

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE OPERATIVNO GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2017

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat/-ka:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK	691.51:624.138.24(043.2)
Avtor	Nina Predovnik
Mentorica	prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Somentorica	asist. dr. Andreja Padovnik, akad. rest.
Naslov	Preverjanje lastnosti injekcijskih mešanic pripravljenih z različnimi mešalniki
Tip dokumenta	Diplomska naloga - VSŠ
Obseg in oprema	49 str., 19 pregl., 36 sl., 15 en.
Ključne besede	apnena injekcijska mešanica, kremenov pesek, restavratorstvo-konservatorstvo, vpliv mešanja, električni mešalniki, ročno mešanje, sposobnost injektiranja

Izvleček

Z diplomsko nalogo smo želeli preveriti vpliv mešanja z različnimi mešalniki na lastnosti sveže in strjene nekonstrukcijske injekcijske mešanice, ki se uporablja na področju restavratorstva-konservatorstva. Izbrani električni mešalniki so zajemali uporabo laboratorijskega mešalnika RILEM-CEN, kuhinjskega mešalnika in električnega vrtalnega kladiva. Četrty način mešanja je bilo ročno mešanje, ker se ta pristop največ uporablja v restavratorsko-konservatorski praksi v Sloveniji. Preiskave so se izvajale na apneni injekcijski mešanici, saj so te mešanice zaradi svoje kemijske sestave in fizikalnih lastnosti najbolj kompatibilne s historičnimi površinami, potrebnimi sanacije. Poleg apnenega veziva je mešanica vsebovala še iz kremenčeve mivke in superplastifikator na osnovi polikarboksilatnih polimerov ter vodo. Po pregledu literature in zastavljenih kriterijih, ki naj bi jih nekonstrukcijske mešanice dosegale za uspešno sanacijo, smo izvedli preliminarne preiskave za dosego ustreznega razmerja sestavin mešanice. Nadaljnje preiskave so se izvajale po standardiziranih metodah, ki smo jih občasno morali modificirati, in po priporočilih priročnika avtoric Biçer-Şimşir in Rainer. Mešanice, ki so dosegale najboljše rezultate, so bile pripravljene z električnim vrtalnim kladivom. Prednost električnega vrtalnega kladiva je tudi možnost, da se uporabi na terenu.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC	691.51:624.138.24(043.2)
Author	Nina Predovnik
Supervisor	prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Co-advisor	asist. dr. Andreja Padovnik, akad. rest.
Title	The influence of different mixer types on the properties of injection grouts
Document type	Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes	49 p., 19 tab., 36 fig., 15 eq.
Key words	lime based injection grout, quartz sand, restoration-conservation, mixing influence, electric mixers, manual mixing, injection ability

Abstract

This thesis studies mixing non-structural injection grouts using different mixers and its influence on properties on a fresh mixture and on hardened mortar. The research was conducted for restoration and conservation purposes. The selected electric mixers included the laboratory RILEM-CEN mixer, a kitchen mixer and a rotary hammer drill. As a last type of mixing non-structural injection grouts we choose a hand mixing, which is the most used method of mixing in Slovenian restoration and conservation practice. The tests were made with an injection grout based on hydrated lime, because lime-based mixtures have the best compatibility with historical architectural surfaces in need of restoration due to their physical and chemical composition. Furthermore, the injection grout consisted of quartz sand, a superplasticizer based on polycarboxylate polymers and of water. After examining the literature and the set criteria, which the non-constructive mixtures should achieve for successful restoration, preliminary investigations were carried out. Based on the preliminary results, we tried to achieve an appropriate ratio of the mixture components. Further investigations were conducted using standardized methods, which were occasionally modified. The recommendations of Biçer-Şimşir and Rainer were also followed. The rotary hammer drill produced the mixtures with the best results. In addition to providing good results, the rotary hammer drill is also advantageous for the use out in the field.

ZAHVALA

Najprej bi se rada zahvalila somentorici diplomske naloge, asist. dr. Andreji Padovnik, za vso velikodušno in vsestransko pomoč, nasvete ter usmerjanje tekom nastajanja naloge. Najlepše se zahvaljujem tudi mentorici prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov, za sprejem pod svoje mentorstvo, vodenje in prijazno pomoč.

Za pomoč pri izvedbi preiskav v laboratoriju se iskreno zahvaljujem Franciju Čeponu.

Najlepša hvala vsem, ki so kakorkoli pomagali pri nastanku in izvajanju preiskav diplomske naloge.

Najlepše se zahvaljujem še družini, za vso izkazano podporo in spodbujanje tekom šolanja.

KAZALO

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	III
ZAHVALA	IV
1 UVOD	1
2 PREGLED LITERATURE	2
3 SESTAVINE IN SESTAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC	4
3.1 Vezivo	4
3.2 Polnilo	4
3.3 Voda	5
3.4 Kemijski dodatek	6
3.5 Sestava injekcijskih mešanic	6
3.5.1 Potreba po vodi	7
4 MEŠALNIKI IN PRIPRAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC	10
4.1 Laboratorijski standardni mešalnik RILEM-CEN	10
4.2 Kuhinjski mešalnik	11
4.3 Električno vrtalno kladivo (HILTI TE 7-A)	12
4.4 Ročno mešanje	12
4.5 Postopek mešanja injekcijske mešanice	13
4.6 Priprava in negovanje preizkušancev	13
5 OPIS PREISKAV INJEKCIJSKIH MEŠANIC	15
5.1 Opis preiskav na svežih injekcijskih mešanicah	15
5.1.1 Pretočnost	15
5.1.2 Izločanje vode	15
5.1.3 Sposobnost zadrževanja vode injekcijske mešanice	16
5.1.4 Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice	18
5.1.5 Preverjanje stabilnosti oziroma segregacije	19
5.1.6 Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic	20
5.1.7 Sprememba prostornine – plastični cilinder	21
5.1.8 Injektabilnost z injekcijsko brizgo	22
5.2 Opis preiskav na strjenih mešanicah	24
5.2.1 Poroznost	24

5.2.2	Kapilarno vpijanje vode	26
5.2.3	Tlačna trdnost	28
5.2.4	Cepilna natezna trdnost	29
6	REZULTATI IZVEDENIH PREISKAV	30
6.1	Rezultati preiskav na svežih injekcijskih mešanicah	30
6.1.1	Pretočnost	30
6.1.2	Izločanje vode.....	30
6.1.3	Sposobnost zadrževanja vode injekcijske mešanice.....	31
6.1.4	Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice	32
6.1.5	Preverjanje stabilnosti oziroma segregacije	32
6.1.6	Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic	33
6.1.7	Sprememba prostornine – plastični cilinder	36
6.1.8	Injektabilnost z injekcijsko brizgo.....	38
6.2	Rezultati preiskav na strjenih mešanicah	39
6.2.1	Poroznost	39
6.2.2	Kapilarno vpijanje vode	40
6.2.3	Tlačna trdnost.....	42
6.2.4	Cepilna natezna trdnost	43
7	UGOTOVITVE IN ZAKLJUČEK	44
	VIRI.....	47

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Zahteve za nekonstrukcijske injekcijske mešanice [2].	2
Preglednica 2: Značilnosti hidratiziranega apna pridobljene po specifikaciji.	4
Preglednica 3: Kemična sestava finega kremenovega peska [11].	5
Preglednica 4: Tehnični podatki o superplastifikatorju [13].	6
Preglednica 5: Sestava injekcijske mešanice.	7
Preglednica 6: Masno razmerje med vodo in suhimi sestavinami injekcijskih mešanic preliminarnih preiskav.	9
Preglednica 7: Število obratov standardnega mešalnika RILEM-CEN.	11
Preglednica 8: Število obratov kuhinjskega mešalnika	12
Preglednica 9: Število obratov električnega vrtalnega kladiva (HILTI TE 7-A) [16].	12
Preglednica 10: Število preizkušancev za posamezno preiskavo, pripravljenih z enim načinom mešanja.	14
Preglednica 11: Rezultati pretočnosti doseženi z različnimi načini mešanja.	30
Preglednica 12: Izločanje vode v % po 3 urah.	31
Preglednica 13: Sposobnost zadrževanja vode sveže injekcijske mešanice.	32
Preglednica 14: Rezultati prostorninske mase sveže mešanice.	32
Preglednica 15: Rezultati spremembe prostornine mešanice glede na način mešanja	36
Preglednica 16: Procentualni prikaz izračunane poroznosti, vsebnosti kapilarnih in zračnih por.	39
Preglednica 17: Rezultati meritev kapilarnega srka (kg/m^2) s pripadajočim koeficientom kapilarnega srka ($\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$).	41
Preglednica 18: Rezultati povprečne tlačne trdnosti vzorcev starosti 90 in 270 dni, ter vzorcev predhodno uporabljenih za preiskavo poroznosti pri starosti 240 dni.	42
Preglednica 19: Cepilna natezna trdnost preizkušancev starosti 90 dni.	43

KAZALO SLIK

Slika 1: Sejalna krivulja finega kremenovega peska [11].	5
Slika 2: Preiskava pretočnosti.	8
Slika 3: V ozadju strjeni vzorci injekcijske mešanice vlite v plastični, cilindrični kalup. V ospredju strjena mešanica v apnenem kalupu.	9
Slika 4: Primerjava razpokanosti injekcijskih mešanic v obroču z večjo količino dodane vode (levo) in manjšo količino dodane vode (desno).	9
Slika 5: Prikaz gibanja lopatice (levo) [15] in shema jeklene posode ter lopatice (desno) [14].	10
Slika 6: Laboratorijski standardni mešalnik RILEM-CEN na UL, FGG.	11
Slika 7: Kuhinjski mešalnik in pripadajoča lopatica.	11
Slika 8: Električno vrtalno kladivo HILTI TE 7-A in pripadajoča lopatica.	12
Slika 9: Ročni način priprave injekcijske mešanice.	13
Slika 10: Sveža injekcijska mešanica vlita v kalup (levo) in vzorci po razkalupljenju (desno).	13
Slika 11: Preiskava pretočnosti injekcijske mešanice.	15
Slika 12: Merilni valji napolnjeni z injekcijsko mešanico.	16
Slika 13: Kalup z injekcijsko mešanico prekrit z gazo (levo) ter papirnatimi brisačami in neprepustno ploskvijo (desno).	17
Slika 14: Kalup obtežen z utežjo.	17
Slika 15: Tehtanje mase vode, ki so jo vsrkale papirnat brisače.	17
Slika 16: Tehtanje prazne in napolnjene injekcijske brizge.	19
Slika 17: Plastičen cilinder z iztočnimi luknjami na treh nivojih [2].	20
Slika 18: Apnene skodelice napolnjene z injekcijsko mešanico.	21
Slika 19: Strjena injekcijska mešanica v plastičnem cilindričnem kalupu.	22
Slika 20: Zapolnitev razlike višine zaradi skrčitve s kremenčevo mivko.	22
Slika 21: Sejalna krivulja uporabljenega granulata.	23
Slika 22: Granulat nasut do višine 20 ml (levo) ter nanj vlita injekcijska mešanica (desno).	23
Slika 23: Vzorci namočeni v vodo do višine cca 3 mm.	24
Slika 24: Vzorci potopljeni v vodo (levo) in po določenem preteku dni postavljeni v eksikator (desno).	25
Slika 25: Vzorci vstavljeni v napravo za izsesavanje zraka.	25
Slika 26: Zaščita stranskih površin vzorca s silikonskim premazom.	27
Slika 27: Postavitev vzorcev v pladenj z vodo do višine cca 3 mm.	27
Slika 28: Injekcijska mešanica vlita v valjast plastični kalup (levo) in po preteku določenega časa sušenja in strjevanja zavravana z mavcem (desno).	28
Slika 29: Preša s pomočjo katere obremenjujemo vzorec (levo), ter tlačno obremenjevanje vzorca (desno).	28

Slika 30: Cepilno natežno obremenjevanje vzorca.....	29
Slika 31: Mešanice pripravljene z RILEM-CEN mešalnikom in količina izločene vode na površini..	31
Slika 32: Prostorninska masa injekcijskih mešanic glede na nivo plastičnega cilindra.	33
Slika 33: Primerjava razpokanosti med neomočeno in omočeno apneno skodelico glede na posamezen način mešanja injekcijske mešanice	35
Slika 34: Površinska razpokanost vzorcev	37
Slika 35: Iztekanje mešanice iz injekcijske brizge z granulatom.	38
Slika 36: Kapilarni srk v odvisnosti od časa.....	41

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Za utrjevanje odstopajočih dekorativnih plasti ometov (stenske slike, mozaiki, itd) se uporabljajo nekonstrukcijske injekcijske mešanice. Te se na terenu pripravljajo ročno ali z električnim mešalnikom, v laboratoriju pa se praviloma pripravljajo z laboratorijskimi mešalniki.

Injekcijske mešanice so suspenzije trdnih delcev dispergiranih v vodi, ki lahko pod različnimi vplivi spremenijo svoje lastnosti v svežem in strjenem stanju. Razlike v lastnostih se lahko pojavljajo zaradi različnih okoljskih vplivov, različnega postopka mešanja ali uporabe različnih mešalnikov. Tako lahko ista injekcijska mešanica pripravljena pod različnimi vplivi doseže različne lastnosti, kar lahko vpliva na poslabšanje injektabilnosti, stabilnosti in ne nazadnje na mehanske in fizikalne lastnosti.

Namen našega raziskovalnega dela je bil preučiti vpliv priprave mešanice z različnimi mešalniki na lastnosti v svežem in strjenem stanju. Ker se preiskave ne izvajajo vedno samo v laboratoriju ampak tudi na terenu, smo v raziskavo vključili poleg standardnega laboratorijskega mešalnika še dva električna mešalnika (kuhinjski mešalnik, električno vrtalno kladivo) in ročno pripravo mešanic.

Uporabili smo injekcijsko mešanico na osnovi hidratiziranega apna in kremenčevega polnila v volumenskem razmerju 1:3. Preiskave lastnosti na svežih in strjenih mešanic smo izvajali po standardiziranih in modificiranih standardnih laboratorijskih testih povzetih po avtoricah Biçer-Şimşir in Rainer [4] in Padovnik [2].

2 PREGLED LITERATURE

Historični dekorativni ometi (stenske slike, mozaiki, sgraffito, itd.), ki so del arhitekturne dediščine, so zaradi različnih vplivov velikokrat poškodovani. Pogosta poškodba, ki je prisotna na dekorativnih ometih, je ločitev ometov od nosilca ali odstopanje finega od grobega ometa. Najpogostejši vzroki za odstopanje plasti ometov so temperaturne spremembe, zmrzal in nihanje relativne vlage ter s tem povezani škodljivi vplivi, kot so kristalizacija vodotopnih soli, biodegradacija, itd [1]. Prav tako pa lahko poškodbe povzročajo mehanski vplivi in nepravilna tehnološka izdelava stenske slike.

Odstopajoče plasti ometov se sanira oziroma stabilizira z nekonstrukcijskim injektiranjem, ki je pogost konservatorsko-restavratorski poseg pri obnovi dekorativnih ometov. V ta namen konservatorji-restavratorji uporabljajo komercialno dostopne injekcijske mešanice ali mešanice pripravijo po svojih recepturah [2]. V obeh primerih je potrebno delce trdnih snovi zamešati oziroma dispergirati v vodi, da dobimo suspenzijo, ki jo nato injiciramo za odstopajoče plasti ometov. Pri tem si konservatorji-restavratorji pomagajo z ročnim ali strojnim mešanjem.

Pri sanacijah odstopajočih dekorativnih plasti ometov je treba slediti tudi določenim zahtevam za nekonstrukcijske injekcijske mešanice, ki so podane v preglednici 1.

Preglednica 1: Zahteve za nekonstrukcijske injekcijske mešanice [2].

Lastnosti	Zahteve
Pretočnost/konsistenca	Dovolj tekoča za injektiranje.
Izločanje vode	$\leq 2\%$ (EN 447:1996)
Vodozadržnost	Čim višja.
Sprememba prostornine	Najmanjše možno.
Stopnja poroznosti	$> 20\%$
Koeficient kapilarnega vpijanja vode	50-100%
Tlačna trdnost	0,4-2,5 MPa
Cepilna natezna trdnost	0,3-1,2 MPa

Zahteve težijo h kompatibilnosti injekcijskih mešanic z originalnimi materiali, saj je postopek konsolidacije ireverzibilen postopek. Injekcijske mešanice morajo tako imeti podobne lastnosti kot utrjevani historični ometi in ne smejo na njih povzročati mehanskih ali kemičnih sprememb barvnih plasti in ometov [3]. Prav tako pa so pomembne delovne lastnosti mešanic v svežem stanju (kot so dobra pretočnost in injektibilnost, stabilnost, primeren čas strjevanja, minimalno vnašanje vlage med postopkom injektiranja, itd.), od katerih je odvisna uspešnost zapolnjevanja dekorativnih odstopajočih plasti ometov.

Pogosto se zgodi, da konservatorji-restavratorji na terenu injekcijske mešanice pripravljajo s kuhinjskim mešalnikom ali maso mešajo na roke. Vplivi mešanja in različni okoljski dejavniki pa lahko povzročajo spremembe lastnosti v svežem in strjenem stanju mešanic. Avtorici Biçer-Şimşir in

Rainer [4] navajata, da lahko hitrost in čas mešanja vplivata na konsistenco injekcijske mešanice. Višja hitrost in daljši čas mešanja lahko vplivata na boljšo injektabilnost, pretočnost in na stabilnost mešanice. Predlagata, da se na terenu uporabi kuhinjski mešalnik namesto laboratorijskega mešalnika in poudarjata, da se v primeru uporabe komercialno dostopnih injekcijskih mešanic, pri pripravi mešanic držimo navodil proizvajalca.

Avtorji Dils in sod. [5] so proučevali vpliv načina mešanja na lastnosti betonskih mešanic. Rezultati kažejo, da na mikrostrukturo vzorcev poleg različnih postopkov mešanja, ki se lahko razlikujejo v času in hitrosti mešanja, času doziranja superplastifikatorja, zračnem tlaku v posodi, ipd., vpliva še sestava, morfologija in porazdelitev zrn polnila. Avtorji Dils in sod. [5] ugotavljajo še, da se lahko boljša obdelovalnost mešanice doseže s krajšim časom mešanja, vendar z višjo hitrostjo mešanja in s kasnejšim doziranjem superplastifikatorja v mešanico. Ta izboljšana obdelovalnost in reologija mešanice, pa lahko vplivata na povišanje deleža ujetih zračnih mehurčkov, ki se kažejo kot zračne votline in kapilarne pore. Njihovo zmanjšanje lahko dosežemo z uporabo vakuumskega mešalnika in z zmanjšanim dovajanjem zračnega tlaka v mešalno posodo [6].

Vpliv mešanja na cementnih pastah pa sta preverjala Fernández-Altable in Casanova [7]. Rezultati raziskav vpliva mešalne sekvence in odmerka superplastifikatorja (PC) na reološki odziv cementnih past ob različnih temperaturah, kažejo razlike v pretočnosti ob različnih strižnih stopnjah mešanja mešanic [7]. Mešanje (z reometrom) z visokim strižnim učinkom se izkaže za zelo ugodno glede izboljšanja pretočnosti mešanice [8]. Izkazalo se je, da na viskoznost mešanice vplivata temperatura in delež superplastifikatorja (PC).

3 SESTAVINE IN SESTAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC

3.1 Vezivo

Uporabili smo hidratizirano apno, proizvedeno v podjetju IGM Zagorje. Proizvaja se v praškasti obliki, ki se ob dodani vodi spremeni v apneno kašo. Ker je zračno (nehidravlično) vezivo, za učinkovito strjevanje potrebuje CO_2 iz zraka. Ob vgrajevanju mešanic v zidove ali elemente, ki jih želimo sanirati, je torej bistvenega pomena dober dostop zraka. V nasprotnem primeru lahko strjevanje poteka dlje časa [9].

V literaturi najdemo različna mnenja glede primernosti in načina uporabe hidratiziranega apna kot veziva. Na trgu je dandanes na voljo veliko pripravljenih komercialnih mešanic. Ugotavlja se, da kljub dobri obdelovalnosti, ki jo lahko z njimi dosežemo, dolgoročno gledano vseeno ne dosegajo tako dobrih lastnosti, kot jih lahko dosega mešanica hidratiziranega apna in polnila. Primerno vgradljivost in manjše krčenje slednje pa lahko dosežemo z uporabo različnih dodatkov [10].

Bistvene značilnosti hidratiziranega apna so razvidne iz preglednice 2.

Preglednica 2: Značilnosti hidratiziranega apna pridobljene po specifikaciji.

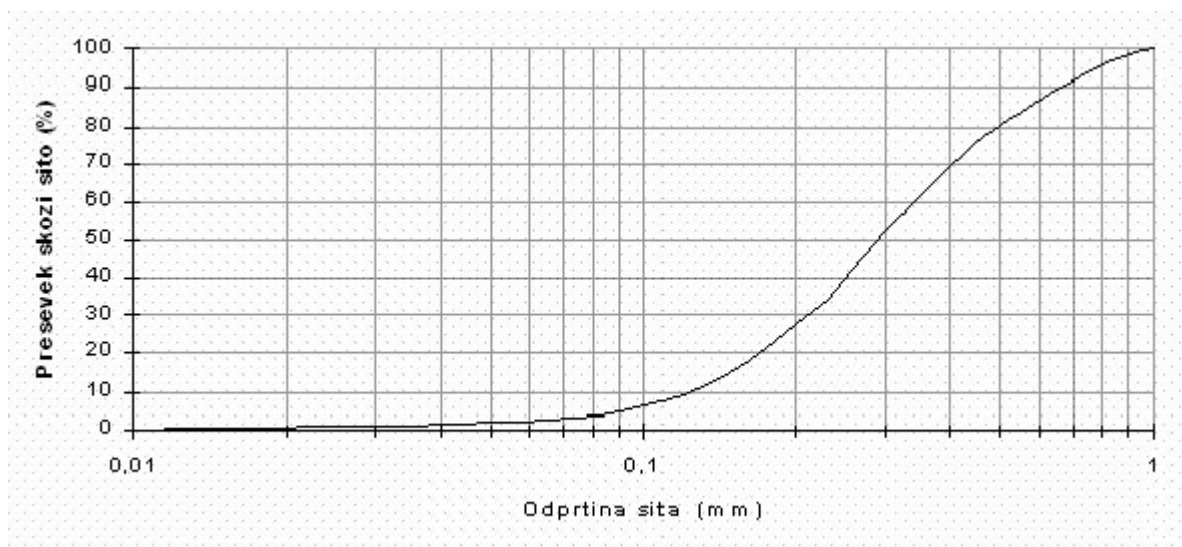
Značilnosti		Lastnost
CaO+MgO		>98
MgO		$\leq 5 \%$
CO_2		$\leq 4 \%$
SO_3		$\leq 0,2 \%$
Aktivno apno		$\geq 85 \%$
Prosta voda		$\leq 2 \%$
Prostorninska obstojnost		obstojno
Velikost delcev	0,2 mm	$\leq 0,5 \%$
	0,09 mm	$\leq 5 \%$
Vsebnost zračnih por		$\leq 12 \%$
Ugrez		> 10 mm in < 50 mm
Trajnost		Ni podatka

3.2 Polnilo

Velikost delcev polnila za injekcijske mešanice je ključnega pomena, saj majhni delci omogočajo lažjo injektabilnost mešanice, medtem ko lahko groba zrnastost vpliva na zmanjšanje injektabilnosti in omogoča močnejšo in kompaktnjšo mešanico, kar je tudi lahko zaželeno [10].

Kot polnilo za pripravo injekcijskih mešanic smo uporabili gradbeno mivko podjetja Kema, iz finega kremenovega peska zrnastosti 0,063-1 mm. Pesek je naravnega izvora in 100% opran, da ne vsebuje

organskih nečistoč ter presejan. Krivulja zrnivosti je razvidna s slike 1, kemična sestava pa iz preglednice 3.



Slika 1: Sejalna krivulja finega kremenovega peska [11].

Preglednica 3: Kemična sestava finega kremenovega peska [11].

Kemična sestava	Vsebnost [%]
SiO ₂	>98
Fe ₂ O ₃	0,297
Al ₂ O ₃	0,658
TiO ₂	0,032
CaO	0,041
MgO	0,027
P ₂ O ₅	0,009
K ₂ O	0,104

Kremenov pesek ima zaradi fino zrnate strukture dobro sposobnost zadrževanja vode. Poslabšuje pretočnost, zmanjšuje krčenje injekcijskih mešanic in količino izločene vode, ki lahko privede do segregacije [9].

Zaradi preprečitve vnosa dodatne vlage v mešanico ob njeni pripravi, smo kremenčevo mivko sušili na zraku približno teden dni in določili prostorninsko maso zrn, ki znaša 2,73 g/cm³.

3.3 Voda

Količina dodane vode ima v injekcijski mešanici pomembno vlogo, saj lahko ob preveliki količini povzročimo segregacijo mešanice in poslabšanje stabilnostnih in mehanskih lastnosti.

Za pripravo injekcijskih mešanic smo uporabljali pitno vodo iz vodovoda. Najpomembnejša je čistoča vode, ki ne sme vsebovati soli, kemijskih spojin, olj, organskih primesi, ipd. V primeru uporabe neustrezne vode pripomoremo k hitrejši spremembi časovnega poteka hidratacije mešanice, pojavu eflorescence, spremembi barve mešanice, ipd [12].

Pred zamešanjem mešanice, smo preverjali tudi temperaturo vode, ki je ob vsakem dolivanju dosegala $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

3.4 Kemijski dodatek

Pri naših raziskavah smo uporabili superplastifikator na osnovi polikarboksilatnih polimerov proizvajalca TKK Srpenica. Uporabljen kemijski dodatek spada med hiperplastifikatorje in nadomesti precejšno količino potrebe po vodi, medtem pa ne poslabša obdelovalnosti mešanice, temveč lahko zvišuje njeno trdnost [13].

Z zmanjšanjem količine vode vplivamo na zvišanje mehanskih lastnosti, vodo-nepropustnosti, na odpornost proti vremenskim vplivom ter na zmanjšanje prostorninskih sprememb in razpok pri sušenju [12].

Lastnosti superplastifikatorja povzete po tehničnem listu produkta, so podane v preglednici 4.

Preglednica 4: Tehnični podatki o superplastifikatorju [13].

Lastnosti	Vrednosti
Izgled	Tekočina svetlo rjavo rumene barve
Gostota, 20°C	$(1,05 \pm 0,02) \text{ kg/dm}^3$
pH	$5,5 \pm 1,0$
Vsebnost vodikovih kloridov (Cl^-)	Ne vsebuje kloridov
Vsebnost alkalij (ekvivalent Na_2O)	$<3,0\%$

3.5 Sestava injekcijskih mešanic

Izbira materialov in sestava injekcijske mešanice temeljita na rezultatih raziskav v doktorski disertaciji avtorice Padovnik [2]. Volumsko razmerje med vezivom in polnilom je 1:3. Na podlagi raziskav avtorice Padovnik [2] so se mase z višjim deležem polnila izkazale za najbolj stabilne in odporne na krčenje oziroma nastajanje razpok med sušenjem. Sestava injekcijske mešanice je podana v preglednici 5.

Preglednica 5: Sestava injekcijske mešanice.

Volumsko razmerje		Etalon
Volumsko razmerje vezivo/polnilo	1:3	
Vezivo	1 del hidratiziranega apna	290 g
Polnilo	3 deli kremenčeve mivke	938 g
Kemični dodatek	0,3% PCE – Superplastifikator	3,68 g
Voda	1,17 dela hidratiziranega apna	340 g

Za tehtanje mase hidratiziranega apna, kremenovega peska in vode smo uporabili tehtnico z natančnostjo $\pm 0,1\text{g}$. Pri tehtanju superplastifikatorja pa tehtnico z natančnostjo $\pm 0,01\text{g}$.

3.5.1 Potreba po vodi

Količino dodane vode mešanici, izrazimo kot vodovezivno razmerje (v/v), ta pa predstavlja razmerje med maso dodane vode in maso veziva. Določitev ustrezne količine vode, ki jo bomo dodali mešanici, izredno vpliva na sposobnost injektiranja sveže mešanice in mehanske lastnosti v strjenem stanju [9]. Ker pa področje konservatorstva ne navaja priporočenih vodovezivnih razmerij, smo potrebno količino vode ugotavljali na podlagi predhodno opravljenih analiz.

Izvedli smo preiskavo pretočnosti (podrobnejši opis izvedbe v poglavju 5.1.1 Pretočnost) in opazovali še stabilnost pred krčenjem ter oblikovanjem razpok po dvodnevem sušenju injekcijske mešanice. Slednje smo opazovali na vzorcih vlitih v plastične kalupe in apnene skodelice. Omenjene analize smo izvajali na dveh injekcijskih mešanicah, ki sta vsebovali različno količino vode (preglednica 6).

Z določanjem pretočnosti mešanic z različnimi količinami dodane vode smo uporabili modificiran Marshev lijak po standardu SIST EN 445:2008 [2]. Preiskava pretočnosti (slika 2) nam omogoča opazovanje iztekanja injekcijske mešanice, oceno njene homogenosti, ugotavljanje morebitne zaustavitve ter okvirnega časa popolnega iztekanja mešanice. Pri preiskavi smo merili čas in opazovali enakomernost curka med iztekanjem mešanice.



Slika 2: Preiskava pretočnosti.

Primernost izbranega deleža vode smo nato preverili še s pomočjo metod za opazovanje krčenja in morebitne razpokanosti injekcijskih mešanic.

Uporabili smo plastične cilindrične kalupe višine 30 mm in premera 46 mm (slika 3) ter plastične obroče višine 10 mm in premera 100 mm (slika 4). S cilindričnimi kalupi smo kasneje izvajali še preiskavo, opisano v poglavju 5.1.7 Sprememba prostornine – plastični cilinder. Primerjava rezultatov preiskav s plastičnimi obroči je omogočala hitrejši čas potencialnega razvoja razpok, saj smo jih postavili na porobetonski zidak, ki je vpiljal vodo iz injekcijske mešanice vlite v obroč. Podoben učinek smo pričakovali ob vgradnji mešanice v apnene skodelice (slika 3) ki, tako kot porobetonski zidak, srkajo vodo iz injekcijske mešanice. V primeru plastičnega cilindra je odtekanje vode skozi spodnjo ploskev onemogočeno, kar upočasnjuje sušenje mešanice in posledičen pojav razpok.



Slika 3: V ozadju strjeni vzorci injekcijske mešanice vlite v plastični, cilindrični kalup. V ospredju strjena mešanica v apnenem kalupu.



Slika 4: Primerjava razpokanosti injekcijskih mešanic v obroču z večjo količino dodane vode (levo) in manjšo količino dodane vode (desno).

Rezultati preliminarne raziskave so pokazali, da sta obe mešanici odporni proti krčenju in oblikovanju razpok med sušenjem. Zato smo količino dodane vode izbrali glede na rezultate pretočnosti.

Mase sestavin in masno razmerje med vodo in suhimi sestavinami v mešanici (vezivo in polnilo) so podani v preglednici 6 za obe mešanici. Pri uporabi mešanice 1 je material neenakomerno iztekla in zastajal v lijaku. Injekcijska mešanica 2 pa je dosegla čas pretočnosti 1 min in 40 sekund in v tem času ohranila primerno homogenost, ocenjeno preko enakomernega curka iztekajoče se mešanice. Glede na ugotovljeno smo izmerjen čas iztekanja mešanice 2, prevzeli kot referenco za nadaljnje preiskave pretočnosti.

Preglednica 6: Masno razmerje med vodo in suhimi sestavinami injekcijskih mešanic preliminarne preiskave.

	Masa dodane vode [g]	Masa suhih sestavin mešanice [g]	v/m
Mešanica 1	324	1228	0,26
Mešanica 2	340	1228	0,28

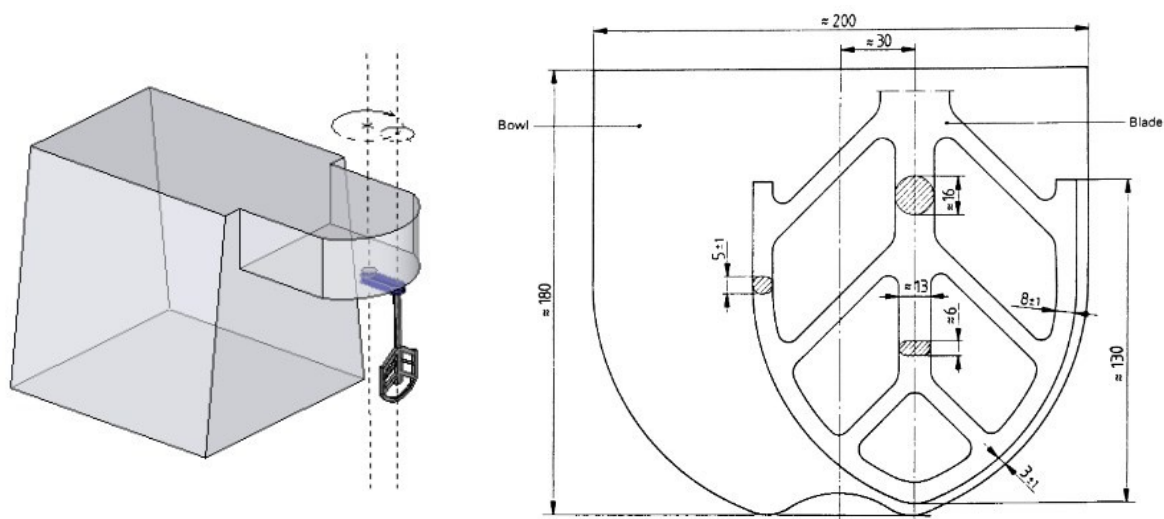
4 MEŠALNIKI IN PRIPRAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Izbrano mešanico smo pripravljali s tremi različnimi električnimi mešalniki in z mešanjem na roke z večjo kovinsko žlico. Injekcijske mešanice pripravljene s standardnim laboratorijskim mešalnikom so nam služile za primerjavo s preostalimi tremi načini mešanja.

V nadaljevanju so podrobneje opisane lastnosti posameznih mešalnikov.

4.1 Laboratorijski standardni mešalnik RILEM-CEN

Standardni laboratorijski mešalnik, sestoji iz nerjaveče jeklene posode in lopatice. Jeklena lopatica se obrača okoli lastne osi medtem, ko se planetarno obrača še okoli osi posode - pogonske osi (slika 5). Obe rotacijski smeri se gibljeta v nasprotnih smereh [14]. Injekcijska mešanica se pripravlja v jekleni posodi (slika 6).



Slika 5: Prikaz gibanja lopatice (levo) [15] in shema jeklene posode ter lopatice (desno) [14].



Slika 6: Laboratorijski standardni mešalnik RILEM-CEN na UL, FGG.

Na izbiro imamo dve stopnji hitrosti mešalnika, ki sta za vsako os drugačni. Podatki so razvidni iz preglednice 7.

Preglednica 7: Število obratov standardnega mešalnika RILEM-CEN.

Hitrost mešanja	Nizka	Visoka
Št. obratov okoli lastne osi v 1. min	140 ± 5	285 ± 5
Št. obratov okoli pogonske osi v 1. min	62 ± 5	125 ± 10

4.2 Kuhinjski mešalnik

Uporabili smo kuhinjski mešalnik z močjo 300 W, ki ima pet možnih stopenj hitrosti mešanja (slika 7). Vanj smo vstavili le eno lopatico, saj bi dve povzročili preveč zračnih mehurčkov v injekcijski mešanici. Višina jeklene lopatice je 8,5 cm, premer pa 4,6 cm.



Slika 7: Kuhinjski mešalnik in pripadajoča lopatica.

Uporabljali smo dve hitrosti mešanja. Število obratov, ki jih mešalnik doseže v eni minuti je razvidno iz preglednice 8. Injekcijska mešanica se pripravlja v plastični posodi.

Preglednica 8: Število obratov kuhinjskega mešalnika

Hitrost mešanja	Nizka	Visoka
Št. obratov okoli lastne osi v 1. min	540	1200

4.3 Električno vrtalno kladivo (HILTI TE 7-A)

Uporabili smo električno vrtalno kladivo (HILTI TE 7-A) v katerega smo vstavili lopatico spiralne oblike (slika 8). Hitrost vrtenja je težko določljiva, saj nimamo posamičnih gumbov, kateri bi ob posamezni nastavitvi določali konstantnost obratov.



Slika 8: Električno vrtalno kladivo HILTI TE 7-A in pripadajoča lopatica.

Mešalnik ima tako le univerzalni gumb, preko katerega sami določamo hitrost, glede na moč stiska gumba. Podatki so razvidni iz preglednice 9. Injekcijska mešanica se pripravlja v plastični posodi.

Preglednica 9: Število obratov električnega vrtalnega kladiva (HILTI TE 7-A) [16].

Hitrost mešanja	1. stopnja	2. stopnja
Št. obratov okoli lastne osi v 1. min	< 740	740

4.4 Ročno mešanje

Za mešanje injekcijskih mešanic smo uporabili večjo kovinsko žlico (slika 9). Hitrosti oz. številnost obratov mešanja nismo merili. Smo pa med mešanjem ravno tako kot pri ostalih mešalnikih, razlikovali med počasno začetno hitrostjo in kasnejšo nekoliko hitrejšo. Injekcijska mešanica se pripravlja v plastični posodi.



Slika 9: Ročni način priprave injekcijske mešanice.

4.5 Postopek mešanja injekcijske mešanice

Mešanje smo izvajali v mešalni posodi, kjer smo v prvih 10-15 sekund, na minimalni hitrosti, premešali hidratizirano apno in kremenov pesek. Med mešanjem na minimalni hitrosti smo v naslednjih 45 sekundah dodali 70 % vode in nadaljevali z mešanjem še 2 min na minimalni hitrosti. V naslednjih 15 sekundah smo med mešanjem na minimalni hitrosti dodali superplastifikator, skupaj s 30 % preostale vode. Mešanje smo prekinili za 15-30 sekund, da smo očistili morebitne ostanke mešanice iz lopatice in sten posode. Mešanje smo nadaljevali z maksimalno hitrostjo še 3 min.

Pripravljeno injekcijsko mešanico uporabimo glede na zahteve posamezne preiskave.

4.6 Priprava in negovanje preizkušancev

Za preiskave mehanskih lastnosti injekcijske mešanice pripravljene z različnimi mešalniki, potrebujemo strjene valjaste preizkušance, ki so bili podvrženi 90 in 270 dnevnemu negovanju.

Pripravljeno mešanico smo vgradili v valjaste plastične kalupe višine in premera 50 mm (slika 10, levo). Plastični kalupi so bili postavljeni na papirnato brisačo, ki je prekrivala porobetonski zidak. Pred vlitjem mešanice smo kalupe premazali še z oljem, za lažje razkalupljenje.



Slika 10: Sveža injekcijska mešanica vlita v kalup (levo) in vzorci po razkalupljenju (desno).

Injekcijsko mešanico smo nalili do zgornjega roba valjastega kalupa (slika 10, levo), razkalupljenje preizkušancev (slika 10, desno) pa smo izvedli po 48-ih urah sušenja v prostoru s temperaturo 24 ± 2 °C in relativno vlažnostjo 40%. Preizkušance smo negovali 90 oziroma 270 dni v prostoru s temperaturo 24 ± 2 °C in relativno vlažnostjo 40%.

Iz preglednice 10 je razvidno število preizkušancev, ki so se uporabili za posamezno preiskavo.

Preglednica 10: Število preizkušancev za posamezno preiskavo, pripravljenih z enim načinom mešanja.

Preiskava	Dimenzije kalupa	Število preizkušancev na posamezni mešalnik
Tlačna trdnost po 90. dneh	Premer 50 mm Višina 50 mm	5
Tlačna trdnost po 270. dneh		4
Cepilna natezna trdnost po 90. dneh		5
Poroznost		3
Kapilarno vpijanje vode		2

5 OPIS PREISKAV INJEKCIJSKIH MEŠANIC

5.1 Opis preiskav na svežih injekcijskih mešanicah

5.1.1 Pretočnost

Preiskava je bila izvedena po modificiranem postopku standarda SIST EN 445:2008 [17], namenjenega preizkušanju injekcijskih mas za prednapete kable. Modifikacija zajema zmanjšanje volumna lijaka z 1,7 l na 0,25 l in zmanjšanja spodnje odprtine z 1 cm na 0,5 cm [2] (slika 11). Zmanjšanje pa omogoča natančnejše razumevanje obnašanja mešanice v praksi, ki se injektira v majhnih količinah s pomočjo injekcijske brizge.

Predhodno omočen lijak volumna 0,25 l, do roba napolnimo s pripravljeno mešanico. Spodnjo odprtino premera 0,5 cm medtem zatesnimo. Napolnjenemu lijaku odtesnimo odprtino in pričnemo z merjenjem časa, ki ga mešanica potrebuje za iztek skozi odprtino. Meritve se izvedejo takoj po zamešanju mešanice in po preteku 30 min v treh ponovitvah.



Slika 11: Preiskava pretočnosti injekcijske mešanice.

5.1.2 Izločanje vode

Meritve izločanja vode smo izvedli po modificiranem postopku standarda ASTM C 940 avtoric Bicer-Simsir in Rainer [4]. Sprememba je zajemala uporabo manjšega volumna merilnega valja in sicer 100 ml, namesto 1000 ml. Merilni valj postavimo na površino, ki ni izpostavljena tresljajem in vanj vlijemo $80 \text{ ml} \pm 1 \text{ ml}$ injekcijske mešanice. Vrh valja z namenom preprečitve izhlapevanja vode, zatesnimo s folijo (slika 12).



Slika 12: Merilni valji napolnjeni z injekcijsko mešanico.

Odčitavanja zgornjega nivoja mešanice in izločene vode potekajo prvo uro v petnajst minutnih intervalih, nato merjenja ponavljamo vsako uro, dokler se posedanje ne ustali. Končni odčitek se izvrši po štiriindvajsetih urah od začetnega časa.

Kriteriji priporočene mejne vrednosti izločanja vode se glede na različne vire zelo razlikujejo. Razlog je v obravnavi različnih sestav mešanic. Svoje rezultate sem ocenjevala na podlagi standarda EN 447 [18], ki določa da lahko količina izločene vode dosega vrednost $\leq 2,0 \%$.

Izločanje vode izračunamo po naslednji enačbi (1):

$$\text{Izločanje vode [\%]} = \frac{V_1}{V} \cdot 100 \quad (1)$$

kjer je:

- V_1 ... prostornina vode, ki se je izločila nad mešanico [ml]
- V ... prostornina mešanice [ml]

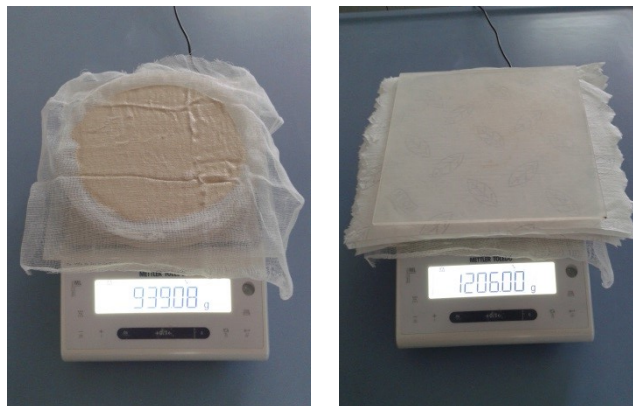
5.1.3 Sposobnost zadrževanja vode injekcijske mešanice

Določitev vodozadržnosti sveže injekcijske mešanice sem izvajala skladno s standardom PSIST prEN 1015-8:2001 [19].

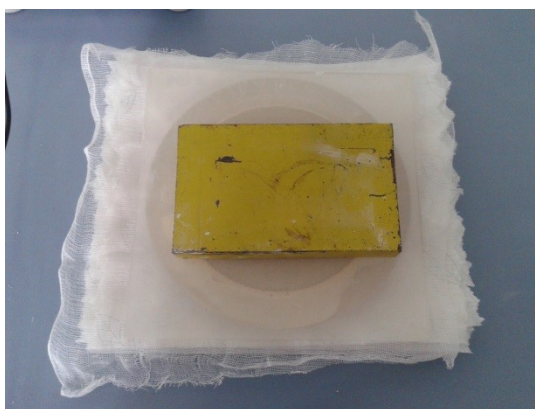
Preiskavo je potrebno izvesti 15 sekund po končanem mešanju. Za izvedbo preiskave potrebujemo kalup, katerega mere predpisuje standard, 2 kg utež, gazo ter filtrski papir, ki smo ga nadomestili s papirnatimi brisačami.

Postopek narekuje tehtanje suhega filtrskega papirja in praznega kalupa. Kalup nato napolnimo z mešanico, ki jo poravnamo na višino robov (slika 13, levo). Poln kalup ponovno stehtamo ter površino

prekrijemo z gazo in filtrskim papirjem (slika 13, desno). Namestimo še vodoneprepustno površino in vse skupaj obrnemo za 180° ter obtežimo z 2 kg utežjo (slika 14). Po petih minutah kalup obrnemo v prvotno lego in stehamo moker filtrski papir.



Slika 13: Kalup z injekcijsko mešanico prekrit z gazo (levo) ter papirnatimi brisačami in neprepustno ploskvijo (desno).



Slika 14: Kalup obtežen z utežjo.

V primeru, ko masa vsrkane vode filtrskega papirja – papirnatih brisač (slika 15) presega 10 g, moramo poskus ponoviti z večjim številom filtrov.



Slika 15: Tehtanje mase vode, ki so jo vsrkale papirnate brisače.

Ustreznost mase papirja preverimo s sledečim izrazom (2):

$$\frac{W_3}{n} \leq 10 \text{ g} \quad (2)$$

kjer je:

- W_3 ... masa vpote vode v filter papir [g]
- n ... število uporabljenih filter papirjev

Preostale uporabljene enačbe, za izračun vodozadržnosti (3-7):

$$m_5 = m_3 - m_1 \quad (3)$$

$$W_2 = m_5 \cdot W_1 \quad (4)$$

$$W_3 = m_4 - m_3 \quad (5)$$

$$W_4 = W_3 / W_2 \cdot 100 \quad (6)$$

$$WRV = 100 - W_4 \quad (7)$$

kjer je:

- m_1 ... masa kalupa v suhem stanju [g]
- m_2 ... masa filter papirja v suhem stanju [g]
- m_3 ... masa kalupa in mešanice [g]
- m_4 ... masa z vodo prepojenega filter papirja [g]
- m_5 ... masa mešanice v kalupu [g]
- W_1 ... vsebnost vode izražena kot delež celotne mase preskusne malte [/]
- W_2 ... vsebnost vode mešanice v kalupu [g]
- W_4 ... relativna izguba vode mešanice [%]
- WRV ... vodozadržnost sveže injekcijske mešanice [%]

5.1.4 Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice

Prostorninsko maso injekcijske mešanice smo preverjali po prilagojenem postopku ASTM C185-02 GCI 4.5, opisanem v priročniku avtoric Bicer-Simsir in Rainer [4].

Za preverjanje prostorninske mase uporabimo 60 ml injekcijsko brizgo, ki jo stehtamo in napolnimo z 20 ml injekcijske mešanice (slika 16). Napolnjeno brizgo ponovno stehtamo.



Slika 16: Tehtanje prazne in napolnjene injekcijske brizge.

Prostorninsko maso določimo s pomočjo naslednje enačbe (8):

$$\rho_{mešanice} = \frac{Mg}{20} \quad (8)$$

kjer je:

- $\rho_{mešanice}$... prostorninska masa injekcijske mešanice [g/cm^3]
- Mg ... masa injekcijske mešanice [g]
- 20 ... volumen injekcijske mešanice [g]

5.1.5 Preverjanje stabilnosti oziroma segregacije

Za preverjanje stabilnosti oziroma segregacije injekcijske mešanice, pripravljene z različnimi mešalniki, smo uporabili metodo po priporočilu RILEM TC 145 WSM, ki je bila prilagojena v okviru doktorske disertacije Padovnik [2].

Za izvedbo preiskave smo potrebovali visok plastičen cilinder z iztočnimi luknjami na treh nivojih – zgornji, srednji, spodnji (slika 17). Višina cilindra meri 37 cm, notranji premer pa 2,2 cm.



Slika 17: Plastičen cilinder z iztočnimi luknjami na treh nivojih [2].

Iztočne luknje, ki se nahajajo na dnu posameznega nivoja, se pred vlivanjem mešanice v cilinder, zatesnijo s čepom. Na koncu se s folijo zatesni še vrh cilindra, skozi katerega se mešanica vliva. S tem preprečimo dotok zraka in možnost sušenja ter strjevanja mešanice. Po štiriindvajsetih urah se na zgornjem nivoju cilindra odstrani čep in počaka, da izteče zgornji del vlite mešanice v posodo. Enak postopek se ponovi še za srednji in spodnji nivo.

Za iztočeno mešanico iz posameznega nivoja sem nato določila prostorninsko maso po postopku in z enačbo, ki sta opisana v poglavju 5.1.4 Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice.

5.1.6 Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic

Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic spada med in-situ preiskave in je opisana v priročniku avtoric Bicer-Simsir in Rainer [4].

Za izvedbo preiskave potrebujemo apnene skodelice višine 30 mm, v katere vlijemo injekcijsko mešanico. Skodelice so narejene iz apnene malte za izdelavo ometov (volumsko razmerje apnenega testa in kalcitnega agregata je 1: 2) [2].

Za vsako mešanico potrebujemo dve apneni skodelici. Za preverjanje vpliva predhodnega vlaženja na lastnosti mešanice se ena skodelica pred napolnitvijo predhodno navlaži, druga pa ostane suha. Skodelici nato napolnimo z 20 ml injekcijske mešanice (slika 18) in nekajkrat udarimo ob delovno površino, da izločimo morebitne zračne mehurčke. Napolnjene skodelice se nato sušijo 24 ur.



Slika 18: Apnene skodelice napolnjene z injekcijsko mešanico.

Glede na rezultate lahko mešanice razvrstimo v tri skupine [4]:

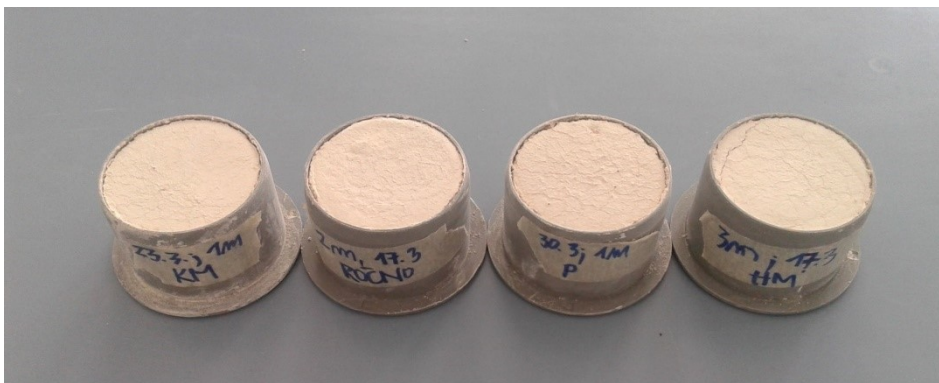
- **vzorec nima sledov krčenja:** ni vidnih razpok med skodelico in injekcijsko mešanico niti se te ne pojavljajo po sredini vzorca
- **srednja stopnja krčenja:** 0,5 mm ali manjše razpoke med skodelico in injekcijsko mešanico oz. po sredini vzorca
- **visoka stopnja krčenja:** 0,5 mm ali večje razpoke med skodelico in injekcijsko mešanico oz. po sredini vzorca

5.1.7 Sprememba prostornine – plastični cilinder

Spremembo prostornine zaradi krčenja smo preverjali po postopku nestandardizirane metode s plastičnimi cilindri [2].

Preiskava se izvaja s plastičnimi cilindričnimi kalupi višine 30 mm in premera 46 mm. Z injekcijsko mešanico napolnjene kalupe sušimo 30 dni. Posušenim ter strjenim vzorcem nato določimo spremembo prostornine s pomočjo kremenčeve mivke z znano prostorninsko maso v nasutem stanju.

Postopek preiskave najprej narekuje tehtanje strjenega vzorca s kalupom (slika 19) nato pa prazen prostor med vzorcem in robom kalupa, ki je nastal zaradi sušenja, zapolnimo s kremenčevo mivko. Površino poravnamo z robovi kalupa (slika 20). Napolnjen kalup ponovno stehtamo.



Slika 19: Strjena injekcijska mešanica v plastičnem cilindričnem kalupu.



Slika 20: Zapolnitev razlike višine zaradi skrčitve s kremenčevo mivko.

Spremembo prostornine določimo s pomočjo naslednje enačbe (9):

$$\Delta V = \frac{V_{\text{pesek}}}{V_{\text{kalup}}} \times 100 \quad (9)$$

kjer je:

- ΔV ... sprememba prostornine [%]
- V_{pesek} ... prostornina dodanega peska [g]
- V_{kalup} ... prostornina cilindričnega kalupa [g]

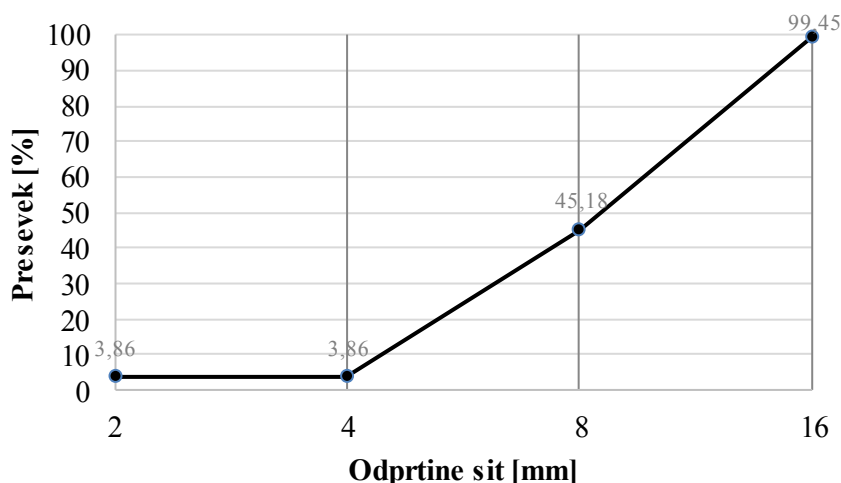
5.1.8 Injektabilnost z injekcijsko brizgo

Injektabilnosti injekcijskih mešanic smo preverjali po nestandardiziranem postopku z injekcijsko brizgo. Metoda z injekcijsko brizgo spada v sklop in situ metod. Avtorici Bicer-Simsir in Rainer [4] obravnavata mešanice s finejšimi polnili, zato predlagata uporabo drobljenega ometa granulacije od 2 do 4 mm.

Zaradi večje frakcije zrn polnila uporabljenega za injekcijske mešanice, smo bili primorani uporabiti večje injekcijske brizge. Nad odprtino brizge smo prav tako namestili tudi mrežico, ki je znom

granulata preprečevala zamašitev odprtine injekcijske brizge. Tega postopek v priročniku [4] sicer ne zahteva.

Za določitev injektabilnosti potrebujemo 60 ml injekcijsko brizgo in predhodno omočeni granulati frakcije od 4 do 16 mm (slika 21).



Slika 21: Sejalna krivulja uporabljenega granulata.

Granulat nasujemo v injekcijsko brizgo do višine 20 ml (slika 22, levo). Z granulatом nasuto brizgo držimo v vertikalni poziciji ter vanjo vlijemo mešanico (slika 22, desno). Namestimo bat injekcijske brizge in mešanici s pritiskom pomagamo prodirati skozi granulata toliko časa, da priteče skozi odprtino brizge.



Slika 22: Granulat nasut do višine 20 ml (levo) ter nanj vlita injekcijska mešanica (desno).

Rezultati injektabilnosti se lahko uvrstijo v tri razrede [4]:

- **E (enostavno)** – mešanica steče skozi konico brizge ob dovajanju pritiska

- **F (izvedljiva)** – mešanica doseže konico injekcijske brizge vendar ob dovajanju pritiska ne steče skozenjo
- **DL (težavna)** – mešanica se ustavi pred dosegom konice injekcijske brizge ob dovajanju pritiska. Z milimetrskim ravnilom se izmeri razdalja, do katere mešanica (L) uspe prodreti skozi granulat.

5.2 Opis preiskav na strjenih mešanicah

5.2.1 Poroznost

Določanje stopnje poroznosti, stopnje kapilarnih in zračnih por, je potekalo po standardu SIA 262/1, dodatek A [20].

Preiskavo začnemo s tehtanjem vzorcev in postavitvijo v pečico za 24 ur pri temperaturi 120°C. Suhe vzorce naslednji dan ohladimo na sobno temperaturo in ponovno stehtamo. Vse vzorce nato postavimo 3 mm globoko v vodo (slika 23). Po šestih urah vzorce stehtamo in jih postavimo nazaj 3 mm globoko v vodo. Po 24. urah jih ponovno stehtamo in vzorce potopimo v vodo (slika 24, levo).



Slika 23: Vzorci namočeni v vodo do višine cca 3 mm.

Po preteku štirih dni z vodo prepojene vzorce stehtamo na zraku in potopljene v vodi. Vzorce nato postavimo v pečico za 24 ur na 110°. Po 24 urah sušenja vzorce ohladimo v eksikatorju (slika 24, desno) in jih ponovno stehtamo.



Slika 24: Vzorci potopljeni v vodo (levo) in po določenem preteku dni postavljeni v eksikator (desno).

Vzorci nato postavimo v napravo za izsesavanje zraka (slika 25). Tlak v posodi z vzorci mora biti manjši od 1 mbar. Po dveh urah izsesavanja zraka smo posodo z vzorci, ki je pod tlakom, napolnili z vodo in pazili, da v napravo nismo spustili zraka. Vzorci pustimo v vodi tri dni in jih nato stehtamo na zraku in v vodi. Na koncu smo vzorce postavili v pečico na temperaturo 110°C. Po tri dnevem sušenju vzorce še zadnjič stehtamo.



Slika 25: Vzorci vstavljeni v napravo za izsesavanje zraka.

Stopnja skupne poroznosti je določena po naslednji enačbi (10):

$$n = \frac{(m_{TOT0} - m_{110}) / \rho_w}{V_E} \times 100 \quad (10)$$

kjer je:

- n ... stopnja poroznosti [%]

- m_{TOT0} ... masa mokrega vzorca po končanem izsesavanju zraka pod tlakom [g]
- m_{I10} ... masa suhega vzorca po zadnjem sušenju [g]
- ρ_w ... gostota vode [g/cm³]
- V_E ... volumen vzorca [cm³]

Določila sem še stopnjo kapilarnih por (11):

$$U_E = \frac{(m_{E0} - m_{I10}) / \rho_w}{V_E} \times 100 \quad (11)$$

kjer je:

- U_E ... stopnja kapilarnih por [%]
- m_{E0} ... masa mokrega vzorca po štiri dnevni potopitvi v vodi [g]
- m_{I10} ... masa suhega vzorca po zadnjem sušenju [g]
- ρ_w ... gostota vode [g/cm³]
- V_E ... volumen vzorca [cm³]

Stopnja zračnih por (12) pa se izračuna kot razlika stopnje skupne poroznosti in stopnje kapilarnih por:

$$LP = n - U_E \quad (12)$$

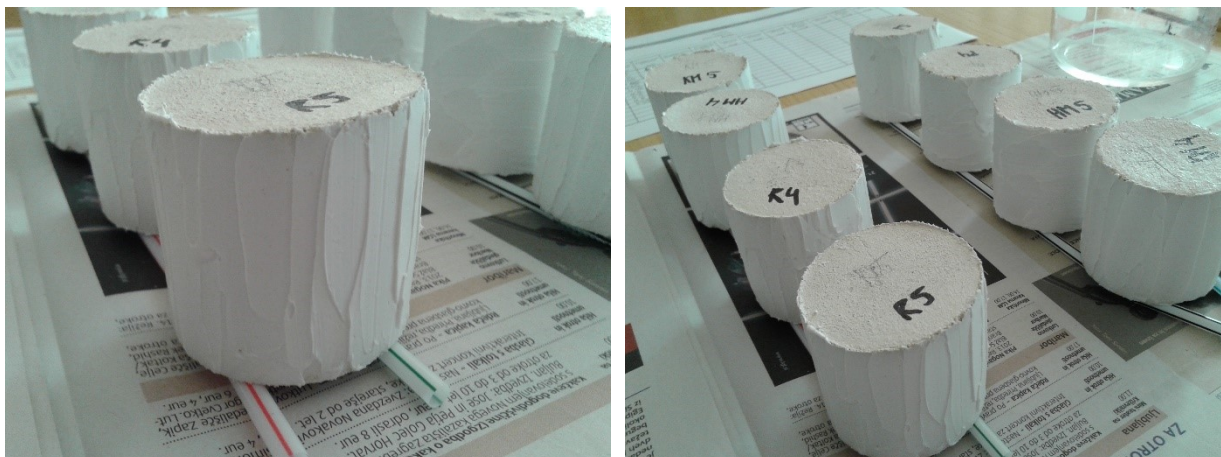
kjer je:

- LP ... stopnja kapilarnih por [%]

5.2.2 Kapilarno vpijanje vode

Meritve sposobnosti vpijanja vode smo izvedli po priporočilu RILEM št. testa II. 6 [21].

Za izvedbo preizkusa smo vsem vzorcem, z izmerjeno višino in premerom, stranske površine zaščitili s silikonskim premazom po celotni višini (slika 26). Ko se je premaz posušil, smo jih postavili v pečico na 120°C za 24 ur. Vzorce smo vzeli iz pečice in jih postavili v eksikator, da se ohladijo. Na sobno temperaturo ohlajene vzorce smo nato stekali in postavili 3 mm globoko v vodo (slika 27). Ves čas trajanja preizkusa ohranjamo enako višino vode. Na določene časovne intervale vzorce vzamemo iz vode in jih stekamo ter jih postavimo nazaj v vodo.



Slika 26: Zaščita stranskih površin vzorca s silikonskim premazom.



Slika 27: Postavitev vzorcev v pladenj z vodo do višine cca 3 mm.

Opisan preizkus traja 24 ur. Časovni intervali merjenja pa so sledeči: 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 ur, 2 ur, 3 ur, 4 ur, 5 ur, 6 ur in 24 ur.

Koeficient kapilarnega vpijanja vode po 24. urah smo določili po enačbi (13):

$$k = \frac{m/s}{\sqrt{t}} \quad (13)$$

kjer je:

- k ... koeficient kapilarnega vpijanja vode $\left[\frac{\text{kg/m}^2}{\sqrt{\text{min}}} \right]$
- m ... masa vode [kg]
- s ... površina skozi katero vzorec vpija vodo [m^2]
- t ... čas [$\sqrt{\text{min}}$]

5.2.3 Tlačna trdnost

Preiskavo tlačne trdnosti valjastih preizkušancev smo izvedli po standardu SIST EN 1015-11:2001 [22], pri starosti 90 in 270 dni. Preiskavo tlačne trdnosti smo opravili še na vzorcih iz preiskave poroznosti, katerih starost je dosegla 240 dni.

Injekcijske mešanice smo vlivali v valjaste kalupe višine in premera 5 cm (slika 28, levo). Po dosegu izbrane starosti smo vzorce stekali in jim izmerili dimenzije. Zaradi zagotavljanja enakomernega vnosa sile v valj smo zgornjo površino vzorca izravnali z mavcem (slika 28, desno). S tem smo dosegli ravno površino na stiku med vzorcem in tlačno ploščo, preko katere vnašamo enosno tlačno silo v vzorec (slika 29, desno). Vzorec smo obremenjevali do porušitve in odčitali maksimalno doseženo silo.



Slika 28: Injekcijska mešanica vlita v valjast plastični kalup (levo) in po preteku določenega časa sušenja in strjevanja zravnana z mavcem (desno).



Slika 29: Preša s pomočjo katere obremenjujemo vzorec (levo), ter tlačno obremenjevanje vzorca (desno).

S pridobljenimi podatki izračunamo tlačno trdnost po naslednji enačbi (14):

$$f_c = \frac{F}{\pi r^2} \quad (14)$$

kjer je:

- f_c ... tlačna trdnost [MPa]
- F ... maksimalna tlačna sila [kN]
- r ... polmer vzorca [mm]

5.2.4 Cepilna natezna trdnost

Cepilno natezno trdnost smo preverjali po standardu ASTM C496 [23], na valjastih preizkušancih pri starosti 90 dni.

Pred pričetkom preizkusa smo stehali in izmerili preizkušance. Nato smo jih v ležečem položaju postavili v prešo (slika 29, levo) in jih obremenjevali po daljši stranici valja (slika 30). Preiskava poda maksimalno cepilno silo, ki jo vzorec prenese.



Slika 30: Cepilno natezno obremenjevanje vzorca.

Cepilno natezno trdnost izračunamo s spodnjo enačbo (15):

$$f_{st} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (15)$$

kjer je:

- f_{st} ... cepilna natezna trdnost [MPa]
- F ... maksimalna dosežena sila [kN]
- d ... premer vzorca [mm]
- l ... dolžina vzorca [mm]

6 REZULTATI IZVEDENIH PREISKAV

6.1 Rezultati preiskav na svežih injekcijskih mešanicah

6.1.1 Pretočnost

Rezultati pretočnosti takoj po zamešanju in po preteku 30 min so podani v preglednici 11. Pri meritvah 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. Kot zgornjo mejo ustreznega pretočnega časa smo izbrali 1 min 40 sek (glej 3.5.1 Potreba po vodi).

Preglednica 11: Rezultati pretočnosti doseženi z različnimi načini mešanja.

Način mešanja	Čas pretočnosti takoj po zamešanju injekcijske mešanice	Čas pretočnosti 30 min po zamešanju injekcijske mešanice
RILEM-CEN mešalnik	1 min 31 sek	2 min 45 sek
Kuhinjski mešalnik	2 min 05 sek	3 min 33 sek
Elek. vrtno kladivo	3 min 27 sek	4 min 52 sek *
Ročno mešanje	3 min 07 sek *	***

* enkrat neuspešen iztek injekcijske mešanice

*** trikrat neuspešen iztek mešanice

Najboljše rezultate pretočnosti smo dobili z injekcijsko mešanico takoj po zamešanju in po 30 minutah, pripravljeno z mešalnikom RILEM-CEN. Dobre rezultate kaže še mešanica pripravljena s kuhinjskim mešalnikom. Tudi v tem primeru injekcijska mešanica lepo izteka iz lijaka, brez kakršnih koli zaustavitev. Slabša pretočnost se kaže s preostalima dvema načinoma mešanja, električnim vrtnim kladivom in mešanjem na roke. Mešanica pripravljena z električnim vrtnim kladivom sicer pri testiranju takoj po zamešanju neprekinjeno teče iz lijaka, medtem ko se po 30 minutah mešanica zaustavi in ne izteče iz lijaka.. Najslabše rezultate je dosegla mešanica, pripravljena z ročnim mešanjem. V obeh primerih, takoj po zamešanju in po 30 minutah, mešanica ne izteče iz lijaka.

Izbran kriterij ustrezne pretočnosti, največ 1 min 40 sek, dosega le mešalec RILEM-CEN. Ostali trije načini mešanja pa kriterija ne izpolnijo.

6.1.2 Izločanje vode

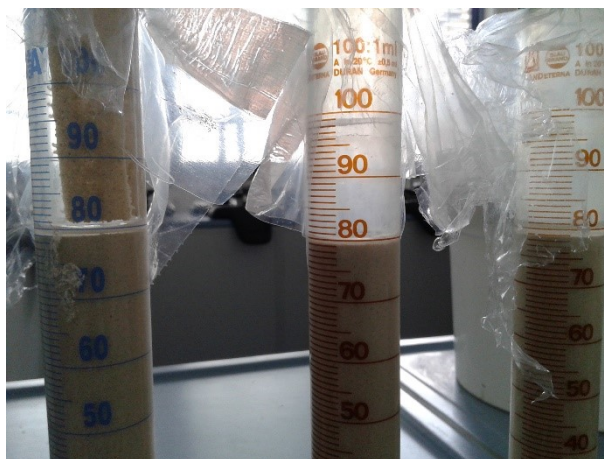
Dobro formulirana mešanica, z ustrezno določenim razmerjem veziva, polnila, dodatkov in vode, ne sme segregirati ali pretirano izločati vode. V nasprotnem primeru pride do spremembe lastnosti mešanice in težav pri injektiranju (npr. zamašitve) [4].

Preglednica 12: Izločanje vode v % po 3 urah.

Način mešanja	Izločanje vode [%]
RILEM-CEN mešalnik	1,3
Kuhinjski mešalnik	2,0
Elek. vrtalno kladivo	1,4
Ročno mešanje	1,2

Vrednosti podane v preglednici 12 predstavljajo povprečje treh meritev. Pri naših preiskavah smo izbrali kriterij za izločanje vode $\leq 2,0$ % po preteku 3 ur [18]. Glede na postavljen kriterij izločanja vode lahko ugotovimo, da vse mešanice, pripravljene z različnimi mešalniki, izbran kriterij izpolnijo. Najslabše rezultate je dosegla mešanica, pripravljena s kuhinjskim mešalnikom (2,0 %). Rezultata za mešanici pripravljene z RILEM-CEN mešalnikom in električnim vrtalnim kladivom sta si precej blizu in imata v povprečju 0,75 % manjše izločanje vode kot v primeru kuhinjskega mešalnika. Najmanj vode je izločila mešanica, pripravljena z ročnim mešanjem, in sicer v povprečju 0,8 % manj kot mešanica pripravljena s kuhinjskim mešalnikom.

Slika 31 prikazuje izločeno vodo po končanem preizkusu.



Slika 31: Mešanice pripravljene z RILEM-CEN mešalnikom in količina izločene vode na površini.

Rezultati kažejo, da injekcijske mešanice pripravljene z različnimi mešalniki dosegajo ustrezno homogenost, saj izločanje vode ne privede do segregacije.

6.1.3 Sposobnost zadrževanja vode injekcijske mešanice

Vrednosti v preglednici 13 prikazujejo povprečje treh rezultatov meritev vodozadržnosti za mešanico pripravljeno s posameznim mešalnikom. Dobljeni rezultati variirajo, glede na način mešanja, v območju 1-2 %. Najslabšo sposobnost zadrževanja vode dosega mešanica pripravljena z ročnim mešanjem (84 %) ali RILEM-CEN mešalnikom (84 %). Njuna izguba vode dosega 16 %. Z uporabo kuhinjskega mešalnika in električnega vrtalnega kladiva se mešanici izboljša sposobnost zadrževanja

vode od 1 do 2 %. Izguba vode je tako najmanjša ob pripravi mešanice z električnim vrtalnim kladivom in dosega 14 % delež.

Preglednica 13: Sposobnost zadrževanja vode sveže injekcijske mešanice.

Način mešanja	Vodozadržnost sveže injekcijske mešanice
	[%]
RILEM-CEN mešalnik	84
Kuhinjski mešalnik	85
Elek. vrtalno kladivo	86
Ročno mešanje	84

Rezultati kažejo, da način mešanja lahko vpliva na sposobnost zadrževanja vode. Najvišjo sposobnost zadrževanja vode, kaže mešanica pripravljena z električnim vrtalnim kladivom, ki dosega večjo hitrost pri mešanju in s tem vpliva na dobro razporeditev delcev v masi in omočenje vseh suhih delcev z vodo.

6.1.4 Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice

Vpliv prostorninske mase injekcijske mešanice v svežem stanju je ob utrjevanju arhitekturnih površin zelo pomemben. Zavedati se moramo, da lahko lastna teža injekcijske mešanice, ki jo vtiskamo pod omet, povzroči strukturno nestabilnost, poškodbe ali celo porušitev sanirane površine [4].

Preglednica 14: Rezultati prostorninske mase sveže mešanice.

Način mešanja	Prostorninska masa [g/cm ³]
RILEM-CEN mešalnik	2,00
Kuhinjski mešalnik	2,00
Elek. vrtalno kladivo	2,00
Ročno mešanje	2,00

Povprečna prostorninska masa sveže injekcijske mešanice, znaša v vseh primerih 2 g/cm³ (preglednica 14). Dobljen rezultat je smisel, saj je razmerje sestavin mešanice vseskozi enako. Spreminja se le vrsta mešalnika oz. način mešanja, ki pa ne vpliva na spremembo mase mešanice.

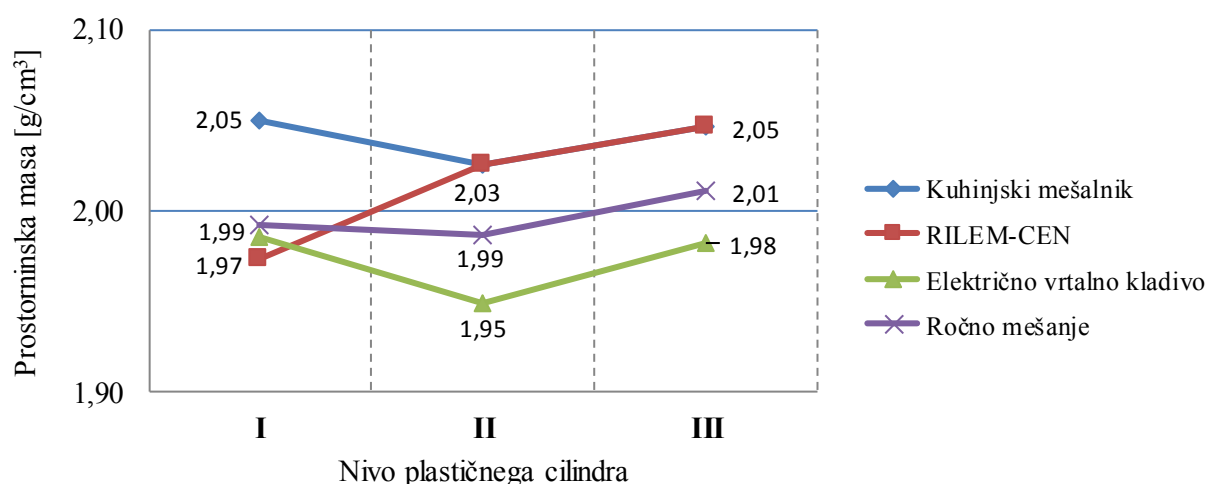
6.1.5 Preverjanje stabilnosti oziroma segregacije

S preiskavo preverjamo nivojsko odpornost ločevanja polnila, vode in veziva, ki lahko vodi do segregacije.

Rezultati prostorninske mase, prikazani na sliki 32, se glede na nivo odvzema mešanice iz plastičnega valja (I, II, III) niso pomembno razlikovali. Odstopanja so minimalna odvisna od uporabljene vrste mešalnika. Največje razhajanje rezultatov med začetnim in končnim nivojem je zaznati pri pripravi mešanic z RILEM-CEN mešalnikom. Izkaže se, da imajo z njim pripravljene mešanice večjo možnost segregiranja.

Sklepamo, da je uporaba RILEM-CEN mešalnika najmanj primerna, saj povzroča ločevanje sestavin mešanic. Dobre rezultate in $0,02 \text{ g/cm}^3$ razlike med spodnjim in zgornjim nivojem kažeta kuhinjski mešalnik in ročno mešanje.

Nivojski odvzem mešanice, dosega v povprečju, končni rezultat prostorninske mase 2 g/cm^3 . Sklepamo torej, da ne pride do segregacije injekcijske mešanice. Odstopanja prostorninskih mas posameznega načina mešanja se minimalno razlikujejo.



Slika 32: Prostorninska masa injekcijskih mešanic glede na nivo plastičnega cilindra.

V primerjavi s preiskavo prostorninske mase v poglavju 6.1.4 Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice, obe podajata primerljive rezultate, saj ni zaznati večjih končnih odstopanj.

Omeniti je potrebno še, da je bila sama izvedba preizkusa preverjanja homogenosti na koncu nekoliko zahtevna. Iztek injekcijske mešanice skozi odprtino je zaradi svoje kompaktnosti zahteval pomoč z dodatno palico, ki je prevzela vlogo bata. Gostota mešanice je onemogočala samodejno iztekanje skozi vse tri nivoje plastičnega valja.

Ocenjujem, da je uporabljena modifikacija postopka lahko vplivala na dobljene rezultate, zato je rezultate preiskave treba vzeti z rezervo.

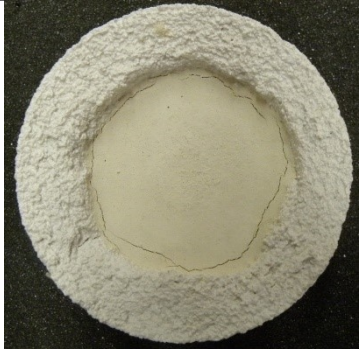
6.1.6 Sprememba prostornine z metodo apnenih skodelic

S preiskavo preverjamo prostorninsko stabilnost in vpliv količine vode v mešanici. Z visoko vsebnostjo vode povečujemo injektabilnost vendar zmanjšujemo prostorninsko stabilnost. Posledica tega je nastanek razpok, kar slabša trajnost in sprijemnost mešanice z elementom, ki ga želimo sanirati [4].

Po 24-urnem sušenju mešanic v apnenem kalupu ni opaziti pretirane razpokanosti. Vidno je stransko odstopanje od skodelic, ki nakazuje na slabšo sprejemnost materialov skodelice in mešanice – debelejša razpoka pri ročnem mešanju, ožja pri mešanju z RILEM-CEN in kuhinjskim mešalnikom ter električnim vrtnim kladivom. Razpok po sredini vzorca ni opaziti pri nobenem vzorcu (slika 33).

Na nastanek ali zmanjšanje nastanka razpok, predhodno vlaženje apnenih skodelic ne vpliva. Pomemben pa je način mešanja, ki nam omogoči čim boljšo homogenost mešanice. V našem primeru le-to dosežejo električni mešalniki.

Glede na kriterij priročnika avtoric Bicer-Simsir in Rainer [4], lahko vse preizkušene vzorce uvrstimo v razred srednje stopnje krčenja.

Način mešanja	Neomočena skodelica	Z vodo omočena skodelica
RILEM-CEN mešalnik		
Kuhinjski mešalnik		
Električno vrtalno kladivo		
Ročno mešanje		

Slika 33: Primerjava razpokanosti med neomočeno in omočeno apneno skodelico glede na posamezen način mešanja injekcijske mešanice

6.1.7 Sprememba prostornine – plastični cilindri

Preiskava spremembe prostornine s plastičnimi cilindri prikazuje krčenje mešanice, ki ga lahko pričakujemo tudi pri kasnejši uporabi mešanice pri sanaciji elementov. Zaradi nezaželenosti razpok in želje po dobri sprijemnosti s saniranim elementom, se stremi k čim manjši spremembi prostornine v času sušenja in strjevanja [9].

Glede na sam videz posušenih in strjenih vzorcev, površinske razpokanosti v večini primerov ni bilo opaziti (slika 34). Na nekaterih vzorcih pa je minimalna, v debelini manj kot mm. Milimetrski posedki strjenih mešanic, glede na rob kalupa, nakazujejo na precejšno kompaktnost mešanice.

Glede na dobljene rezultate, podane v preglednici 15, je najmanjši odstotek krčenja dosežen z ročnim mešanjem (1,5 %). Sledita mu kuhinjski mešalnik in električno vrtalno kladivo, ki dosejata enak odstotek (2 %). Še nekoliko večje krčenje je opaziti pri mešanju z RILEM-CEN mešalnikom (2,6 %).

Preglednica 15: Rezultati spremembe prostornine mešanice glede na način mešanja

Način mešanja	Sprememba prostornine [%]
RILEM-CEN mešalnik	2,60
Kuhinjski mešalnik	2,01
Elek. vrtalno kladivo	2,04
Ročno mešanje	1,51

Krčenje injekcijskih mešanic pripravljenih z ročnim mešanjem je za kar 42% manjše, kot v primeru priprave z RILEM-CEN mešalnikom. Vendar se je potrebno zavedati, da ob ročnem mešanju doseženo razmešanje injekcijske mešanice ni tako dobro kot pri pripravi z električnimi mešalniki.

Medtem, ko je razlika med ročno pripravo in RILEM-CEN mešalnikom precej visoka, dosejata ostala dva mešalnika podobne rezultate. Njunsko končno krčenje je v primerjavi z mešalnikom RILEM-CEN za cca 23 % manjše. Razlika z ročnim mešanjem je cca 25 %.

Način mešanja	1.vzorec	2.vzorec	3.vzorec
RILEM- CEN mešalnik			
Kuhinjski mešalnik			
Elek. vrtalno kladivo			
Ročno mešanje			

Slika 34: Površinska razpakanost vzorcev

6.1.8 Injektabilnost z injekcijsko brizgo

Zmožnost injektabilnosti je pri injekcijskih mešanicah ključnega pomena. Prazne prostore in razpoke najlažje zapolnujemo z injekcijsko brizgo [4]. Injiciranje tako poteka pod pritiskom. Mešanica pa mora biti sposobna prodreti skozi granuliran material v čim bolj homogenem stanju. Stremi se k enakomernemu razporedu mešanice skozi celotno površino, ki jo želimo sanirati.

Z izvedenimi preiskavami smo ugotovili, da pripravljene injekcijske mešanice dosegajo razreda F ali DL.

Mešanice imajo zaradi kremenovega peska gostejšo strukturo in so težje prodirale skozi granulato. Granulat je moral biti za vsak preizkus predhodno namočen, v nasprotnem primeru vleče nase vodo iz mešanice. To le še otežuje prodiranje mešanice med zrni granulata, sploh pa onemogoča iztek skozi odprtino injekcije.

Od vseh izvedenih preizkusov, nam je iztek uspel le enkrat pri mešanici, pripravljene z RILEM-CEN mešalnikom (slika 35). Ker so mešanice s tem mešalnikom, glede na predhodne preiskave, dosegale najboljše rezultate homogenosti, smo pričakovali, da bo iztek uspel pri več poskusih. Injekcijske mešanice pripravljene z ostalimi mešalniki, kljub mrežici niso iztekale skozi injekcijsko brizgo. Občasno je iztek le redkejši del preostali, gostejši del mešanice, pa je zapolnil začetne prostore med zrni do polovice višine granulata. V primeru ročnega mešanja je prodiranje še slabše, saj ni nujno, da so vse grudice peska popolnoma razgrajene. To še dodatno upočasnjuje prodiranje mešanice.



Slika 35: Iztekanje mešanice iz injekcijske brizge z granulatom.

Mešanica bi bila primerna za injektiranje skozi frakcijo granulata večjega od 16 mm.

6.2 Rezultati preiskav na strjenih mešanicah

6.2.1 Poroznost

Poroznost materiala je pomembna lastnost, preko katere izvemo količino por v obravnavanem materialu in njihov vpliv na obstojnost oz. propadanje materiala. Odločilno vpliva tudi na zmožnost vpijanja vode. Nizka poroznost modernih materialov lahko ovira izhlapevanje vode in povzroči kopičenje vlage [24].

Upoštevali smo kriterij iz doktorske disertacije Padovnik [2] in sicer, minimalni delež odprte (kapilarne) poroznosti je postavljen na 20 %, delež zračnih por pa lahko dosega 8 %.

Glede na rezultate v Preglednica 16 so vse mešanice presegle vrednost kapilarne poroznosti 20 %, saj se vrednosti gibljejo med 35 in 44 %.

Opazimo lahko, da je ob največji vsebnosti kapilarnih por, vsebnost zračnih por najmanjša in obratno.

Dobljeni rezultati nakazujejo na pomembnost oblike in hitrosti uporabljene lopatice, čeprav vrednosti podane v preglednici 16 ne kažejo pretiranega odstopanja med posameznimi načini mešanja injekcijskih mešanic.

Preglednica 16: Procentualni prikaz izračunane poroznosti, vsebnosti kapilarnih in zračnih por.

Način mešanja	Poroznost [%]	Vsebnost kapilarnih por [%]	Vsebnost zračnih por [%]
RILEM-CEN mešalnik	34,70	32,78	1,94
Kuhinjski mešalnik	35,60	33,22	2,36
Elek. vrtno kladivo	34,50	32,45	2,01
Ročno mešanje	34,80	33,31	1,49

Spomnimo se, da najvišjo hitrost doseže električno vrtno kladivo, sledi kuhinjski mešalnik, RILEM-CEN in ročno mešanje. Lopatica RILEM-CEN se medtem še planetarno obrača. Oblike lopatic pa so podrobneje prikazane v poglavju 4.

Kuhinjski mešalnik je dosegel največji delež poroznosti (35,60 %). Skoraj odstotek manjšo stopnjo poroznosti dosegata ročno mešanje (34,80 %) in RILEM-CEN mešalnik (34,70 %). Električno vrtno kladivo, katerega hitrost je najhitrejša izmed uporabljenih mešalnikov, dosega najnižjo stopnjo poroznosti (34,50 %).

Poleg hitrosti obračanja lopatic, lahko iz pridobljenih rezultatov razberemo, da igra oblika lopatic pomembno vlogo. Informacijo o tem nam podajajo vrednosti zračnih por. Te se formirajo z vnosom zraka med mešanjem injekcijske mešanice in nezadostnim zgoščanjem med vgrajevanjem [2].

Največjo vrednost zračnih por dosega kuhinjski mešalnik (2,36 %) in električno vrtno kladivo (2,01 %). Številnost obratov je pri slednjem mnogo večja kot pri kuhinjskem mešalniku. Oblika lopatice kuhinjskega mešalnika je oblikovana za vnašanje zraka v maso, pri električnem vrtnem kladivu pa spiralna. Predvidevamo lahko, da hitrosti obeh mešalnikov povzročata zračne mehurčke, vendar spiralna oblika lopatice povzroča ugodnejšo razmešanost injekcijske mešanice in lažje izhajanje mehurčkov. Če v primerjavo vključimo še RILEM-CEN mešalnik vidimo, da se vsebnost zračnih por (1,94 %) približuje vrednostim dobljenih z električnim vrtnim kladivom. Število obratov je izmed uporabljenih eklektičnih mešalnikov, najmanjša pri RILEM-CEN mešalniku. Na ugodno razmešanost in majhen vnos zraka mora, poleg manjše hitrosti mešanja, pozitivno vplivati tudi planetarni način vrtenja lopatice in njena oblika.

Pri ročnem mešanju je vnos zračnih por najmanjši (1,49 %), vendar pa vzorci vsebujejo največ delež kapilarnih por (33,31 %). Kapilarne pore se pojavljajo v času sušenja [2]. V primeru ročnega mešanja lahko njihovo visoko vsebnost pripišemo slabi razmešanosti injekcijske mešanice. Precej visoko vrednost dosežemo še s kuhinjskim mešalnikom (33,22 %), ki pa jo verjetno povzroča neugodna oblika lopatice.

Najmanjšo vsebnost je zaznati pri električnem vrtnem kladivu (32,45 %), sledi mu RILEM-CEN mešalnik (32,78 %). Način mešanja in oblika lopatice, se pri teh dveh omenjenih mešalnikih dobro dopolnjujeta in ustvarjata učinkovite rezultate.

Ugotovimo, da je injekcijske mešanice smiselno pripravljati z električnim vrtnim kladivom. Z njim pripravljene injekcijske mešanice se izkažejo za ugodne, saj je zaradi nizke stopnje poroznosti zmanjšana zmožnost vpijanja vode in njena zmožnost povzročanja kasnejših negativnih vplivov (vlaga, soli, odstopanje...).

6.2.2 Kapilarno vpijanje vode

Preizkus ponazori kapilarni srk vode po eni površini vzorca – v našem primeru površina poškodovane arhitekturne poslikave, ki je lahko izpostavljena zunanjim vremenskim dejavnikom npr. dežju v kolikor se nahaja na prostem ali vpijanju vlage iz prostora v starejših oz. slabo hidroizoliranih objektih.

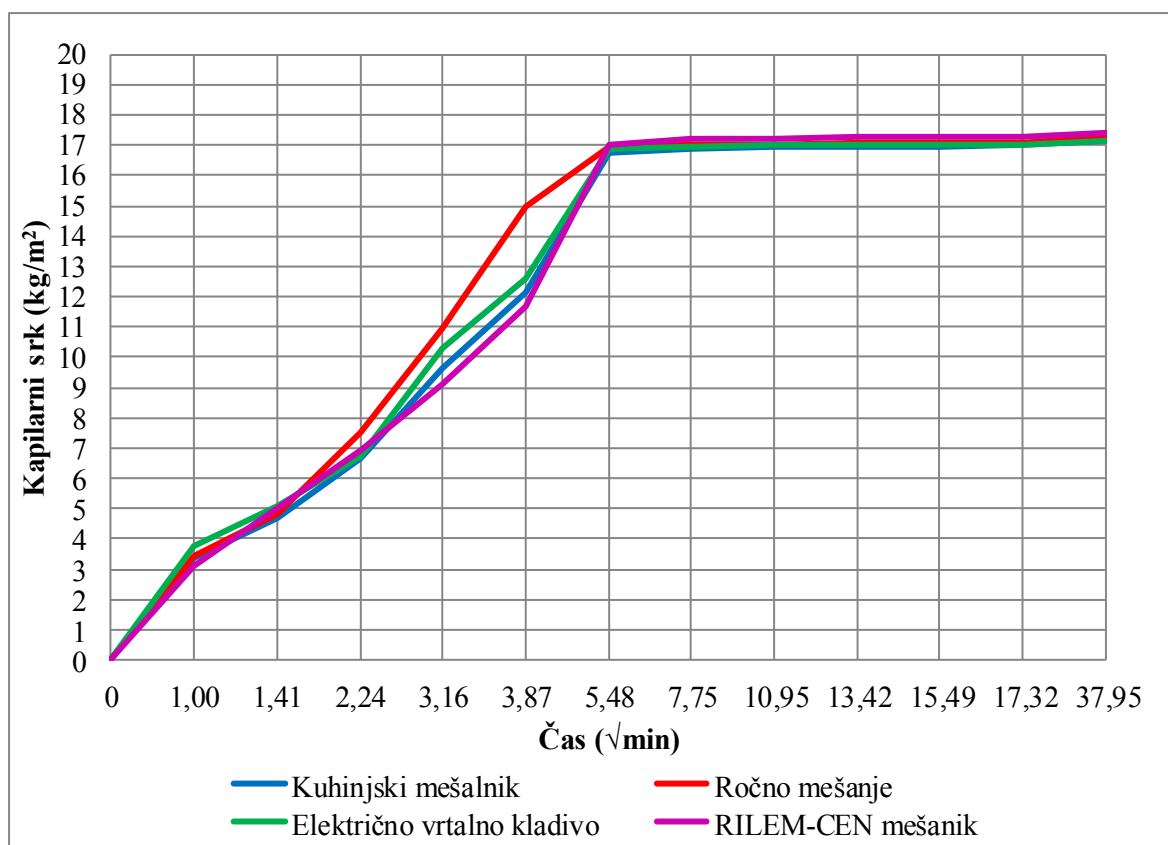
Upoštevali smo kriterij iz doktorske disertacije Padovnik [2] in sicer se največji koeficient kapilarnega vpijanja vode giblje med 1,0 in 1,5 kg/(m²√min).

Iz preglednice 17 je razvidno, da so vrednosti kapilarnega srka po 24. urah pri vseh načinih mešanja enake. Dosežene vrednosti, ki se gibljejo v območju od 0,45 kg/(m²√min) do 0,46 kg/(m²√min) ne presegajo postavljenega kriterija. Ugotovimo, da vrsta mešalnika nima vpliva na kapilarni srk vode.

Preglednica 17: Rezultati meritev kapilarnega srka (kg/m^2) s pripadajočim koeficientom kapilarnega srka ($\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$).

Način mešanja	Kapilarni srk po 24 urah [kg/m^2]	Koeficient kapilarnega srka po 24 urah [$\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{min}}^{1/2}$]
RILEM-CEN mešalnik	17,42	0,46
Kuhinjski mešalnik	17,12	0,45
Elek. vrtalno kladivo	17,17	0,45
Ročno mešanje	17,29	0,46

Na sliki 36 lahko opazimo, da do razlik v količini vpite vode prihaja med 5 in 30 minut ($2,24 - 5,48 \sqrt{\text{min}}$). Vpijanje vode je najhitreje naraščalo pri vzorcih, katerih mešanice so bile pripravljene z ročnim mešanjem. Vrednosti vpijanja vode za mešanice pripravljene z električnimi mešalniki, v tem času dokaj enakomerno naraščajo. Večje razlike med njimi ni opaziti. Manjša razlika nastopi le med RILEM-CEN mešalnikom in električnim vrtalnim kladivom med 10. in 15. min ($3,16 - 3,87 \sqrt{\text{min}}$) in sicer za cca $1 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$. Po 24-ih urah so vse mešanice dosegle isto vrednost kapilarnega vpijanja vode in sicer cca $17,3 \text{ kg}/\text{m}^2$.



Slika 36: Kapilarni srk v odvisnosti od časa.

6.2.3 Tlačna trdnost

Prekomerna trdnost ali togost injekcijske mešanice ali premočno zlepljenje odstopajočih plasti ometov, lahko povzročijo nove napetosti v historyčnih materialih. Vzroki so lahko različno temperaturno raztezanje ali neenakomerni raznosi mehanskih obremenitev [24], posledica pa so dodatne poškodbe.

Upoštevali smo kriterij, iz doktorske disertacije Padovnik [2]. Kriterij priporoča dosego tlačne trdnosti v območju med 0,4 in 2,5 MPa.

Kot je razvidno tudi iz preglednice 18, smo tlačno trdnost preizkušancev preverjali pri treh različnih starostih. Za določanje maksimalne tlačne sile smo pri starosti 90 in 270 dni, preizkušali normalno sušene vzorce. Pri starosti 240 dni pa smo uporabili vzorce, ki so bili uporabljeni pri preiskavi poroznosti in večkrat podvrženi vlaženju ter sušenju.

Glede na željno po nadomestitvi RILEM-CEN mešalnika z drugim mešalnikom, lahko iz rezultatov v preglednici 18 sklepamo naslednje.

Preglednica 18: Rezultati povprečne tlačne trdnosti vzorcev starosti 90 in 270 dni, ter vzorcev predhodno uporabljenih za preiskavo poroznosti pri starosti 240 dni.

Način mešanja	f_c	f_c	f_c vzorcev testiranih
	(starost 90 dni)	(starost 270 dni)	za poroznost
	[MPa]	[MPa]	(starost 240 dni)
			[MPa]
RILEM-CEN mešalnik	1,40	2,40	3,20
Kuhinjski mešalnik	1,50	2,40	3,10
Elek. vrtalno kladivo	1,90	2,70	3,80
Ročno mešanje	1,20	1,80	2,40

Normalno sušeni preizkušanci stari 90 dni dosegajo najvišje povprečne tlačne trdnosti, če so pripravljeni z električnim vrtalnim kladivom. Glede na RILEM-CEN mešalnik dosegajo 26% višjo tlačno trdnost. Dober prenos tlačne sile je dosežen tudi z uporabo kuhinjskega mešalnika, s katerim je glede na RILEM-CEN doseženo 7 % izboljšanje tlačne trdnosti. Vzorci pripravljeni z ročnim mešanjem dosegajo najslabše rezultate, in sicer 14 % slabše trdnosti v primerjavi z RILEM-CEN. Razlika najvišje (elek. vrtalno kladivo) in najnižje (ročno mešanje) dosežene povprečne tlačne trdnosti, ki izvira iz načina mešanja, je kar 37 %.

Pri starosti 270 dni se tlačna trdnost vzorcev poviša. V primeru uporabe električnega vrtalnega kladiva, ki ponovno dosega najboljše rezultate, imajo preizkušanci za 13 % boljšo tlačno trdnost kot preizkušanci pripravljeni z RILEM-CEN mešalnikom. Mešanica pripravljena s kuhinjskim mešalnikom po 270 dni starosti doseže 2,40 MPa, kar je enako kot pri mešanici pripravljene z RILEM-CEN mešalnikom.

Najslabše rezultate ponovno doseže mešanica pripravljena z ročnim mešanjem. Glede na RILEM-CEN so dosežene vrednosti kar 25 % manjše, v primerjavi z električnim vrtalnim kladivom pa je tlačna trdnost manjša za 33 %.

Primerjava tlačnih trdnosti mešanic pri starosti 90 in 270 dni kaže, da se pri mešanicah pripravljenih z RILEM-CEN mešalnikom vrednosti povečajo za 56,9 %, s kuhinjskim mešalnikom za 60 %, električnim vrtalnim kladivom za 70,5 %, z ročno pripravo mešanice pa se tlačna trdnost poviša za 64,1 %.

Preizkušancem, ki so bili predhodno podvrženi vlaženju in sušenju, so se tlačne trdnosti povišale največ in dosežajo pri starosti 240 dni bistveno višje vrednosti kot pri starosti 270 dni v konstantnih pogojih okolja. Tako kot v prejšnjih primerih, tudi v tem primeru preizkušanci, pripravljeni z električnim vrtalnim kladivom dosegajo najboljše rezultate (3,80 MPa) in sicer je povprečna tlačna trdnost za 19 % višja od RILEM-CEN mešalnika. Preizkušanci pripravljeni s kuhinjskim mešalnikom in ročnim mešanjem dosegajo slabše tlačne trdnosti od preizkušancev pripravljenih s RILEM-CEN mešalnikom.

Najvišje tlačne trdnosti dobimo z uporabo električnega vrtalnega kladiva. V vseh treh testiranjih smo z njim dobili najboljše rezultate. Kuhinjski mešalnik je medtem dokaj enakovreden RILEM-CEN mešalniku. Njuni rezultati ne kažejo pretiranih razlik oz. odstopanj. Ročno mešanje pa daje najslabše rezultate, ki so posledica slabe homogenosti mešanice.

6.2.4 Cepilna natezna trdnost

Preiskava se je izvajala na vzorcih starih 90 dni. Podobno kot pri rezultatih tlačne trdnosti se tudi pri preizkušanju cepilne natezne trdnosti, najboljše odnesejo vzorci, katerih mešanica se je pripravljala z električnim vrtalnim kladivom (0,19 MPa). Sledita RILEM-CEN (0,13 MPa) in kuhinjski mešalnik (0,13 MPa). Najnižjo zmožnost prenašanja natezne obremenitve dobimo z ročno pripravo mešanic (0,09 MPa) (preglednica 19).

Upoštevali smo kriterij iz doktorske disertacije Padovnik [2]. Kriterij pravi, da naj se cepilna natezna trdnost nahaja med 0,3 in 1,2 MPa. Dobljeni rezultati kriterija ne izpolnjujejo.

Preglednica 19: Cepilna natezna trdnost preizkušancev starosti 90 dni.

Način mešanja	f_{st} [MPa]
RILEM-CEN mešalnik	0,13
Kuhinjski mešalnik	0,13
Elek. vrtalno kladivo	0,19
Ročno mešanje	0,09

7 UGOTOVITVE IN ZAKLJUČEK

Ob preučevanju vpliva različnih oblik lopatic in hitrosti mešanja, ob enakem razmerju sestavin in enakem postopku mešanja injekcijske mešanice, ugotavljamo naslednje. Iz dobljenih rezultatov preiskav lahko potrdimo vpliv načina mešanja na lastnosti injekcijskih mešanic. Vplivni parametri so način vrtenja lopatice, hitrost lopatice in oblika lopatice. Zanimala nas je še možnost zamenjave RILEM-CEN mešalnika z drugimi načini mešanja, podrobnejše ugotovitve pa so podane v nadaljevanju.

Uporabljeni električni mešalniki in ročno mešanje dosegajo različne homogenosti injekcijske mešanice, ki predstavlja bistveno funkcijo v vseh izvedenih preiskavah. Povzročajo različno učinkovitost razmešanja in vnos zračnih mehurčkov.

Z ozirom na rezultate preiskav sposobnosti zadrževanja vode, določanja prostorninske mase in preverjanja homogenosti lahko zaključimo, da dajejo vsi načini mešanja enakovredne rezultate, ki izhajajo predvsem iz ohranjanja enakega razmerja sestavin. Pri preostalih izvedenih preiskavah na svežih injekcijskih mešanicah pa vpliv načina mešanja lažje pazimo. Pojavijo se sicer minimalna odstopanja, vendar zadostna, da lahko pripišemo povzročen vpliv posamezni komponenti načina mešanja.

Težave pri ročnem mešanju so se tako pojavljale zaradi slabe razmešanosti injekcijske mešanice. Grude peska, ki nastanejo ob dolivanju vode in superplastifikatorja težko razmešamo. Razlog je v tem, da ne moremo doseči moči vrtenja lopatice in števila obratov električnega mešalnika. Nekonstantnost tekom intervalov postopka mešanja pa dodatno povzroča nastanek grud, kjer voda ne zapolni prostora med zrni peska. Ročni način priprave mešanice ima tako za posledico zelo slabo zmožnost injektiranja in slabo pretočnost, izločanje vode pa je zelo majhno, kar lahko pripišemo vpijanju vode v še ne premešane grude. V času sušenja in strjevanja injekcijske mešanice je razpokanje minimalno in le površinsko. Zaradi začetne vsebnosti manjših zračnih prostorov oz. volumna por v vzorcu, ki se v času sušenja ne more krčiti oz. posedati, saj tak del ne vsebuje vode, ki bi izhlapevala iz površine, je tudi sprememba prostornine najmanjša izmed testiranih načinov mešanja.

Injekcijske mešanice pripravljene z električnimi mešalniki dosegajo dobro homogenost in razmešanost mešanice. Glede na preiskavo pretočnosti in injektabilnosti je zelo uspešen RILEM-CEN mešalnik, sledita mu kuhinjski mešalnik in električno vrtalno kladivo. Površinske razpokanosti so tudi pri teh vzorcih minimalne. Razlike pa nastanejo pri spremembi prostornine. Največje krčenje v plastičnih cilindrih je opaziti pri vzorcih mešalnika RILEM-CEN, kuhinjski mešalnik ter električno vrtalno kladivo pa imata delež krčenja enak.

Nadaljnje ugotovitve najlažje opišemo s primerjavo rezultatov na strjenih vzorcih.

Vzorci RILEM-CEN mešalnika imajo kljub največjemu krčenju izmed testiranih načinov mešanja, stopnjo poroznosti precej nizko. Predvidevamo lahko nekoliko slabšo razmešanost injekcijske mešanice.

Električno vrtalno kladivo in kuhinjski mešalnik imata medtem enak delež krčenja, vendar je stopnja poroznosti slednjega večja. Kapilarno vpijanje vode med njima je podobno in je manjše od kapilarno vpite vode vzorcev RILEM-CEN. Iz tega lahko sklepamo, da je lopatica kuhinjskega mešalnika neugodne oblike in povzroča v injekcijski mešanici velik delež zračnih por, lopatica električnega vrtalnega kladiva pa z najnižjo stopnjo poroznosti nakazuje na zelo ugodno obliko lopatice in uporabljeno hitrost. Ugotovitev lahko potrdimo z rezultati tlačne in cepilne natezne trdnosti.

Največjo tlačno in cepilno natezno trdnost so dosegali vzorci, pripravljeni z električnim vrtalnim kladivom. Sledijo vzorci, pripravljeni z RILEM-CEN in kuhinjskim mešalnikom. Cepilna natezna trdnost je pri obeh načinih mešanja enaka. V primeru tlačne trdnosti, pa dosega višje rezultate kuhinjski mešalnik. Čeprav dosegajo vzorci večjo poroznost to očitno nima tako slabega vpliva na tlačno trdnost. RILEM-CEN mešalnik torej slabše premeša injekcijsko mešanico kar vpliva na stabilnostne lastnosti. Planetarno obračanje lopatice, poleg osne rotacije, ne vpliva na dvig kvalitete injekcijske mešanice. Z ozirom na podatke o izločanju vode lahko možnost slabše razmešanosti tudi potrdimo. Namreč, količina izločene vode v primeru uporabe RILEM-CEN mešalnika dosega skoraj najnižji odstotek izločene vode. Slabše izločanje dobimo le še z ročnim mešanjem. Predvidevamo, da temu botrujejo ujete grude materiala, ki zaradi nepopolne razmešanosti vase vpijajo vodo. Kuhinjski mešalnik pa celo dosega skrajno mejo ustreznega izločanja vode. To pomeni, da je injekcijska mešanica popolnoma premešana.

Vzorci pripravljeni z ročnim mešanjem, dosegajo glede stopnje poroznosti in kapilarnega vpijanja vode srednjo vrednost, v primerjavi z električnimi mešalniki. Vendar mora biti, kot v primeru RILEM-CEN mešalnika, vpliv slabe premešanosti injekcijske mešanice glavni vzrok slabih stabilnostnih lastnosti. Tlačno in cepilno natezno silo so namreč vzorci z ročno pripravo prenašali najslabše.

Za primerno nadomestitev laboratorijskega RILEM-CEN mešalnika na terenu se torej izkažeta električno vrtalno kladivo, in v kolikor ni zahtevana visoka homogenost, tudi kuhinjski mešalnik. Pozabiti ne smemo tudi na spremembo prostornine, ki bi jo v danem primeru še lahko smatrali kot dovolj majhno. Na lastnosti injekcijskih mešanic v svežem stanju način mešanja nima tako velikega vpliva, kot ga ima na trdnost vzorcev v strjenem stanju.

Ugotavljamo, da je način obračanja/vrtenja lopatice manj pomemben od njene oblike. V našem primeru se izkaže za pomembnejše usklajenost med obliko lopatice in hitrostjo mešalnika. Vendar je potrebno upoštevati, da je sestava injekcijske mešanice enostavna, struktura kompaktna in vsebnost

dodatkov minimalna. Ne moremo trditi, da način obračanja lopatice ne bi vplival na lastnosti injekcijske mešanice, ki bi vsebovala več različnih dodatkov.

Izbrana sestava mešanice za injektibilnost ni najbolj primerna izbira, v kolikor je potrebno sanirati površine, kjer prevladuje fina zrnastost delcev. Injektiranje bi bilo ne glede na uporabljen način mešanja zelo oteženo. Smiselno bi ga bilo izvajati le na elementih, kjer so zračni žepi relativno veliki in ima zdrobljen material relativno velika zrna ter z močnejšim pritiskom, ki bi uspešno pomagal pri prodiranju injekcijske mešanice.

V nadaljnjih preiskavah bi bilo smiselno preveriti vpliv različnih dodatkov injekcijski mešanici ter njihovih deležev. Zaradi gostejše strukture mešanice zaradi uporabe kremenovega peska pa bi bilo smiselno izvesti še dodatne preiskave injektibilnosti, vendar s testiranjem skozi večje frakcije granulata.

VIRI

- [1] 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. 12-13.
- [2] Padovnik, A. 2016. Utrjevanje odstopajočih plasti ometov stenske poslikave z nekonstrukcijskim injektiranjem. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Padovnik): f. 37, 46, 137, 57-58, 66, 57, 115-118, 121, 125, 127.
- [3] Bogovčič, I. 2000. Restavriranje stenskih slik. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Akademija za likovno umetnost in oblikovanje (samozaložba I. Bogovčič): f. 3.
- [4] 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 24. 2. 2016)
- [5] Dils, J., De Schutter, G., Boel, V. 2012. Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. *Materials and Structures*, 45: f. 1673-1683.
- [6] Dils, J., Boel, V., De Schutter, G. 2013. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. *Construction and Building Materials*, 41: f. 455-463.
- [7] Fernandez-Altable, V., Casanova, I. 2006. Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 36: f. 1222-1230.
- [8] Williams, D. A., Saak, A. W., Jennings, H. M. 1999. The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research*, 29: f. 1491-1496.
- [9] Uranjek, M. 2008. Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek): f. 11, 16-17, 60, 69.
- [10] 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: f. 3-17.

-
- [11] KEMA. 2017. Tehnični list.
<http://www.kema.si/si/vsebina/produkti/po-produktnih-skupinah/kremenovi-peski-v-vrecah/133> (Pridobljeno 11. 5. 2017)
- [12] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in onstrucij: f. 99-100, 104, 110-111.
- [13] TKK, CEMENTOL Hiperplast 481. 2017. Tehnični list.
<http://www.tkk.si/si/izdelki/izdelki-glede-na-lastnosti/gradimo-in-saniramo/cementol/plastifikatorji-in-superplastifikatorji/cementol-hiperplast-481> (Pridobljeno 11. 5. 2017)
- [14] BS EN 196-1:1994. Methods of testing cement. Part 1: Determination of strenght.
https://www.allbeton.ru/upload/iblock/113/bs_en_196_1_1995_methods_of_testing_cement_part_1_determination_of_strength.pdf (Pridobljeno 17. 5. 2017)
- [15] Štupar, B. 2012. Vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti malt. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Štupar): f. 43.
- [16] Hilti. 2017. HILTI TE 7-A.
<https://www.hilti.si/vrtanje-in-ru%C5%A1enje/vrtalna-kladiva/r3509> (Pridobljeno 8. 6. 2017)
- [17] SIST EN 445:2008. Injekcijska masa za prednapete kable: preskusne metode.
- [18] EN 447:1996: Grout for prestressing tendons.
- [19] PSIST prEN 1015-8:2001. Metode preskušanja zidarske malte – 8. del: Določevanje zadrževanja vode sveže malte.
- [20] SIA 262/1:2008. Concrete Structures – Supplementary specifications. Appendix A. Capillary suction and porosity.
- [21] 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: f. 173–253.
- [22] SIST EN 1015-11:2001. Metode preskušanja zidarskih malt – 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.

- [23] ASTM C 496/C 496M. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

- [24] 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: f. 110–116.