma omet sedanje poslikave je nanesen čez geometrijsko poslikavo (priloga L, točka 1 in 3). Verjetno so pred nanosom novega ometa, starejši oziroma prvotni omet skupaj zgeometrijsko poslikavo odbili do zidu in nanесли novi sekundarni omet, ki je nanesen čez starejšo poslikavo.

Po podatkih Agencije RS (ARSO, 2015) za okolje je znašala povprečna letna temperatura zraka med leti 1971 in 2000 od 8 do 10 °C, povprečna julijska temperatura od 14 do 16 °C, januarska pa od –4 do –2 °C. Padavinski režim je subkontinentalen, v povprečju pade od 1100 do 1700 mm padavin na leto.

Na spodnjem delu zidu pod stensko sliko (priloga L, točka 2), v območju 1 meter nad tlemi, se pojavljajo poškodbe, ki so posledica prekomerne vlage v zidu in posledično prisotnosti organizmov (biodegradacija). Poleg tega je opazna ekspanzija notranjih ometov. V času sondiranja, meseca junija 2013, je bila povprečna izmerjena vlaga v zidu nad 65 %. Razlog za prekomerno vlago v zidovih je neurejeno odvajanje meteorne vode in slabo vzdrževan in uničen kamen talnega zidca. Kamniti (peščenjaki) talni zidec so v eni od prejšnjih obnov ometali s cementno malto.

Stenska slika sv. Lenarta je poškodovana zaradi prisotnosti prekomerne kapilarne vlage v zidovih in slabe tehnologije priprave in nanosa ometa na zid, kar je povzročilo odstopanje ometa od podlage. Prekomerna vlaga v temelju in spodnjem delu zidu se zaradi kapilarnega srka vode dviga po zidu navzgor. Vlaga na svoji poti raztaplja tudi vezivo ometa, zaradi česar je ta postal popolnoma krhek in se na več mestih loči od zidu (priloga L, točka 3).

Vidne so tudi večje razpoke širine od 0,08 do 0,7 mm, ki potekajo večinoma v diagonalni ali vertikalni smeri (priloga L, točka 3). Večje število razpok se nahaja na zgornji strani poslikave, med glavo svetnika in knjigo, ter na spodnji polovici med koncem šala in spodnjim robom črne obleke. Ločita se lahko dve vrsti razpok, in sicer: globoke razpoke, ki potekajo vse do nosilca (te so večinoma skoncentrirane na spodnji polovici poslikave) in ozke razpoke, ki niso globoke (te se nahajajo večinoma v zgornji polovici poslikave).

Na spodnjem delu stenske slike so na nekaterih delih odpadli deli ometa skupaj z barvno plastjo (priloga L, točka 4). Vertikalna razpoka, ki poteka po črni obleki, čevlju in vse do okvirja stenske slike, na rjavem oblaku nivojsko odstopa (priloga L, točka 4).

5.3 Neporušne preiskave

V okviru ugotavljanja in vrednotenja poškodovanosti stenske slike so bile uporabljene različne metode za detekcijo odstopajočih plasti ometov in analizo ometov ter barvnih plasti. V okviru doktorske disertacije je izbran za izvajanje analiz in utrjevanje z izbrano mešanico spodnji del stenske slike, ki je označen na sliki 5.2 z rdečim črtkastim kvadratom.



Slika 5.2: Označena lokacija izbranega področja.

Figure 5.2: Selected part of the wall painting.

5.3.1 Metoda s trkanjem

Najprej smo stensko sliko pregledali s klasično nedestruktivno metodo – z nežnim trkanjem po površini. Ob trkanju se posluša akustični odziv. Višji kot so toni, bolj kompaktna je struktura ometa oziroma povezava med ometom in zidom. Nižji, bolj votli toni nakazujejo na odstopajoče plasti ometov.

Z nežnim trkanjem po površini spodnjega dela stenske slike smo določili mesta odstopajočih plasti ometov, ki so prikazana na sliki 5.3.

Odstopajoča mesta so razdeljena na tri stopnje, in sicer:

- 1. stopnja, rdeče barve – kritično, potrebno je injicirati mešanico, da se prepreči nastajanje nadaljnjih poškodb (odpadanje ometa);
- 2. stopnja, oranžne barve – manj kritična mesta, delujejo trdno in ni nujno injicirati mešanice;
- 3. stopnja, z rumeno barvo – nekritična mesta, ob trkanju delujejo votlo, vendar so trdna in ni potrebe po injiciranju mešanice.

Mesta, ki niso označena, delujejo trdna in kompaktna, brez poškodb.

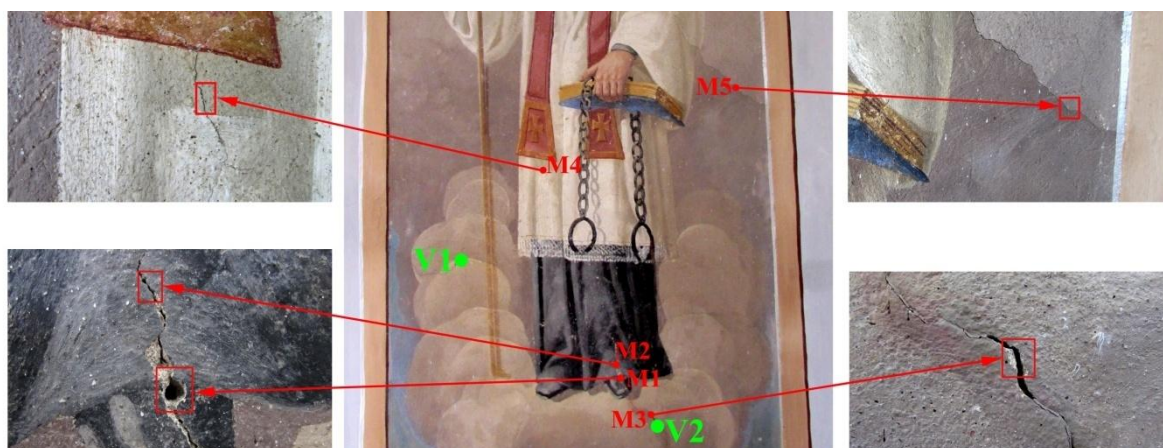


Slika 5.3: Označeni del odstopajočih plasti ometov z metodo s trkanjem.
Figure 5.3: Marked detached plaster layers evaluated by the tapping method.

5.3.2 Mikroskopska analiza s sistemom HIROX

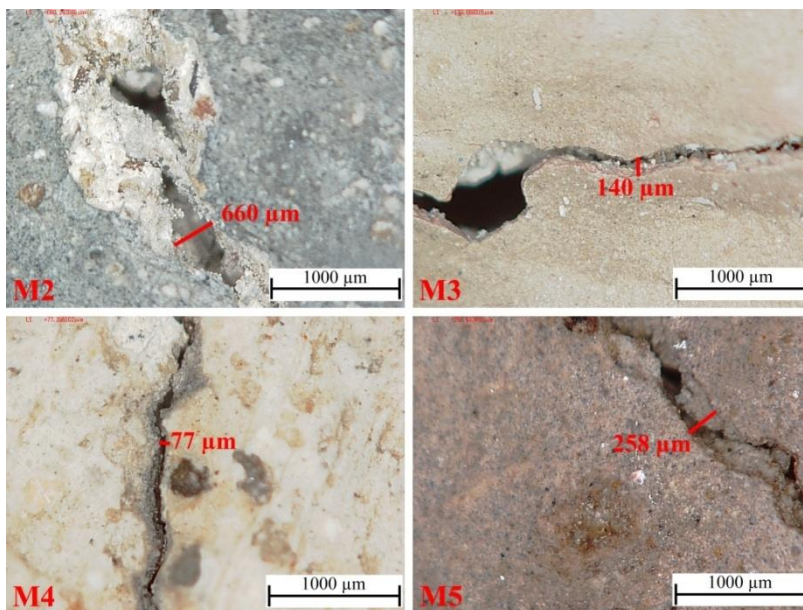
In-situ mikroskopsko analizo smo opravili s 3D optičnim mikroskop HIROX KH 3000, (v nadaljevanju »mikroskopski sistem HIROX 3D«) (Štukovnik, 2015), z namenom detajlne vizualne preiskave površine stenske slike.

Na stenski sliki sv. Lenarta je bila v oktobru 2014 opravljena analiza z mikroskopskim sistemom HIROX 3D na petih merilnih mestih. Na sliki 5.4 so označena merilna mesta.



Slika 5.4: Merilna mesta z mikroskopskim sistemom HIROX KH 3000 in mesta odvzema vzorcev.
Figure 5.4: Measurement points with the HIROX KH 3000 microscope system and the place of taken samples.

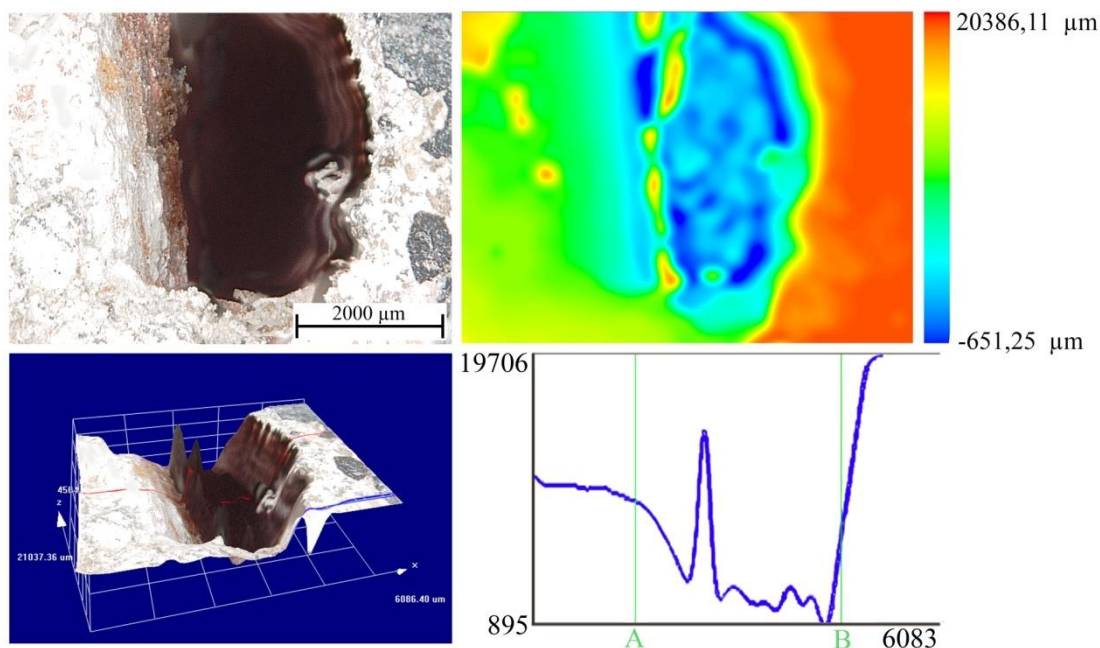
Na merilnih mestih M2, M4 in M5 smo merili širino razpok (slika 5.5). Širina razpok se giblje od 77 do 660 μm . Na vseh merilnih mestih je bila detektirana kristalizacija soli v razpokih. V ta namen je bil odvzet vzorec ometa (slika 5.4, točka V2) za določitev vrste soli, ki se pojavljajo v razpokah.



Slika 5.5: Meritve širine razpok.

Figure 5.5: Measurement of width of the cracks.

Na sliki 5.6 je predstavljeno merilno mesto M1, kjer se iz večžariščne ali multifokalne slike nazorno vidi globina razpoke in odstopanje ometa od nosilca.



Slika 5.6: Razpoka, merilno mesto M1, 50x povečava. Multifokalna slika (levo zgoraj).

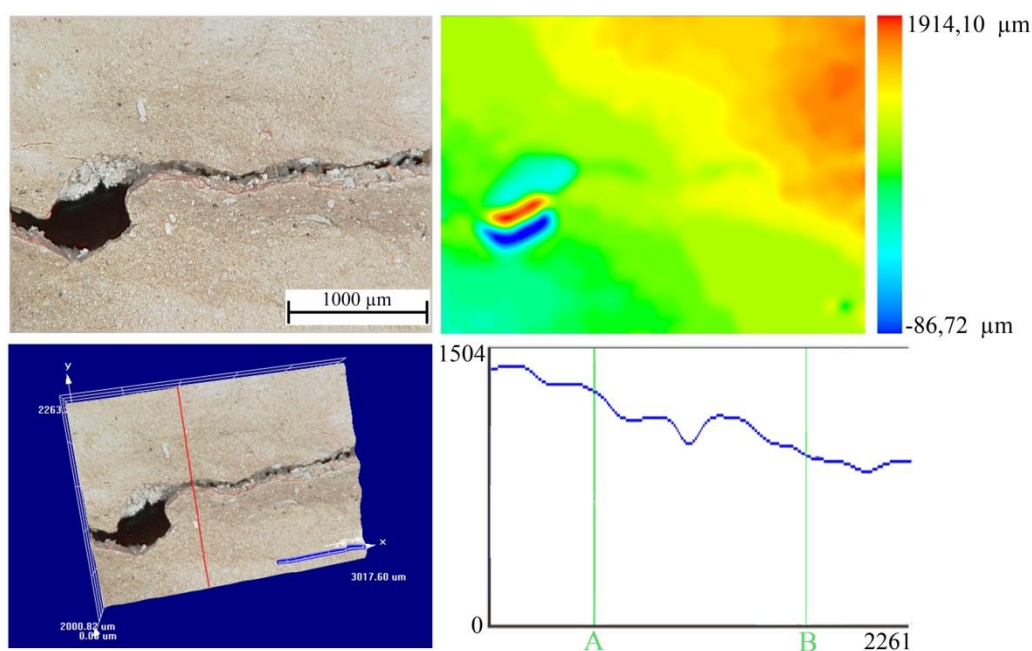
Topografija površine (desno zgoraj). 3D slika (levo spodaj). Profil (desno spodaj).

Figure 5.6: Crack measurement point M1 50x magnification. Multifocus image (top left). Topography image (top right). 3D image (bottom left). Profile (bottom right)

Iz topografije površine merilne točke M1 (slika 5.6, desno zgoraj) je razvidna nivojska razlika med levo in desno stranjo razpoke. Desna površina razpoke je višja za okrog 9406 μm in je obarvana v

rdečo-oranžnih tonih, medtem ko je nižja, leva stran razpoke obarvana z zeleno-rumenimi toni. Nivojska razlika je prav tako razvidna iz 3D slike in profila. Izmerjena globina razpoke je 19706 μm , njena širina je 6083 μm . Na topografiji površine se razpoka oziroma odstopljeno mesto ometa od zidu vidi kot območje, ki je obarvano s temno modro barvo.

Merilna točka M3, ki je merjena na vertikalni razpoki, je predstavljena na sliki 5.7. Iz multifokalne slike, 3D slike in profila je razvidno, da ima razpoka nivojski zamik. Izmerjena globina razpoke je 1504 μm in širina 140 μm .



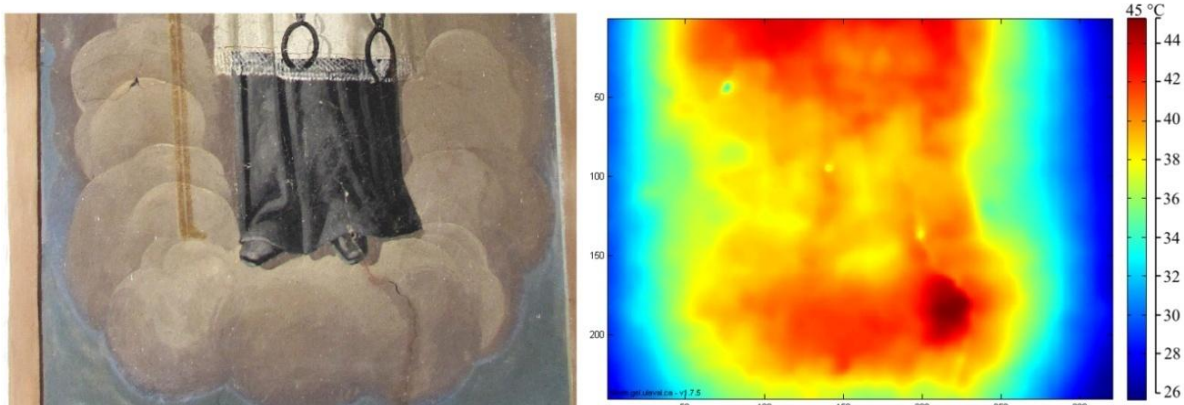
Slika 5.7: Razpoka, merilno mesto M3, 100x povečava. Multifokalna slika (levo zgoraj). Topografija površine (desno zgoraj). 3D slika (levo spodaj). Profil (desno spodaj).

Figure 5.7: Crack measurement point M1 50x magnification. Multifocus image (top left). Topography image (top right). 3D image (bottom left). Profile (bottom right).

5.3.3 Termografske meritve

Termografske meritve temeljijo na zaznavanju spremenjene površinske temperature zaradi različnih toplotnih prevodnosti barvne plasti, ometa, nosilnega zidu in morebitnih votlih mest ter razpok. V ta namen smo uporabili infrardečo termo kamero FLIR A320, predvsem za odkrivanje in oceno odstopajočih plasti ometov.

Izbran predel, spodnji del stenske slike, se je enakomerno segreval z dvema IR grelcema. Najvišja površinska temperatura je dosegla približno 45 $^{\circ}\text{C}$. Po končanem segrevanju smo ohlajanje merili 105 min.



Slika 5.8: Fotografija z označeno lokacijo termografske meritve (levo), temperaturna slika po 30-ih s končanega gretja (desno).

Figure 5.8: Marked locations of thermographic measurement (left), the temperature image after 30 s of heating (right).

Na sliki 5.8 (desno) je prikazana površinska temperatura 30 sekund po končanem gretju. Na mestih, kjer naj bi bila morebitna odstopanja plasti ometov oziroma votlikavost, so temperature na površini višje (temnejša rdeča barva), ker se mesta počasneje ohlajajo zaradi zmanjšanja stopnje difuzije toplote. Največja področja odstopajočih mest so na oblaku, ob razpokah in ob beli čipki.

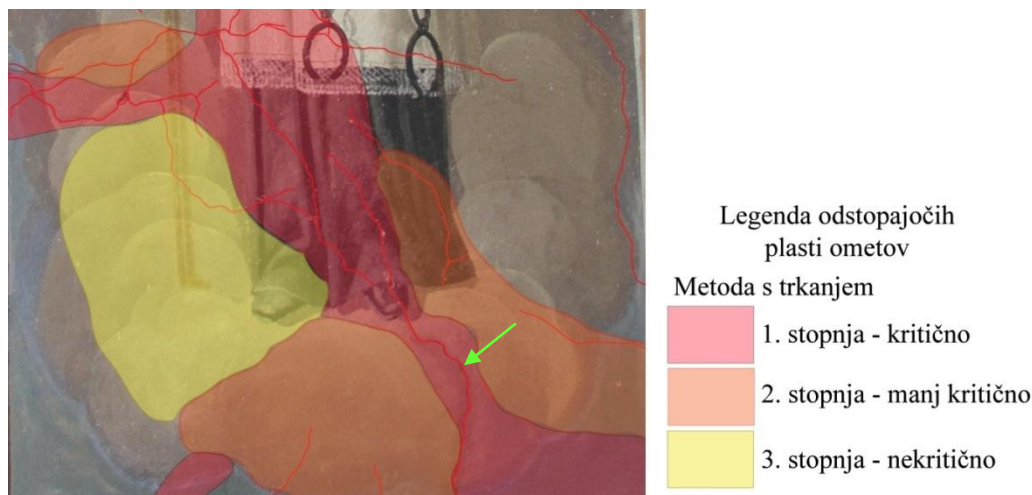
5.3.4 Povzetek rezultatov neporušnih metod

Kapela ima v spodnjem kamnitem talnem zidcu prekomerno količino vlage v zidovih, katera se zaradi kapilarnega srka dviguje po zidu navzgor proti stenski sliki sv. Lenarta.

Poškodbe, odstopanje ometa od zidu, odpadanje ometa in razvoj soli so posledica prisotnosti prekomerne vlage v zidovih in slabe tehnologije priprave in nanosa ometa na zid.

Za detekcijo odstopajočih plasti ometov so uporabljene tri metode, in sicer: metoda s trkanjem, mikroskopska analiza s sistemom HIROX in termografske meritve.

Z mikroskopsko analizo sistema HIROX smo izmerili širine in globine razpok. Omet, na katerega je naslikana poslikava sv. Lenarta, je nanesen v debelini okrog 2 cm. Razpoke so široke od 77 do 660 μm .

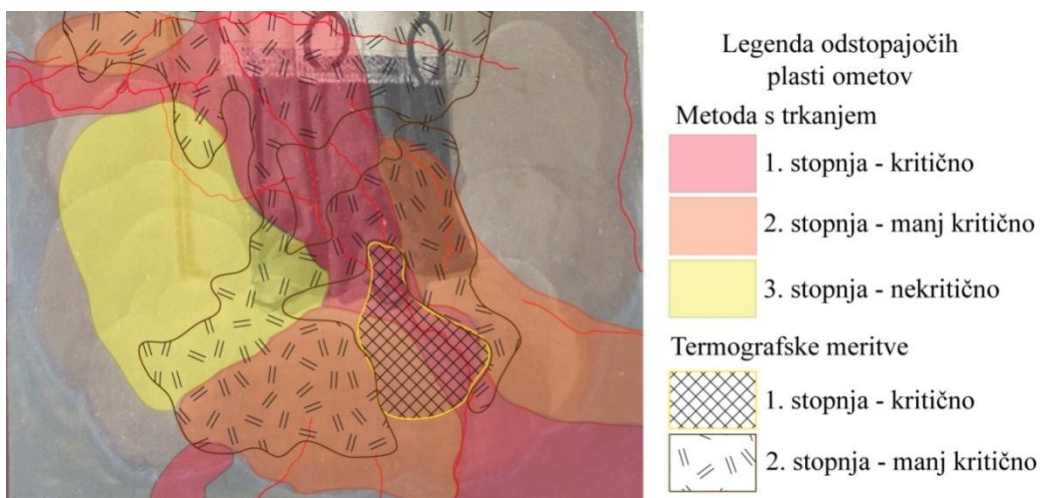


Slika 5.9: Združena metoda s trkanjem in označenimi razpokami.

Figure 5.9: Combined method by tapping and marked cracks.

Na sliki 5.9 je razvidno, da so kritična mesta odstopajočih plasti ometov (označena z rdečo barvo) na mestih, kjer je skoncentrirano večje število razpok. Vertikalna razpoka označena z zeleno puščico ima nivojski zamik in v njej smo zaznali prisotnost vodotopnih soli s pomočjo mikroskopskega sistema HIROX 3D.

Primerjava rezultatov metode s trkanjem in termografskih meritev (slika 5.10) pokaže, da so rezultati v večji meri primerljivi. Vendar pa je detekcija odstopajočih plasti ometov s termografskimi meritvami veliko bolj natančna kot metoda s trkanjem. Glede na rezultate termografskih meritev lahko zaključimo, da so področja, označena z 2. in 3. stopnjo z metodo trkanja (slika 5.10) še vedno dovolj trdna in kompaktna ter jih ni potrebno utrjevati. Po drugi strani pa so se področja, označena v rdeči barvi, na podlagi metode s trkanjem, izkazala kot problematična tudi s termografsko meritvijo in jih je treba utrditi.



Slika 5.10: Združena metoda s trkanjem in termografska meritev.

Figure 5.10: Combined method by tapping and thermographic measurement.

Pri interpretaciji rezultatov termografskih meritev se je kot zelo primerna izkazala združitev rezultatov termografske metode in metode s trkanjem. Na ta način smo dobili celovitejšo sliko o problemu, kar je omogočilo lažjo interpretacijo rezultatov termografskih meritev.

Zaključimo lahko, da so se vse tri neporušne metode izkazale kot učinkovito orodje za analizo in detekcijo odstopljenih plasti ometov. Termografske meritve so bolj učinkovite in natančnejše od metode s trkanjem, z mikroskopskim sistemom HIROX 3D pa lahko analiziramo globine in širine razpok ter določimo mesta za vzorčenje, ki daje največ podatkov.

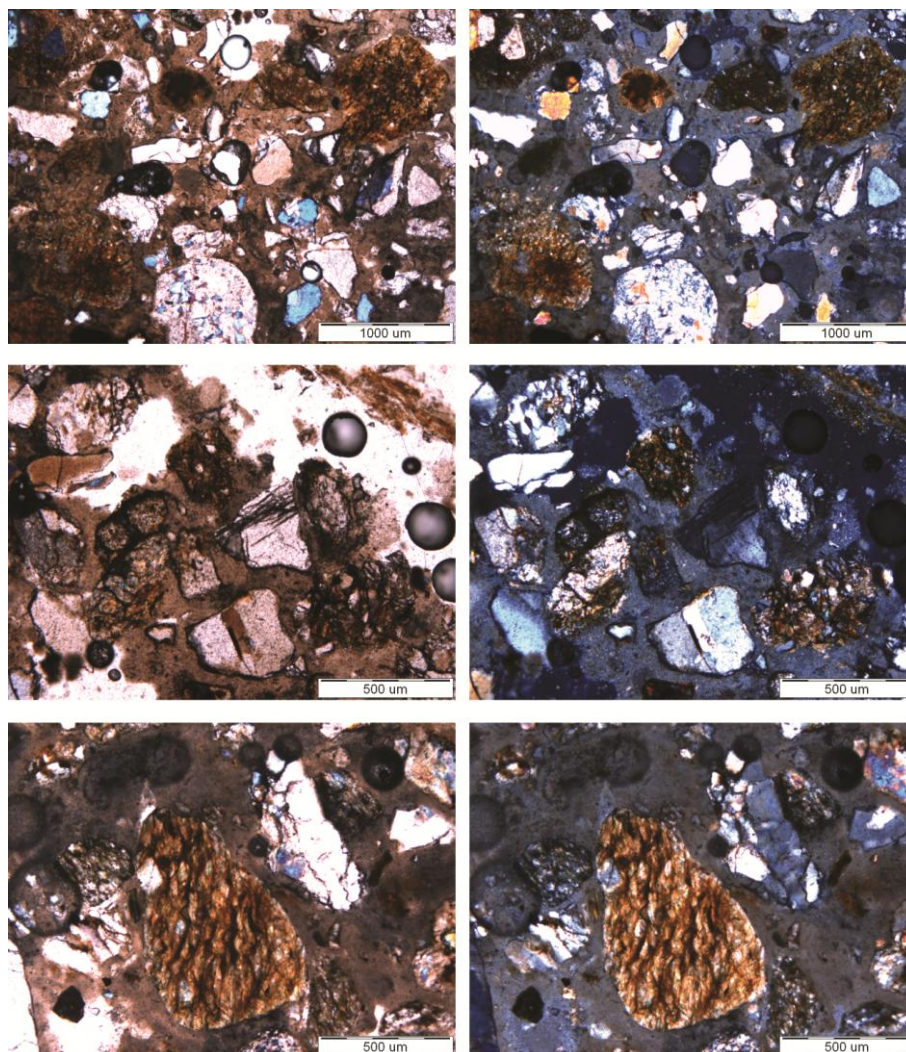
5.4 Destruktivne metode

5.4.1 Optična mikroskopija

Optična mikroskopija je bila izbrana za karakterizacijo in določitve sestave ometa. Opravili smo jo na vzorcu V1 (Slika 5.4). Vzorec je bil odvzet z močno poškodovanih delov stenske slike, do dodatnih poškodb pri odvzemu vzorca ni prišlo. Za preiskave na zbruskih je bil uporabljen polarizacijski optični mikroskop Olympus BX60 z JVC3-CCD z video kamero.

Vzorec V1 je homogen, saj so zrna agregata enakomerno porazdeljena in brez večjih razpok v vezivu (slika 5.11). Zrna agregata so oglatih oblik in dimenzij od 0,13 do 0,79 mm. Oblika zrn nakazuje, da je bil uporabljen drobljen pesek. Pri mineralni sestavi agregata prevladujejo silikatni minerali kremenca. Nekaj je tudi karbonatnih zrn peščenjaka z zaobljeno obliko.

Vezivo je na osnovi apna, ki mu je kot mineralni dodatek dodana zdrobljena opeka (slika 5.11). Zrna opeke so različnih dimenzij, od 0,26 do 0,85 mm.



Slika 5.11: Mikroskopska slika vzorca ometa (V1). Splošne slike, 5x in 10x povečave, PPT (levo).
Splošne slike, 5x in 10x povečave, XPT (desno).

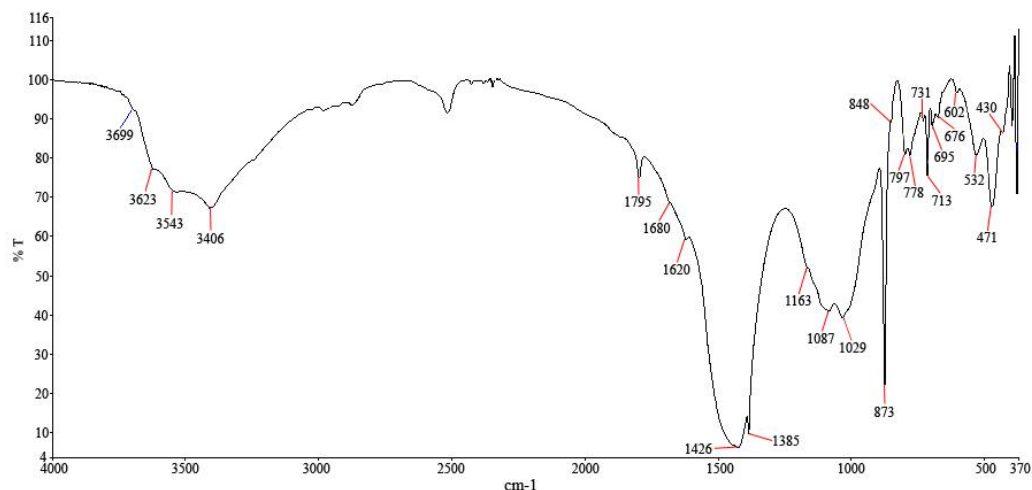
Figure 5.11: Microscopic image of mortar (V1). Images of the sample, 5x and 10 x magnification,
PPT (left). Images of the sample, 5x and 10x magnification, XPT (right).

5.4.2 Infrardeča spektroskopija s Fourierovo transformacijo (FTIR)

Mesto odvzema vzorca V2 je označeno na sliki 5.4. Vzorec smo analizirali s spektroskopijo FTIR s Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR spektrometrom v transmisiji KBr, z namenom ugotavljanja morebitne prisotnosti vodotopnih soli. Spektre smo posneli z MCT detektorjem v območju 4000 cm^{-1} do 400 cm^{-1} z 32-imi posnetki pri spektralni resoluciji 4 cm^{-1} . V ta namen je bil vzorec homogeniziran in uprašen.

Na podlagi spektrov (slika 5.12 in slika 5.13) analiziranega vzorca ometa V2 smo določili prisotnost naslednjih vodotopnih soli: kalcijev sulfat dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), natrijev nitrat (NaNO_3) in kalijev

nitrat (KNO_3). Prav tako pa je analiza vzorca pokazala sestavo ometa: kalcit, kremen, silikati in prisotnost kaolina.

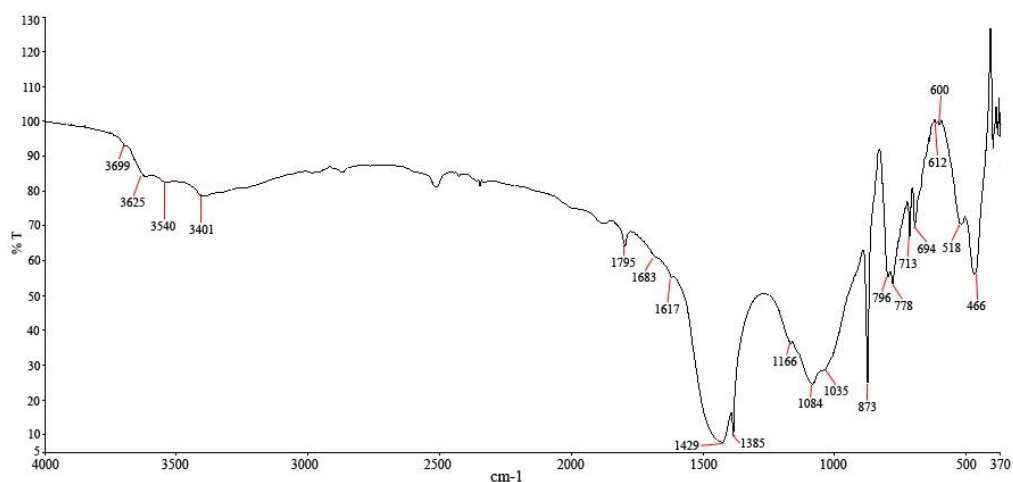


Slika 5.12: FTIR spekter vzorca V2.

Figure 5.12: FTIR spectra of the sample V2.

S slike 5.12 se lahko razbereta značilna absorpcijska trakova 1385 cm^{-1} in 848 cm^{-1} , ki pripadata natrijevemu nitratu. Prisotnost kalcijevega sulfata dihidrata oziroma sadre bi lahko prikazovali absorpcijski trakovi 3543 cm^{-1} , 3406 cm^{-1} , 1680 cm^{-1} , 1620 cm^{-1} , 676 cm^{-1} in 601 cm^{-1} .

Medtem ko ostali absorpcijski trakovi pripadajo kalcitu (1795 cm^{-1} , 1426 cm^{-1} , 873 cm^{-1} in 713 cm^{-1}), kremenu (1163 cm^{-1} , 1087 cm^{-1} , $797\text{--}778\text{ cm}^{-1}$ in 694 cm^{-1}), silikatu (1029 cm^{-1} , 471 cm^{-1}) in kaolinu (3699 cm^{-1} , 3622 cm^{-1} , 532 cm^{-1}).



Slika 5.13: FTIR spekter vzorca V2.

Figure 5.13: FTIR spectra of the sample V2.

Spekter na sliki 5.13 ima značilni absorpcijski trak za kalijev nitrat pri 1385 cm^{-1} in kalcijev sulfat dihidrat pri 3540 cm^{-1} , 3401 cm^{-1} , 1683 cm^{-1} , 1617 cm^{-1} in 600 cm^{-1} . Ostali absorpcijski trakovi

pripadajo ponovno kalcitu (1795 cm^{-1} , 1429 cm^{-1} , 873 cm^{-1} , 713 cm^{-1}), kremenu (1166 cm^{-1} , 1084 cm^{-1} , $796\text{-}778\text{ cm}^{-1}$, 694 cm^{-1} , 518 cm^{-1}), silikatu (1035 cm^{-1} , 466 cm^{-1}) in kaolinu (3699 cm^{-1} , 3625 cm^{-1}).

Natrijev nitrat (NaNO_3) in kalijev nitrat (KNO_3) spadata v skupino zelo topnih soli, medtem ko kalcijev sulfat dihidrat spada v ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) srednje topne soli in je tudi najbolj nevaren. Kristalizacija sadre lahko povzroči resne poškodbe, kot so: degradacija ometa na ali pod površino, odpadanje barvne plasti in nastajanje površinske koprore.

Poleg vodotopnih soli je bil v analiziranem vzorcu ometa detektiran kalcit, ki ga pripišemo apnenemu vezivu. Kremen in slikati predstavljajo agregat. Glede na jakost absorpcijskih trakov prevladuje kremenov agregat. V vzorcu pa je prav tako prisoten kaolin oziroma glina, ki jo lahko pripišemo drobljeni opeki, prisotni v ometu.

5.4.3 Povzetek rezultatov destruktivnih analiz

Rezultati optične mikroskopske analize in FTIR analize pokažejo, da je pri ometu porabljeno vezivo na osnovi apna z dodano mleto opeko. Agregat je drobljen kremen in peščenjak granulacije od 0,13 do 0,79 mm.

FTIR analiza ometa pokaže prisotnost vodotopnih soli nitratov in sadre. Sadra spada v skupino srednje topnih soli in je nevarna za obstoj stenske slike. Pri kristalizaciji povzroča poškodbe v obliki degradacije ometa na ali pod površino, prašenje ometa, odpadanje barvne plasti itd.

5.5 Izvedba sistematičnega injiciranja na izbrani stenski sliki

Namen sistematičnega injiciranja je zapolnitev votlih mest za odstopljenimi plastmi ometov, da se ponovno vzpostavi stabilna strukturna celota in hkrati omogoča nadaljnje konservatorske-restavratorske posege. Pri tem je pomembno upoštevati temeljni konservatorski-restavratorski načeli (Bogovčič, 2000):

- združljivost oziroma kompatibilnost originalnih materialov z novo vgrajenimi materiali, po kemijskih, fizikalnih in mehanskih lastnostih in
- minimalno poseganje v obstoječo poškodovano stensko sliko, za preprečitev povzročanja novih stresov na originalu, ker se ne more zagotoviti nespremenljivosti in povratnosti uporabljenih materialov. Le z minimalnimi posegi se lahko zagotovi možnost vpogleda v zgradbo/sestavo in zgodovino umetnine.

Pred samim pričetkom utrjevanja odstopajočih plasti ometov na spodnjem delu stenske slike sv. Lenarta sem v septembru 2014 opravila utrjevanje prhkega in drobljivega ometa z apneno vodo. Apneno vodo sem injicirala z injekcijsko iglo v razpoke oziroma v že nastale poškodbe. Utrjevanje odstopajočih plasti ometov sem opravila septembra 2015.

5.5.1 Priprava in testiranje injekcijske mešanice $L_1 S_2B_1$ PCE na terenu

Injekcijska mešanica je suspenzija dvofaznega sistema trdnih delcev, dispergiranih v tekočem mediju, ki je občutljiva na okoljske spremembe in nenazadnje na opremo (vrsta mešalnika). Pomembno je, da konservatorji-restavradorji pri pripravi mešanic sledijo navodilom proizvajalca ali laboratorijskim navodilom glede načina in časa mešanja, količine dodane vode itd. Vendar pa priprava mešanice na terenu ni nikoli enaka kot v laboratoriju. Kot je že omenjeno v uvodu, lahko vpliv okolja bistveno vpliva na delovne lastnosti mešanice in posledično tudi na mehansko-fizikalne lastnosti.

Izbrana mešanica $L_1 S_2B_1$ PCE je bila pripravljena pred samim postopkom injiciranja na terenu, pred katerim smo na njej opravili preiskave nekaterih delovnih lastnosti. V ta namen smo na terenu uporabili in-situ metode za preverjanje prostorninske mase sveže mešanice, izločanja vode, vodozadržnosti, pretočnosti, injektabilnosti z injekcijsko brizgo, tečenja na apnenih ploščah, merjenja razleza in preverjanja prostorninske stabilnosti z apneno skodelico.

Rezultate, dobljene na terenu, smo primerjali z rezultati dobljenimi v laboratoriju, kar je omogočilo ovrednotenje vpliva različnih pogojev okolja na delovne lastnosti mešanice.

Na terenu sem mešanico $L_1 S_2B_1$ PCE pripravila po postopku, opisanem v poglavju 3.3.1 (s kuhinjskim mešalnikom). Za injektabilnost in pretočnost z injekcijsko brizgo sem uporabila drobljen apneni omet (glej poglavje 3.5.5). Apnena skodelica, ki sem jo uporabila, je bila enaka kot pri testih v laboratoriju.

V preglednici 5.1 in prilogi M so podani rezultati in-situ testov mešanice $L_1 S_2B_1$ PCE, pripravljene in testirane na terenu. V času testiranja je bila temperatura v kapeli 18 °C in RH 65 %.

Material (hidratizirano apno, kalcitna moka, ultralahko polnilo, voda in superplastifikator) smo en dan prej pripeljali v kapelo. Pred pričetkom mešanja sem materialu izmerila temperaturo, bila je cca. 18 °C.

Iz preglednice 5.1 je razvidno, da je prišlo do razlik med rezultati preiskav na sveži mešanici $L_1 S_2B_1$ PCE na terenu in v laboratoriju.

Mešanica, pripravljena na terenu, je manj viskozna in dosega višji razlez ter krajši čas pretočnosti, merjen z modificiranim lijakom. V obeh primerih mešanica presega dopustne razlike v rezultatih, ki izvirajo iz variacije rezultatov preiskav v laboratoriju (koeficient variacije).

Izločanje vode in vodozadržnost mešanice, pripravljene na terenu, sta bila slabša kot pri mešanici, pripravljene v laboratoriju.

Dopustne razlike v rezultatih pa mešanica, pripravljena na terenu, ne presega pri prostorninski masi, izločanju vode in vodozadržnosti, glede na rezultate v laboratoriju.

Preverjanje injektabilnosti in pretočnosti z injekcijskimi brizgami ter tečenje na apnenih ploščah s kanalčki ni pokazalo razlik, glede na rezultate v laboratoriju.

Do razlike pa je prišlo pri preverjanju prostorninske stabilnosti mešanice z apnenimi skodelicami. Na stiku mešanice in skodelice je v obeh primerih (pri suhi in navlaženi skodelici) nastala razpoka širine 0,5 mm. Izkazalo se je, da ima vlaženje apnene skodelice na terenu boljši učinek, saj v tem primeru ni razpok v sami masi, medtem ko so v primeru suhe skodelice nastale razpoke v masi širine do 0,3 mm.

Preglednica 5.1: Lastnosti injekcijske mešanice L₁ S₂B₁ PCE, testirane na terenu.

Table 5.1: Properties of injection mixture L1 S2B1 PCE tested at the field.

Lastnosti	Dosežene vrednosti na terenu (v laboratoriju)	Dopustne razlike za rezultate v laboratoriju
Prostorninska masa sveže pripravljene mešanice	1,50 g/cm ³ (1,51 g/cm ³)	0,04 g/cm ³
Izločanje vode	1,9 % (1,7 %)	0,3 %
Vodozadržnost	79 % (80 %)	2,4 %
Razlez	300 mm (279 mm)	6 mm
Pretočnost z modificiranim lijakom	46 s (53 s)	
Injektabilnost z injekcijsko brizgo	Suh drobljen omet: težavno (D ₂₇) 27 mm in navlažen drobljen omet: enostavno (E) > 30 mm (enako)	Enako
Pretočnost z injekcijsko brizgo	Suh in navlažen drobljen omet: težavno (D) (enako)	Enako
Tečenje na apnenih ploščah s kanalčki	Suh odprt/zaprt, navlažen odprt/zaprt kanalček: razdalja H > 200 mm (enako)	Enako
Prostorninska stabilnost z apneno skodelico	Suha apnena skodelica: 0,5/0,3 mm (0,2/0,5 mm) Navlažena apnena skodelica: 0,5/0 mm (0,2/0,5 mm)	Enako

Verjetno lahko razlike v rezultatih pripišemo različni temperaturi in relativni vlažnosti. V laboratoriju je bila temperatura 21 ± 2 °C in RH 55 ± 5 %, medtem ko je bila v kapeli nižja temperatura in višja relativna vlaga (T = 18 °C in RH 65 %). Dobljeni rezultati kažejo, da bi bilo treba injekcijsko mešanico testirati v različnih pogojih okolja, če želimo dobiti celotno informacijo o njenem obnašanju.

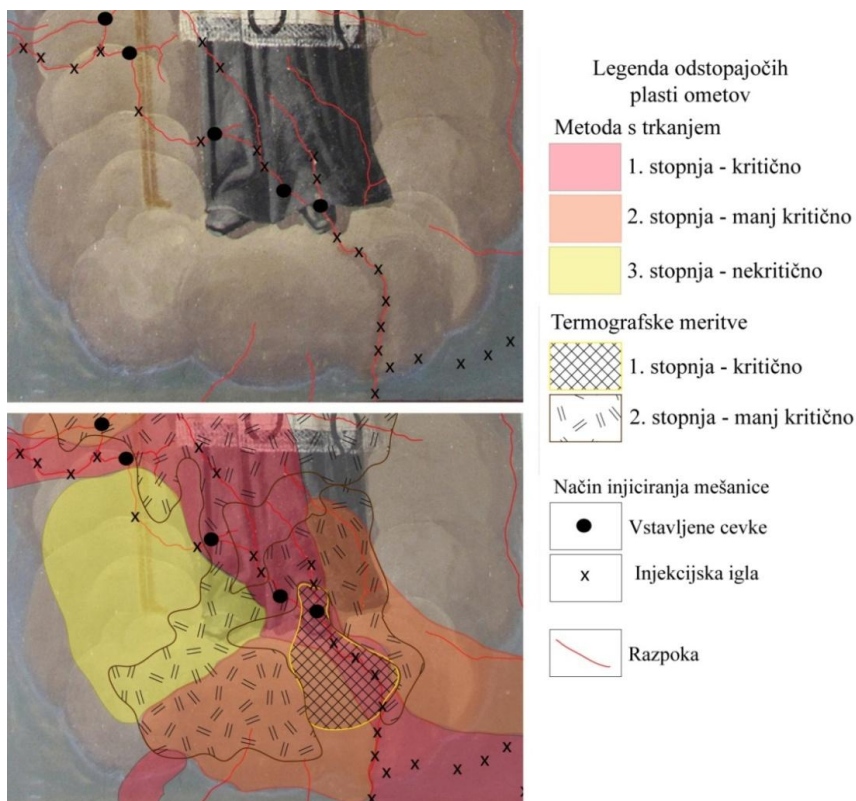
Iz rezultatov je tudi razvidno, da je temperatura pomemben parameter pri sanacijskih postopkih, saj vpliva na lastnosti svežih mešanic in v končni fazi prav tako na mehansko-fizikalne lastnosti mešanic v strjenem stanju. Posebna pozornost je potrebna v primeru, ko se uporabljajo kemični dodatki, ki so še posebej dovzetni za različne vplive okolja in način mešanja (Fernando in sod., 2015).

Glede na rezultate preiskav mešanice $L_1 S_2B_1$ PCE, pripravljene na terenu, ki so bili v dopustnem območju odstopanj, razen razleza in pretočnosti, sem mešanico injicirala v odstopajoče plasti ometov. V primeru, da bi mešanica presegala dopustna odstopanja še pri drugih lastnostih, te mase ne bi uporabila za injiciranje.

5.5.2 Utrjevanje odstopajočih plasti ometov stenske slike

Sistematično injiciranje sem opravila na mestih, ki so označena na sliki 5.14, z mešanico $L_1 S_2B_1$ PCE. Mesta za injiciranje sem izbrala na obstoječih poškodbah in razpokah. S tem sem izpolnila zahtevo po minimalnem povzročanju novih poškodb na stenski sliki.

Stenske slike pred pričetkom utrjevanja nisem površinsko zaščitila z japonskim papirjem, ker za to ni bilo potrebe. Na podlagi predhodnega vizualnega pregleda sem ocenila, da med postopkom utrjevanja ne bo prišlo do novih poškodb.



Slika 5.14: Označene lokacije injiciranja mešanice.

Figure 5.14: Injection points.

Pri injiciranju sem uporabila dve metodi, in sicer metodo s predhodnim vstavljanjem cevk v že nastale poškodbe in injekcijsko iglo (priloga N). Cevke so bile dolžine 5 do 10 cm in premera 3,5 mm, injekcijska igla je imela zunanji premer 1,2 mm. V obeh primerih sem uporabila injekcijsko brizgo, s katero je mogoče previdno in kontrolirano injiciranje mešanice z manjšimi delovnimi pritiski.

V pripravljena mesta za utrjevanje sem najprej injicirala apneno vodo in etanol v razmerju 50 : 50, zaradi zmanjšanja površinskih sil v notranjosti odstopljenih površin in izboljšanja injektibilnosti mešanice.

Apneno vodo, namesto destilirane vode, sem izbrala zaradi ponovnega utrjevanja ometa.

Injiciranje sem pričela spodaj (ob vznožju poslikave) in ga postopoma nadaljevala po steni navzgor.

V primeru, ko je med postopkom injiciranja mešanica začela uhajati iz razpoke ali cevke, sem injiciranje prekinila. Na podlagi tega sem predpostavila, da je injicirana mešanica zapolnila dostopne zračne žepe in razpoke.

Za utrditev sem uporabila cca. 0,5 l injekcijske mešanice.

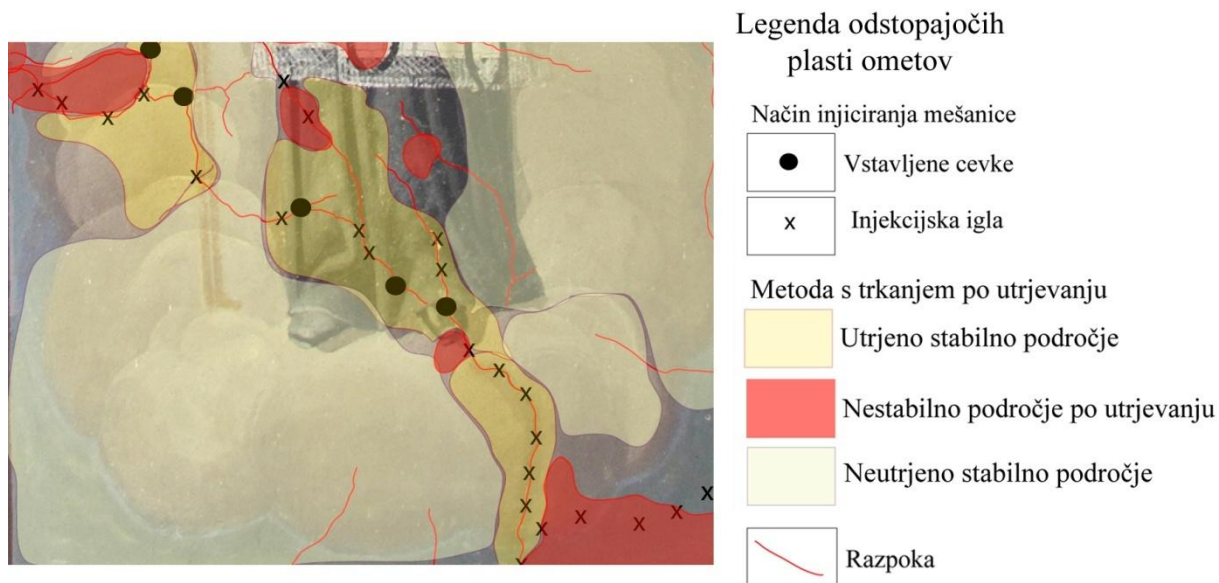
Obe metodi injiciranja mešanice sta se izkazali za uporabni in učinkoviti. Z vstavljanjem cevk v poškodbe je omogočeno globlje injiciranje, medtem ko so injekcijske igle primernejše za manjše poškodbe.

5.6 Neporušne preiskave po postopku utrjevanja

Za preverjanje kakovosti utrjevanja odstopljenih plasti ometov smo uporabili dve neporušni preiskavi, in sicer metodo s trkanjem in termografsko meritev. Obe preiskavi smo opravili v drugi polovici oktobra 2015.

Najprej sem opravila metodo z nežnim trkanjem po utrjevani površini spodnjega dela stenske slike. Na podlagi zvočnega odziva sem določila stabilna in nestabilna področja, ki so prikazana na sliki 5.15. Področja so razdeljena v tri skupine:

- utrjeno stabilno področje, kjer je po postopku utrjevanja področje stabilno,
- neutrjeno stabilno področje, na tem področju se ni injiciralo mešanice,
- utrjeno nestabilno področje, kljub utrjevanju z mešanico, področje še ni stabilno. V tem primeru je potrebno ponoviti postopek injiciranja mešanice.

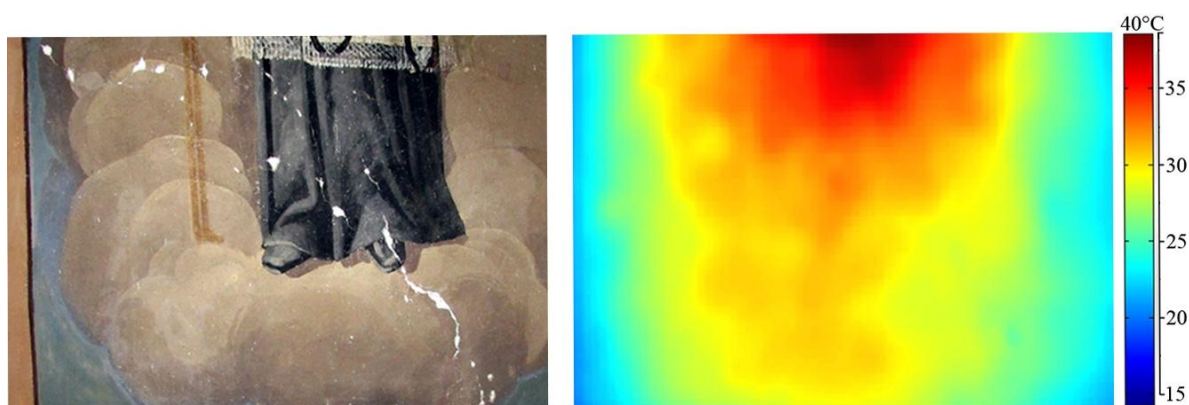


Slika 5.15: Preverjanje kakovosti utrjevanja z metodo s trkanjem.

Figure 5.15: Checking the quality of consolidation with the tapping method.

V nadaljevanju smo uporabili termografsko metodo z infrardečo termo kamero FLIR A320, predvsem za preverjanje kakovosti utrjevanja. Na sliki 5.16 so predstavljeni rezultati termografskega merjenja izbranega dela stenske slike, 30 s po končanem gretju površine.

Spodnji del stenske slike smo ponovno enakomerno segrevali z dvema IR grelcema. Najvišja površinska temperatura je dosegla približno 45 °C. Po končanem segrevanju smo ohlajevanje spremljali in merili 105 min.

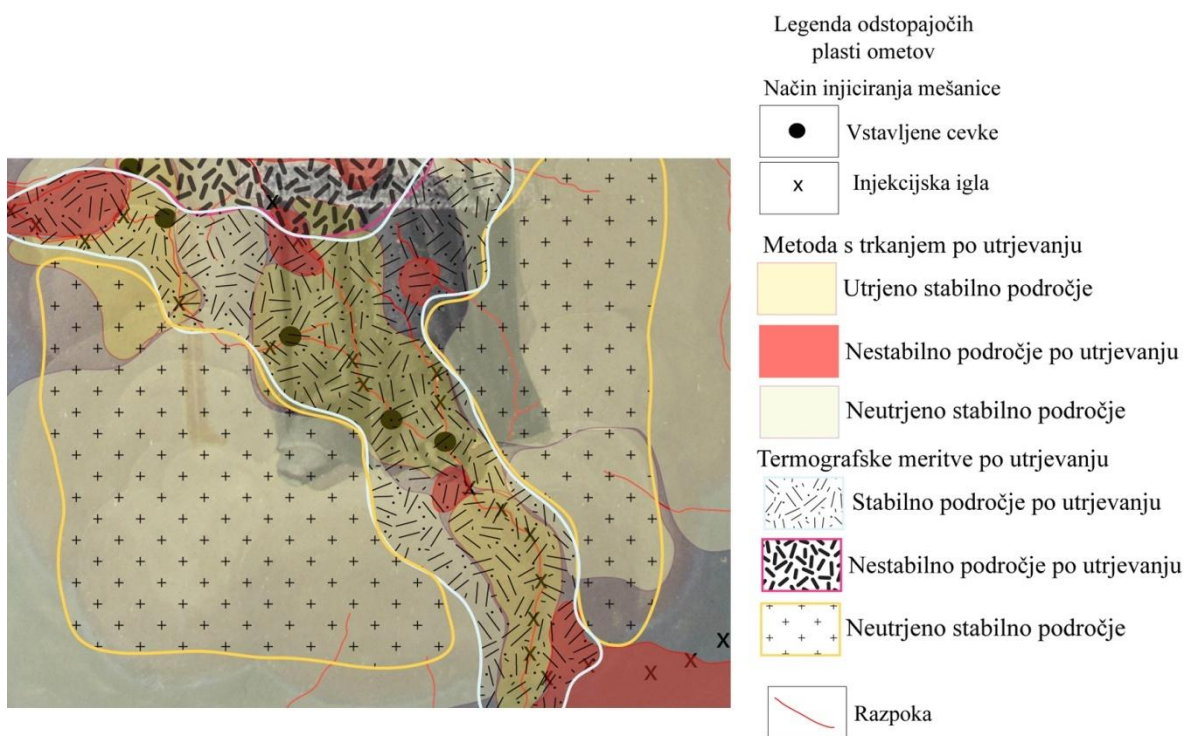


Slika 5.16: Preverjanje kakovosti utrjevanja s termografsko meritvijo.

Figure 5.16: Checking the quality of consolidation with the thermographic measurement.

Termografska meritev je pokazala, da je bilo utrjevanje uspešno na oblaku in deloma na obleki svetnika. V primeru zgornjega dela obleke, kjer so temperature na površini najvišje (temno rdeča barva), utrjevanje ni bilo uspešno.

Primerjava rezultatov metode s trkanjem in termografske meritve, ki je prikazana na sliki 5.17, ponovno pokaže primerljivost rezultatov. Obe metodi pokazeta, da se mora v primeru zgornjega dela obleke posotopek utrjevanja ponoviti. Utrjevanje oblaka in čevlja svetnika ob razpoki pa je bilo uspešno in postopka ni treba ponoviti.



Slika 5.17: Združena metoda s trkanjem in termografska meritev po utrjevanju.

Figure 5.17: Combined method by tapping and thermographic measurement after consolidation.

5.7 Povzetki in zaključki poglavja in-situ preiskav stenske slike in utrjevanja

V okviru opisanih in situ preiskav stenske slike z izbranim naborom neporušnih in porušnih preiskav ter korelacijo posameznih rezultatov je bila ovrednotena kakovost in učinkovitost utrjevanja odstopajočih plasti ometov za primer uporabe mešanice $L_1 S_2 B_1$ PCE.

Pred injiciranjem izbrane mešanice, $L_1 S_2 B_1$ PCE, smo preverili nekatere delovne lastnosti z in-situ metodami na terenu. Dobljene rezultate smo primerjali z laboratorijskimi rezultati. Primerjava rezultatov pokaže vpliv okolja (temperature in relativne valge) na posamezne lastnosti sveže pripravljene mešanice. Večje razlike v rezultatih so bile pri razlezu, pretočnosti in preverjanju prostorninske stabilnosti z apnenimi skodelicami.

Injiciranje je potekalo po načelu minimalnega poseganja v stensko sliko oziroma minimalnega povzročanja novih poškodb. Zato smo mešanico s pomočjo injekcijske brizge injicirali skozi razpoke

in že nastale poškodbe. Po končanem postopku smo utrjevano področje ponovno pregledali z nedestruktivnima metodama.

Kombiniranje in primerjava rezultatov metod s trkanjem in termografskih meritev po utrjevanju je zelo dober pristop pri vrednotenju kakovosti nekonstrukcijskega injektiranja. Rezultati posameznih preiskav in njihova medsebojna primerjava so omogočili natančno določitev območij, ki so kakovostno zapolnjena z injekcijsko mešanico, ter območij, ki niso bila uspešno utrjena.

Izkazalo se je, da je termografska meritev sicer natančnejša, vendar jo je mnogo lažje interpretirati skupaj z metodo trkanja. Prav tako se združitev obeh metod izkaže kot učinkovito že pri detekciji odstopajočih plasti ometov pred postopkom utrjevanja.

6 PRIPOROČILA ZA IZBIRO USTREZNE INJEKCIJSKE MEŠANICE IN UTRJEVANJE ODSSTOPAJOČIH PLASTI OMETOV

6.1 Predhodne preiskave

Zagotovitev kakovostne izvedbe utrjevanja odstopajočih plasti ometov stenske slike je odvisna od predhodnih preiskav originalnih materialov, na podlagi katerih se nato izbere ustrezna injekcijska mešanica. Kot je bilo že velikokrat omenjeno, je konsolidacija odstopajočih plasti ometov ireverzibilen postopek, kar pomeni, da injekcijske mase, ki jo injiciramo v zračne žepe, ni mogoče več odstraniti. Zato mora biti injekcijska mešanica kompatibilna z originalnimi materiali, da kemično, fizikalno ali mehansko ne vpliva na propadanje in pojavljanje novih poškodb na historičnih ometih ali sami poslikavi. Temu se je mogoče izogniti s predhodnimi preiskavami historičnih ometov oziroma materialov, iz katerih je stenska slika narejena.

Vendar samo podatki o lastnostih materialov, iz katerih je stenska slika narejena, ne zadostujejo za izbiro in zasnovu ustreznih injekcijskih mešanic. Potrebno je opraviti pregled na sami stenski sliki, določiti kritična mesta odstopanja, razpok in drugih poškodb. Ti pregledi omogočajo natančnejšo določitev vzrokov za propadanje in nastajanje poškodb ter izbor ustreznih ukrepov z uporabo kompatibilnih materialov.

Pri izvedbi preiskav se kot zelo dober pristop izkaže kombiniranje in primerjava rezultatov neporušnih (metoda s trkanjem, termografske meritve, meritve z mikroskopskim sistemom HIROX 3D), delno porušnih in porušnih preiskav, seveda le tam, kjer je mogoče sondiranje in odvzem vzorca, kot je bil primer in-situ preiskav stenske slike, predstavljen v 5. poglavju.

6.2 Izbira ustrezne injekcijske mešanice za kakovostno izvedbo utrjevanja

Na podlagi vseh pridobljenih podatkov se nato določijo kriteriji, ki jih injekcijska mešanica mora doseči, da bo učinkovito stabilizirala odstopajoče plasti ometov.

Kriterije glede lastnosti mešanic (preglednica 6.1) lahko razdelimo v dve osnovni skupini, in sicer: delovne lastnosti ali lastnosti sveže pripravljenih mešanic ter lastnosti strjenih injekcijskih mešanic.

Osnovni kriteriji za lastnosti sveže pripravljenih injekcijskih mešanic so: ustrezna injektabilnost in pretočnost, da se zapolnijo zračni žepi in razpoke, čim večja stabilnost in čim manjše izločanje vode, ustrezna vodozadržnost, čim manjše krčenje in čim večja odpornost proti oblikovanju razpok. Pri lastnostih strjenih injekcijskih mešanic pa je pomembno, da so mehanske in fizikalne lastnosti podobne lastnostim materialov, ki jih utrjujemo. Prav tako pa mešanice ne smejo vsebovati substanc,

ki lahko škodljivo vplivajo na poslikave. Prisotnost vodotopnih soli, kloridov, sulfatov in nitratov mora biti čim manjša.

Preglednica 6.1: Kriteriji lastnosti sveže pripravljenih in strjenih injekcijskih mešanice.

Table 6.1: Characteristics of fresh and hardened injection grout properties.

Lastnosti sveže pripravljene injekcijske mešanice	Kriterij	Izbrana mešanica	
Pretočnost	Mora biti zadostna, da dosežemo čim boljše zapolnitev zračnih žepov in	$\Delta t \leq 90$ s	L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE
Injektabilnost	razpok.		L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Stabilnost	Med postopkom mešanja in v času vezanja ne sme priti do razmešanja ali segregacije mešanice.	Stabilna mešanica	L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Čas vezanja	Mešanica mora doseči ustrezne mehanske karakteristike v časovno sprejemljivih časovnih okvirjih.	≤ 48 h	
Vodozadržnost	Mešanice morajo imeti čim višjo sposobnost zadrževanja vode, da pod vplivom kapilarnega srka okoliškega ometa obdržijo injektabilnost in pretočnost.	≥ 80 %	L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Izločanje vode	Mešanice morajo imeti čim manjše vrednosti izločanja vode, da zagotovijo stabilnost mešanice.	≤ 2 %	L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Lastnosti strjene injekcijske mešanice			
Prostorninska stabilnost	Da ne pride do zmanjšanja sprijemnosti s podlago in nastanka razpok.	Minimalna sprememba prostornine (≤ 5 %)	L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Sprijemna trdnost	Dobra sprijemnost s podlago	$\geq 0,10$ MPa	L ₁ S ₃ PCE
Cepilna natezna trdnost	Mehanske lastnosti v okviru	0,3–1,2 MPa	
Tlačna trdnost	mehanskih lastnosti obstoječih historičnih ometov.	0,4–2,5 MPa	L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE
Stopnja poroznosti		> 20 %	L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Koeficient kapilarnega vpijanja vode	V okviru lastnosti obstoječih historičnih ometov.	1,0–1,5 kg/m ² √min	L ₁ S ₃ PCE L ₁ S ₂ B ₁ PCE L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Paroprepustnost		$\mu = 8-12$	L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Stabilnost oziroma trajnost strjene mešanice	Obstojne na spremembe temperature in vlage.		L ₁ S ₂ B ₁ PCE L ₁ S ₁ B ₂ PCE
Vsebnost škodljivih substanc	Delež substanc, ki bi lahko negativno vplivale na poslikave (vodotopne soli, kloridi, sulfati in nitrati), mora biti čim manjši.	Količina vodotopnih soli naj bo čim manjša.	

6.3 Preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic na terenu z in-situ metodami

Za posamezne lastnosti injekcijskih mešanic se lahko vzpostavi cenovno sprejemljiv sistem kontrole materialov, postopkov in izvedenih del v laboratoriju in na terenu, s pomočjo dostopnih in dovolj učinkovitih metod preiskav.

V ta namen smo razvili ali prevzeli od drugih avtorjev in-situ metode, ki omogočajo konservatorju-restavratorju učinkovito preverjanje nekaterih ključnih lastnosti injekcijskih mešanic, kot so pretočnost in injektibilnost, krčenje in nastajanje razpok, izločanje vode, vodozadržnost, prehod vodne pare in kapilarno vpijanje vode. Navedene lastnosti lahko konservatorji-restavratorji enostavno in cenovno sprejemljivo sami kontrolirajo na terenu. Pridobljeni podatki naj služijo samo kot pomoč izvajalcem del pri izbiri najbolj optimalne mešanice med razpoložljivimi mešanicami. V preglednici 6.2 podajamo povzetek in-situ testov, ki jih na podlagi opravljenih raziskav in analiz priporočam za testiranje injekcijskih mešanic na terenu.

Dodatne analize pa je potrebno narediti v laboratoriju, s standardiziranimi testi, ki natančneje ovrednotijo lastnosti injekcijskih mešanic.

Preglednica 6.2: Sinteza in-situ testov za preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic na terenu.

Table 6.2: Synthesis of field tests to evaluate injection grouts properties at the field.

In-situ test	Pripomočki	Negativne lastnosti	Priporočila
Prostorninska masa sveže mešanice	Injekcijska brizga 10 ml	Injekcijsko brizgo je težko napolniti, če je masa preveč viskozna.	-
Izločanje vode	Merilni valj 100 ml	-	-
Vodozadržnost	Kalup po standardu PSIST prEN 1015-8:2001	Kontakt med filtrskim papirjem in injekcijsko maso ni popoln.	Namesto filtrskega papirja se lahko uporabijo papirnate brisače.
Določevanje pretočnosti	Volumen lijaka 0,25 ml in premer spodnje odprtine 0,5 mm (SIST EN 445:2008)	Preveč viskoznih mas se ne da testirati.	-
Spremeba prostornine z metodo apnenih skodelic	Apnene skodelice	-	Apnene skodelice se lahko postavi v zaprte posode, omejen dostop CO ₂ .
Injektibilnost z injekcijsko brizgo	Injekcijska brizga 60 ml in 20 ml Granuliran material 2–4 mm	Granuliran material lahko zamaši injekcijsko konico.	Med injekcijsko konico in granulirani material se vstavi mrežica, ki prepreči zamašitev.
Pretočnost z injekcijsko brizgo	Injekcijska brizga 60 ml in 20 ml Granuliran material 2–4 mm	Granuliran material lahko zamaši injekcijsko konico.	Med injekcijsko konico in granulirani material se vstavi mrežica, ki prepreči zamašitev.

se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 6.2.

Preizkušanje tečenja na apnenih ploščah s kanalčki	Apnena plošča s kanalčki Injekcijska brizga	Odprti kanalčki, kar ne reflektira dejanskega stanja	Kanalčke se zapre s prozornim lepilnim trakom. Naredijo se lahko širši ali ožji kanalčki.
Čas vezanja injekcijske mešanice	Apnena skodelica Injekcijska brizga z iglo	-	Apnene skodelice se lahko postavi v zaprte posode, omejen dostop CO ₂ .

6.4 Postopek utrjevanja odstopajočih plasti ometov

Utrjevanje odstopajočih plasti ometov z injekcijsko brizgo je običajen poseg, ki se razlikuje od konstrukcijskega injektiranja. Poseg injiciranja z injekcijsko brizgo vsebuje naslednje korake:

- priprava odstopajočih plasti ometov,
- injiciranje injekcijske mešanice,
- čiščenje površine.

Od same predpriprave odstopajočih plasti ometov je odvisno, kako uspešen bo postopek utrjevanja. Okruške, prah in koščke zdrobljenega ometa, ki so prisotni v zračnih žepih in razpokah za odstopajočimi plastmi ometov, bi morali odstraniti oziroma očistiti. To je delno ali polno izvedljivo z izsesavanjem z mini vakuumom (sesalec) ali z uporabo priročnih in ostalih majhnih orodij za odstranjevanje zdrobljenega ometa, kot so: zračna puhalka (mini-air-blower), pincete, lepilni trakovi itd. Če je odstopajoča površina preveč poškodovana in je nevarnost, da se med samim postopkom injiciranja dodatno poškoduje, jo je potrebno zaščititi z japonskim papirjem in ustreznim utrjevalcem.

V primeru, da ni poškodb oziroma razpok na odstopajočih delih ometov, skozi katere lahko vstavimo cevke ali igle, moramo narediti luknjice s pomočjo vrtalke in lesnih svedrov (v centru koničasti) pri stalnem blagem sesanju prašnih delcev izven območja vrtanja.

Pri izdelavi lukenj je potrebno paziti, da čim manj poškodujemo barvno plast. V luknjice potem vstavljamo injektirne cevke. Po potrebi del okrog cevk ali morebitne druge luknje zapolnimo z ometom in s tem preprečimo iztekanje mase med postopkom injiciranja.

V te luknje in v mesta, predvidena za polnjenje, najprej injektiramo vodo ali mešanico vode in alkohola v razmerju 50 : 50. S predhodnim vlaženjem odstopljenih plasti ometov se izboljša injektibilnost injekcijskim mešanicom in zagotovi boljši oprijem (Biçer-Şimşir in Rainer, 2013), s tem se tudi izognemo hitremu sušenju in nastajanju razpok.

Slaba stran predhodnega vlaženja za odstopajočimi plastmi ometa je aktivacija prisotnih vodotopnih soli in njihov transport na površino. Na barvno površino se z vodo prenaša tudi umazanija.

Po opisani pripravi sledi polnjenje žepov. V primeru uporabe zelo tekoče mešanice to lahko injiciramo na vrhu zračnih žepov, saj bo s pomočjo gravitacije napolnila notranje praznine. V nasprotnem primeru injiciranje pričnemo spodaj in nadaljujemo postopoma proti vrhu.

Injiciramo na čeloma z injekcijsko brizgo ali iglo primerne velikosti. Če utrjujemo večja odstopljena mesta, lahko uporabimo cevke s posebnimi nastavki, ki omogočajo enostaven spoj z injekcijo.

Večje praznine lahko injiciramo postopoma, da se mešanica med posameznimi fazami strdi. S tem lahko preprečimo nabiranje večje količine mešanice na enem mestu, kar lahko razmoči odstopljeno plast ometa in posledično odpadanje ometa skupaj z barvno plastjo. Med samim injiciranjem lahko občutljiva mesta in oboke podpremo s posebnimi podporniki, pred ali med postopkom injiciranja. Podpornike umaknemo šele, ko je mešanica suha.

Na utrjevano območje odstopljenega ometa lahko dovedemo tudi majhen pritisk, če je to izvedljivo, kar omogoči boljši kontakt in oprijem mešanice s plastjo ometa.

V kolikor injekcijska mešanica priteče na poslikavo, jo je treba takoj odstraniti, da se ne strdi ali pusti madežev. Po navadi jo odstranimo z vodo.

Zaželeno je, da ves čas injiciranja spremljamo in preverjamo injicirana mesta, da pozneje ne bi prišlo do dodatnih težav.

6.5 Zaporednje izvajalskih ukrepov pri konstrukcijskem in nekonstrukcijskem injektiranju

Namen utrditve kamnitega ali mešanega kamnito-opečnatega zidu s sistematičnim konstrukcijskim injektiranjem je, da se doseže zlepljanje posameznih gradnikov zidu v čim bolj homogeno celoto in se s tem izboljšajo mehanske lastnosti zidu (Uranjek, 2008).

Utrjevanje historičnih zidov je lahko problematično predvsem v primerih, kadar so na zidovju že poškodovane stenske slike, saj lahko pride do dodatnih poškodb ali negativnih vplivov na zaključne sloje oziroma barvno plast. Poškodbe, ki se lahko pojavijo na ometih in barvni plasti, so odvisne od več dejavnikov. Zato je potrebno poznavanje vrste in lastnosti posameznih gradnikov zidu ter sestave in mehansko-fizikalnih lastnosti injekcijskih mešanic, ki se jih vgrajuje. Prav tako je pomembno detajlno poznavanje stanja oziroma poškodovanosti same stenske slike.

Med in po izvedeni utrditvi s postopkom sistematičnega injektiranja zidu je potrebno preprečiti poškodbe ometa in poslikav. To je mogoče z interdisciplinarnim pristopom in je potrebno poleg gradbene upoštevati tudi konservatorsko-restavratorsko stroko, na kar opozarja prav tako Uranjek (2008).

Kadar je potrebno s postopkom sistematičnega injektiranja utrditi zid, na katerem so stenske slike z odstopajočimi plastmi ometov, so ključne priprava zidu in stenske slike, izbira injekcijske mešanice ter izvedba injektiranja.

V tem primeru moramo najprej pripraviti in zavarovati stensko sliko. Izvedeni morajo biti vsi ukrepi za preprečevanje poškodb na stenski sliki. Ti so:

- konsolidacija odstopajočih plasti ometov in barvne plasti;
- če so prisotne razpoke, skozi katere bi lahko prišlo do iztekanja injekcijske mešanice med postopkom sistematičnega injektiranja, jih je potrebno ustrezno sanirati;
- lice stenske slike se utrdi in zaščiti s postopkom »armiranja«, tako da se prelepi z japonskim papirjem in tremi plastmi gaze;
- pripravi in izvede se podporni opaž. V tem primeru je primerno med opažem in licem stenske slike položiti plast mehke gobe/pene, da se neravna površina stenske slike prilagodi opažu in s tem prepeči dodatne poškodbe;
- v skrajnem primeru je možno snemanje stenske slike in ponovna namestitev na prvotno lokacijo. Postopke snemanja stenske slike je podrobno opisal avtor Bogovčič (2000).

Ko je stenska slika zaščitenjena, je mogoče nadaljevati pripravo zidu in izvedbo sistematičnega injektiranja po navodilih avtorja Uranjeka (2008).

Pri postopku sistematičnega injektiranja zidu bi rada izpostavila nekaj faktorjev, ki se posredno ali neposredno nanašajo na obstoj stenske slike, in sicer:

- izbira ustrezne kompatibilne injekcijske mešanice, kar pomeni da bi se morali uporabljati materiali, ki so po mehansko-fizikalnih in kemijskih lastnostih čim bolj podobni tradicionalnim materialom historičnih zgradb. V primeru mineralnih apnenih ometov in stenskih slik ni priporočljiva uporaba cementnega veziva, saj lahko pride do sulfatne reakcije v prisotnosti vlage. Produkta, ki lahko nastaneta pri teh reakcijah, sta entringit in tumasit. Entringit povzroča nabrekanje materiala, tumasit pa razpad veziva (Uranjek, 2008);
- prekomerno omočenje zidu pred postopkom injektiranja ni priporočljivo, saj se lahko povzročijo nove poškodbe na stenski sliki. Če se v zidu nahajajo vodotopne soli, lahko zaradi omočenja pride do raztapljanja in potem do kristalizacije soli na območju pod ometom ali do izsoljevanja na površini. Na površini stenske slike se lahko zaradi povišane vlažnosti pojavijo mikroorganizmi (plesni). Prav tako so lahko v zidu (kamnitih gradnikih in vezivu) prisotni glineni delci in mavec v obliki CaSO_4 in $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, ki ob stiku z vodo povečajo prostornino (Uranjek, 2008);
- neustrezen pritisk pri uvajanju injekcijske mešanice v zid, saj lahko visoki pritisk povzroči nove poškodbe, kot je lokalno izpadanje ometa ali celo delov zunanjih slojev zidu.

7 ZAKLJUČEK

7.1 Rezultati in najpomembnejše ugotovitve

Razvoj kompatibilnih injekcijskih mešanic za utrjevanje odstopajočih plasti ometov stenskih slik temelji na večletnem raziskovalnem delu na področju materialov z mineralnim vezivom, ki so se uporabljali pri izdelavi stenskih slik in se še danes uporabljajo pri njihovi sanaciji.

Razvoj mešanic ne temelji samo na zasnovi in testiranju lastnosti ampak tudi na prilagajanju standardiziranih testov in razvoju novih metod za učinkovito ovrednotenje ključnih lastnosti injekcijskih mešanic. Prilagajanje standardiziranih testov in razvoj novih metod sta bila nujno potrebna predvsem pri preverjanju delovnih lastnosti mešanic v svežem stanju, sposobnosti tečenja, injektabilnosti, pretočnosti, stabilnosti itd. Bistvene razlike med konstrukcijskim in nekonstrukcijskim injektiranjem izhajajo predvsem iz načina priprave in količine mešanice. Zato smo pri standardiziranih metodah zmanjšali velikost vzorca in prilagodili posamezne dele opreme.

Uporabili smo tudi nekatere nove nestandardizirane metode, ki omogočajo dodatna testiranja mešanic in so namenjena predvsem konservatorjem-restavratorjem na terenu. V okviru doktorske disertacije so podana priporočila in seznam tistih in-situ metod, ki se jih lahko uporablja na terenu za preverjanje delovnih lastnosti mešanic.

V okviru disertacije smo razvili in pripravili še modele, ki simulirajo odstopljene plasti ometov in omogočajo testiranje nekaterih lastnosti mešanic za uspešno konsolidacijo historičnih ometov, ki jih druge metode ne omogočajo.

V eksperimentalnem delu doktorske disertacije smo najprej razvili 17 mešanic, na osnovi hidratiziranega apna, pucolanskega dodatka tufa, kalcitne moke in ultralahkega polnila, brez ali s PCE/PPh superplastifikatorjem. Delo je bilo razdeljeno v štiri sklope. V višji sklop preiskav so prišle mešanice, ki so v predhodnem sklopu dosegale postavljene kriterije (na primer dovolj majhno krčenje, ustrezno pretočnost in injektabilnost itd.) ali pa so imele vlogo primerjalne mešanice. V zadnjem sklopu preiskav smo preverjali sprijemno trdnost mešanic na posebej pripravljenih modelih zračnih žepov in sendvičev, ki posnemajo sklope stenskih slik.

Po ključnih lastnostih izstopata dve mešanici, $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE, ki sta dosegali najboljše rezultate in ju je mogoče uporabiti za stabilizacijo odstopajočih plasti ometov.

Prednost injekcijske mešanice $L_1 S_2 B_1$ PCE pred mešanico $L_1 S_3$ PCE je doseganje nižje prostorninske mase, zaradi ultralahkega polnila, ki nadomešča del kalcitne moke.

V začetni fazi eksperimentalnega dela, ko smo preverjali predvsem lastnosti svežih mešanic, je bila ena ključnih lastnosti tudi stabilnost mešanic, takoj po zamešanju in med nekajdnevnim sušenjem. Za ovrednotenje stabilnosti mešanic smo prilagodili oziroma razvili nove metode, ki omogočajo preverjanje separacije sestavin injekcijske mešanice (segregacije) ter njihovo krčenje zaradi sušenja in odpornost proti oblikovanju razpok. Obe mešanici sta se izkazali za stabilni, izločanje vode je pod 2 %, sprememba prostornine zaradi izhlapevanja vode in posledično krčenja pa ne presega 5 %. Preverjanje spremembe prostornine z apnenimi skodelicami je pokazalo, da na nastajanje razpok med sušenjem mešanice predhodno vlaženje skodelic nima vpliva.

Injektibilnost obeh mešanic se poveča s predhodnim vlaženjem granuliranega poroznega materiala (drobljenega apnenega ometa), vendar je ob dobri vodozadržnosti obeh mešanic, ki je nad 80 %, omogočena tudi penetracija in tečenje skozi stolpec suhega drobljenega apnenega ometa.

Pomembne so tudi mehansko-fizikalne lastnosti injekcijske mešanice, ki morajo biti primerljive z ustreznimi lastnostmi originalnih poroznih historičnih ometov. Velik vpliv na mehansko-fizikalne lastnosti ima stopnja poroznosti mešanic, vrsta por in njihova porazdelitev. Visoko stopnjo celotne poroznosti sta dosegli obe izbrani mešanici, $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE, in to okrog 40 %. Mešanica $L_1 S_2 B_1$ PCE je na račun ultralahkega polnila dosegla višjo stopnjo, in sicer 42 %. Poroznost vpliva na paroprepustnost, ki je pomembna lastnost injekcijske mešanice, saj ne sme priti do akumulacije vodne pare oziroma vlage med plastmi ometa in področjem z mešanico za utrditev. V nasprotnem primeru se lahko pojavijo nove poškodbe na stenski sliki. Ponovno ima mešanica $L_1 S_2 B_1$ PCE z deležem ultralahkega polnila višjo sposobnost prehajanja vodne pare kot mešanica $L_1 S_3$ PCE. Da mešanici ne zadržujeta vodne pare oziroma vlage, so potrdili tudi pospešeni testi na sendvičih.

Mehanske lastnosti, kot so tlačna trdnost, cepilna-natezna trdnost in sprijemna trdnost, so bistvene za učinkovitost posega v poškodovano stensko sliko. Ugotovili smo, da na trdnost pomembno vpliva delež ultralahkega polnila, saj mešanica $L_1 S_2 B_1$ PCE dosega nižjo trdnost kot $L_1 S_3$ PCE.

Povprečna tlačna trdnost mešanic $L_1 S_3$ PCE in $L_1 S_2 B_1$ PCE, s pripadajočima vrednostma 3,5 in 1,8 MPa po 90-ih dneh, se s časom izboljša, in sicer na 3,8 in 2,1 MPa po enem letu. Tlačne trdnosti obeh mešanic izpolnjujejo kriterije. To pa ne velja za cepilno natezno trdnost, ta je nižja od edinega razpoložljivega kriterija v literaturi, ki pa je bil postavljen za hidravlične apnene injekcijske mešanice.

Najpomembnejša mehanska lastnost injekcijskih mešanic je njihova sprijemna trdnost s podlago, ki je bila testirana na predhodno pripravljenih zračnih žepih in sendvičih. Zračni žepi, ki simulirajo odstopajoče plasti ometov imajo to dobro lastnost, da otežijo dostop CO_2 , ki je potreben za karbonatizacijo veziva v mešanici in se s tem približajo dejanskemu stanju na terenu. Izkazalo se je, da se mešanici poslabša sprijemna trdnost z višino zračnega žepa. Medtem ko sta pri višini 2 mm injekcijski mešanici dosegli sprijemno trdnost $f_u = 0,08$ in 0,10 MPa, za $L_1 S_2 B_1$ PCE in $L_1 S_3$ PCE, in

je vsaj zadnja izpolnila tudi postavljen kriterij, pa so bile sprijemne trdnosti pri 5 mm zračnih žepih bistveno nižje.

Znano je, da se injekcijskim mešanici na osnovi apna ob stiku z večjo količino vlage ali vode mehanske lastnosti poslabšajo. Zato smo preskušance in sendviče pospešeno starali v različnih klimatskih pogojih, v kombinaciji s predhodnim namakanjem v destilirani vodi ali 3 % raztopini NaCl. Preskušanci mešanice L₁ S₂B₁ PCE so veliko bolj obstojni na klimatske spremembe in delovanje NaCl, v primerjavi z mešanico L₁ S₃ PCE, kjer so preskušanci izpostavljeni NaCl raztopini razpadli. V nasprotju s pričakovanji je bil pri mešanici L₁ S₂B₁ PCE dosežen celo prirast tlačne trdnosti po pospešenem staranju in s predhodnim namakanjem v destilirani vodi. Povišane sprijemne trdnosti na sendvičih se lahko pripišejo pospešeni karbonatizaciji apna zaradi cikličnega vlaženja in sušenja. Rezultati pospešene karbonatizacije v komori pa dokazujejo, da ob prisotnosti CO₂ obe mešanici dosežeta sprijemne trdnosti nad 0,15 MPa.

Glede na dobljene rezultate je bila za utrjevanje odstopajočih plasti ometov stenske slike sv. Lenarta uporabljena mešanica L₁ S₂B₁ PCE. Mešanico smo ponovno pripravili na terenu in testirali s predlaganimi in-situ metodami z namenom preučevanja vpliva okolja na lastnosti svežih mešanic. Primerjava rezultatov, pridobljenih na terenu in v laboratoriju, je pokazala razlike, kar kaže na pomemben vpliv dejanskih pogojev okolja na lastnosti injekcijskih mešanic v svežem stanju. To je vsekakor področje, na katerem bi se morale opraviti dodatne raziskave vpliva različnih pogojev okolja na delavne lastnosti injekcijskih mešanic.

7.2 Prispevek doktorske disertacije

Glavni cilj disertacije, razvoj novih kompatibilnih injekcijskih mešanic za stabilizacijo odstopajočih ometov stenskih slik, je bil na podlagi obsežnih eksperimentalnih in analitičnih raziskav v celoti dosežen. V okviru doktorske disertacije so doseženi vsi predvideni izvorni prispevki k razvoju znanosti, in sicer:

- Podane so rešitve problematike ustreznega pristopa k sanaciji odstopajočih plasti ometov s stenskimi slikami. Ugotovljeno je bilo, da na tem področju v Sloveniji ne obstaja sistematičen pristop, niti niso na voljo vsi podatki o sestavi injekcijskih mešanic, ki so bile uporabljene v praksi. Poleg tega tudi v mednarodni literaturi ni podatka o pristopu, ki bi uporabil prilagoditev obstoječih standardnih metod in različne nove metode za ovrednotenje lastnosti injekcijskih mešanic in posegov injektiranja v laboratoriju in na terenu, kot je to predlagano v tej disertaciji. Zato predstavlja doktorska disertacija na tem področju nove temelje za nadaljnja raziskovanja.

- Razvoj kompatibilnih injekcijskih mešanic na osnovi mineralnega veziva in polnila z dodatki za zmanjšanje prostorninske mase in dodane zamesne vode. Na podlagi dostopne znanstvene literature, pregleda konservatorske-restavratorske prakse in pregleda lastnosti historičnih apnenih ometov so postavljeni in definirani kriteriji, ki naj jih injekcijske mešanice dosegajo za zagotovitev kakovostne sanacije.
- Vzpostavil se je cenovno sprejemljiv sistem kontrole materialov, postopkov in izvedenih del v laboratoriju in na terenu s pomočjo dostopnih in dovolj učinkovitih metod preiskav. V ta namen so bile razvite in vpeljane nove enostavne in-situ metode in modeli, katere lahko konservatorji-restavratorji uporabljajo pri preverjanju delovnih lastnosti mešanic in posegov na terenu. Prav tako so bile razvite in vpeljane nove metode za natančnejšo preverjanje lastnosti posegov injektiranja v laboratoriju.
- Rezultati in-situ raziskav z destruktivnimi in nedestruktivnimi metodami, ki omogočajo detekcijo odstopajočih plasti ometov pred in po postopku utrjevanja. Na praktičnem primeru stenske slike je prikazan celovit postopek sanacije odstopajočih plasti ometov in kontrole izvedenih ukrepov. Pri utrditvi odstopajočih ometov stenske slike je bila uporabljena mešanica, razvita v okviru doktorske disertacije.
- Podana so priporočila za nadaljnji razvoj in raziskave kompatibilnih materialov z mineralnim vezivom za obnovo odstopljenih plasti ometov s poslikavami.

7.1 Možnosti nadaljnjega raziskovanja

Doktorska disertacija predstavlja pomemben temelj za nadaljnje preiskave na področju nekonstrukcijskih injekcijskih mešanic za stabilizacijo odstopajočih plasti dekorativnih ometov. Med raziskovalnim delom se je odprlo še veliko novih, še nerešenih problemov. Možnosti nadaljnjega raziskovanja so predvsem na naslednjih področjih:

- Nadaljnje testiranje mešanic glede vsebnosti škodljivih substanc, kot so vodotopne soli (kloridi, sulfati, nitrati ...).
- Nadaljnji razvoj injekcijskih mešanic na osnovi apnenega veziva s kremenčevim polnilom v kombinaciji z ultralahkim polnilom.

- Nadaljnji razvoj mešanic s pucolanskimi dodatki. Injekcijske mešanice na osnovi apnenega veziva potrebujejo za vezanje in strjevanje CO₂ iz zraka, ki pa ima pogosto otežen dostop do odstopajočih plasti ometov. Zato bi bilo nujno potrebno razviti kompatibilne mešanice s pucolanskimi dodatki, ki bi omogočili strjevanje mešanice v primerih, ko je dostop CO₂ do zračnih žepov zelo oviran.

- V sklopu doktorske disertacije je pokazala velik potencial mešanica L₁ S₁B₂ PCE, ki pa je imela relativno nizko sprjemno trdnost, ki bi jo bilo smiselno izboljšati.

- Dodatne eksperimentalne raziskave in preučevanja vpliva pospešenega staranja na mehanske lastnosti mešanic. Pri preiskavi pospešeno staranih preskušancev in sendvičev se je pokazal vpliv temperature in vlage na lastnosti tlačnih in sprjemnih trdnosti. Za dodatno razlago in potrditev rezultatov že izvedenih mehanskih preiskav bi bilo priporočljivo pripraviti dodatne vzorce sendvičev in ponoviti analize (to že poteka).

- Priprava izbrane mešanice in testiranje z in-situ preiskavami na terenu so pokazali velik vpliv realnega okolja na lastnosti sveže mešanice. Zato bi bilo smiselno preučiti vpliv različnih klimatskih pogojev in načina priprave mešanice na terenu na njene delavne lastnosti.

- V sklopu raziskovalnega dela je bilo razvitih in modificiranih veliko testov in metod, ki bi jih bilo potrebno validirati. Tudi v tej smeri že potekajo dodatne preiskave.

»Ta stran je namenoma prazna«

VIRI

- Agrawal, O. P., Pathak, R. 2001. Examination and conservation of wall paintings: a manual. New Delhi, Sundeep Prakashan: str. 43–70.
- Arandigoyen, M., Bernal, J. L. P., López, M. A. B., ALVAREZ, J. I. 2005. Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 252: 1449–1459.
- Arendt, C. 1987. The role of the architectural fabric in the preservation of wall paintings. V: CATHER, S. (ur.). *The conservation of wall paintings: Proceedings of a Symposium Organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, 13–16 July 1987*. Singapore, Tien Wah Press: str. 29–43.
- Arizzi, A., Cultrone, G. 2014. The water transfer properties and drying shrinkage of aerial lime-based mortars: an assessment of their quality as repair rendering materials. *Environmental Earth Sciences*, 71: 1699–1710.
- Arnold, A., Zehnder, K. 1987. Monitoring wall paintings affected by soluble salts. V: CATHER, S. (ur.). *The conservation of wall paintings: Proceedings of a Symposium Organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, 13–16 July 1987*. Singapore, Tien Wah Press: str. 103–137.
- ARSO. 2015. Atlas okolja.
http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 26. 6. 2015)
- Ashurst, J. 1983. Mortars, plasters and renders in conservation. London, EASA: 10–16, 35–36.
- Azeiteiro, L. C., Velosa, A., Paiva, H., Mantas, P. Q., Ferreira, V. M., Veiga, R. 2014. Development of grouts for consolidation of old renders. *Construction and Building Materials*, 50: 352–360.
- Baglioni, P., Dei, L., Piqué, F., Sarti, G., Ferroni, E. 1997. New autogenous lime-based grouts used in the conservation of lime-based wall paintings. *Studies in Conservation*, 42 (1), 43–54.
- Balen, K., Papayianni, I., Hees, R., Binda, L., Waldum, A. 2005. Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. *Materials and Structures*, 38: 781.
- Ballantyne, A. 1996. Stabilising the substrate: Grouting – The options. *Conservation News* 60: str. 43–45.
- Bass, A. 1998. Design and evaluation of hydraulic lime grouts for in situ reattachment of lime plaster to earthen walls. Master of science. Pennsylvania, University of Pennsylvania
http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1488&context=hp_theses (Pridobljeno 4. 3. 2013)
- Biçer-Şimşir, B., Rainer, L. H. 2013. Evaluation of lime-based hydraulic injection grouts for the conservation of architectural surfaces: A manual of laboratory and field test methods. Los Angeles, The Getty Conservation Institute.
http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/evaluation_grouts (Pridobljeno 10. 9. 2013)
- Biçer-Simsir, B., Griffin, I., Palazzo-Bertholon, B. N. D., Rainer, L. 2009. Lime-based injection grouts for the conservation of architectural surfaces. *Reviews in Conservation*, 10: 3–17.
- Bodnar, J., Mouhoubi, K., Szatanik-Perrier, G., Vallet, J., Detalle, V. 2012a. Photothermal thermography applied to the non-destructive testing of different types of works of art. *International Journal of Thermophysics*, 33: 1996–2000.
- Bodnar, J. L., Candoré, J. C., Nicolas, J. L., Szatanik, G., Detalle, V., Vallet, J. M. 2012b. Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings. *NDT and E International*, 49: 40–46.

- Bogovčič, I. 1900. Hrastovlje. Restavratorski posegi na stenskih slikah. Ljubljana, Restavratorski center Republike Slovenije: 4–5, str. 9.
- Bogovčič, I. 1988. Turjak – stara grajska kapela. Poročila. Restavratorski center Republike Slovenije. Varstvo spomenikov 30: 336–337.
- Bogovčič, I. 2000. Restavriranje stenskih slik. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Akademija za likovno umetnost in oblikovanje (samozaložba I. Bogovčič): f. 3–19.
- Bogovčič, I. 2006. Sestava injekcijske mešanice na osvi apnenega kazeinata. Osebna komunikacija. (15. 2. 2006)
- Bogovčič, I. 2014a. Akrilna smola Barlep. Message to: Padovnik, A. 9. 7. 2014. Osebna komunikacija.
- Bogovčič, I. 2014b. Sestava injekcijske mešanice v primeru cerkve sv. Neže (Lopata) in cerkve sv. Petra (Kamni vrh pri Ambrusu). Message to Padovnik, A. 9. 7. 2014. Osebna komunikacija.
- Bogovčič, I., Vardjan, F. 1991. Lopata p. c. sv. Neže. Varstvo spomenikov, 33: 337.
- Botticelli, G. 1992. Metodologia di Restauro delle Pitture Murali. Firenze, Centro Di della Edifimi: p. 11–22.
- Böttger, K.G. 1997. Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze. Doktorska disertacija. Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar L (samozaložba K.G. Böttger).
- Bras, A., Henriques, F. M. A. 2009. The influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout properties. *Materials and Structures*, 42: 1423–1432.
- Butina, M. 1988. Strahomer – cerkev sv. Jakoba. *Varstvo spomenikov*, 30: 336.
- Butina, M. 2005a. Sestava injekcijske mešanice v primeru cerkve sv. Martina (Šilentabor). Sporočilo za Padovnik, A. 1. 7. 2005. Osebna komunikacija.
- Butina, M. 2005b. Freske, ometi, sonde, injektiranje, kitanje. Vipava. Delavnica od 27. do 30. junija 2005. Ljubljana. Zavod za varstvo kulturne dediščine slovenija: str. 20–22.
- Calicchia, P., Cannelli, B. G. 2005. Detecting and mapping detachments in mural paintings by non-invasive acoustic technique: measurements in antique sites in Rome and Florence. *Journal of Cultural Heritage*, 6: 115–124.
- Castellini, P., Paone, N., Tomasini, E. P. 1996. The Laser Doppler Vibrometer as an instrument for nonintrusive diagnostic of works of art: Application to fresco paintings. *Optics and Lasers in Engineering*, 25: 227–246.
- Cazalla, O., Rodriguez-Navarro, C., Sebastian, E., Cultrone, G., De La Torre, M. J. 2000. Aging of lime putty: effects on traditional lime mortar carbonation. *Journal of the American Ceramic Society*, 83: 1070–1076.
- Charola, A. E. 2000. Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39, 3: 327–342.
- Cizer, Ö., Van Balen, K., Elsen, J., Van Gemert, D. 2012. Real-time investigation of reaction rate and mineral phase modifications of lime carbonation. *Construction and Building Materials*, 35: 741–751.
- Cocca, M., D'Arienzo, L., D'Orazio, L., Gentile, G., Martuscelli, E. 2004. Polyacrylates for conservation: chemico-physical properties and durability of different commercial products. *Polymer testing*, 23: 333–342.
- Colalucci, G. The frescoes of Michelangelo on the vault of the Sistine Chapel: Original technique and conservation. V: CATHER, S. (ur.). *The conservation of wall paintings: Proceedings of a Symposium Organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute*, London, 13–16 July 1987. Singapore, Tien Wah Presss: str. 67–77.
- Colleparidi, M. 1990. Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings. *Materials and Structures*, 23, 2: 81–102.

- CTS. 2002. PLM-A. <http://www.ctseurope.com/en/scheda-prodotto.php?id=283> (Pridobljeno 7. 11. 2015)
- Daehne, A., Herm, C. 2013. Calcium hydroxide nanosols for the consolidation of porous building materials – results from EU-STONECORE. *Heritage Science*, 1: 1–9.
- Deffner in Johann. 2012. CalXnova Lime Injection Mortar. http://www.deffner-johann.de/media/wysiwyg/dateien/d_und_j_4227_001_005_020-calxnova_kalkinjektionsmoertel_shop_102012.pdf. (Pridobljeno 5. 6. 2015).
- Del Vescovo, D., Fregolent, A. 2005. Assessment of fresco detachments through a non-invasive acoustic method. *Journal of Sound and Vibration*, 284: 1015–1031.
- Del Vescovo, D., Fregolent, A. 2009. Theoretical and experimental dynamic analysis aimed at the improvement of an acoustic method for fresco detachment diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23: 2312–2319.
- Duh, D. 2008. Samozgoščevalni in vibrirani betoni z apnenčevo moko. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Duh): 20 f.
- D'Ambrogio, W., Mannaioli, A., Del Vescovo, D. 1994. Use of FRF measurements as a non-destructive tool to detect detachment of frescoes. V: *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, Honolulu, Hawaii, 1 January 31–February 3 1994: p. 1083–1088.
- Elert, K., Rodriguez-Navarro, C., Pardo, E. S., Hansen, E., Cazalla, O. 2002. Lime Mortars for the Conservation of Historic Buildings. *Studies in Conservation*, 47: 62–75.
- Ettl, H. 2005. Untersuchungen zur Festigung und Hinterfüllung von Putz und Malschicht. V: Hemmeter, K. (ur.) *Restaurierung von Wandmalerei: innovative Verfahren zur Erhaltung der Deckenmalereien im Salomonsaal von Kloster Aldersbach*. München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege: str. 18–19.
- Falk, L. 1991. Kebelj – ž. c. sv. Marjete. Poročila. *Umetnostna, arhitekturna in urbanistična dediščina. Varstvo spomenikov*, 33: 298–299.
- Ferragni, D., Forti, M., Malliet, J., Mora, P., Teutonico, J. M., Torraca, G. 1984. Injection grouting of mural paintings and mosaics. V: Brommelle, N. S. (ur.), Pye, E. M. (ur.), Smith, P. (ur.), Thomson, G. (ur.) *Adhesives and consolidants: Contributions to the 1984 IIC Congress*, Paris, 2–8 September 1984. London, International Institute for conservation: str. 110–116.
- Ferragni, D., Forti, M., Malliet, J., Mora, P., Teutonico, J. M., Torraca, G. 1985. In situ consolidation of wall and floor mosaics by means of injection grouting techniques. *Mosaics No. 3: Conservation in situ, Aquileia 1983*. Rome, ICCROM: str. 83–101.
- Gašperič, N. 2013. Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona. *Diplomska naloga Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Gašperič)*: str. 40.
- Gnom. 2016. Tradicionalna gradnja. Apno. <http://www.gnom.si/apno/> (Pridobljeno 7. 4. 2016).
- Griffin, I. 2004. Pozzolanas as Additives for Grouts: An Investigation of Their Working Properties and Performance Characteristics. *Studies in Conservation*, 49: 23–34.
- Groot, C., Van Hees, R., Wijffels, T. 2009. Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates. *Construction and Building Materials*, 23: 1743–1750.
- Hansen, E. F., Rodríguez-Navarro, C., Balen, K. V. 2008. Lime Putties and Mortars: Insights into Fundamental Properties. *Studies in Conservation*, 53: 9–23.
- Hinsch, K. D., Zehnder, K., Joost, H., Gülker, G. 2009. Monitoring detaching murals in the Convent of Müstair (Switzerland) by optical metrology. *Journal of Cultural Heritage*, 10: 94–105.
- Horie, C. V. 2002. *Materials for conservation: organic consolidants, adhesives and coatings*. London, Butterworths: str. 92–112, 144.

- Horky, J. 1986. Restoration of wall paintings in a small chapel near Fribourg. V: Brommelle, N. S. (ur.), Smith, P. (ur.). Case Studies in the Conservation of Stone and Wall Paintings, Preprints of the Contributions to the Bologna Congress, Bologna, 21–26 September 1986. London, International Institute for Conservation: str. 44–45.
- Hudoklin, R. 1985. Tehnologija materialov, ki se uporabljajo v slikarstvu : njihova priprava, obdelava in uporaba. Del 1, Temeljniki, podloge, veziva in polnila podlog Tehnologija materialov, ki se uporabljajo v slikarstvu. Ljubljana: Vzajemnost: str. 36–41.
- IBZ. 2015. Caloxil. <http://www.ibz-freiberg.de/en/Specialproducts> (Pridobljeno 15. 5. 2015).
- IGM. 2005. Hidrirano apno CL 90. <http://www.igm.si/index.php/apno> (Pridobljeno 10. 2. 2015).
- Ince, C., Carter, M., Wilson, M., Collier, N., El-Turki, A., Ball, R., Allen, G. 2011. Factors affecting the water retaining characteristics of lime and cement mortars in the freshly-mixed state. *Materials and Structures*, 44: 509.
- Ince, C., Ozturk, Y., Carter, M., Wilson, M. 2014. The influence of supplementary cementing materials on water retaining characteristics of hydrated lime and cement mortars in masonry construction. *Materials and Structures*, 47: 493.
- Jahn. 2012. Jahn M40 Injection Mortar. http://www.jahn-international.com/files/downloads/m-lijen/en/Jahn_M40%20Injectionmortar.pdf (Pridobljeno 5. 6. 2015).
- Jazbec, A. 2007a. Avber. Cerkev sv. Nikolaja. Varstvo spomenikov. Poročila, 43: 14–15.
- Jazbec, A. 2007b. Perati – cerkev sv. Petra. Varstvo spomenikov. Poročila, 43: 155.
- Jazbec, L. N. 2007c. Stržišče, cerkev sv. Ožbolta. Restavriranje poslikave v prezbiteriju. <https://sites.google.com/site/restavriranjeinsvetovanje/home/kontakto/strie-cerkev-sv-obolta-restavriranje-poslikave-v-prezbiteriju-2> (Pridobljeno 5. 6. 2014).
- Jazbec, A. 2009a. Avber – cerkev sv. Nikolaja. Varstvo spomenikov. Poročila, 45: 16–17.
- Jazbec, A. 2009b. Slap pri Vipavi, cerkev sv. Matija. Varstvo spomenikov. Poročila, 45: 175.
- Jazbec, A. 2012a. Kneža – znamenje pri hiši Kneža 5. Varstvo spomenikov. Poročilo, 47: 66–69.
- Jazbec, A. 2012b. Kobjeglava – domačija Kobjeglava 57. Varstvo spomenikov. Poročila, 47: 69–72.
- Jazbec, A. 2012c. Kred – cerkev sv. Nikolaja. Varstvo spomenikov. Poročila, 47: 82–83.
- Jazbec, K. 2013. Infrardeča termografija kot metoda zaznavanja segregacije samozgoščevalnega betona. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Jazbec): 5–22 f.
- Jornet, A., Mosca, C., Cavallo, G., Corredig, G. 2012. Comparison Between Traditional Lime Based and Industrial Dry Mortars. V: Válek, J. (ur.), Hughes, J. J. (ur.), Groot, C. J. W. P. (ur.). *Historic Mortars*. Springer Netherlands: 631–641.
- Jornet, A., Romer, A. 2008. Lime Mortars: Relationship between Composition and Properties. Characterization, diagnosis, conservation, repair, compatibility: HMC08, 1st Historical Mortars Conference. Lisbon, Lneç, 24–26 September 2008.
- Jorne, F., Henriques, F. M. A., Baltazar, L. G. 2015. Influence of superplasticizer, temperature, resting time and injection pressure on hydraulic lime grout injectability. Correlation analysis between fresh grout parameters and grout injectability. *Journal of Building Engineering*, 4: 140–151.
- Kavčič, K. A. 2008. Poročilo o konservatorsko-restavratorskem posegu na stenskih poslikavah Jerneja iz Loke, Godešič, cerkev sv. Miklavža (EŠD: 2219). <http://www2.arnes.si/~aklanc4/slo102/dokumentacija%20godesic.pdf> (Pridobljeno 28. 3. 2012).
- Kavčič, K. A. 2015. Godešič, cerkev sv. Nikolaja, restavriranje stenskih poslikav nad cerkveno lopo. http://www.restavrorstvo-sentjost.si/pages/reference/restavriranje/stenskePoslikave/godesicLopa/Reference_StenskePoslikave_GodesicLopa.html (Pridobljeno 8. 12. 2015).
- Kavčič, K. A. 2008a. Cerkev sv. Mohorja in Fortunata. Varstvo spomenikov. Poročila, 44: 100–109.

- Kavčič, K. A. 2012. Sestava injekcijske mešanice v primeru cerkve sv. Miklavža (Godešič). Message to Padovnik, A. 2. 4. 2014. Osebna komunikacija.
- Kavčič, K. A. 2013. Referenčni projekti. Stenske poslikave – Šentjošt, fragment freske. http://www.restavradorstvo-sentjost.si/pages/reference/restavriranje/stenskePoslikave/sentjost_fragmentFreske/ReferenceStenskePoslikave_SentjostFreskeFragment.html (Pridobljeno 28. 6. 2014).
- Kavčič, M., Andrejčič, F. 2006. Konserviranje-restavriranje ohranjenih apnenih ometov: vzorec 4. http://www.zvkds.si/media/articles/documents/M_Kav%C4%8Di%C4%8D_kons-res.pdf (Pridobljeno 25. 9. 2014).
- Kenyon, C. 1996. Stabilising the substrate: Grouting: The options. Review of Stone Section Meeting British Museum, 28th October 1995. Conservation News, 59: 71–73.
- Klarner, K., Schick, B. 1998. Foamgrout: A method to treat large detachments of plaster layers carrying wallpaintings. V: Krist, G. (ur.), Neubarth, K. (ur.), Götzenauer, J. (ur.), Schreiber, O. (ur.), Danzl, T. (ur.). Baroque wallpaintings: Technical problems and current conservation methods. Wiena, Austria, Mauerbach: str. 117–118.
- Kodelja, M. 2009. Študija učinkovitosti superplastifikatorjev za zagotavljanje obstojnosti črpnih betonov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kodelja): f. 29–33.
- Kokalj, F. 1965. Restavriranje Jelovškovih fresk v Kamniku. Varstvo spomenikov, 10: 129–130.
- 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 (samozaložba D. Kovač): f. 20–24.
- Kovačič, B. 1983. Brdinje – p. c. sv. Neže. Poročila. Umetnostni spomeniki. Varstvo spomenikov, 24: 307.
- Kramar, S., Mirtič, B. 2009. Karakterizacija historičnih ometov kot del konservatorsko-restavratorskih posegov in arheoloških poizkopavalnih analiz. RMZ – Materials and geoenvironment, 56: 501–519.
- Kremer. 2014. Ledan TB 1. http://www.kremer-pigmente.com/media/files_public/31000e.pdf (Pridobljeno 24. 10. 2014).
- Križnar, A. 2006. Slog in tehnika srednjeveškega stenskega slikarstva na Slovenskem. Ljubljana, ZRC SAZU: str. 15–24.
- Lanas, J., Alvarez-Galindo, J. I. 2003. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. Cement and Concrete Research, 33: 1867–1876.
- Lantern, G. 1999. Some 'new' materials for restoration of stones and mural paintings. OPD Restauro, 11: 226–234.
- Leitner, H. 2000. Brittle and flexible: the structural stabilisation of painted plaster on suspended wooden ceilings. Zeitschrift für kunsttechnologie und konservierung, 14, 1: 113–120.
- Lubelli, B. A. 2006. Sodium chloride damage to porous building materials. Doktorska disertacija. Delft, Technische Universiteit Delft (B. A. Lubelli): 174 str.
- Lubelli, B., Van Hees, R. P. J., Groot, C. J. W. P. 2006. Sodium chloride crystallization in a "salt transporting" restoration plaster. Cement and Concrete Research, 36: 1467–1474.
- Luzzana, G., Mauri, A. 1991. Restauri della chiesa di Santa Maria Podone e del complesso dell'ex canonica. http://www.milanoneicantieridellarte.it/uploads/interventi/1248794910rel_tecnica.pdf (Pridobljeno 18. 4. 2015).
- Luzzana, G., Stefanoni, M. 2008. Interventi di restauro conservativo nella chiesa dedicata ai Santi Faustino e Giovita.

- http://www.milaneicantieridellarte.it/uploads/interventi/1255377709rel_tecnica.pdf
(Pridobljeno 18. 5. 2015).
- MAC. 1992. Albaria Iniezione 100.
<http://www.dekint.it/degussa/2.%20RECUPERO%20DELLE%20MURATURE/ALBARIA%20INIEZIONE%20100%20mar-02.pdf> (Pridobljeno 5. 6. 2015)
- Macchiarola, M. 2016. Restoration mortars for mosaic conservation. Predstavitev prezentacije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Akademiji za likovno umetnost in oblikovanje. (Pridobljeno 6.4.2016)
- MAPEI. 2012. Mape Antique F21. http://www.mapei.com/public/COM/products/608_mape-antique_f21_gb.pdf (Pridobljeno 15. 6. 2015).
- Maryniak-Piaszczyński, E., Ziegenbalg, G. 2010. Nano-Lime as a Binder for Injection Grouts and Repair Mortars. V: VÁLEK, J. (ur.), GROOT, C. (ur.), HUGHES, J. J. (ur.). Historic Mortars and RILEM TC 203-RHM Final Workshop HMC2010. Prague, Czech Republic, 22–24 September 2010. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 1159–1167.
- Matteini, M. 1987. An assessment of Florentine methods of wall painting conservation based on the use of mineral treatments. V: CATHER, S. (ur.). The conservation of wall paintings: Proceedings of a Symposium Organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, 13–16 July 1987. Singapore, Tien Wah Press: p. 137–147.
- Medved, S. 2010. Navlaževanje gradbenih konstrukcij. V: Medved, S. (ur.) Gradbena fizika II. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo: str.125–169.
- Mesojedec, T. 2009a. Mostec – cerkev sv. Fabijana in Sebastjana. Varstvo spomenikov. Poročila, 45: 129–130.
- Mesojedec, T. 2009b. Novo mesto, cerkev sv. Nikolaja. Varstvo spomenikov. Poročila, 45: 136–137.
- Merrifield, M. P. 1952. The art of fresco painting, as practised by the old Italian and Spanish masters, with a preliminary inquiry into the nature of the colours used in fresco painting, with observations and notes. London, C.Gilpin.
- Miltiadou-Fezans, A., Tassios, T. P. 2013. Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening. Materials and Structures, 46: 1631–1652.
- Mora, P., Mora, L., Philippot, P. 1984. Conservation of wall paintings. London, Butterworths: str. 10–16, 165–216, 236–243.
- Naglos, A. 2008. Cerkev sv. Štefana. Varstvo spomenikov. Poročila, 44: 306–307.
- Oldenbrough, C. 1996. Stabilising the substrate: Grouting: The options. Conservation News, 60: 45.
- 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): f. 47–51.
- Papayianni, I., Stefanidou, M. 2001. Porosity and structure of old mortars. V: Görün, A. (ur.), Nadide, S. (ur.). Proceedings of the 2nd International Congress on Studies in ancient structures. Istanbul, Turkey, 9–13 July 2001. Istanbul, Yıldız Technical University: str. 509–512.
- Papayianni, I., Stefanidou, M. 2006. Strength–porosity relationships in lime–pozzolan mortars. Construction and Building Materials, 20: 700–705.
- Pergar, R. 1988. Sužid p. c. sv. Trije kralji. Varstvo spomenikov, 30: 324.
- Pirnat, M. 1970. Vrzenec. Poročila. Umetnostni in urbanistični spomeniki. Varstvo spomenikov, 13–14: 248.
- Povše, V. 1965. Marija Gradec pri Laškem. Poročila. Umetnostni in urbanistični spomeniki. Varstvo spomenikov, 10: 234–235.
- RILEM. 2002. 26. Slump flow test. V: Bartos, P.J.M. (ed.), Sonebi, M. (ed.), Tamimi, A.K. (ed.). Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests - Report of RILEM TC 145-WSM. RILEM Publications SARL: str. 84-92.

- RILEM. 1980a. Test No. II. 4, Water absorption under low pressure (pipe method). Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, 13: 201–204.
- RILEM. 1980b. Test No. II. 6, Water absorption coefficient. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, 13: 173–253.
- Rousset, B., Gentile, S., James, J., Pozzi, B. 2005. Injection grouts for molasse sandstones: [preliminary assessments. http://www.conservation-science.ch/files/rousset_gentile_james_pozzi_2005_delft_injectiongroutsformolassesandstone_spreliminaryassessments.pdf](http://www.conservation-science.ch/files/rousset_gentile_james_pozzi_2005_delft_injectiongroutsformolassesandstone_spreliminaryassessments.pdf) (Pridobljeno 13. 2. 2011).
- Sahu, S., Badger, S., Thaulow, N., Lee, R. J. 2004. Determination of water–cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy. *Cement and Concrete Composites*, 26: 987–992.
- Setzer, M., Heine, P., Kasperek, S., Palecki, S., Auberg, R., Feldrappe, V., Siebel, E. 2004. Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test—Reference method and alternative methods A and B. *Materials and Structures*, 37: 743.
- Sfarra, S., Ambrosini, D., Paoletti, D., Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., Maldague, X. 2014. Non-Destructive Testing Techniques to Help the Restoration of Frescoes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39: 3461–3480.
- Sotlar, A. 1991. Male Rodne nad Rogaško Slatino – Cerkev sv. Mohorja in Fortunata. *Varstvo spomenikov*, 33: 337.
- Spagnolo, S. G., Guattari, G., Grinzato, E., Bison, P. G., Paoletti, D., Ambrosini, D. 1999. Frescoes diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography. <http://www.ndt.net/article/v05n01/schirrip/schirrip.htm> (Pridobljeno 28. 2. 2015).
- Stefanidou, M. 2010. Methods for porosity measurement in lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 24: 2572–2578.
- Tavares, M., Veiga, M., Fragata, A. 2010. Grouting mortars for consolidation of historical renders showing loss of adhesion. V: Válek, J. (ur.), C. Groot, C. (ur.), HUGHES, J. J. (ur.). 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop. Prague, Czech Republic, 22–24 September 2010. Bagnaux, Rilem publication s.a.r.l.: str. 743–752.
- Teutonico, J. M. 2009. The ICCROM Architectural Conservation Course 1982–92: history, evolution, impact. *Museum International*, 61: 49–4.
- Thomson, M., Lindqvist, J. E., Elsen, J., Groot, C. J. W. P. 2004a. Porosity of mortars. V: GROOT, C. (ur.), Ashall, G. (ur.), Hughes, J. (ur.). *Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair – Final Report of RILEM TC 167-COM*. Bagnaux, Rilem publication s.a.r.l.: str. 77–106.
- Thomson, M. L., Lindqvist, J. E., Elsen, J., Groot, C. J. W. P. 2004b. Porosity of historic mortars. 13th International Brick and Block Masonry Conference. Amsterdam, 4–7 July, 2004. <http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/2004/232.pdf> (Pridobljeno 5. 6. 2015).
- Torraca, G. 2009. Lectures on materials science for architectural conservation. Los Angeles, Getty Conservation Institute: str. 72–95. https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/torraca.pdf (Pridobljeno 2. 4. 2010).
- Toscana. 2015. Ledan TC1-PLUS. <http://www.tecnoediletoscana.it/public/prodotti/33cd7ae804472d1b6ba261a1b781cf2ba5566c8e99ec0111425386a78ade079.pdf> (Pridobljeno 5. 12. 2015).
- Uranjek, M. 2008. Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek): 44–48, 60–69 f.

- Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek): 29–34, 60–64 f.
- Uranjek, M., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V., Bosiljkov, V. 2010. Problems related to grout injection of heritage buildings walls. Proceedings of the Eighth International Masonry Conference: str. 1055–1064.
- Valluzzi, M., Binda, L., Modena, C. 2002. Experimental and analytical studies for the choice of repair techniques applied to historic buildings. *Materials and Structures*, 35: 285–292.
- Valluzzi, M. R. 2009. Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls. V: GROOT, C. (ur.). Pro067 of International RILEM Workshop on Repairs Mortars for Historic Masonry. Delf, Netherlands, 26–28 January 2009. RILEM Publications SARL: str. 382–397.
- Veiga, R. 2012. Conservation of historic renders and plasters: From laboratory to site. *Historic Mortars*, 7: 207–225.
- Veiga, M. R., Magalhães, A. C., Bokan-Bosiljkov, V. 2004. Capillarity tests on historic mortar samples extracted from site. Methodology and compared results. 13th International Brick and Block Masonry Conference. Amsterdam, 4–7 Julij 2004: str. 1–10.
- Velepič, C. 1950. Zanimigrad. Referat za umetnostne spomenike. Poročila o delu zavoda v II. polletju 1950. *Umetnostni spomeniki. Varstvo spomenikov*, 3: 179–184.
- Válek, J., Matas, T. 2010. Experimental Study of Hot Mixed Mortars in Comparison with Lime Putty and Hydrate Mortars. V: Válek, J. (ur.), Groot, C. (ur.), HUGHES, J. J. (ur.). 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop. Prague, Czech Republic, 22–24 September 2010. Bagnaux, Rilem publication s.a.r.l.: str. 1229–1240.
- Vindišar, G. 2004. Primerjalna analiza eksperimentalnih metod za zaznavanje vlage v zidanih zgradbah. Magistrska naloga. Ljubljana, (G. Vindišar): 173 str.
- Zadnikar, M., Komelj, D. 1953–1954. Dobravlje. Konservatorska poročila za leti 1953 in 1954. *Umetnostni spomeniki. Varstvo spomenikov*, 5: 143–144.
- Zajadacz, K., Nykiel, J., Simon, S. 2010. Historic and modern injection grouts used in Poland for wall painting conservation. V: Válek, J. (ur.), Groot, C. (ur.), HUGHES, J. J. (ur.). 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop. Prague, Czech Republic, 22–24 September 2010. Bagnaux, Rilem publication s.a.r.l.: str. 1293–1300.
- Zajadacz, K., Simon, S. 2006. Grouting of architectural surfaces – the challenge of testing. V: Rodrigues J. D. (ur.), Mimoso, J. M. (ur.). International Seminar Theory and Practice in Conservation, Lisbon May 4–5, 2006, Laboratório Nacional de Engenharia Civil: str. 509–516.
- Zalar, K. 2014. Rut, cerkev sv. Lamberta. *Varstvo spomenikov. Poročila*. 49: 239.
- Zarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: str. 99–100.
- Zehnder, K., Vouite, A. 2009. Monitoring detaching murals in the convent of Müstair (Switzerland) by mirror micrometry. *Journal of Cultural Heritage*, 10: 493–500.
- Zini, G., Fenu, G. 2009. Chiesa della Purissima, Lavori di restauro e valorizzazione a fini turistico culturali. <http://82.85.16.83/Relazione-Purissima.pdf> (Pridobljeno 18. 4. 2015).
- Zoubek, R. 2013. Informacija o sestavi injekcijskih mešanic. Sporočilo za: Padovnik, A. 23.10. 2013. Osebna komunikacija.
- Zoubek, R. 2012. Konservatorsko-restavratorski projekt in Quagliev slikarski proces. V: SITAR, M. N. (ur.). Restavriranje Quaglievih poslikav v ljubljanski stolnici. Ljubljana: Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije: str. 150–151, 204.

ZVKDS, 2014. Konserviranje-restavriranje ohranjenih apnenih ometov. <http://www.zvkds.si/sl/restavratorski-center/metode-in-tehnologije/predstavitev-metod-in-tehnologij/konserviranje-restavriranje-apnenih-ometov/> (Pridobljeno 12. 6. 2014).

Černilogar, L. 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. http://www.tkk.si/si/files/default/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf (Pridobljeno 4. 2. 2013).

Štukovnik, P. 2015. Vpliv okolja na historične materiale z mineralnim vezivom. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Štukovnik): f. 13–15.

ASTM C940-03. Standard test method for expansion and bleeding of freshly mixed grouts for preplaced-aggregate concrete in the laborator.

ASTM C185-02. Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar.

ASTM C496/C496M. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

SIST EN 196-3:2005/A1:2009. Metode preskušanja cementa – 3. del: Določanje časa vezanja in prostorninske obstojnosti.

SIST EN 445:2008. Injekcijska masa za prednapete kable – Preskusne metode.

EN 1015-1:2001. Metode preskušanja zidarske malte – 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.

SIST EN 1015-3:2001. Metode preskušanja zidarske malte – 3. del: Določevanje konsistence sveže malte (s stresalno mizo).

PSIST prEN 1015-8:2001. Metode preskušanja zidarske malte – 8. del: Določevanje zadrževanja vode sveže malte.

SIST EN 1015-12:2001. Metode preskušanja zidarske malte – 12. del: Določevanje sprijemne trdnosti strjenih ometov na podlage.

SIST EN 1771:2004. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Določevanje sposobnosti za injektiranje s preskusom s peščenim stolpcem.

ISO 12572:2001. Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties.

SIA 262/1:2008. Concrete Structures – Supplementary specifications. Appendix A. Capillary suction and porosity.

»Ta stran je namenoma prazna«

PRILOGE

»Ta stran je namenoma prazna«

PRILOGA A: FAKTORJI VPLIVA NA POŠKODBE HISTORIČNIH OMETOV

Preglednica A.1: Pomembni faktorji, ki vplivajo na procese degradacije historičnih ometov.

Table A.1: Some factors causing damage to original mortar and plaster and damage types.

Okoljski vplivi			
Vpliv vlage in vode	Dež, sneg	Kisel dež povzroči razpadanje karbonatov	Slaba kohezivnost malte v zidu in ometu
	Kapilarna ali kondenzna vlaga	Raztapljanje in oslabitev veziva in drugih sestavin v ometu	Odstopanje ometa od zidu ali finega od grobega ometa
	Poplave	Raztapljanje in oslabitev veziva in drugih sestavin v ometu	
Prisotnost vodotopnih soli	Kapilarna ali kondenzna vlaga	Kristalizacija soli – povzročanje pritiska v porah z rastjo kristalov	Prašenje, osipanje materiala, odstopanje ometov in barvne plasti
	Poplave		
Temperaturni vplivi	Zmrzovanje/tajanje	Povzročanje termalne napetosti	Plasti odluščijo od spodnje plasti, porušitev stika med plastmi
	Segrevanje (požar)	Kalcijev karbonat spremeni v kalcijev oksid	Razpoke Odpadanje ometa
Mehanski vplivi	Potres		Razpoke
	Vibracije		Odstopanje ometa od nosilca
	Promet		Odpadanje ometov
	Posedanje tal		
Heterogenost materialov, ki sestavljajo stensko sliko			
Sestava ometa	Vrsta, kakovost veziva		Odstopanje plasti ometov med seboj
	Granulacija, kakovost in vrsta agregata	Slaba priprava zidu Slaba priprava ometa	Odstopanje ometa od nosilca/zidu Odpadanje ometa Nastajanje razpok
Lastnosti kamnitega/opečnatega zidu in ometov	Poroznost Kapilarni transport Oprijemna trdnost		
Prisotnost soli v materialih		Kristalizacija soli – povzročanje pritiska v porah z rastjo kristalov	Prašenje, osipanje materiala, odstopanje ometov in barvne plasti
Izdelava stenske slike			
Tehnične napake pri konstrukciji		Zamakanje, nezadostne povezave materialov	Razpoke Odpadanje ometa Odstopanje ometa
Tehnološke napake pri izdelavi stenske slike	Zadostna količina uporabljenega veziva	Uporabljenega preveč veziva	Večje razpoke Odstopanje ometa od zidu ali finega od grobega ometa
		Premalo veziva	Pomanjkanje kohezije s stikom ometa Prašenje ometa
	Oslabljen stik med plasti ometov	Fin omet nanesen na predhodno zaglajeno površino	Odstopanje ometov Odpadanje ometov

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice A.1

Propadanje zaradi nepravilnih posegov			
Konstrukcijski posegi		Povzročajo vibracije in mehanske vplive	Večje razpoke Odstopanje ometa od zidu ali finega od grobega ometa
Posegi v stensko sliko	Cementno vezivo	Povečanje trdnosti, pokanje	Oblikovanje razpok in difuzija vode skozi razpoke
	Dodajanje umetnih smol	Sol iz cementa Vpliv, sprememba naravnega režima vodne pare	Razvoj soli Odstopanje ometa od zidu ali finega od grobega ometa

PRILOGA B: PREGLED UPORABE INJEKCIJSKIH MAS V SLOVENIJI OD LETA 1950 DO 2014

Preglednica B.1: Uporaba injekcijskih mešanic v Sloveniji od 1950 do 2014.

Table B.1: Materials used in Slovenia for injection grouts from 1950 to 2014.

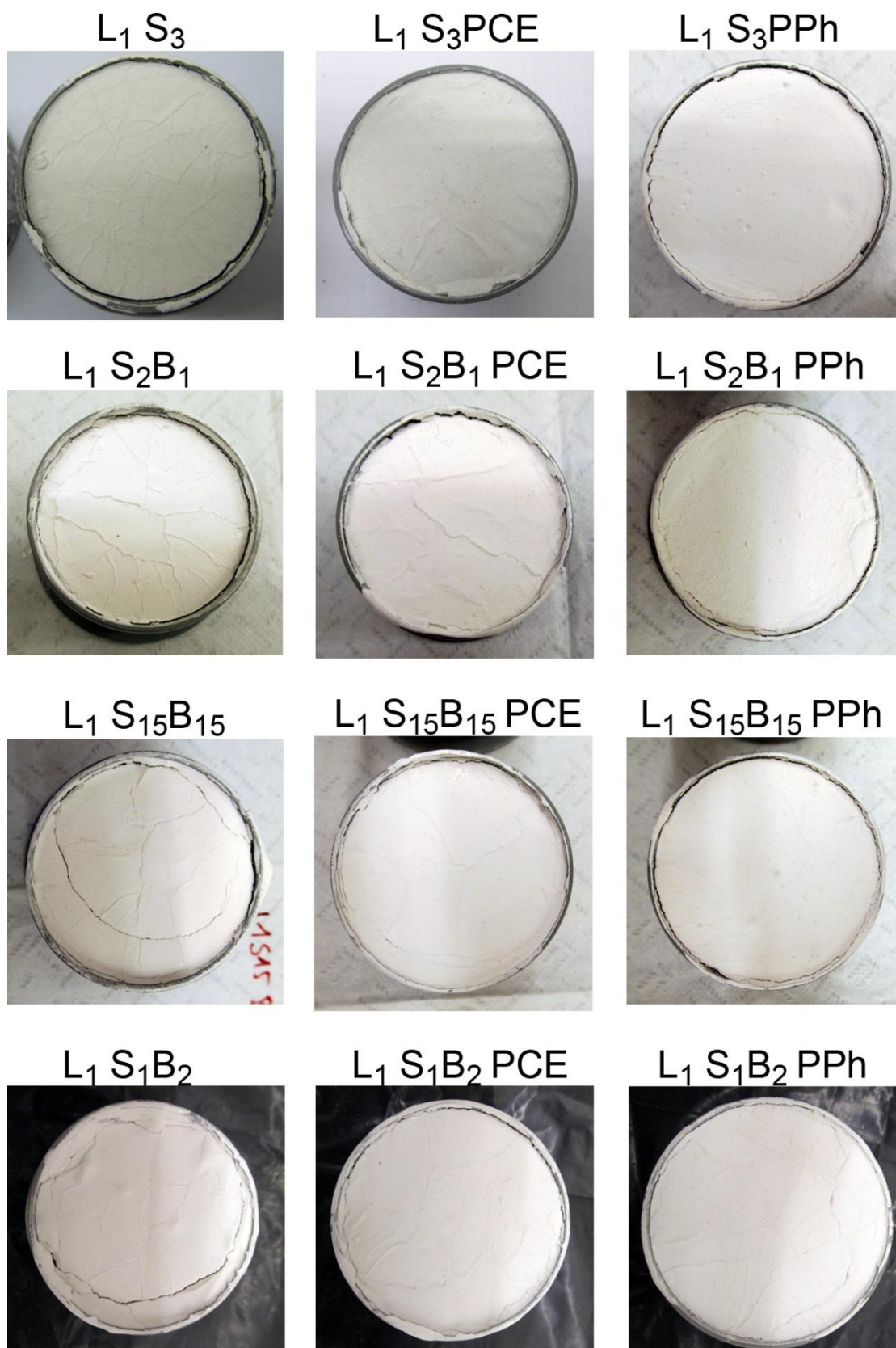
Ime objekta	EŠD	Čas nastanka poslikave	Čas kons.-rest. posega	Uporabljena injekcijska mešanica	Referenca
Zanigrad – Cerkev sv. Štefana	1467	13. stoletje	1950	Apneni kazein	(Velepič, 1950)
Hrastovlje – Cerkev sv. Trojice	179	1490	1952–1958	Apneni kazein	(Bogovčič, 1990)
Dobravlje – Cerkev sv. Petra in Pavla	4104	18. stoletje	1953–1954	Apneni kazein	(Zadnikar in Komelj, 1953–1954)
Marija Gradec – Cerkev Matere božje	3093	1526	1964	Apneni kazein + kalcitna moka	(Povše, 1965)
Kamnik – Cerkev Marijinega brezmadežnega spočetja	1877	18. stoletje	1965	Apneni kazein + kalcitna moka	(Kokalj, 1965)
Vrzdenc – Cerkev sv. Kacijana	854	16. stoletje	1970	Apneni kazein	(Pirnat, 1970)
Vrhe – Cerkev sv. Neže	3338	14. stoletje	1983??	Apneni kazein	(Kovačič, 1983)
Hrastovlje – Cerkev sv. Trojice	179	1490	1984	Gašeno apno + akrilna emulzija (Primal AC35)	(Bogovčič, 1990)
Turjak – Grad Turjak, kapela	790	15. stoletje	1986	Gašeno apno + akrilna emulzija (Paraloid AT85)	(Bogovčič, 1988)
Sužid – Cerkev sv. treh kraljev	3760	15. stoletje	1988	Omenjeno »Podmehurjena mesta smo utrdili z injektiranjem.«	(Pergar, 1988)
Strahomer – Cerkev sv. Jakoba	2568	15. stoletje	1988	Omenjeno	(Butina, 1988)
Šmarje pri Jelšah – kapelica križevega pota (Ječa)			1989	Omenjeno »injektiranje votlih mest«	(Sotler, VS31 1989)
Kebelj – Cerkev sv. Marjete	3062	1750	1990	Apneni kazein	(Falk, 1991)
Lopata – Cerkev sv. Neže	1571	1520	1991	Gašeno apno + akrilna emulzija (Primal AC33)	(Bogovčič, 2014b)
Male Rodne – Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	3083	15. stoletje	1991	Omenjeno »injektirali votla mesta«	(Sotlar, 1991)

se nadaljuje ...

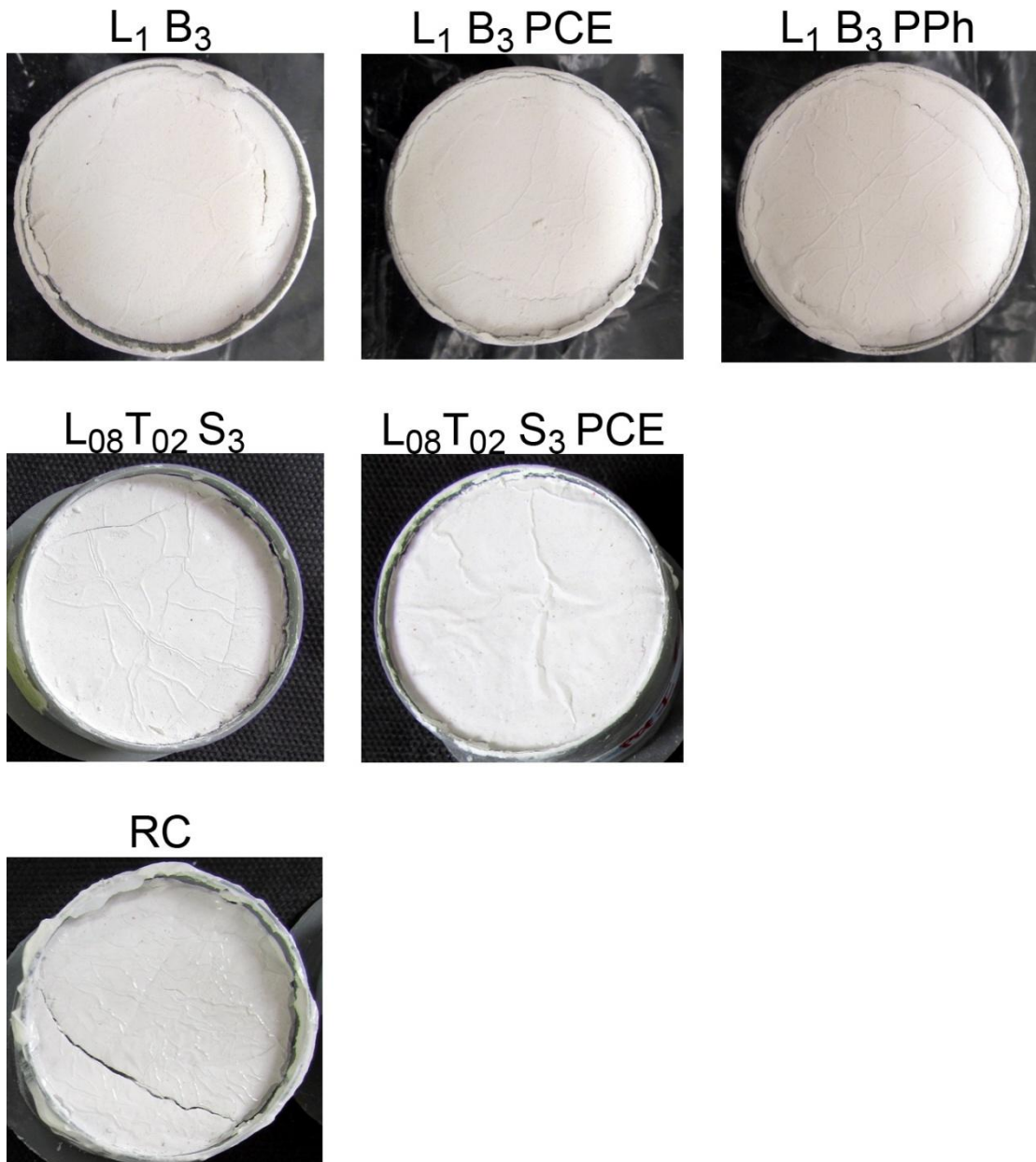
...nadaljevanje preglednice B.1

Kamni vrh pri Ambrusu – Cerkev sv. Petra	211	1459	1992–1994	Gašeno apno + akrilna emulzija (Primal AC33)	(Bogovčič, 2014b)
Avber – Cerkev sv. Nikolaja	3553	1928	2000, 2006	Gašeno apno + akrilna emulzija (Primal E-330 FM)	(Jazbec, 2007a, Jazbec, 2009a)
Perati – Cerkev sv. Petra	4878	15. –18. stoletje	2000	Gašeno apno + akrilna emulzija (Sokrat 2804)	(Jazbec, 2007b)
Šilentabor – Cerkev sv. Martina	4131	15. stoletje	2005	Gašeno apno + kalcitna moka + voda + akrilna emulzija (Primal AC33)	(Butina, 2005)
Ljubljana – Cerkev sv. Nikolaja	333	18. stoletje	2002–2006	Hidravlično apno NHL5 + apneni kazein + voda	(Zoubek, 2012)
Mostec – Cerkev sv. Fabijana in Sebastijana	3941	19. stoletje	2006	Ledan TB1	(Mesojedec, 2009a)
Koreno nad Horjulom – Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	2129	15. stoletje	2007	Gašeno apno + kalcitna moka + voda (akrilna emulzija?)	(Kavčič, 2008a)
Zanigrad – Cerkev sv. Štefana	1467	13. stoletje	2007	Gašeno apno	(Naglos, 2008)
Stržišče – Cerkev sv. Ožbolta	4023	1896	2007	Gašeno apno + kalcitna moka + voda in Ledan TB1	(Jazbec, 2007c)
Novo mesto – Cerkev sv. Nikolaja	494	16. stoletje	2008	Ledan TB1 in Ledan TC1 Plus	(Mesojedec, 2009b)
Slap pri Vipavi – Cerkev sv. Matije	3998	1702	2008	Gašeno apno in Ledan TB1	(Jazbec, 2009b)
Godešič – Cerkev sv. Nikolaja	2219	1400	2008, 2011	Gašeno apno + kalcitna moka + voda in Ledan TB 1	(Kavčič, 2008b, Kavčič, 2012)
Kneža – Znamenje pri hiši Kneža 5	5055	19. stoletje	2012	Gašeno apno + Ledan TB1	(Jazbec, 2012a)
Kobjeglava – Domačija Kobjeglava 57	7342	19. stoletje	2012	Gašeno apno + voda	(Jazbec, 2012b)
Kred – Cerkev sv. Nikolaja	3798	15. –18. stoletje	2012	Gašeno apno + Ledan TB1 + kalcitna moka + voda	(Jazbec, 2012c)
Šentjošt nad Horjulom – Cerkev sv. Jošta	2451	15. stoletje	2013	Gašeno apno + kalcitna moka + voda	(Kavčič, 2013)
Rut – Cerkev sv. Lamberta	3981	1893	2014	Injekcijska mešanica PLM-A	(Zalar, 2014)

PRILOGA C: SPREMEMBA PROSTORNINE S PLASTIČNIMI CILINDRIČNIMI KALUPI



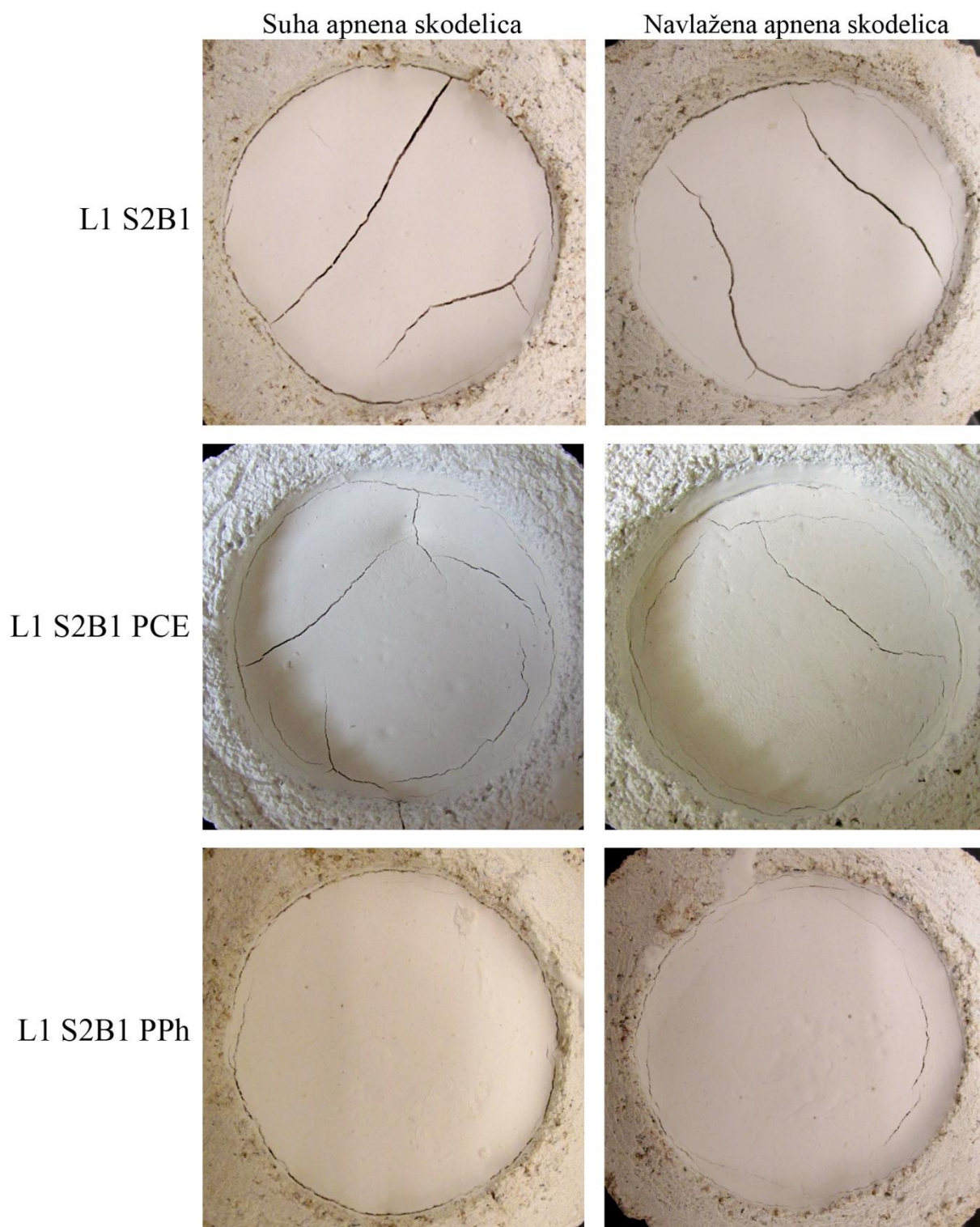
Slika C.1: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic s plastičnimi cilindričnimi kalupi.
Figure C.1: Drying shrinkage measurement with the plastic cylindrical mould.



Slika C.2: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic s plastičnimi cilindričnimi kalupi.

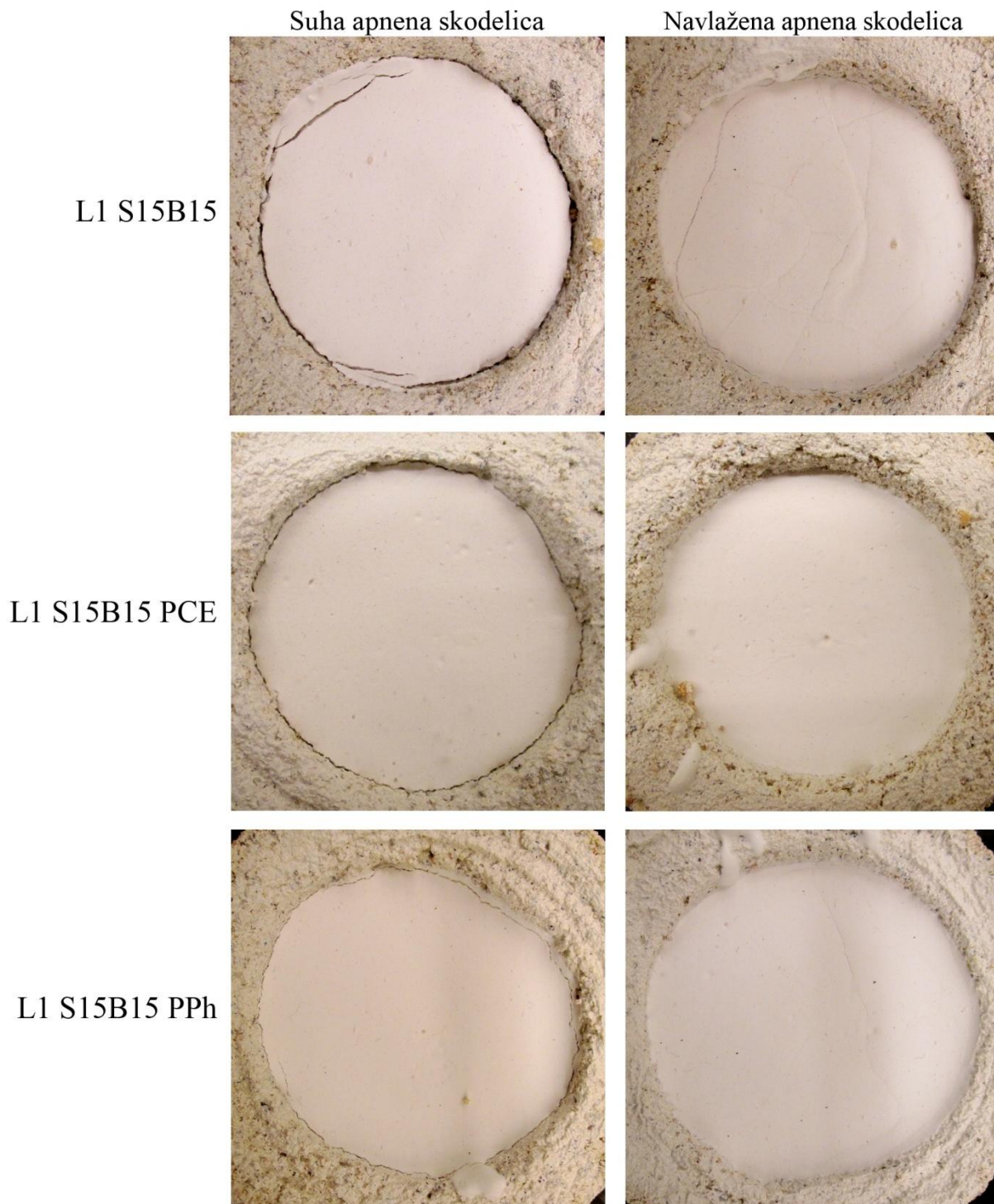
Figure C.2: Drying shrinkage measurement with the plastic cylindrical mould.

PRILOGA D: SPREMEMBE PROSTORNINE INJEKCIJSKIH MEŠANIC Z METODO APNENIH SKODELIC

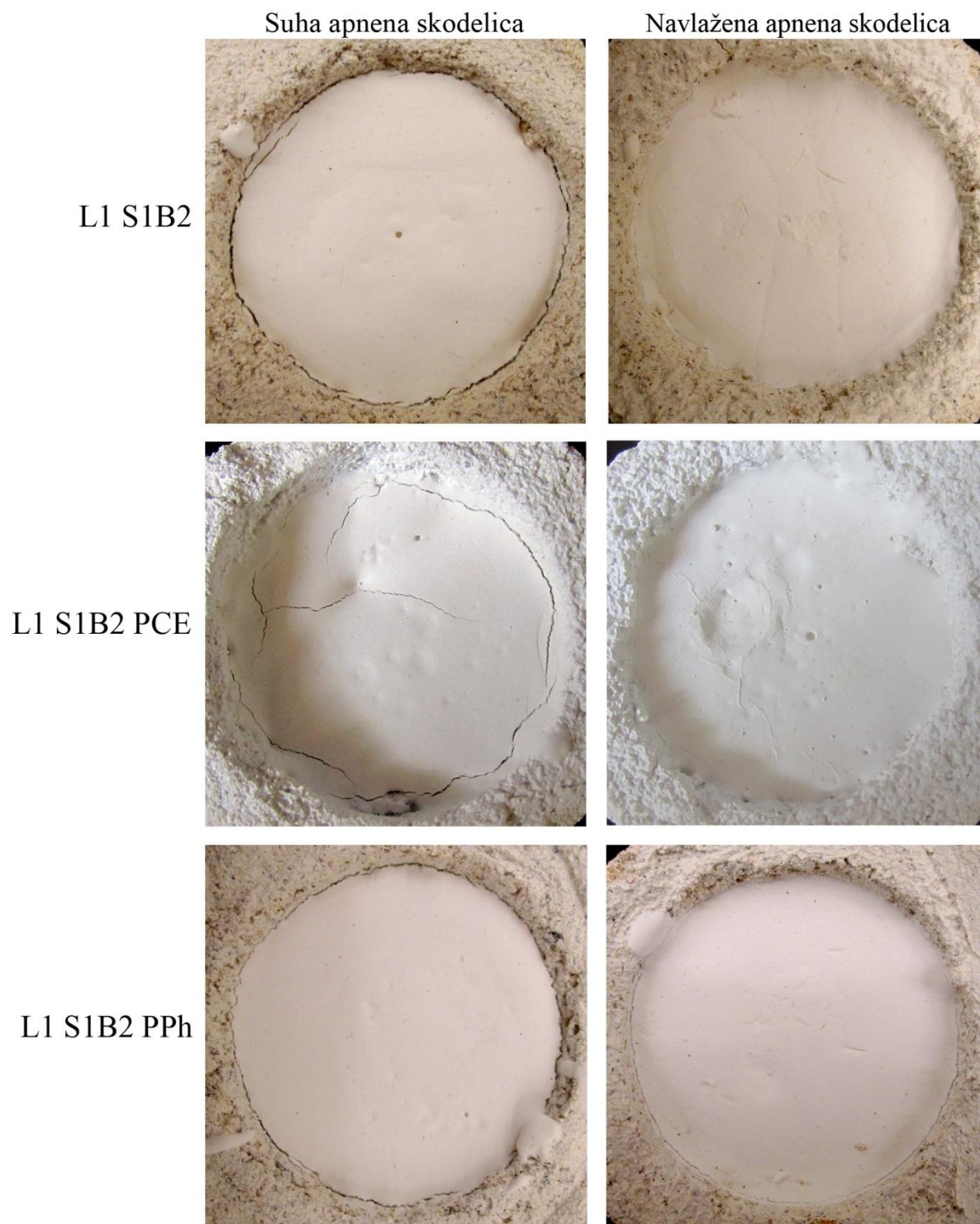


Slika D.1: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic L1S2B1, L1 S2B1 PCE in L1S2B1 PPh, vgrajenih v suhe apnene skodelice (levo) in predhodno navlažene apnene skodelice (desno).

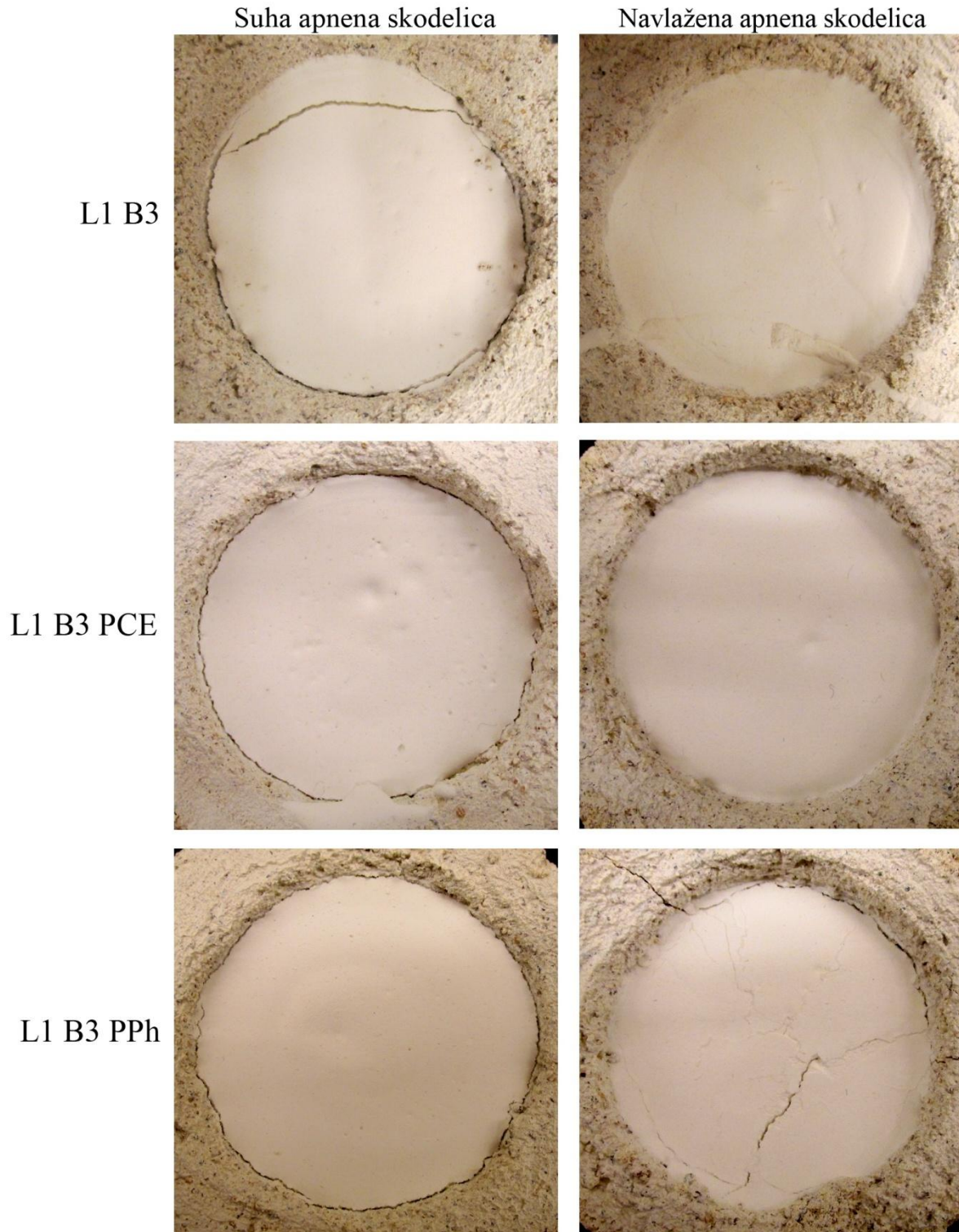
Figure D.1: Drying shrinkage test of grout mixtures L1S2B1, L1 S2B1 PCE and L1S2B1 PPh after drying in dry mortar cups (left) and pre-wetted mortar cups (right).



Slika D.2: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic L1S15B15, L1 S15B15 PCE in L1S15B15 PPh, vgrajenih v suhe apnene skodelice (levo) in predhodno navlažene apnene skodelice (desno).
Figure D.2: Drying shrinkage test of grout mixtures L1S15B15, L1 S15B15 PCE and L1S15B15 PPh after drying in dry mortar cups (left) and pre-wetted mortar cups (right).

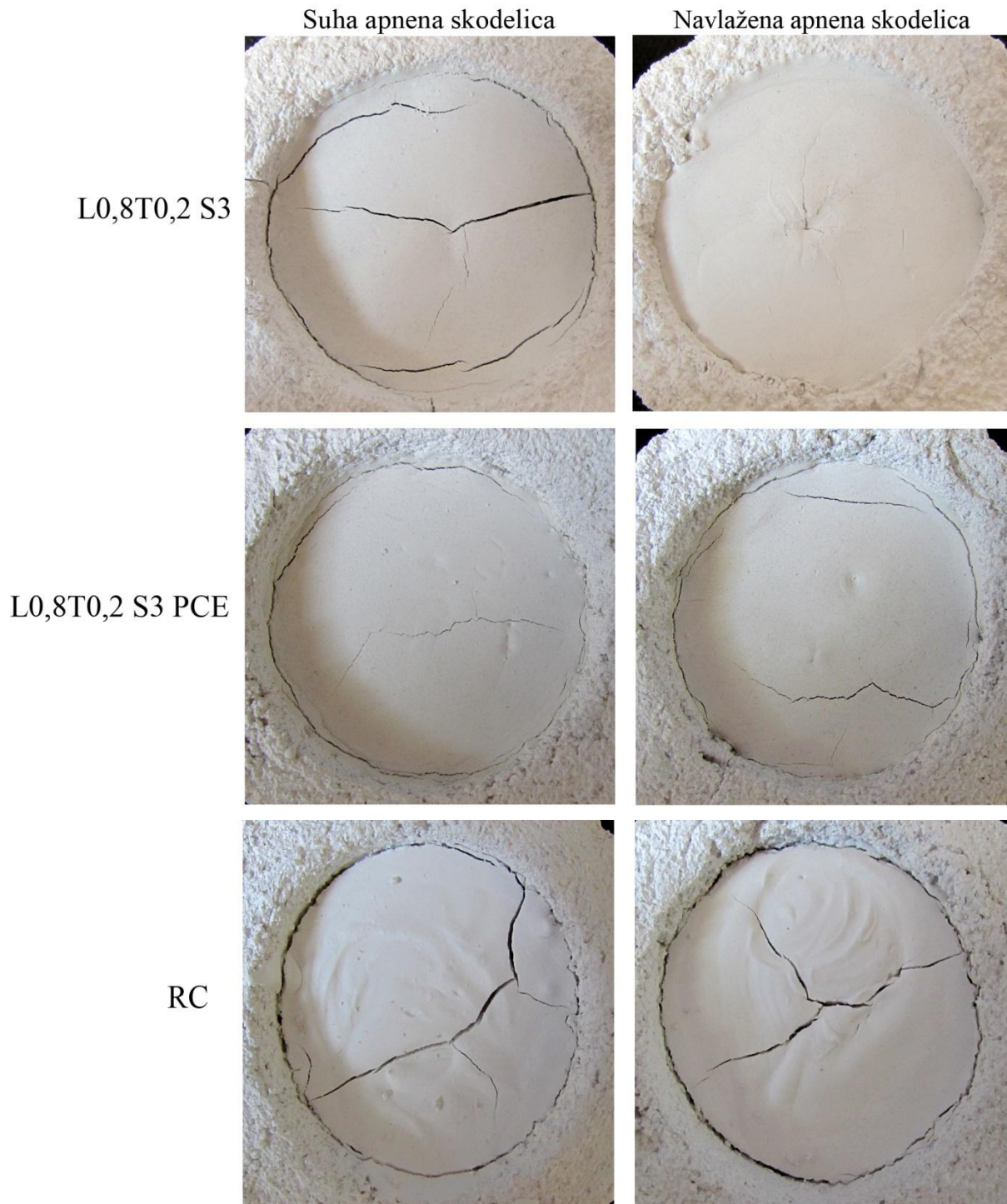


Slika D.3: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic L1S1B2, L1 S1B2 PCE in L1S1B2 PPh, vgrajenih v suhe apnene skodelice (levo) in predhodno navlažene apnene skodelice (desno).
Figure D.3: Drying shrinkage test of grout mixtures L1S1B2, L1 S1B2 PCE and L1S1B2 PPh after drying in dry mortar cups (left) and pre-wetted mortar cups (right).



Slika D.4: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic L1B3, L1 B3 PCE in L1 B3 PPh, vgrajenih v suhe apnene skodelice (levo) in predhodno navlažene apnene skodelice (desno).

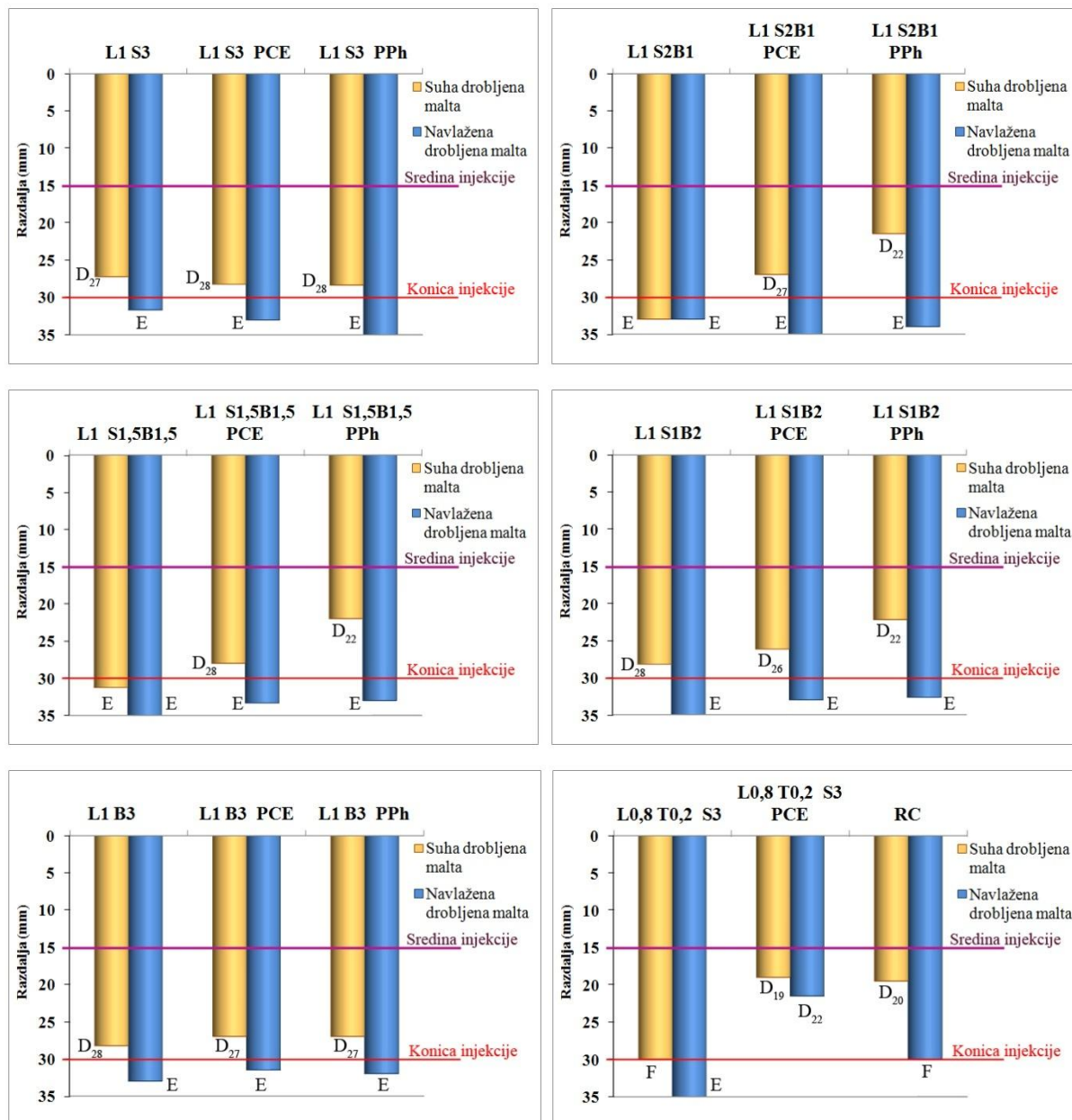
Figure D.4: Drying shrinkage test of grout mixtures L1B3, L1 B3 PCE and L1B3 PPh, after drying in dry mortar cups (left) and pre-wetted mortar cups (right).



Slika D.5: Sprememba prostornine injekcijskih mešanic L08 T0,2 S3, L08 T0,2 S3 PCE in RC, vgrajenih v suhe apnene skodelice (levo) in predhodno navlažene apnene skodelice (desno).

Figure D.5: Drying shrinkage test of grout mixtures L08 T0,2 S3, L08 T0,2 S3 PCE and RC after drying in dry mortar cups (left) and pre-wetted mortar cups (right).

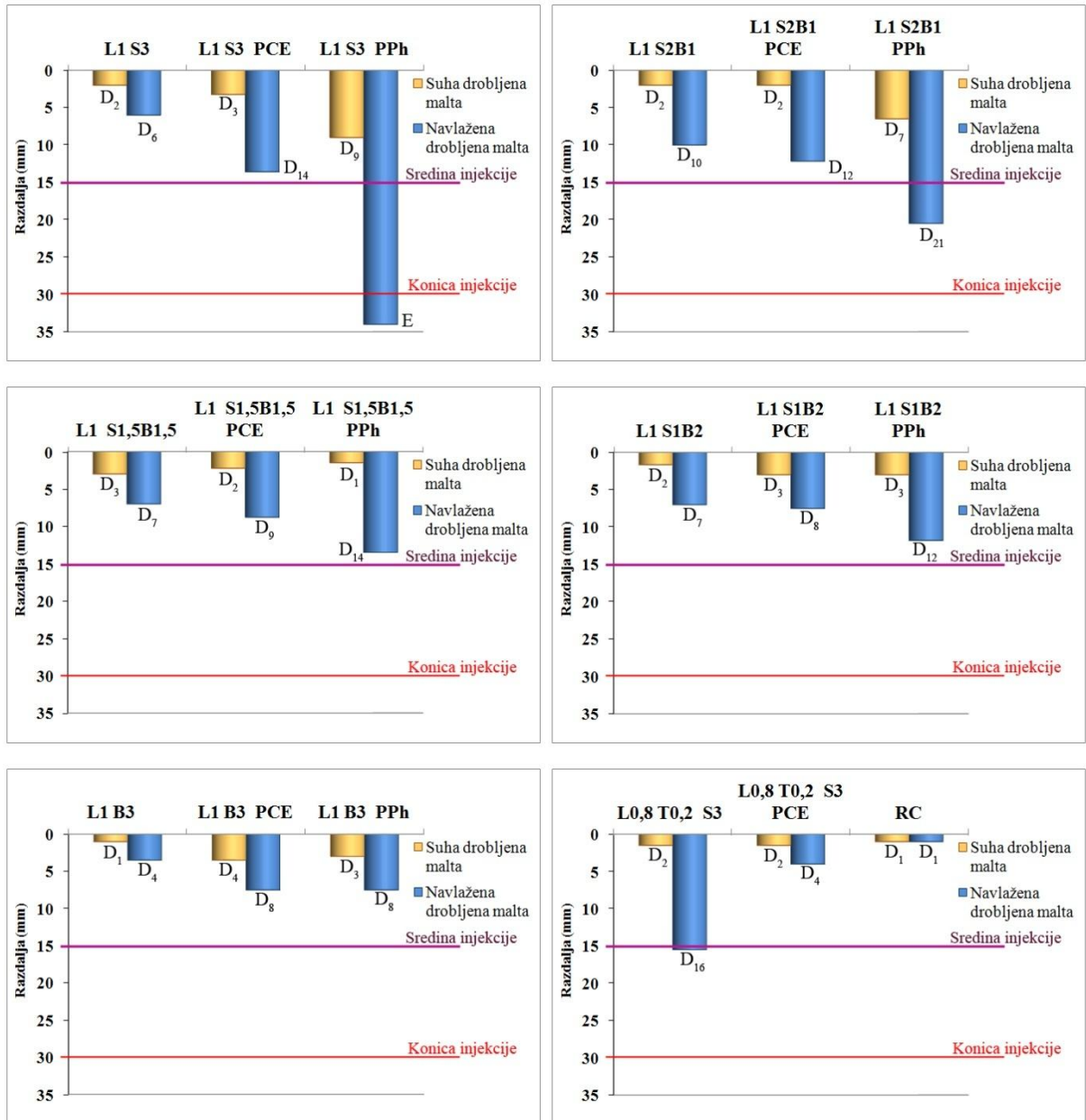
PRILOGA E: PREIZKUŠANJE INJEKTABILNOSTI INJEKCIJSKIH MEŠANIC Z INJEKCIJSKO BRIZGO



Slika E.1: Rezultati preizkušanja injektabilnosti injekcijskih mešanic z injekcijsko brizgo skozi suh in predhodno navlažen drobljeni apneni ometom.

Figure E.1: The results of injectability test with syringes – The distance reached by the grout in dry and pre-wetted crushed lime mortar.

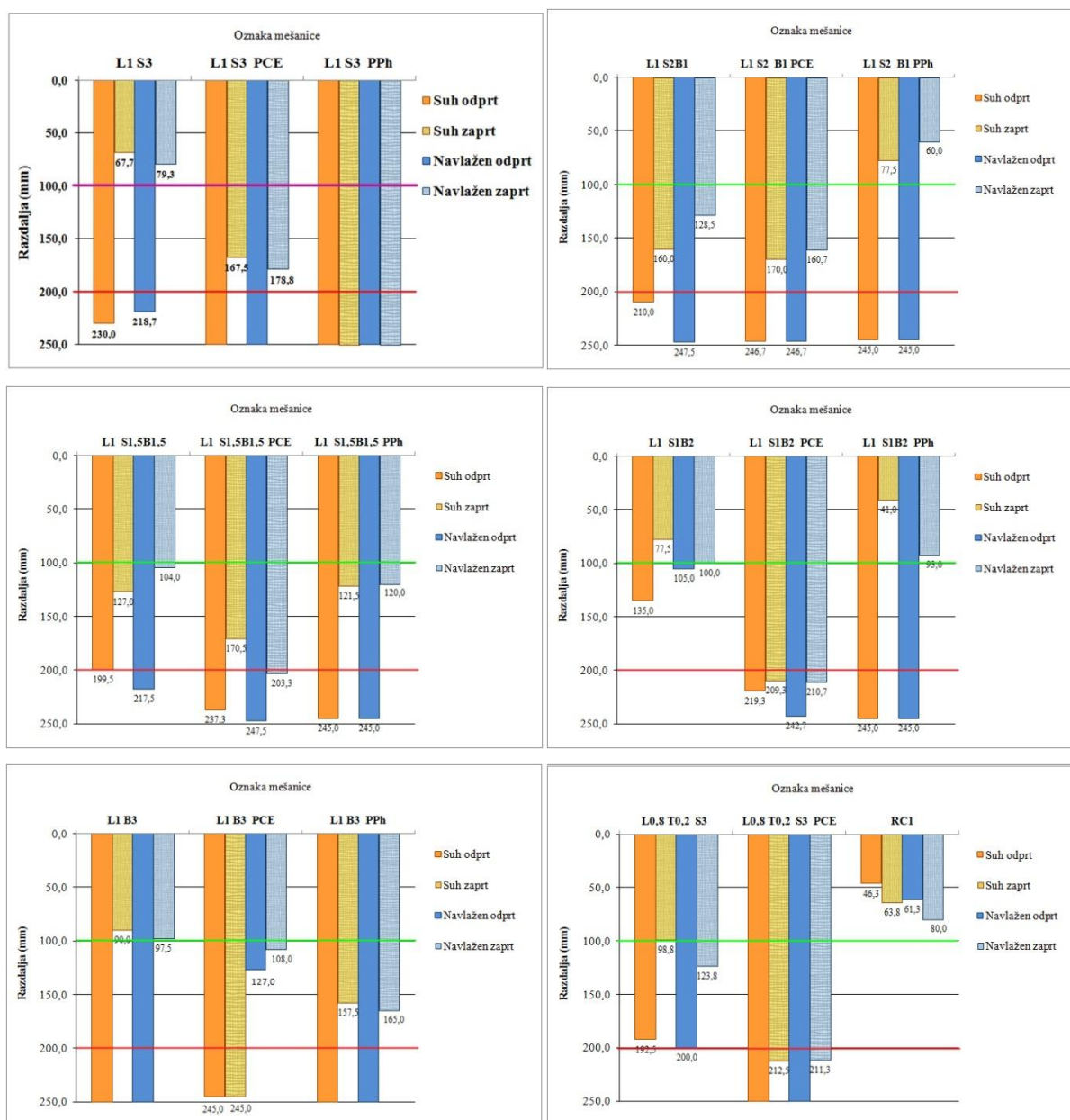
PRILOGA F: PREIZKUŠANJE PRETOČNOSTI INJEKCIJSKIH MEŠANIC Z INJEKCIJSKO BRIZGO



Slika F.1: Rezultati preizkušanja pretočnosti injekcijskih mešanic z injekcijsko brizgo skozi suh in predhodno navlažen drobljeni apneni ometom.

Figure F.1: The results of fluidity test with syringes – The distance reached by the grout in dry and pre-wetted crushed lime mortar.

PRILOGA G: PREIZKUŠANJE TEČENJA INJEKCIJSKIH MEŠANIC NA APNENIH PLOŠČAH S KANALČKI



Slika G.1: Rezultati preizkušanja tečenja injekcijskih mešanic z injekcijsko brizgo na apnenih ploščah z odprtimi/zaprtimi in suhimi/predhodno navlaženimi kanalčki.

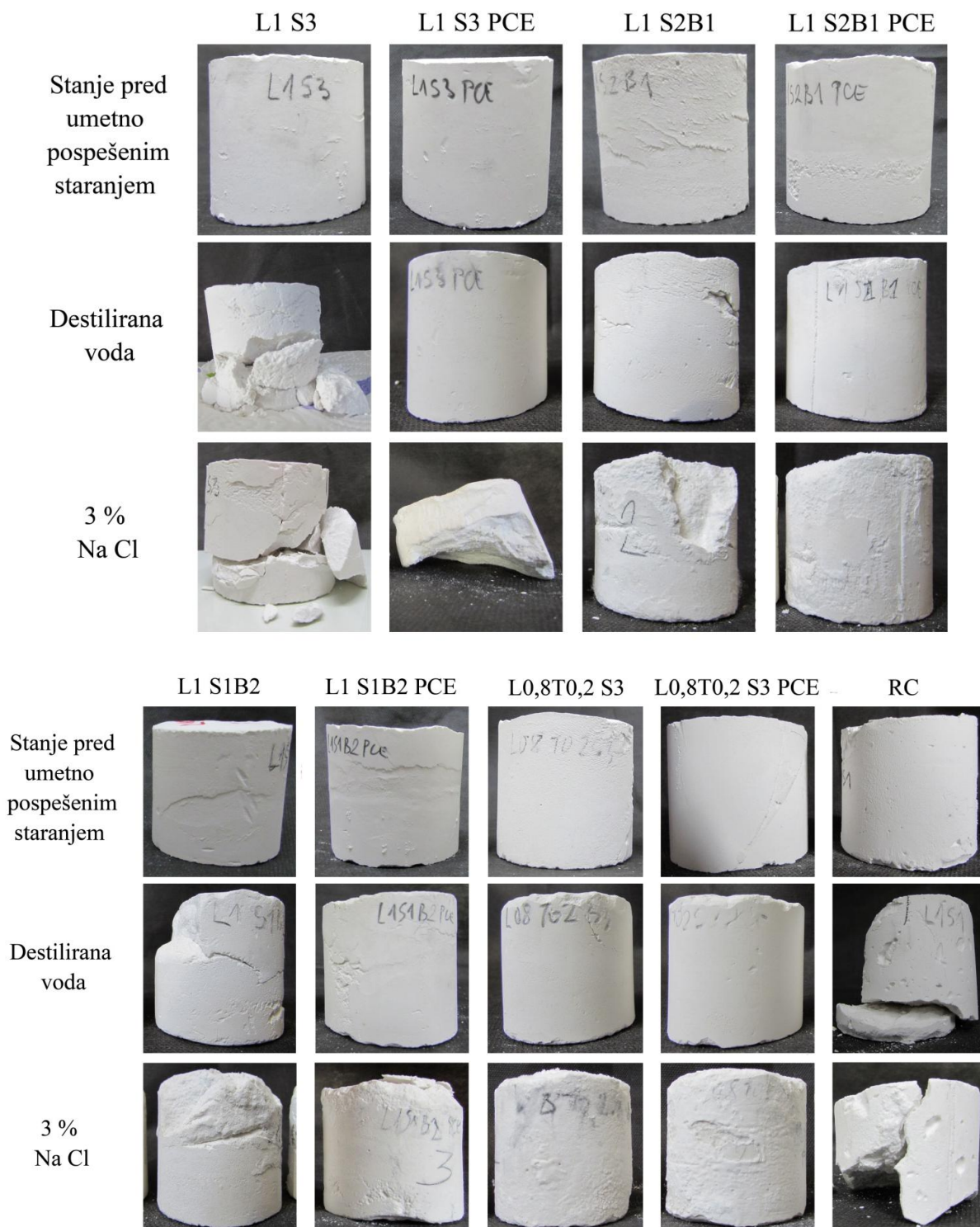
Figure G.1: The results of fluidity test on plastered tile – The distance reached by the grout in dry/predwelled and open/close channels.

PRILOGA H: NAČINI PORUŠITVE INJEKCIJSKIH MEŠANIC V ZRAČNIH ŽEPIH IN NASTAJANJE RAZPOK MED SUŠENJEM

Preglednica H.1: Način porušitve injekcijskih mešanic v zračnih žepih.

Table H.1: Fracture pattern of injection grouts in the models of air pockets.

Injekcijska mešanica	Višina žepa (mm)	Adhezija porušitve na stiku mešanice in zgornjega finega ometa	Kohezijska porušitev v mešanici	Adhezija porušitve na stiku mešanice in spodnjega grobega ometa	Kohezijska porušitev substrata	Razpoke
L ₁ S ₃	2	100 %	-	-	-	Vidne razpoke 1 mm široke, horizontalne in vertikalne.
L ₁ S ₃	5	100 %	-	-	-	Vidne razpoke 1 mm široke, horizontalne in vertikalne.
L ₁ S ₃ PCE	2	40 %	60 %	-	-	Ni vidnih razpok.
L ₁ S ₃ PCE	5	-	20 %	80 %	-	Vidne vertikalne razpoke do 0,5 mm široke.
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	2	-	15 %	80 %	5 %	Ni vidnih razpok.
L ₁ S ₂ B ₁ PCE	5	-	35 %	60 %	5 %	Vidne razpoke vertikalne 0,3 mm.
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	2	-	-	95 %	5 %	Nekaj vertikalnih razpok, širokih 0,2 mm.
L ₁ S ₁ B ₂ PCE	5	-	15 %	80 %	5 %	Vidne razpoke 0,5 mm horizontalne in vertikalne.
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	2	80 %	20 %	-	-	Vidnih nekaj manjših horizontalnih in vertikalnih razpok (široke do 0,5 mm)
L _{0,8} T _{0,2} S ₃ PCE	5	-	30 %	70 %	-	Vidne razpoke horizontalne širine do 0,2 mm.
RC	2	100 %	-	-	-	Vidne razpoke 1 mm široke, horizontalne in vertikalne.
RC	5	50 %	50 %	-	-	Vidne razpoke 1 mm široke, horizontalne in vertikalne.

PRILOGA I: POSPEŠENO STARANI PRESKUŠANCI**Slika I.1:** Pospešeno starani preskušanci injekcijskih mešanic.**Figure I.1:** Accelerated ageing of injection grouts samples.

PRILOGA J: NAČINI PORUŠITVE ZA POSAMEZNE INJEKCIJSKE MEŠANICE IN NASTAJANJE RAZPOK MED SUŠENJEM

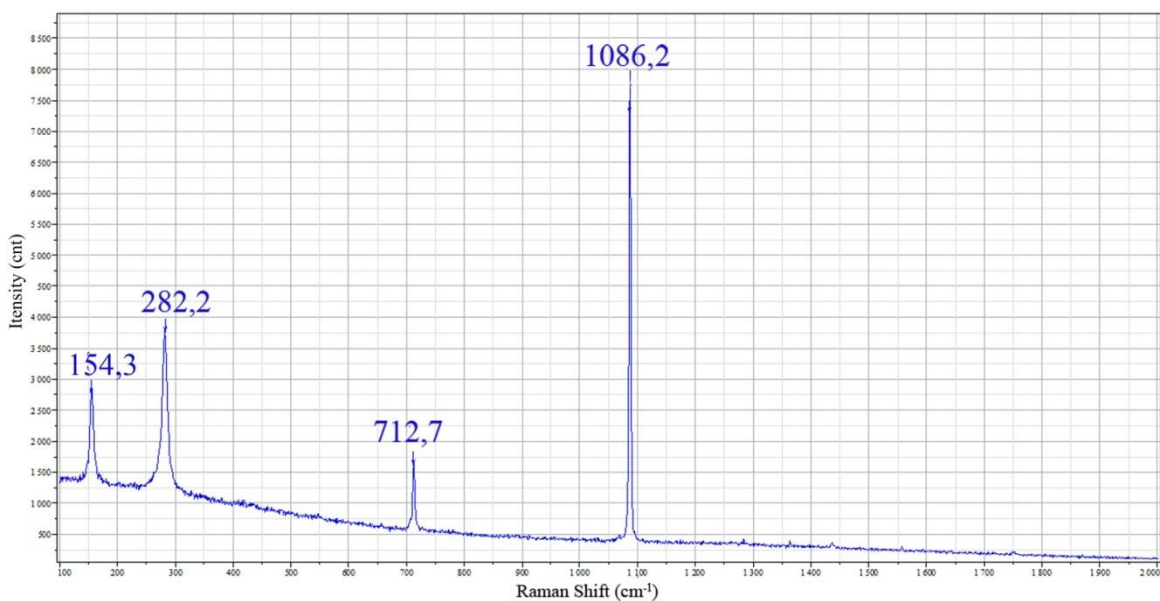
Preglednica J.1: Način porušitve injekcijskih mešanic v sendvičih.
Table J.1: Fracture pattern of injection grouts in the model of sandwiches.

Injekcijska mešanica	Višina žepa (mm)		Adhezija porušitve na stiku mešanice in zgornjega finega ometa	Kohezijska porušitev v mešanici	Adhezija porušitve na stiku mešanice in spodnjega grobega ometa	Kohezijska porušitev substrata	Razpoke
L₁ S₃	2	-	100	-	-	-	Vertikalne razpoke široke 0,1 mm.
		NaCl	-	80	20	-	
	5	-	100	-	-	-	Razpoke široke do 0,5 mm.
		NaCl	100	-	-	-	
L₁ S₃ PCE	2	-	100	-	-	-	Ni vidnih razpok
		NaCl	10	80	-	10	
	5	-	-	10	90	-	Vidnih nekaj razpok, širokih do 0,5 mm.
		NaCl	80	-	20	-	
L₁ S₂B₁ PCE	2	-	-	10	90	-	Ni vidnih razpok.
		NaCl	-	20	70	10	
	5	-	-	-	100	-	Nekaj manjših vidnih razpok na stiku, široke 0,1 mm.
		NaCl	20	20	60	-	
L₁ S₁B₂ PCE	2	-	90	10	-	-	Ni vidnih razpok.
		NaCl	10	90	-	-	
	5	-	-	-	40	60	Nekaj manjših razpok, širine 0,1 mm.
		NaCl	-	10	10	80	
L_{0,8}T_{0,2}S₃ PCE	2	-	100	-	-	-	Ni vidnih razpok.
		NaCl	100	-	-	-	
	5	-	-	-	100	-	Nekaj vidnih vertikalnih razpok širine 0,3 mm.
		NaCl	-	10	20	70	
RC	2	-	100	-	-	-	Vertikalne razpoke širine 0,5 mm.
		NaCl	-	-	-	-	
	5	-	20	10	70	-	Vertikalne razpoke, širine do 0,5 mm in na stiku širine 0,2 mm.
		NaCl	100	--	-	-	

PRILOGA K: RAMAN SPEKTROSKOPIJA POSPEŠENO STARANE INJEKCIJSKE MEŠANICE

Vzorec je bil preiskan z ramanskim mikrospektrom LabRAM HR900 (Horiba Jobin-Yvon), povezanim z mikroskopom Olympus BXFM. Za analizo je bil uporabljen laser valovne dožine 785 nm. Spektri so bili posneti s CCD detektorjem s spektralno resolucijo cca 1cm^{-1} . Kalibracija spektrometra je bila izvedena s silicijevim kristalom. Spektri so bili posneti v območju 100 cm^{-1} do 2000 cm^{-1} .

Posneti Raman spekter pospešeno karbonatizirane injekcijske mešanice je prikazan na sliki K.1. Z Raman tehniko ni bilo mogoče zaslediti nastajanja drugačnih karbonatnih kristalov (npr. aragonit) kot kalcita. Karbonatnim kalcitnim kristalom pripadajo naslednji tipični frekvenčni signali pri valovnih številih 154 cm^{-1} , 282 cm^{-1} , 712 cm^{-1} in 1086 cm^{-1} (slika K.1).



Slika K.1: RAMAN spekter pospešeno starane injekcijske mešanice L_1S_3 .

Figure K.1: The RAMAN spectra of accelerated ageing of the injection grout L_1S_3 .

PRILOGA L: REZULTATI SONDIRANJA IN PREGLEDA STANJA OBRAVNAVANE KAPELE NA GMAJNI

1. Sondiranje

Prvotni geometrijski vzorec



Stični rob, omet od stenske slike nanesen čez geometrijski vzorec.



Rdeča puščica kaže odstopljeno plast ometa od opeke.



Slika L.1: Prikaz sondiranja v kapeli.

Figure L.1: Paint and mortar stratigraphy in the chapel.

2. Stanje in poškodbe

Zunanost – kamniti talni zidec



Notranjost – odstopanje in ekspanzija ometov zaradi prekomerne vlage (30 cm od tal)



Notranjost – biodegradacija zaradi prekomerne vlage, z rdečo puščico označen mah (30 cm od tal)



Notranjost – rdeča puščica kaže na odstopanje ometa zaradi prekomerne vlage (1 m od tal)



Slika L.2: Prikaz poškodbe zaradi prekomerne vlage v zidovih.

Figure L.2: The rising damp in walls as well as the presence of salts is actually the major cause of decay affecting the plaster.

3. Grafični prikaz razpok na stenski sliki sv. Lenarta



Slika L.3: Grafični prikaz razpok.
Figure L.3: Graphic documentation of the cracks.

4. Poškodbe na stenski sliki

Nivojska razpoka



Nivojska razpoka (detajl) z odstopljeno plastjo ometa od zidu.



Odpadel omet skupaj z barvno plastjo na razpoki



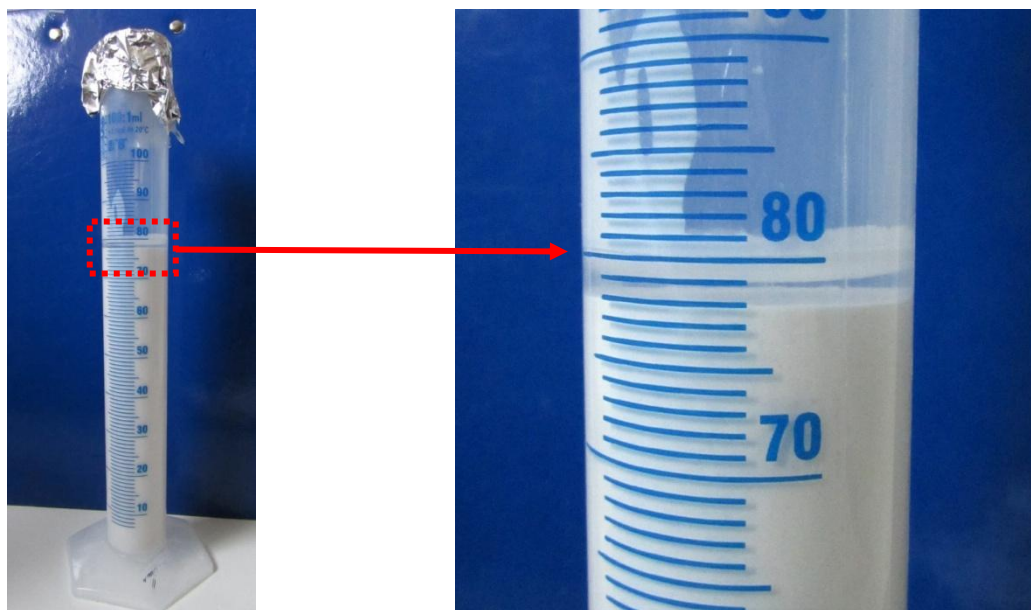
Razpoke z odpadlim delom ometa.



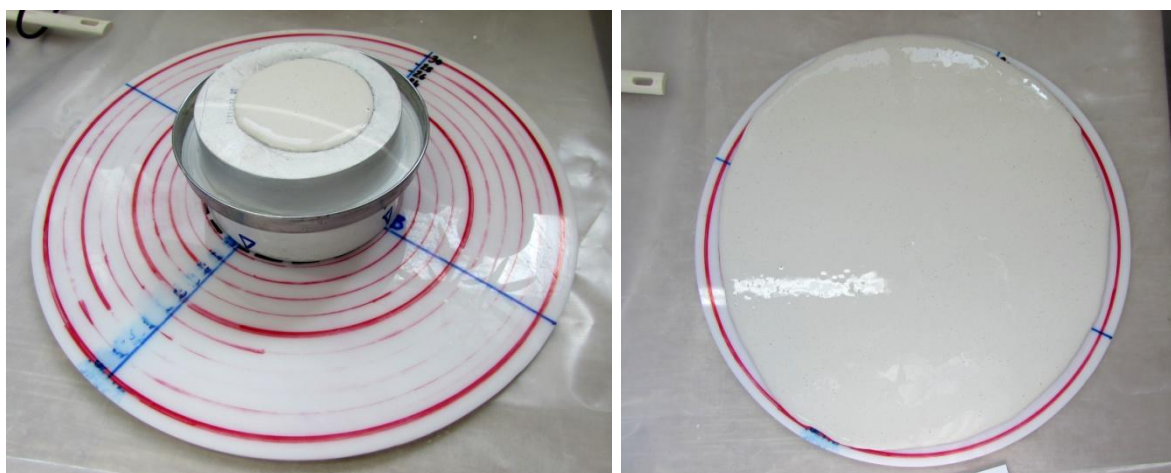
Slika L.4: Razpoke na stenski sliki.
Figure L.4: Cracks in the mural painting.

PRILOGA M: TESTIRANE INJEKCIJSKE MEŠANICE L₁ S₂B₁ PCE NA TERENU

Izločanje vode



Razlez



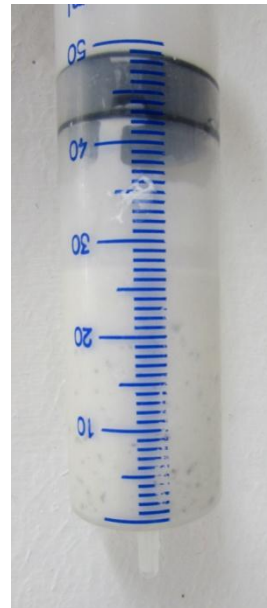
Slika M.1: Testiranje injekcijske mešanice L₁ S₂B₁ PCE na terenu – izločanje vode in razlez.
Figure M.1: Evaluation of the injection grout L₁ S₂B₁ PCE in the field - bleeding and mini slump.

Injektibilnost z injekcijsko brizgo

Suh drobljen omet: enostavno (E) > 30 mm



Navlažen drobljen omet: enostavno (E) > 30 mm

**Pretočnost z injekcijsko brizgo**

Suh drobljen omet: težavno (D)



Navlažen drobljen omet: težavno (D)

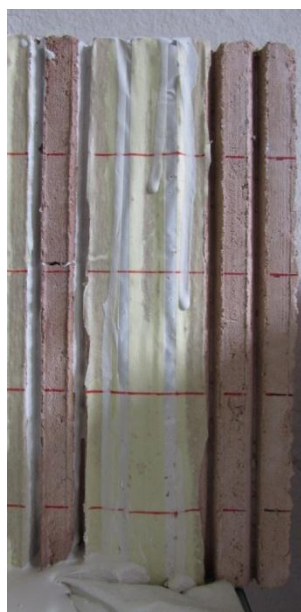


Slika M.2: Testiranje injekcijske mešanice $L_1 S_2 B_1$ PCE na terenu – injektibilnost in pretočnost z injekcijsko brizgo.

Figure M.2: Evaluation of the injection grout $L_1 S_2 B_1$ PCE in the field - injectability with syringe and flow with syringe.

Tečenje na apnenih ploščah s kanalčki

Suh odprt/zaprt kanalček: razdalja $H > 200$ mm Navlažen odprt/zaprt kanalček: razdalja $H > 200$ mm



Prostorninska stabilnost z apneno skodelico

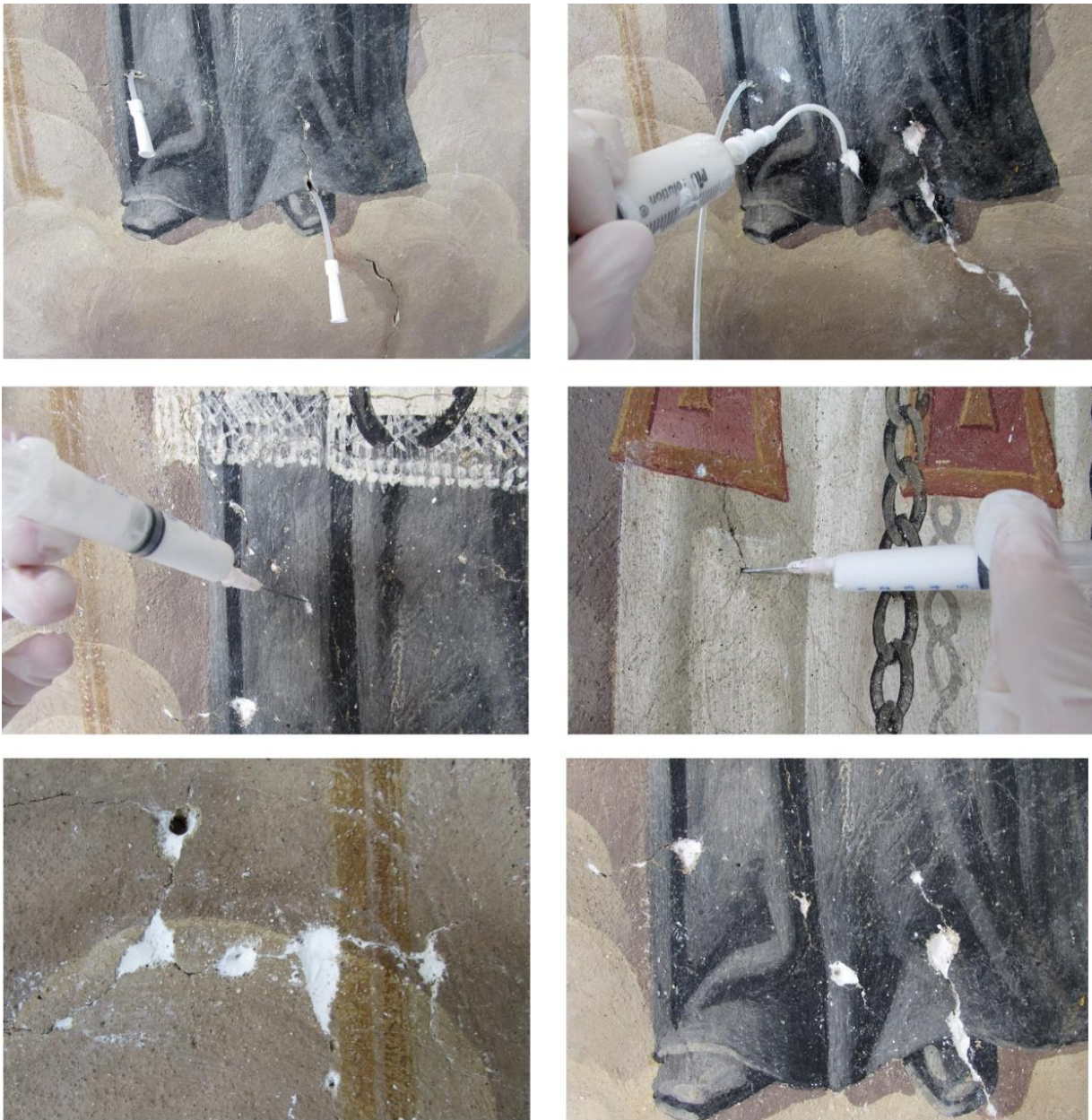
Suha apnena skodelica: 0,5/0,3 mm

Navlažena apnena skodelica: 0,5/0 mm



Slika M.3: Testiranje injekcijske mešanice $L_1 S_2 B_1$ PCE na terenu – tečenje na apnenih ploščah in prostorninska stabilnost z apnenimi skodelicami.

Figure M.3: Evaluation of the injection grout $L_1 S_2 B_1$ PCE in the field - flow on plastered tile and drying shrinkage with mortar cups.

PRILOGA N: UTRJEVANJE ODSSTOPAJOČIH PLASTI OMETOV STENSKE SLIKE

Slika N.1: Utrjevanje odstopajočih plasti ometov stenske slike sv. Lenarta v kapeli na Gmajni pri Lenartu.

Figure N.1: Consolidation of detached plaster layers with selected grout mixture in the chapel near Lenart.