

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Stermšek, L., 2013. Vpliv dodatkov na lastnosti injekcijskih mas z apnenim vezivom. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V.): 26 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Stermšek, L., 2013. Vpliv dodatkov na lastnosti injekcijskih mas z apnenim vezivom. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V.): 26 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**PRVOSTOPENJSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
GK^{*}) " - V@uf \ (UN)**

Kandidatka:

Diplomska naloga št.: 90/B-GR

Graduation thesis No.: 90/B-GR

Mentorica:

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 25. 09. 2013

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Lucija Stermšek izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom
>>Vpliv dodatkov na lastnosti injekcijskih mas z apnenim vezivom<<.

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

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

Ljubljana, 13.9.2013

Lucija Stermšek

BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 691:620.1(497.4)(043.2)
Avtor: Lucija Stermšek
Mentor: izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Naslov: Vpliv dodatkov na lastnosti injekcijskih mas z apnenim vezivom
Tip dokumenta: diplomsko delo – univerzitetni študij - B
Obseg in oprema: 26 str., 11 pregl., 13 sl., 4 graf., 12 en.
Ključne besede: injektiranje, mineralni dodatki, kemijski dodatki, preiskave injekcijskih mešanic

Izvleček

V sklopu diplomskega dela smo ugotavljali vpliv kemijskih dodatkov, kot so superplastifikator, sredstvo za kontrolo viskoznosti in amonijev karbamat ter vpliv mineralnih dodatkov, tufa in kalcitne moke, na lastnosti apnenih in kombiniranih apneno cementnih injekcijskih mas za utrjevanje kamnitih zidanih stavb. Preiskave, izvedene v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, so potekale na svežih in strjenih injekcijskih mešanicah. V skladu s standardi smo na svežih injekcijskih mešanicah izvedli test pretočnosti in izločanja vode, določili smo jim razlez in vodozadržnost. Na strjeni injekcijski mešanici smo izvedli nestandardizirano preiskavo krčenja, v skladu s standardom smo jim določili upogibno natezno trdnost in tlačno trdnost. Opazovali smo potek sušenja apnenih injekcijskih mešanic. Slednjim smo poskusili določiti sposobnost injektiranja.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT

UDC: 691:620.1(497.4)(043.2)
Author: Lucija Stermšek
Supervisor: Assoc. Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, PhD
Title: Influence of additives on properties of lime-based injection grouts
Document type: Graduation thesis – University studies - B
Scope and tools: 26 p., 11 tab., 13 fig., 4 graph., 12 eq.
Keywords: grouting, mineral additives, chemical admixtures, tests of injection grouts

Abstract

In the scope of this diploma thesis we have determined the influence of chemical admixtures such as superplasticizer, viscosity modifying agent and ammonium carbamate and the influence of mineral additives, i.e. trass and limestone filler, on the properties of lime and mixed lime-cement grouts for strengthening of stone masonry buildings by grout injection. The tests, carried out in the laboratory of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering, were performed on the fresh and hardened grouts. In accordance with the standards we have performed the test of fluidity and bleeding test on fresh grout mixture, we also determined the flow value and the water retentivity. On hardened grout we have performed non-standardized test of shrinkage and in accordance with the standard we have determined their flexural strength and compressive strength. We have observed the course of drying for lime grout mixtures and we tried to determine the injectability of those grouts.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč in podporo pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov.

Za pomoč pri laboratorijskem delu diplomske naloge se zahvaljujem Dori Kovač ter Andreji Padovnik za koristne nasvete in spodbudo pri nastajanju diplomskega dela.

Zahvaljujem se svoji družini in vsem bližnjim, ki so ves čas študija verjeli vame in me spodbujali.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	UPORABLJENI MATERIALI	2
2.1	Veziva.....	2
2.2	Dodatki	2
3	IZVEDENE PREISKAVE.....	4
3.1	Standardne preiskave	4
3.2	Nestandardizirane preiskave.....	7
4	SESTAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC IN ANALIZA REZULTATOV	9
4.1	Apnene injekcijske mešanice	9
4.1.1	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice A.....	10
4.1.2	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice B.....	10
4.1.3	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice C.....	11
4.1.4	Primerjava apnenih injekcijskih mešanic.....	12
4.2	Apneni cementne injekcijske mešanice.....	15
4.2.1	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice D.....	16
4.2.2	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice E.....	16
4.2.3	Rešitev problema pretočnosti in segregacije.....	17
4.2.4	Rezultati preiskav na strjenih injekcijskih mešanicah	17
5	SPOSOBNOST INJEKTIRANJA	21
6	ZAKLJUČEK.....	24
	VIRI.....	25

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Sestava injekcijskih mešanic v masnih deležih	9
Preglednica 2: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice A	10
Preglednica 3: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice B	10
Preglednica 4: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice C	11
Preglednica 5: Povprečne tlačne trdnosti preizkušenih apnenih injekcijskih mešanic.....	14
Preglednica 6: Sestava injekcijskih mešanic v masnih deležih	15
Preglednica 7: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice D	16
Preglednica 8: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice E	16
Preglednica 9: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice F	17
Preglednica 10: Povprečna upogibna natezna trdnost preizkušancev apneno cementnih injekcijskih mešanic	19
Preglednica 11: Povprečna tlačna trdnost preizkušancev apneno cementnih injekcijskih mešanic	19

KAZALO SLIK

Slika 1: Amonijev karbamat.....	3
Slika 2: Lijak za merjenje pretočnosti (levo) in test izločanja vode (desno).....	4
Slika 3: Določanje prostorninske mase (levo) in razleza (desno).....	5
Slika 4: Test vodozadržnosti: obtežen kalup	6
Slika 5: Preizkus tlačne trdnosti	7
Slika 6: Apnene injekcijske mase v komori.....	7
Slika 7: Meritev krčenja	8
Slika 8: Injekcijska masa C2: Izrazito krčenje (levo) in vidna razpokanost po merjenju krčenja (desno)	13
Slika 9: Razpokanost injekcijske mešanice A1(52) v prizmi (zgoraj) in razpadli vzorci mešanice A3(33) po razkalupljenju (spodaj).....	14
Slika 10: Vidna segregacija cementa na strjenem vzorcu injekcijske mešanice D3	18
Slika 11: Razpokanost apneno cementne injekcijske mešanice	18
Slika 12: Naprava za preizkus sposobnosti injektiranja, v ozadju injektiran kamnit zid	21
Slika 13: Injektiranje mešanice A1(52) skozi omočen drobljen omet	22

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Vodozadržnosti in relativne izgube vode v %.....	12
Grafikon 2: Krčenje apnenih injekcijskih mešanic.....	13
Grafikon 3: Povprečne tlačne trdnosti preizkušenih apnenih injekcijskih mešanic.....	15
Grafikon 4: Krčenje apneno cementnih injekcijskih mešanic.....	18

X Stermšek, L. 2013. Vpliv dodatkov na lastnosti injekcijskih mas z apnenim vezivom.
Dipl. nal. – UNI-B. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Prometna smer.

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Za utrjevanje kamnitih zidanih stavb se uporablja metoda sistematičnega injektiranja, vtiskovanja tekoče suspenzije v delno votel zid. S tem postopkom se doseže ustrezna povezanost med posameznimi kamni in sloji zidu. Izboljšajo se mehanske lastnosti zidov, kar pomeni, da se objekt z injektiranimi zidovi bolje odziva na potresno obtežbo kot objekt z neutrijevanimi zidovi.

Pri konstruktivnem injektiranju se uporabljajo apnene in cementne ter polimerne injekcijske mešanice. Za utrjevanje kamnitih stavb kulturne dediščine je najprimerneje uporabiti suspenzijo na osnovi apna. Poznamo pa tudi kombinirane injekcijske mešanice, sestavljene iz apna, pucolanov in cementa. Njihov namen je izkoristiti prednosti klasičnih apnenih oziroma cementnih mešanic [1].

Za zagotovitev kakovostne izvedbe utrjevanja zidov z injektiranjem je ena izmed najpomembnejših komponent ustrezna izbira injekcijske mešanice. V ta namen smo v sklopu diplomskega dela ugotavljali vpliv kemijskih dodatkov, kot so; superplastifikator, sredstvo za kontrolo viskoznosti in amonijev karbamat ter vpliv mineralnih dodatkov, tufa in kalcitne moke, na lastnosti injekcijskih mas na osnovi apnenega veziva. Obravnavali smo tudi apneno cementne injekcijske mešanice z večjim deležem cementa, saj je njihova uporaba v praksi zelo pogosta. Preiskave, opravljene v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, so potekale na svežih in strjenih injekcijskih masah. Prav tako so v okviru diplomske naloge prvič potekale raziskave svežih injekcijskih mešanic, s katerimi smo poskušali oceniti njihovo sposobnost injektiranja skozi različne aglomerirane materiale, ki lahko nastopajo v zidu, kot so pesek različnih granulacij, drobljena apnena malta itd.

Tehnična regulativa (standardi) za področje utrjevanja kamnitih zidanih stavb s sistematičnim injektiranjem še ne obstaja. Zato smo preizkuse svežih injekcijskih mas izvajali v skladu s standardom SIST EN 445, ki je namenjen za cementne injekcijske mase za prednapete kable. Uporabili smo tudi standard SIST EN 1015, ki zajema metode preizkušanja zidarskih malt. Sposobnost injektiranja smo izvajali po standardu SIST EN 1771:2004/AC:2005.

V sklopu eksperimentalnega dela smo izvedli tudi dve nestandardizirani preiskavi. Spremljali smo potek sušenja apnenih injekcijskih mešanic v komorah z omejenim dostopom ogljikovega dioksida, prav tako smo strjenim injekcijskim mešanicom določili krčenje.

Pri vrednotenju ustreznosti injekcijskih mešanic smo sledili omejitvam, ki jih je v svojem magistrskem delu podal Mojmir Uranjek [1].

2 UPORABLJENI MATERIALI

2.1 Veziva

V sklopu preiskav smo uporabili hidratizirano apno in čisti portlanski cement, ki sta tudi najbolj pogosto uporabljena materiala za injekcijske mešanice.

Hidratizirano apno je gašeno apno, ki mu je dodana točno določena, teoretično potrebna količina vode. Z dodatno količino vode se to praškasto vezivo spremeni v apneno kašo [2]. Spada med nehidravlična veziva, kar pomeni, da za vezanje in strjevanje potrebuje CO₂ iz zraka. Zato se pojavljajo težave pri strjevanju injekcijski mešanic na osnovi hidratiziranega apna, kjer je omejen dostop CO₂.

Cement je hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo veže in se strdi. Značilni predstavnik silikatnih cementov je portland cement [2]. Pridobiva se z mletjem portland cementnega klinkerja, cementu je dodana manjša količina sadre, ki služi reguliranju časa vezenja cementa [3]. Uporabljeni cement je trdnostnega razreda 42,5 R.

2.2 Dodatki

Kemijski dodatki omogočajo izboljšanje obdelovalnih lastnosti in pretočnosti, preprečujejo segregacijo težjih delcev in izboljšujejo mehanske lastnosti injekcijskih mas. Izmed nabora kemijskih dodatkov smo uporabili superplastifikator in stabilizator.

Superplastifikatorji omogočajo zmanjšanje potrebe po vodi, ne da bi pri tem poslabšali zahtevano pretočnost. Vplivajo namreč na disperzijo trdnih delcev [1]. Pri apnenih injekcijskih mešanicah smo uporabili superplastifikator na osnovi polikarboksilatnih polimerov, v nadaljevanju označen kot PCE1. Prav tako smo slednjega uporabili tudi pri apneno cementnih mešanicah. Poleg le tega smo uporabili še drug superplastifikator enakega tipa, ki še podaljša čas obdelavnosti, z oznako PCE2, ter polifosfonatni superplastifikator, ki zniža viskoznost mešanice. V nadaljevanju njemu pripada oznaka PPh. Uporabljeni superplastifikatorji delujejo na vse fine delce, zatorej smo ga računali na maso polnila in veziva.

Stabilizator je sredstvo za kontrolo viskoznosti, ki poveča stabilnost materiala na bazi cementa. Ustrezna kombinacija stabilizatorja in superplastifikatorja omogoča proizvodnjo materialov na bazi cementa z visoko sposobnostjo tečenja in z ustrezno stabilnostjo [3]. Z dodajanjem sredstva za kontrolo viskoznosti injekcijskim mešanicam na osnovi cementa se zmanjšujeta izločanje vode in segregacija težjih delcev. Uporabili smo stabilizator na bazi celuloznega etra. Dodatek je v obliki prahu svetlo sive barve.

Amonijev karbamat so beli kristali z močnim vonjem po amonijaku. Čeprav je zelo higroskopičen se v vodi le počasi raztaplja. V stiku z vodo razpade na amonijak in ogljikov dioksid, ki ga hidratizirano apno potrebuje za karbonatizacijo oziroma sušenje [4].



Slika 1: Amonijev karbamat

(http://www.yongfengcn.com/cgi/search-en.cgi?f=product_en_1_+company_en_1_&id=4033&t=product_en_1_)

Mineralni dodatki kot praškasti materiali imajo zaradi svoje finosti veliko specifično površino. Za popolno oblitje finih delcev potrebujejo večjo količino vode, zato injekcijskim mešanicom zmanjšujejo pretočnost.

Tuf je reaktiven mineralni dodatek, ki nastane iz vulkanskega pepela. Uvrščamo ga med naravne pucolane. Zaradi hitrejšega vezanja in doseganja višjih trdnosti se ga dodaja apnenim injekcijskim mešanicom [5]. Tuf ima hidravlične lastnosti, zato smo ga upoštevali kot vezivo.

Mineralni dodatek kalcitna moka iz naravnega kalcijevega karbonata – kalcita je mineraloško marmoniziran apnenec [6]. Pridobiva se z drobljenjem kalcitnega peska. Sodi med inertna polnila, ki injekcijskim mešanicom izboljšajo fizikalne lastnosti.

Pri sestavi injekcijskih mešanic smo kombinirali različne vrste veziv (hidravlično in nehidravlično), v vseh primerih smo uporabili kalcitno moko. Recepturo za vse mešanice smo pripravili sami. Ker gre torej za kombinacijo različnih vrst praškastih delcev, sem v diplomskem delu za količino dodane vode uporabila izraz potreba po vodi, ki pomeni količino dodane vode glede na količino suhe snovi.

3 IZVEDENE PREISKAVE

Na svežih injekcijskih mešanicah smo izvedli standardizirane preiskave pretočnosti, izločanja vode, izmerili smo jim razlez in določili vodozadržnost ter preizkusili njihovo sposobnost injektiranja. Preiskava sposobnosti injektiranja je opisana v 5. poglavju. Opazovali smo potek sušenja apnenih injekcijskih mešanic v komorah z omejenim dostopom CO₂. Na strjeni injekcijski mešanici smo izvedli nestandardizirano preiskavo krčenja, v skladu s standardom smo jim določili tudi upogibno natezno trdnost in tlačno trdnost.

3.1 Standardne preiskave

Meritve pretočnosti in izločanja vode smo opravili v skladu s standardom SIST EN 445:2008 [7]. Pri preiskavi pretočnosti smo potrebovali lijak standardnih dimenzij in prostornine. Merili smo čas, ki je potreben, da 1 liter injekcijske mešanice steče skozi ustje lijaka.

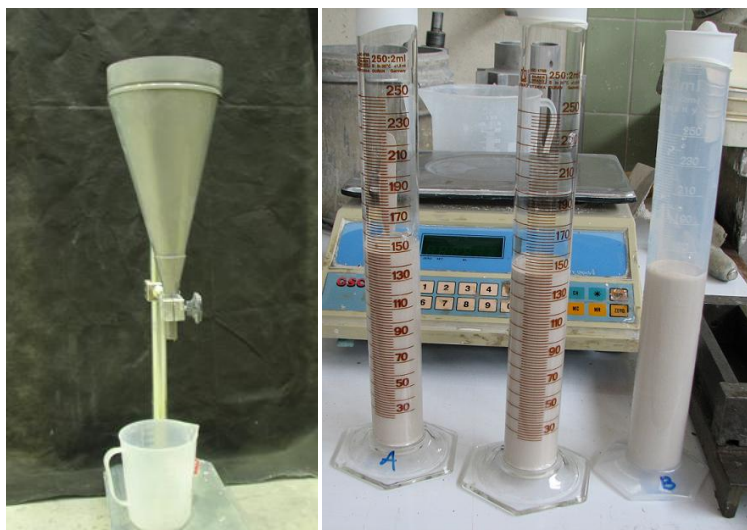
Pri testu izločanja vode smo uporabili modificiran merilni valj prostornine 250 ml, premera 35 mm in višine 300 mm. Vanj smo vlili približno 150 ml injekcijske mešanice in ga zaščitili pred izhlapevanjem. Po preteku 3 ur smo odčitali količino vode, ki je ostala na površini mešanice. Delež izločene vode smo določili po enačbi:

$$\frac{v_1}{v} * 100\% \quad (1)$$

kjer je:

v_1 ...količina izločene vode nad mešanico [ml]

v ...količina injekcijske mešanice [ml]



Slika 2: Lijak za merjenje pretočnosti (levo) in test izločanja vode (desno)

Za test pretočnosti smo upoštevali kriterij, da je ustrezni čas pretočnosti ≤ 60 s. Mojmir Uranjek [8] je v svoji doktorski disertaciji podal ciljno vrednost časa pretočnosti okoli 20 s. Primerna pretočnost je pomembna za zapolnitev votlin in razpok v zidu. Ustrezno izločanje

vode smo omejili na vrednost $\leq 2\%$. Povečano izločanje vode namreč vodi do segregacije delcev veziva in polnila [1].

Prostorninsko maso sveže mešanice smo določili po standardu SIST EN 1015-6:1999 [9], ki določa uporabo kovinske cilindrične posode s prostornino 1 liter in z notranjim premerom 125 mm. Izračunali smo jo po enačbi:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad (2)$$

kjer je:

ρ_m ...prostorninska masa sveže mešanice [kg/m³]

m_1 ...masa posode [g]

m_2 ...masa posode z mešanico [g]

V_v ...prostornina posode [l]

Za določevanje konsistence sveže mešanice smo izvedli metodo **razleza** po standardu SIST EN 1015-3:1999 [10]. Standard določa uporabo stresalne mizice. V našem primeru smo imeli izredno tekočo konsistenco, zato smo uporabili razlezno mizico dimenzij 700x700 mm. Na razlezno mizico smo postavili presekan stožec standardnih dimenzij, v katerega smo vlili pripravljeno mešanico. Nato smo stožec dvignili in pustili, da se mešanica razleže po površini mizice le zaradi delovanja lastne teže. Razlez se izmeri v dveh pravokotnih smereh, rezultat je srednja vrednost obeh meritev v mm.



Slika 3: Določanje prostorninske mase (levo) in razleza (desno)

Meritve vodozadržnosti smo izvedli v skladu s standardom PSIST prEN 1015-8:2001 [11]. Test je zahteval uporabo kalupa, filtrskega papirja in uteži. Postopek je sledeč. Najprej stehtamo filter papir in kalup, ki ga nato napolnimo z injekcijsko mešanico in ponovno stehtamo. Prekrijemo ga z gazo in s filter papirjem, ga obrnemo in obtežimo, kot je prikazano na Sliki 4. Po preteku 5 min kalup razbremenimo in stehtamo filterni papir v mokrem stanju. Standard še navaja, da masa vode, ki jo vsrka filter papir, ne sme preseči 10 g, drugače je preiskavo potrebno ponoviti z večjim številom filter papirjev. Na podlagi naslednjih enačb smo izračunali relativno izgubo vode in vodozadržnost:

masa mešanice: $m_5 = m_3 - m_1$ (3)

količina vode v mešanici: $W_2 = m_5 * W_1$ (4)

masa absorbirane vode: $W_3 = m_4 - m_2$ (5)

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

vodozadržnost: $WRV = 100 - W_4$ (7)

kjer je:

m_1 ...masa kalupa

m_2 ...masa suhega filtrskega papirja

m_3 ...masa kalupa z mešanico

m_4 ...masa z vodo prepojenega filtrskega papirja

W_1 ...delež vode v injekcijski mešanici



Slika 4: Test vodozadržnosti: obtežen kalup

Upogibno natezno trdnost in tlačno trdnost strjenih injekcijskih mešanic smo določali po standardu SIST EN 1015-11:2001 [12]. Upogibno natezno trdnost smo določali na prizmah dimenzij 40/40/160 mm s tritočkovnim preizkusom. Izmerili smo maksimalno upogibno silo F pri kateri je prišlo do porušitve preizkušanca. Upogibno natezno trdnost smo določili z enačbo:

$$f_t = \frac{1,5Fl}{bd^2} \quad (8)$$

kjer je:

f_t ...upogibna natezna trdnost preizkušanca [MPa]

F ...maksimalna dosežena sila [kN]

l ...razdalja med podporama [cm]

b ...širina preizkušanca [cm]

d ...višina preizkušanca [cm]

Z enoosnim tlačnim preizkusom smo na preostalih polovičkah prizem določali tlačno trdnost. Dobili smo maksimalno tlačno silo s katero smo po enačbi (9) izračunali tlačno trdnost:

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

kjer je:

f_c ...tlačna trdnost preizkušanca [MPa]

F ...maksimalna tlačna sila [kN]

a ...širina preizkušanca [cm]



Slika 5: Preizkus tlačne trdnosti

3.2 Nestandardizirane preiskave

Mase v komori. Za opazovanje poteka sušenja apnenih injekcijskih mas smo le te zaprli v plastične posode. S tem smo ponazorili jedro zidov, kjer ni dostopa svežega zraka oziroma CO_2 , ki je potreben za karbonatizacijo apna. Pregled mas smo opravili po enem mesecu.



Slika 6: Apnene injekcijske mase v komori

Krčenje. V čepe cevi premera 75 mm in prostornine 130,95 cm³ smo vlili mešanico. Ko se je le ta posušila, smo izmerili krčenje s pomočjo peska znane prostorninske mase, kot je prikazano na Sliki 5. Najprej smo stehtali maso vlitka, dopolnili vzorec s peskom, ter ga ponovno stehtali. Iz razlike mas smo dobili maso nasutega peska. Krčenje izračunamo na podlagi enačb:

$$\text{masa nasutega peska:} \quad m = m_2 - m_1 \quad (10)$$

$$\text{sprememba volumna:} \quad \Delta V = \frac{m}{\rho} \quad (11)$$

$$\text{krčenje:} \quad \frac{\Delta V}{V} * 100\% \quad (12)$$

kjer je:

m_1 ... masa vlitka [g]

m_2 ... masa vlitka z nasutim peskom [g]

ρ ... prostorninska masa peska v nasutem stanju [g/cm³]



Slika 7: Meritev krčenja

Preiskavo smo izvedli na treh vzorcih. Metoda je primerna za določitev krčenja tistih strjenih injekcijskih mas, pri katerih ne pride do razpok. Pesek namreč zapolni tudi vse površinske razpoke.

4 SESTAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC IN ANALIZA REZULTATOV

4.1 Apnene injekcijske mešanice

Injekcijske mešanice na osnovi apna so s stališča skladnosti z materiali v kamnitih zidovih, kjer vezivo predstavlja apnena malta, najprimernejše za uporabo [8].

V sklopu preiskav apnenih injekcijskih mešanic smo analizirali lastnosti treh mešanic z različno sestavo, kot je podano v Preglednici 1.

Preglednica 1: Sestava injekcijskih mešanic v masnih deležih

Oznaka mešanice	Apno [%]	Tuf [%]	Kalcitna moka [%]	Amonijev karbamat [%] ***	Superplastifikator PCE1 [%] **	Potreba po vodi
A1	20	/	80	/	/	0,46 *
						0,52 *
A2	20	/	80	/	1	0,36
A3	20	/	80	/	0,5	0,33 *
						0,42 *
B1	14	6	80	/	1	0,35
B2	17	3	80	/	1	0,29
C1	20	/	80	0,95	/	0,52
C2	20	/	80	4,6	/	0,57

* Ko je podatek o potrebi po vodi pomemben, je osnovni oznaki mešanice v oklepaju dodana potreba po vodi v odstotkih; primer A1(46) za potrebo po vodi 0,46.

** Delež superplastifikatorja glede na maso suhe snovi.

*** Delež amonijevega karbamata glede na celotno maso.

Vse mešanice vsebujejo nereaktiven mineralni dodatek, to je kalcitna moka. Osnovno mešanico A smo pripravili v volumskem razmerju 1:3 glede na delež apna in kalcitne moke. Zaradi neuspešnega poizkusa injektiranja smo mešanici A1 in A3 zamešali še z večjo količino vode. Mešanica B je vsebovala tudi mineralni dodatek tuf. Pri mešanici C smo uporabili amonijev karbamat.

4.1.1 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice A

V Preglednici 2 so podani rezultati preiskav na sveži injekcijski mešanici A.

Preglednica 2: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice A

Oznaka mešanice	SP [%]	Potreba po vodi	Prostorninska masa [kg/m ³]	Razlez [mm]	Pretočnost [s]		Izločanje vode [%]
					takoj	po 30 min	
A1	/	0,46	1696	197	39	41	2,60
		0,52	1682	283	11	11	3,62
A2	1	0,36	1796	505	14	14	2,47
			1818		20	18	
A3	0,5	0,33	1808	332	38	42	1,33
		0,42	1742	507	12	12	1,93

Iz Preglednice 2 je razvidno, da kriteriju pretočnosti ustrezajo vse mešanice, kriteriju izločanje vode pa le mešanica A3. Pri mešanici A2 smo za prostorninsko maso in pretočnost dobili dva povsem različna rezultata. Prvi rezultat, nižje vrednosti prostorninske mase in pretočnosti, je posledica rahle segregacije takoj po mešanju. Z višanjem deleža superplastifikatorja se je zmanjšala potreba po vodi in izboljšala pretočnost. Superplastifikator ima tudi veliki vpliv na razlez, povečuje tečenje. Zmanjšanje potrebe po vodi hkrati pomeni manjši procent izločene vode.

Za najbolj optimalno mešanico te recepture se je izkazala mešanica A3 z dodanim 0,5 % superplastifikatorjem.

Potek sušenja smo spremljali pri mešanicah A1(46), A1(52) in A3(33), ki smo jih postavili v zaprte komore brez dotoka svežega zraka oziroma CO₂. Po mesecu dni sta bili A1(46) in A1(52) še vedno mehki, opazno je bilo rahlo krčenje. Voda se je nabrala kot kondenz na dnu in ostenju posode. Pri mešanici A3(33) se je zgornji suhi sloj luščil od ostalega dela vzorca. Po pričakovanjih se je najprej začela sušiti mešanica A3(33) z najmanjšo potrebo po vodi.

4.1.2 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice B

Mešanici smo dodali mineralni dodatek tuf, ki smo ga upoštevali kot vezivo. Pri prvem poizkusu mešanja smo dobili zelo gosto slabo pretočno mešanico. Tuf je namreč nase vezal veliko količino vode. Izkazalo se je, da moramo tuf, ki je zelo higroskopičen pucolanski dodatek, pred uporabo namočiti v vodi. Rezultate preiskav sveže injekcijske mešanice B podajamo v Preglednici 3.

Preglednica 3: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice B

Oznaka mešanice	SP [%]	Potreba po vodi	Prostorninska masa [kg/m ³]	Razlez [mm]	Pretočnost [s]		Izločanje vode [%]
					takoj	po 30 min	
B1	1	0,35	1838	378	27	28	1,64
B2	1	0,29	1896	460	51	55	0,66

Za zagotovitev ustreznega časa pretočnosti je v mešanicah, ki vsebujejo tuf, potrebna uporaba superplastifikatorjev. Kljub večjemu času pretočnosti se je za bolj homogeno mešanico, kar je razvidno tudi iz rezultata izločanja vode, izkazala mešanica B2 z nižjim deležem tufa in z manjšo potrebo po vodi.

4.1.3 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice C

Uporabili smo amonijev karbamat, ki smo ga pred uporabo raztopili v znani količini vode. Delež amonijevega karbamata smo poročali glede na celotno maso mešanice, torej na maso veziva, polnila in vode. V Preglednici 4 so povzeti rezultati sveže injekcijske mešanice C.

Preglednica 4: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice C

Oznaka mešanice	Amonijev karbamat [%]	Potreba po vodi	Prostorninska masa [kg/m ³]	Razlez [mm]	Pretočnost [s]		Izločanje vode [%]
					takoj	po 30 min	
C1	0,95	0,52	1666	340	11	11	4,3
C2	4,6	0,57	1618	470	10	10	11,84

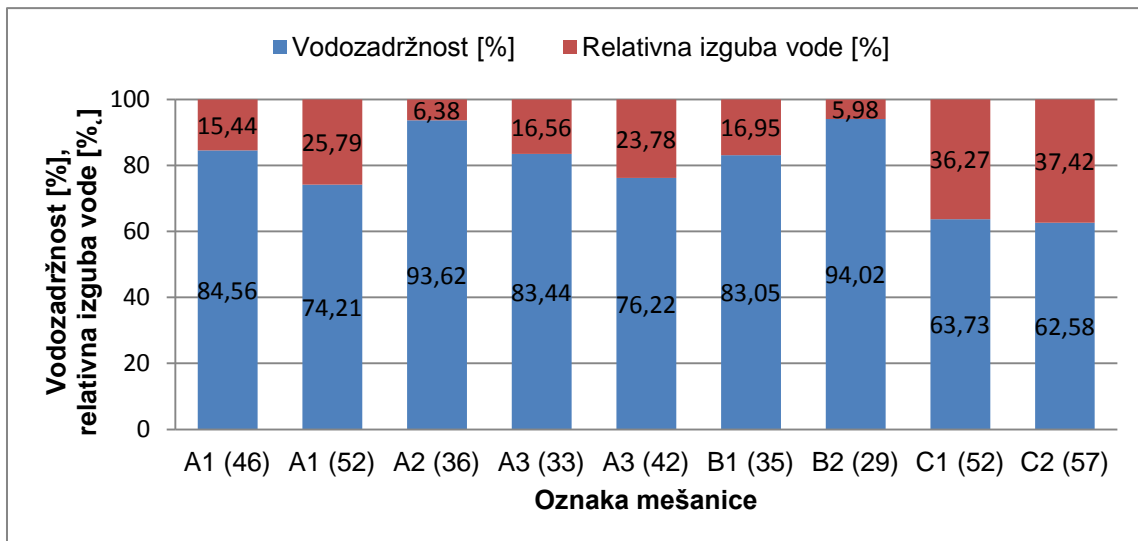
Glede na veliko količino potrebe po vodi je čas pretočnosti majhen, izločanje vode presega dovoljen kriterij. Večjega razmešanja delcev sveže mešanice ni bilo opazno.

Rezultati pregleda teh dveh mešanic v komori so naslednji:

-Iz mešanice C1 se je voda že izločila, zaznati je bilo krčenje, na otip je bila še mehka. Na vzorcih C2 se je naredila tanka plast pod katero je bil sloj vode. Ta plast, ki je verjetno posledica karbonatizacije, ne dovoljuje izhlapevanje izločene vode in s tem posledično preprečuje strjevanje mase. V jedru zidov bi proces sušenja te mase potekal drugače, vodo bi posrkali okoliški gradniki zidu, kar bi omogočilo počasno strjevanje mase. Presenetilo nas je obnašanje, še posebno mešanice z višjim deležem amonijevega karbamata, pri poteku sušenja. Le ta naj bi pospešil sušenje, v stiku z vodo namreč tvori CO₂, vendar se je izkazalo ravno nasprotno. Sklepamo, da je to posledica prevelike količine dodane vode, kar se kaže tudi pri testu izločanja vode.

4.1.4 Primerjava apnenih injekcijskih mešanic

Apnenim injekcijskim masam smo preverili sposobnost vodozadržnosti. Rezultati so razvidni iz Grafikona 1.

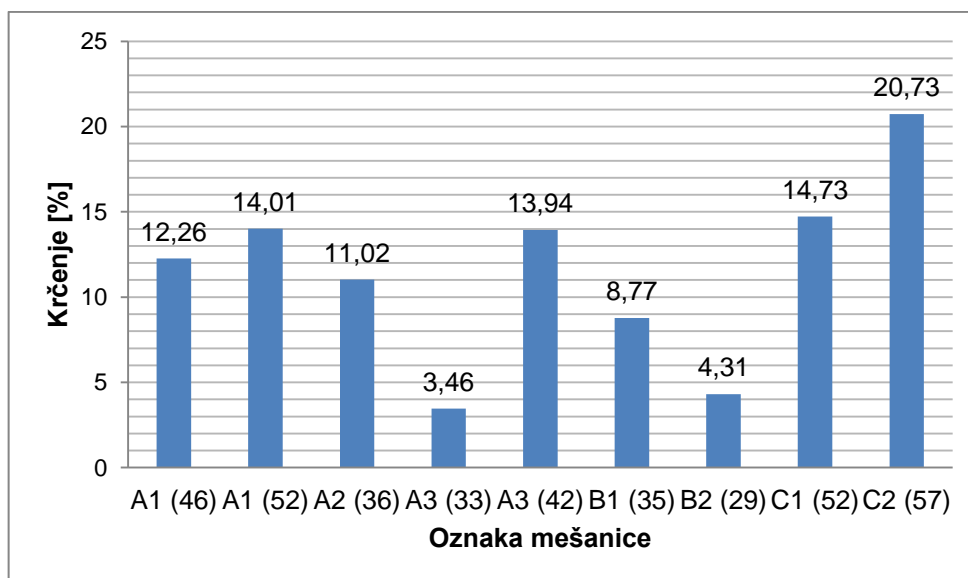


Grafikon 1: Vodozadržnosti in relativne izgube vode v %

Precej nižje vrednosti vodozadržnosti zasledimo pri mešanicah z amonijevim karbamatom. Višjo adsorpcijo vode, seveda ob primerni količini vode, bi morda lahko povečali s primerno zamenjavo polnila. Povečana relativna izguba vode, pogojena s kapilarnim srkom porozne podlage privede do nezadostne sprijemnosti posameznih gradnikov zidu in posledično do poslabšanja mehanskih lastnosti injekcijskih mešanic [1]. Velika sposobnost zadrževanja vode injekcijske mešanice je še posebej pomembna v primerih, ko se zidu pred injektiranjem ne omoči.

Glede na rezultate svežih apnenih injekcijskih mešanic, lahko sklepamo, da se je najbolj obnesla mešanica B2, torej mešanica, ki jo sestavlja volumsko razmerje 15 % tufa in 85 % apna glede na maso veziva.

Velike razlike med injekcijskimi mešanicami so se pokazale pri krčenju, ki je pogojeno s količino uporabljene vode. Iz Grafikona 2 je razvidno, da smo največje krčenje izmerili pri mešanici C2, kjer je potreba po vodi največja. Smiselno bi bilo torej znižati količino vode. Sorazmerno z deležem krčenja je pogojen nastanek razpok. Pri vseh mešanicah bi bilo potrebno znižati delež krčenja, saj prekomerno krčenje zmanjša sprijemnost (adhezijo) z gradniki zidu.



Grafikon 2: Krčenje apnenih injekcijskih mešanic

Slabše mehanske lastnosti so se pokazale pri osnovni mešanici A. Pojavile so se razpoke na strjenih mešanicah. Ob razkalupljenju čepov cevi, ki smo jih uporabili za merjenje krčenja, so vsi vzorci te mešanice razpadli. Prav tako so razpadli vlitki mešanice C2, mešanice z dodatkom amonijevega karbamata. Njena velika razpokanost je bila še toliko bolj vidna po opravljenem merjenju krčenja. Namreč na vrhu vzorca se je naredila tanka bela krhka plast, kot prikazuje Slika 8. Boljše rezultate smo dobili pri injekcijskih mešanicah z dodatkom tufa, kjer razpokanost na čepih ni bila prisotna.



Slika 8: Injekcijska masa C2: Izrazito krčenje (levo) in vidna razpokanost po merjenju krčenja (desno)

Še izrazitejšo razpokanost injekcijskih mešanic, vlitih v prizme za namen preizkusa upogibne natezne in tlačne trdnosti, je definirala oblika, namreč gre za drugačen raspored napetosti. Dodaten vpliv na obnašanje injekcijskih mas v prizmah so povzročile tudi visoke poletne temperature v laboratoriju, ki so povzročile prekomerno izhlapevanje vode. Zaradi izredno velikih razpok in posledično razpada strjenih injekcijskih mas, jim nismo mogli določiti upogibne natezne trdnosti.



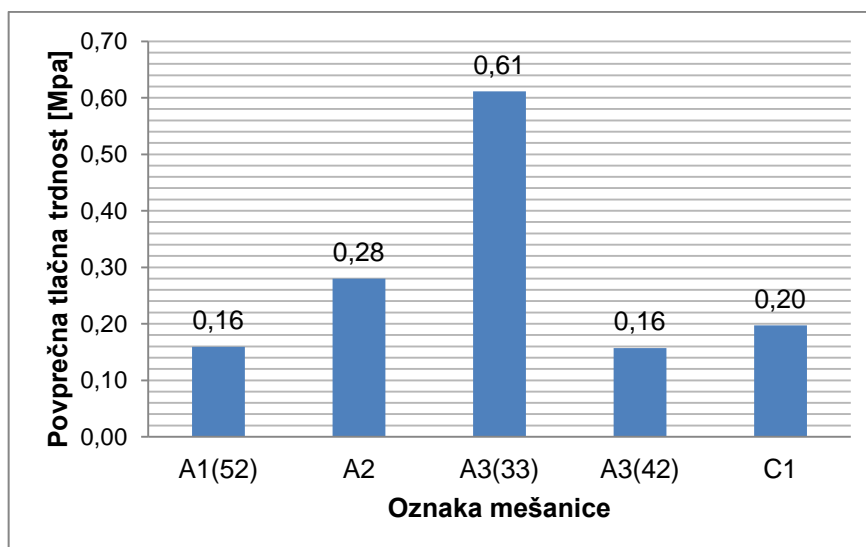
Slika 9: Razpokanost injekcijske mešanice A1(52) v prizmi (zgoraj) in razpadli vzorci mešanice A3(33) po razkalupljenju (spodaj)

Tlačno trdnost smo preverili pri injekcijskih mešanicah A1(52), A2, A3(33), A3(42) in C1 pri starosti 50 dni in jih podajamo v Preglednici 5 in na Grafikonu 3.

Preglednica 5: Povprečne tlačne trdnosti preizkušanih apnenih injekcijskih mešanic

Oznaka mešanice	Tlačna trdnost [MPa]	Koeficient variacije [%]
A1(52)	0,16	4,38
A2	0,28	10,76
A3(33)	0,61	24,30
A3(42)	0,16	0,00*
C1	0,20	0,00*

* Tlačno trdnost smo določili samo na enem vzorcu.



Grafikon 3: Povprečne tlačne trdnosti preizkušenih apnenih injekcijskih mešanic

Tlačne trdnosti analiziranih injekcijskih mešanic so zelo nizke, izstopa le injekcijska mešanica A3(33) z velikim raztrosom vrednosti, kar nakazuje tudi na njeno nehomogenost. Tudi z vidika vrednosti tlačnih trdnosti preizkušenih injekcijskih mas, ne bi bile primerne za injektiranje, saj bi za zagotovitev duktilnosti zidu njihove vrednosti tlačnih trdnosti morale biti podobne vrednostim tlačnih trdnosti obstoječega veziva v zidu.

Povzamemo lahko, da je največji potencial glede na preiskave analiziranih mešanic, tako na svežih kot strjenih vzorcih, pokazala injekcijska masa B2. Bila bi torej primerno izhodišče za nadaljnje preiskave.

4.2 Apneno cementne injekcijske mešanice

Zaradi hitrejšega strjevanja in doseganja višjih trdnosti dodamo apnenim injekcijskim masam cement. V Preglednici 6 podajamo sestavo analiziranih mešanic.

Preglednica 6: Sestava injekcijskih mešanic v masnih deležih

Oznaka mešanice	Apno [%]	Cement [%]	Kalcitna moka [%]	Superplastifikator PCE1 [%] **	Potreba po vodi
D1	6,3	17,3	76,4	0,95	0,24
D2	6,3	17,3	76,4	1,5	0,2
D3	6,3	17,3	76,4	2	0,2
E	9,4	14,2	76,4	1	0,21*
					0,23*

* Ko je podatek o potrebi po vodi pomemben, je osnovni oznaki mešanice v oklepaju dodana potreba po vodi v odstotkih; primer E(21) za potrebo po vodi 0,21.

** Delež superplastifikatorja glede na maso suhe snovi.

Mešanico D smo pripravili v volumskem razmerju 30 % apna in 70 % cementa glede na maso veziva. Pri mešanici E smo upoštevali masno razmerje in sicer 40 % apna in 60 % cementa glede na maso veziva.

4.2.1 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice D

Z rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice D nismo bili zadovoljni. Težave sta povzročali tako pretočnost kot tudi segregacija.

Preglednica 7: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice D

Oznaka mešanice	SP [%]	Potreba po vodi	Prostorninska masa [kg/m ³]	Razlez [mm]	Pretočnost [s]		Izločanje vode [%]
					takoj	po 30 min	
D1	0,95	0,24	1934	535	52	/	1
			2014		61	/	
			2008		48	46	
D2	1,5	0,2	2074	475	143	/	0,67
D3	2	0,2	2038	458	122	/	1,67

Pri mešanici D1 smo dobili pri več poizkusih različne rezultate pretočnosti in prostorninske mase. Sklepamo, da je to posledica odvzema različnega vzorca in sicer z vrha oziroma z dna posode, saj je mešanica takoj po zamešanju rahlo segregirala. Torej vzorec, ki smo ga vzeli z dna posode ima posledično višji pretočni čas in večjo prostorninsko maso. Tudi nižji čas pretočnosti po 30 min pri zadnjem poizkusu je posledica le tega. Z namenom, da bi preprečili segregacijo, smo zmanjšali potrebo po vodi in povečali delež superplastifikatorja, vendar zelenega učinka nismo dosegli. Čas pretočnosti se je povečal, prav tako se je povečala tudi segregacija. V primeru mešanice D3, kjer smo dodali 2 % superplastifikatorja, je nastala plastična zmes, ki se je oprijela ostenja posode. Sklepamo lahko, da je prišlo do predoziranja superplastifikatorja. Kot je razvidno iz Preglednice 7, je izločanje vode v vseh primerih ustrezno, vendar je pri mešanicah prišlo do razmešanja in segregacije težjih delcev. Mešanice niso bile homogene, kar je bilo zelo lepo vidno pri testu izločanja vode. Na dno merilnega valja se je posedel cement. Ta test lahko v bodoče uporabimo kot hitro in enostavno kontrolo stabilnosti mešanice.

Mešanici D1 smo določili vodozadržnost. Njena sposobnost zadrževanja vode je visoka, znaša 95,21 %.

4.2.2 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice E

Tudi ti mešanici nista bili homogeni. Obnašali sta se podobno kot predhodne injekcijske mešanice D, kar je razvidno iz Preglednice 8.

Preglednica 8: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice E

Oznaka mešanice	SP [%]	Potreba po vodi	Prostorninska masa [kg/m ³]	Razlez [mm]	Pretočnost [s]		Izločanje vode [%]
					takoj	po 30 min	
E	1	0,21	2048	418	142	/	1,86
		0,23	2016	465	42	46	2,67
					72	/	

Da bi zmanjšali čas pretočnosti, smo povečali potrebo po vodi. Sorazmerno s tem se je izločila večja količina vode in izmerili smo večji razlez. Tudi tukaj je v obeh primerih prišlo do izrazitega razmešanja, iz česar lahko povzamemo, da tudi ti dve mešanici nista stabilni.

4.2.3 Rešitev problema pretočnosti in segregacije

Za izhodišče smo vzeli mešanico D1. Uporabili smo superplastifikator PCE2. Prisotna je bila zmerna segregacija. Ker je bila mešanica dovolj hitra, pretočnost je takoj po zamešanju znašala 41 s, smo ji lahko povečali viskoznost. V ta namen smo dodali stabilizator. Pri prvem poizkusu zamešanja, kjer smo dodali 0,37 % stabilizatorja glede na suho snov, pri testu pretočnosti nismo dobili niti zveznega curka. Zato smo zmanjšali delež stabilizatorja na 0,072 %. S kombinacijo superplastifikatorja PCE2 in stabilizatorja smo dobili homogeno mešanico, vendar nismo zadostili kriteriju pretočnosti (takoj: 169 s, po 30 min: 143 s). Vpliv stabilizatorja se kaže tudi v zmanjšanem času pretočnosti po 30 minutah, kar kaže na dobro obdelavnost mešanice.

Ker se v praksi izogibamo uporabi večjega števila kemijskih dodatkov, smo želeli stabilnost mešanice doseči samo z enim dodatkom. Uporabili smo polifosfonatni superplastifikator (PPh). Z ozirom na ugotovitev diplomskega dela Nejca Gašperiča [13] je potrebno za približno enako stopnjo obdelavnosti PPh v primerjavi s PCE dodati v razmerju:

$$\frac{PPh}{PCE} = \frac{3}{2}$$

Rezultati preiskav te injekcijske mešanice so podani v Preglednici 9.

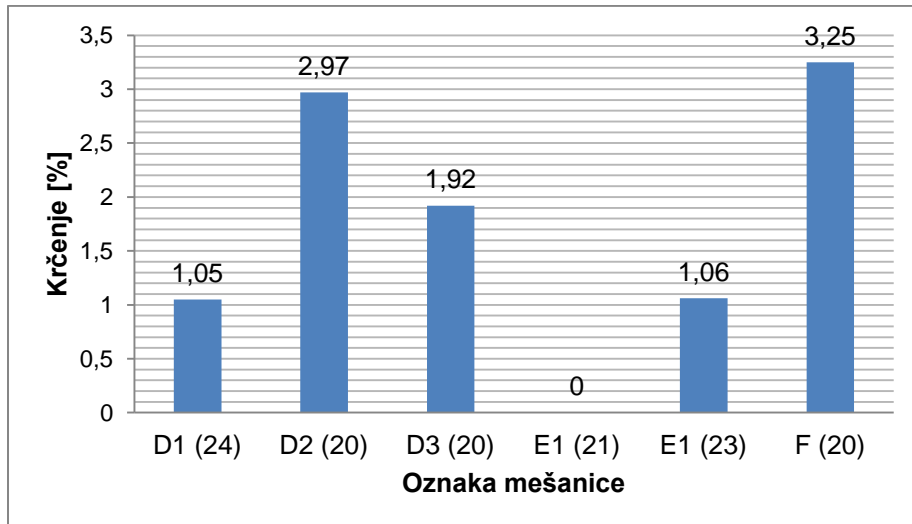
Preglednica 9: Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice F

Oznaka mešanice	SP [%]	Potreba po vodi	Prostorninska masa [kg/m ³]	Razlez [mm]	Pretočnost [s]		Izločanje vode [%]
					takoj	po 30 min	
F	1,43	0,2	2056	493	72	80	1,33

Pri superplastifikatorju PPh smo dosegli ravno nasprotno učinek, povečal je stabilnost mešanice s tem, da je povečal napetost na meji tečenja in zmanjšal viskoznost injekcijske mešanice.

4.2.4 Rezultati preiskav na strjenih injekcijskih mešanicah

Pri krčenju smo dobili zadovoljive rezultate. Največ se je skrčila mešanica F, ki je vsebovala PPh superplastifikator.



Grafikon 4: Krčenje apneno cementnih injekcijskih mešanic

Na strjenih injekcijskih mešanicah je lepo tudi vidna segregacija cementa v primeru vzorca D3, kjer je prišlo do zasičenja superplastifikatorja.



Slika 10: Vidna segregacija cementa na strjenem vzorcu injekcijske mešanice D3

Na Sliki 11 je prikazano izrazito razpokanje injekcijske mešanice, ki smo jo zamešali s superplastifikatorjem PCE2, ki omogoča daljši čas obdelavnosti; daljši čas je tekoča in ne veže. Pri takih mešanicah je nevarnost plastičnega krčenja večja, kar bi lahko bil vzrok za nastanek razpok.



Slika 11: Razpokanost apneno cementne injekcijske mešanice

Apneno cementnim injekcijskim mešanici smo na prizmah določili povprečno upogibno natezno in povprečno tlačno trdnost. Upogibna natezna trdnost strjene injekcijske mešanice je bolj kot njena tlačna trdnost parameter, ki kaže na sposobnost mešanice, da zagotovi ustrezno povezanost posameznih slojev zidu [1]. Zaradi različnega časovnega okvirja preizkušanja injekcijskih mešanic in vlijanja le teh v prizme, smo njihovo upogibno natezno in tlačno trdnost ovrednotili pri različni starosti. Rezultate povprečnih upogibnih nateznih trdnosti in koeficient variacije ter starost preizkušancev podajamo v Preglednici 10.

Preglednica 10: Povprečna upogibna natezna trdnost preizkušancev apneno cementnih injekcijskih mešanic

Oznaka mešanice	Starost preizkušancev [dan]	Upogibna natezna trdnost [MPa]	Koeficient variacije [%]
D1	120	2,79	10,75
D2	120	5,42	7,11
E(21)	50	3,76	13,14
E(23)	50	3,56	12,37
F	30	4,54	7,62

Kot je razvidno iz Preglednice 10, izstopa upogibna natezna trdnost preizkušanca injekcijske mešanice D1 pri starosti 120 dni. V primerjavi s preizkušanci mešanice D2 z istim delež cementa in apna pri enaki starosti, je vrednost upogibne trdnosti D1 nižja. Izstopata tudi injekcijski mešanici E(21) in E(23) z višjim deležem apna pri starosti 50 dni, vendar imata velik raztros in nehomogenost rezultatov. Že pri starosti 30 dni so preizkušenci injekcijske mešanice F dosegli upogibno natezno trdnost 4,54 MPa.

Na polovičkah prizem, ki so ostale od upogibnega preizkusa, smo določili tlačno trdnost. V Preglednici 11 so prikazani rezultati povprečne tlačne trdnosti, koeficient variacije in starost preizkušancev.

Preglednica 11: Povprečna tlačna trdnost preizkušancev apneno cementnih injekcijskih mešanic

Oznaka mešanice	Starost preizkušancev [dan]	Tlačna trdnost [MPa]	Koeficient variacije [%]
D1	120	15,64	2,40
D2	120	23,11	2,59
E(21)	50	17,64	2,89
E(23)	50	15,34	2,99
F	30	24,40	7,73

Raztros rezultatov tlačnih trdnosti z izjemo mešanice F je bil majhen. Tudi pri rezultatih povprečnih tlačnih trdnosti izstopa injekcijska mešanica F. Povprečni tlačni trdnosti injekcijske mešanice E(21) in E(23) z večjim deležem apna sta bili relativno visoki. Velike tlačne trdnosti lahko povečajo togost zidu, ki ga utrjujemo, kar posledično lahko povzroči dodatne poškodbe kamnitih zidanih stavb.

Z primerjavo injekcijskih mešanic D1 in D2 pri isti starosti tako pri tlačni trdnosti kot pri upogibni natezni trdnosti lahko vidimo vpliv vrste polikarboksilatnega superplastifikatorja v povečanju vrednosti omenjenih trdnosti.

5 SPOSOBNOST INJEKTIRANJA

V skladu s standardom SIST EN 1771:2004/AC:2005 [14] smo izvedli poizkus sposobnosti injektiranja. Test temelji na injektiranju pod konstantnim pritiskom 0,075 MPa. Naprava za injektiranje je prikazana na Sliki 12. Sestavljena je iz posode, ki je pod pritiskom, v kateri se nahaja posoda za injekcijsko mešanico. Valj z merilno skalo je s prožno cevjo povezan s posodo ter z merilno iztočno menzuro.



Slika 12: Naprava za preizkus sposobnosti injektiranja, v ozadju injektiran kamnit zid

Pred preiskavo pripravimo granuliran material ustreznih frakcij. Na spodnjem delu valja najprej namestimo gumijasti zamašek, povezan s prožno cevjo, in mrežico z odprtinami 0,5 mm. Nato vanj nasujemo granuliran material do višine 360 mm. Pripravimo dva valja z enakimi frakcijami in sicer za preizkus v suhem in mokrem mediju. Nato se namestita mrežica in prožna cev z gumijastim zamaškom še na zgornjem delu. Tako pripravljen valj stehtamo. V primeru mokrega granuliranega materiala ga stehtamo šele, ko skozenj pod pritiskom spustimo 200 g vode. Nadaljujemo z injektiranjem. Valj pritrdimo nad posodo na določeni standardizirani višini, v katero vlijemo 500 g sveže pripravljene injekcijske mešanice. Le to zapremo in nanjo pritrdimo prožno cev spodnjega dela valja. Z ventilom za regulacijo pritiska dovedemo stisnjen zrak in v posodi ustvarimo pritisk. Spremljamo časovno prodiranje mešanice skozi valj. Ko mešanica doseže spodnji del valja, začnemo meriti čas, ki je potreben, da dosežemo posamezne določene nivoje in sicer na 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm in 350 mm. Injektiramo toliko časa dokler se valj popolnoma ne zapolni in merilno iztočno posodo napolni do 20 ml. Po končanem postopku injektiranja valj z obema prožnima cevema ponovno stehtamo. Vsebnost mešanice v valjih dobimo iz razlike tehtanih mas.

Za vsak test izrišemo krivuljo injektibilnosti:

$$h = f(t)$$

kjer je:

h ...višina določenega nivoja [mm]

t ...čas, ki je potreben za doseg določenega nivoja [s]

Valj, napolnjen z granuliranim materialom, simulira stanje v jedru kamnitih zidov. Uporabili smo drobljen omet frakcij 0/1, 1/2 in 2/4 mm, ki se je izkazal kot visoko porozen material. Pri omočenju je vpil veliko količino vode.

Pri injektiranju apnenih injekcijskih mas, kljub izredno nizkemu času pretočnosti, žal nismo prišli do želenih rezultatov. Mešanica A1(46) se je izkazala kot pregosta, dosegla je samo spodnji nivo valja. Nadaljevali smo z mešanico A1(52). Najprej smo valj napolnili z drobljenim ometom frakcije 2/4 mm. Pri tem se je masa v valju v suhem mediju ustavila na 180 mm. V primeru omočenega drobljenega ometa je masa prešla čez celoten valj prehitro, da bi merili čas in se je končna menzura napolnila do 32 ml, kot prikazuje Slika 13. Nato smo poskusili sestaviti takšne frakcije omočenega drobljenega ometa, ki bi omogočil počasnejši prehod injekcijske mešanice skozi omočen granuliran material. Kombinirali smo frakcije 0/1, 1/2 in 2/4 mm. Tokrat je mešanica prišla samo do 90 mm višine valja. Podoben rezultat smo dobili tudi v primeru mešanih frakcij 1/2 in 2/4 mm z večjim deležem frakcije 2/4 mm. Razlika je bila le v izmerjenih časih. S podobnimi težavami smo se srečali tudi pri mešanici A3(42). Po rezultatih se je le malo razlikovala od mešanice A1(52). Pri mešanici A2(36) z omočenim drobljenim ometom frakcije 2/4 mm je prav tako bil prehitro prehod skozi valj, kar je posledica segregacije mešanice, na dnu posode je ostala gosta zmes.



Slika 13: Injektiranje mešanice A1(52) skozi omočen drobljen omet

Težave so se pojavile tudi pri omočenju suhega granuliranega materiala, nastale so votline med zrnji.

Za nadaljnje preiskave sposobnosti injektiranja bi bilo najprej potrebno ugotoviti primerno sestavo granuliranega materiala v valjih, poizkusili bi lahko tudi z mleto opeko. Na podlagi opravljenih začetnih raziskav sposobnosti injektiranja na apnenih mešanicah A1, A2 in A3 smo prišli do zaključka, da je potrebno prilagoditi in oblikovati s pomočjo dodatkov takšne injekcijske mešanice, ki bodo zadovoljile merjen čas pretočnosti skozi valj napolnjen z določeno frakcijo. Prav tako bi bilo smiselno uporabiti za zapolnitev valja soroden material, ki ga najdemo v gradniku zidu. Pri konstrukcijskem injektiranju se pogosto za odpraševanje finih delcev in nečistoč v zidovje s spiranjem preko vgrajenih injekcijskih nastavkov vnese določena količina vode. Zato bi bila morda smiselna uporaba granuliranega materiala večjih frakcij ($\geq 2/4$ mm).

6 ZAKLJUČEK

V sklopu diplomskega dela smo analizirali vpliv kemijskih in mineralnih dodatkov na lastnosti apnenih in kombiniranih apneno cementnih injekcijskih mešanica. Najpomembnejši omejitvi za ustreznost sveže injekcijske mešanice sta bili kriterij pretočnosti in kriterij izločanja vode.

Preiskane apnene injekcijske mešanice imajo nižje čase pretočnosti vendar večje izločanje vode, kot preiskane apneno cementne injekcijske mešanice z večjim deležem cementa. Njihove pomanjkljivosti se kažejo pri izrazitem krčenju in razmeroma majhni sposobnosti zadrževanja vode. Vredno je omeniti tudi upočasnjeno strjevanje mešanic na osnovi hidratiziranega apna v komorah, ki ponazarjajo stanje v jedru zidov. Po pričakovanju imajo apneno cementne injekcijske mešanice z večjim deležem cementa večjo prostorninsko maso in višjo tlačno trdnost.

Za nadaljnjo raziskovalno delo injekcijskih mas na osnovi apnenega veziva bi bila primerna izhodiščna mešanica, ki vsebuje mineralni dodatek tuf. Za optimalno injekcijsko maso je namreč potrebno ugotoviti ustrezno razmerje materialov, predvsem bi bilo potrebno prilagoditi delež superplastifikatorja in količine uporabljene vode. Smiselno bi bilo zmanjšati količino uporabljenega polikarboksilatnega superplastifikatorja.

Pri apneno cementnih injekcijskih mešanica je izločanje vode ustrezalo kriteriju, vendar je prišlo do razmešanja težjih delcev. Z uporabo kombinacije polikarboksilatnega superplastifikatorja in stabilizatorja ter z uporabo polifosfonatnega superplastifikatorja smo dobili stabilno injekcijsko mešanico. Superplastifikator na osnovi polifosfonatnih polimerov, ki ga še sicer ni na tržišču, naj bi s svojim delovanjem na praškaste delce znižal viskoznost in istočasno povečal napetost na meji tečenja ter na ta način povečal stabilnost mešanice. Izkazal je dober potencial pri uporabi v apneno cementnih injekcijskih mešanica, zato bi lahko njegov vpliv preverili tudi pri apnenih injekcijskih mešanica.

Pri preizkušanju sposobnosti injektiranja apnenih injekcijskih mešanic smo bili žal neuspešni. Potrebno bi bilo prilagoditi frakcijo uporabljenega agregata stanju, ki ga najdemo v zidovju kamnitih stavb in na podlagi tega nato oblikovati injekcijsko mešanico, ki bi zadostovala ustreznim kriterijem sposobnosti injektiranja. Vendar je to le ena od preskusnih metod, ki pripomore k oblikovanju ustrezne injekcijske mešanice za konstruktivno injektiranje kamnitih zidanih stavb.

Za interpretacijo rezultatov delovanja različnih dodatkov pri različnih kombinacijah materialov bi bilo potrebno poznavanje kemije in reologije.

VIRI

- [1] Uranjek, M. 2008. Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek): 166 str.
- [2] Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.
- [3] Petan, S. 2002. Uporaba kamene moke kot dodatnega praškastega materiala za izdelavo samozgoščevalnih betonov iz drobljenega kamenega agregata. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Petan): 109 str.
- [4] Baglioni, P., Dei, L., Pigué., Sarti, G., Ferroni E. 1997. New autogenous lime-based grouts used in the conservation of lime-based wall paintings. *Studies in Conservation*, Vol. 42, No.2: 43–47
- [5] Arrigler, A. 2013. Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Arrigler): 164 str.
- [6] Katalog izdelkov Calcit. 2013.
http://www.calcit.si/fileadmin/templates/calcit/slo/proizvodi/images/Katalog_izdelkov_Calcit.pdf (Pridobljeno 1.9.2013.)
- [7] SIST EN 445:2008. Injekcijska masa za prednapete kable: preskusne metode.
- [8] Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek): 261 str.
- [9] SIST EN 1015-6:1999. Metode preskušanja zidarskih malt – 6. del: Ugotavljanje prostorninske mase sveže malte.
- [10] SIST EN 1015-3:1999. Metode preskušanja zidarske malte – 3. del: Določevanje konsistence sveže malte.
- [11] PSIST prEN 1015-8:2001. Metode preskušanja zidarske malte – 8. del: Določevanje zadrževanja vode sveže malte.
- [12] SIST EN 1015-11:2001. Metode preskušanja zidarskih malt – 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.
- [13] Gašperič, N. 2013. Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Gašperič): 74 str.

- [14] SIST EN 1771:2004/AC:2005. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Ugotavljanje sposobnosti za injektiranje in preskus razcepitve.