

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:

Rojc, K., 2015. Priprava injekcijskih mešanic na osnovi dolomitnega polnila za kamnite zidove. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorica Štukovnik, P.): 83 str.

Datum arhiviranja: 09-09-2015

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:

Rojc, K., 2015. Priprava injekcijskih mešanic na osnovi dolomitnega polnila za kamnite zidove. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V., co-supervisor Štukovnik, P.): 83 p.

Archiving Date: 09-09-2015

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GRADBENIŠTVO
GRADBENE KONSTRUKCIJE**

Kandidat:

KRISTJAN ROJC

**PRIPRAVA INJEKCIJSKIH MEŠANIC NA OSNOVI
DOLOMITNEGA POLNILA ZA KAMNITE ZIDOVE**

Magistrsko delo št.: 9/II.GR

**THE PREPARATION OF INJECTION GROUTS BASED
ON DOLOMITE FILLER FOR STONE MASONRY
WALLS**

Graduation – Master Thesis No.: 9/II.GR

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. dr. Petra Štukovnik

Ljubljana, 03. 09. 2015

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Kristjan Rojc izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom "Priprava injekcijskih mešanic na osnovi dolomitnega polnila za kamnite zidove".

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

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

Ljubljana, 28. 8. 2015

Kristjan Rojc

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.53:022.2:(043.3)
Avtor:	Kristjan Rojc
Mentor:	izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Somentorica:	asist. dr. Petra Štukovnik
Naslov:	Priprava injekcijskih mešanic na osnovi dolomitnega polnila za kamnite zidove
Obseg in oprema:	83 str., 40 pregl., 49 sl., 23 graf.
Ključne besede:	apnene injekcijske mešanice, injektiranje, dolomitna moka, preiskave injekcijskih mešanic

Izvleček

V magistrski nalogi je predstavljena priprava injekcijskih mešanic na osnovi dolomitnega polnila z različnimi mineralnimi vezivi za injektiranje kulturnozgodovinskih objektov. Pripravili in testirali smo injekcijske mešanice, ki so kompatibilne s sestavinami kamnitih zidov kulturne dediščine. Magistrska naloga je eksperimentalne narave in je v celoti zasnovana v obliki različnih preiskav svežih in strjenih injekcijskih mešanic na cilindričnih preizkušancih in standardnih prizmah. Injekcijske mešanice smo pripravili na osnovi hidratiziranega apna, apna z dodatkom tufa ter apna z dodatkom cementa. Kot polnilo smo uporabili dolomitno moko. Ustreznost sveže injekcijske mešanice smo preverili na podlagi testov pretočnosti in izločanja vode. Izkazalo se je, da le apneno – cementni mešanici ustrezata kriterijema, pri ostalih pa smo imeli težavo s prekomernim izločanjem vode. V različnih časovnih obdobjih (35, 70 in 105 dni) smo na cilindričnih preizkušancih in standardnih prizmah izvajali preiskave strjenih injekcijskih mešanic. Prizme smo izpostavili različnim pogojem staranja na zraku, pri povišani temperaturi v NaOH raztopini in v zaprtih plastičnih posodah. Na osnovi rezultatov tlačne in upogibne trdnosti prizem smo sklepali, da se je razvila alkalno-karbonatna reakcija med dolomitnim polnilom in mineralnim vezivom na vzorcih izpostavljenih NaOH raztopini. Najvišje vrednosti tlačne in upogibne trdnosti smo dobili na apneno – cementnih vzorcih. Na valjih in prizmah smo s fenolftaleinskim testom spremljali stopnjo karbonatizacije, ki je bila najbolj intenzivna na prizmah. V jedru valjev je zaradi omejenega dotoka zraka za časa staranja preskušancev, potek karbonatizacije dolgotrajen. Dejstvo je, da pri injektiranju apnenih mešanic, le-te imajo pomanjkljivost počasnega strjevanja v zaprtih prostorih ter manjše trdnostne karakteristike v primerjavi s čistimi cementnimi mešanicami. V tem kontekstu, apneno-cementne mešanice imajo določeni potencial. Namen opravljenih raziskav je postaviti osnovo za nadaljnje raziskave apnenih injekcijskih mešanic na osnovi hidratiziranega apna in dolomitnega polnila.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALIST INFORMATION

UDC: 691.53:022.2:(043.3)
Author: Kristjan Rojc
Supervisor: Assoc. Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph. D.
Cosupervisor: Assist. Petra Štukovnik, Ph. D.
Title: The preparation of injection grouts based on dolomite filler for stone masonry walls
Scope and tools: 83 p., 40 tab., 49 fig., 23 graph.
Keywords: lime-based injection grouts, grouting, dolomite flour, tests of injection grouts

Abstract

The objective of the presented master's thesis is the preparation of grout mixtures on the basis of dolomite filling with different mineral binders for the grouting of cultural and historic heritage buildings. Grout mixtures, which are compatible with the ingredients of existing stone walls of heritage objects were prepared and tested. The master's thesis serves experimental purposes and is fully based on different investigations of fresh and hardened injection mixtures on cylindrical test objects and standard prisms. The prepared grout mixtures were based on hydrated lime, lime with added tuff as well as lime and cement. Dolomite flour was used as filling material. The adequacy of the fresh injection mixture was tested according to flow properties and water release. It has been proven that only the lime and cement mixture conforms both criteria, whereas other mixtures showed excessive water release. Hardened injection mixtures were tested on cylindrical test objects and standard prisms in different time frames (35, 70 and 105 days). The prisms were exposed to different ageing conditions on air, at elevated temperature in the NaOH solution and in closed plastic containers. According to the results of compressive and tensile strength testing, it can be assumed that alkali-carbonate reaction developed between the dolomite filling and the mineral binder on test subjects exposed in the environment of NaOH solution. The highest levels of compressive and tensile strength were achieved using the lime-cement test objects. The phenolphthalein test on cylinders and prisms was used to determine the level of carbonization, which was the most intensive on prisms. Due to the limited air intake during the ageing of test specimens, the process of carbonization in the core of the cylinder is a long-term one. The fact is that when injecting the lime mixtures, their weak point is that the process of solidifying in closed spaces is slow and that their obtained strengths are lower compared to the pure cement mixtures. However, the lime-cement mixtures have a certain potential. The purpose of conducted research is to prepare the solid grounds for further research of lime injection mixtures on the basis of hydrated lime and dolomite filling.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Vlatku Bosiljkovu in somentorici asist. dr. Petri Štukovnik za strokovno pomoč in nasvete, ki so mi bili v veliko pomoč pri izdelavi magistrske naloge.

Zahvaljujem se inž. Franciju Čeponu in Boštjanu Jursinoviču univ. dipl. inž. grad. za pomoč pri laboratorijskem delu magistrske naloge.

Iskrena hvala tudi očetu Aleksandru, mami Nives, sestri Karin in puncu Marini, ki so tekom študija verjeli vame, me spodbujali ter mi vlivali voljo in moč.

Hvala tudi vsem ostalim, ki ste mi vsa ta leta stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	IV
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALIST INFORMATION.....	VI
ZAHVALA.....	VII
1 UVOD	1
1.1 Namen magistrske naloge	3
1.2 Metode dela.....	3
2 UPORABLJENI MATERIALI.....	5
2.1 Sestave injekcijske mešanice	5
2.1.1 Veziva.....	5
2.1.1.1 Apno	5
2.1.1.2 Tuf	6
2.1.1.3 Cement.....	6
2.1.2 Voda – potreba po vodi	7
2.1.3 Polnilo.....	7
2.1.4 Dodatki	9
2.2 Cilindrični preizkušanci – kamniti valji	10
2.2.1 Sestava kamnitih valjev – agregat ("istrski peščenjak").....	10
3 STANDARDNE PREISKAVE INJEKCIJSKIH MEŠANIC.....	12
3.1 Opis standardnih preiskav sveže injekcijske mešanice	12
3.1.1 Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice	12
3.1.2 Pretočnost	13
3.1.3 Izločanje vode.....	13
3.2 Opis standardnih preiskav strjenje injekcijske mešanice na prizmah in valjih	14
3.2.1 Prostorninska masa strjene injekcijske mešanice	14
3.2.2 Tlačna trdnost prizem	15
3.2.3 Upogibna natezna trdnost prizem	15
3.2.4 Tlačna trdnost valjev	16
3.2.5 Cepilna natezna trdnost valjev.....	17
4 PRELIMINARNE PREISKAVE SVEŽIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC.....	18
4.1 Priprava injekcijskih mešanic	19
4.2 Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M1.....	20
4.3 Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M2.....	23
4.4 Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M3.....	26

4.5	Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M4	29
4.6	Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M5	32
4.7	Povzetek svežih injekcijskih mešanic	33
4.8	Nestandardna preiskava izločanja vode iz sveže injekcijske mešanice M1/6.....	33
4.8.1	Standardni test vpijanje vode peščenjaka	35
5	PRIPRAVA IN INJEKTIRANJE CILINDRIČNIH PREIZKUŠANCEV IN PRIZEM..	36
5.1	Priprava cilindričnih preizkušancev – kamniti valji	36
5.2	Injektiranje cilindričnih preizkušancev	38
5.3	Rezultati preiskav izbranih svežih injekcijskih mešanic.....	40
5.3.1	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M1/6	40
5.3.2	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M2/7	41
5.3.3	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M3/9	42
5.3.4	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M4/8 in M5/5.....	43
6	ANALIZA REZULTATOV PREISKAV STRJENIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC	45
6.1	Analiza rezultatov preiskav prizem	45
6.1.1	Prostorninska masa strjenih injekcijskih mešanic	45
6.1.2	Krčenje prizem	47
6.1.3	Tlačna trdnost prizem.....	48
6.1.3.1	Tlačna trdnost prizem sušenih na zraku	49
6.1.3.2	Tlačna trdnost prizem pri pospešenih pogojih staranja	50
6.1.3.3	Tlačna trdnost prizem zaprtih v plastičnih posodah	52
6.1.3.4	Diskusija.....	53
6.1.4	Upogibna natezna trdnost prizem.....	55
6.1.4.1	Upogibno natezna trdnost prizem sušenih na zraku	56
6.1.4.2	Upogibno natezna trdnost prizem pri pospešenih pogojih staranja	57
6.1.4.3	Upogibno natezna trdnost prizem zaprtih v plastičnih posodah.....	58
6.1.4.4	Diskusija.....	59
6.1.5	Stopnja karbonatizacije standardnih prizem (fenoltaleinski test)	61
6.1.5.1	Stopnja karbonatizacije standardnih prizem sušenih na zraku	61
6.1.5.2	Stopnja karbonatizacije standardnih prizem pri pospešenih pogojih staranja	62
6.1.5.3	Stopnja karbonatizacije standardnih prizem zaprtih v plastičnih posodah.....	63
6.1.5.4	Diskusija.....	63
6.2	Analiza rezultatov preiskav cilindričnih vzorcev	64
6.2.1	Razkalupljenje cilindričnih vzorcev	64
6.2.2	Tlačna trdnost valjev	64
6.2.2.1	Grafi sila – pomik pri tlačni obremenitvi	68
6.2.3	Cepilna natezna trdnost valjev	73

6.2.3.1	Graf sila – pomik pri cepilni obremenitvi.....	74
6.2.4	Stopnja karbonatizacije cilindričnih preizkušancev (fenolftaleinski test)	76
7	ZAKLJUČEK	78
VIRI	80

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kemijske lastnosti apna.....	6
Preglednica 2: Kemijske lastnosti tufa	6
Preglednica 3: Kemijske lastnosti CEM I in CEM II/B-M	6
Preglednica 4: Fizikalne lastnosti peščenjaka iz kamnoloma Jelarji (Slovenski naravni kamen, 1999)	11
Preglednica 5: Povzetek sestav (komponent) injekcijskih mešanic	20
Preglednica 6: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M1 (21. 1. 2015).....	20
Preglednica 7: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M1 (9. 3. 2015).....	21
Preglednica 8: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M2 s superplastifikatorjem A (2. 2. 2015)	23
Preglednica 9: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M2 s superplastifikatorjem B (2. 2. 2015).....	24
Preglednica 10: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M2 (9. 3. 2015).....	25
Preglednica 11: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M3 (3. 2. 2015).....	26
Preglednica 12: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M3 (4. 2. 2015).....	27
Preglednica 13: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M3 (3. 3. 2015).....	28
Preglednica 14: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M4 (12. 2. 2015).....	30
Preglednica 15: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M4 (16. – 17. 2. 2015).....	30
Preglednica 16: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M5 (18. 3. 2015).....	32
Preglednica 17: Sestave in rezultati preiskav svežih injekcijskih mešanic M1, M2, M3, M4 in M5	33
Preglednica 18: Izločanje vode iz injekcijske mešanice brez (levo) in s peščenjakom (desno).....	34
Preglednica 19: Rezultata vpivanja vode WA ₂₄ za sivo-modri (levo) in rjav peščenjak (levo).....	35
Preglednica 20: Primerjava povprečnih rezultatov injekcijskih mešanic v cilindričnih preizkušancih	39
Preglednica 21: Rezultati sveže injekcijske mešanice M1/6 (30. 3. 2015)	40
Preglednica 22: Rezultati sveže injekcijske mešanice M2/7 (31. 3. 2015)	42
Preglednica 23: Rezultati sveže injekcijske mešanice M3/9 (1. 4. 2015)	42
Preglednica 24: Rezultati sveže injekcijske mešanice M4/8* in M5/5 (2. – 3. 4. 2015).....	43
Preglednica 25: Primerjava povprečnih prostorninske mase in koeficient variacije strjene injekcijske mešanice v dveh časovnih obdobjih (35 in 70 dni)	46
Preglednica 26: Primerjava krčenja in potrebe po vodi pri injekcijskih mešanicah po 35 dneh.....	48
Preglednica 27: Rezultati povprečne tlačne trdnosti prizem sušenih na zraku (35, 70 in 105 dni).....	49
Preglednica 28: Poprečni rezultati tlačne trdnosti prizem v NaOH raztopini za časovni obdobji 70 in 105 dni.....	51
Preglednica 29: Povprečne tlačne trdnosti prizem zaprtih v plastičnih posodah brez CO ₂	52

Preglednica 30: Rezultati povprečne upogibno natezne trdnost prizem sušenih na zraku v treh časovnih obdobjih.....	56
Preglednica 31: Rezultati poprečne upogibne natezne trdnosti prizem izpostavljenih pospešenim pogojem staranja v NaOH raztopini za časovni obdobji 70 in 105 dni	57
Preglednica 32: Povprečne upogibno natezne trdnosti prizem zaprtih v plastičnih posodah brez CO ₂	58
Preglednica 33: Rezultati povprečne tlačne trdnosti valjev v treh časovnih obdobjih	67
Preglednica 34: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M1	69
Preglednica 35: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M2.....	70
Preglednica 36: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M3.....	71
Preglednica 37: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M4.....	72
Preglednica 38: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M5.....	73
Preglednica 39: Rezultati cepilne natezne trdnosti za valja M4 in M5	74
Preglednica 40: Maksimalni sili in pomika cepilno nateznih preizkav valjev M4 in M5	75

KAZALO SLIK

Slika 1: Tipični prerezi zidanih stavb: enoslojni (levo), dvoslojni (sredina) in troslojni (desno) zid (http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CIHC1_071_Da%20Porto%20F.pdf).....	1
Slika 2: Različni dolomitni moki (rjava in bela dolomitna moka).....	8
Slika 3: Superplastifikator A (levo) in B (desno).....	10
Slika 4: Rjav in svetlo-siv peščenjak (levo) in plasti peščenjaka – fliša (desno).....	11
Slika 5: Določanje prostorninske mase – tehtanje prazne posode (levo) in tehtanje posode z injekcijsko mešanico (desno).....	12
Slika 6: Dimenzije lijak (levo) in merjenje pretočnosti injekcijske mešanice (sredina in desno).....	13
Slika 7: Meritve izločanja vode iz injekcijskih mešanic.....	14
Slika 8: Zasnova preizkusa tlačne trdnosti (levo) in preizkus tlačne trdnosti (sredina in desno).....	15
Slika 9: Zasnova preizkusa upogibne natezne trdnosti.....	16
Slika 10: Prikaz preizkusa upogibne natezne trdnosti pred začetkom (levo) in po končanem preizkusu (desno).....	16
Slika 11: Zasnova preizkusa (levo) in prikaz preizkusa tlačne trdnosti preizkušanca M2-8 (desno).....	17
Slika 12: Zasnova preizkusa (levo) in prikaz preizkusa cepilne natezne trdnosti preizkušanca M4-19 (desno).....	17
Slika 13: Mešalec RILEM-CEM z mešalno posodo in lopaticami (levo) in tehnica s pladnjem rjave dolomitne moke (desno).....	19
Slika 14: Mešanica dolomitne moke in apna z grudicami (levo) pred in po sejanju skozi sito velikosti 0,5 mm (desno).....	21
Slika 15: Izločanje vode iz injekcijske mešanice M1/4 – 2,1 % pred (levo) in po poteku treh ur (desno) ter iz injekcijske mešanice M1/6 – 3,7 % pred (levo) in po poteku treh ur (desno).....	22
Slika 16: Izločanje in nabiranje vode na kalupu (levo) in prizme apnene injekcijske mešanice M1 (desno).....	22
Slika 17: Izločanje vode iz injekcijske mešanice M2/2 – 2,1 % , M2/5 – 2,6 % in M2/7 – 3,2 % pred (levo) in po poteku treh ur (desno).....	25
Slika 18: Viskozna obloga injekcijske mešanice M3 (levo), komponente injekcijske mešanice (sredina) in izločanje vode M3/8 – 3,1 % (desno).....	27
Slika 19: Izločanje vode iz mešanice M3/9 – 4,2 % pred (levo) in po poteku treh ur (desno).....	28
Slika 20: Izrazito krčenje (levo) in pojav izločanja soli iz injekcijske mešanice M3 (desno).....	29
Slika 21: Efekt izločanja vode v mešalni posodi (levo) in na mešalnih lopatkah (sredina) ter izločanje vode M4/8 – 1,05 % (desno).....	31
Slika 22: Minimalno izločanje vode iz kalupu (levo) in apnenno-cementne injekcijske prizme M4 (desno).....	31

Slika 23: Izločanje vode po 3 urah iz mešanice M1/6 brez peščenjaka – 2,5 % (levo) in s peščenjakom – 1,0 % (desno).....	34
Slika 24: Sestavljanje in pripravljanje valjev za injektiranje.....	36
Slika 25: Drobljenje peščenjakov s pomočjo kladiva (levo) in preše (desno).....	37
Slika 26: Sejalna analiza peščenjaka – frakcija 45/63, 32/45, 16/32 in 8/16 (od desne proti levi)	37
Slika 27: Prikaz postopnega 1/3 polnjenja cilindričnega valja s frakcijami peščenjaka.....	38
Slika 28: Pripravljeni cilindrični vzorci za injektiranje.....	38
Slika 29: Injektiranje cilindričnih valjev in polnjenje standardnih kalupov za prizme	39
Slika 30: Določanje prostorninske mase M1/6 (levo), težava z izločanjem vode iz standardnih kalupov (sredina) in posedanje injekcijske mešanice (desno).....	41
Slika 31: Prikaz priprave injekcijske mešanice M2/7 v mešalni posodi.....	41
Slika 32: Krčenje injekcijske mešanice M2/7 v cilindričnih preizkušancih.....	42
Slika 33: Krčenje injekcijskih prizem (levo), krčenje injekcijske mešanice v valju (sredina) in posedanje injekcijske mešanice ter izločanje soli (desno).....	43
Slika 34: Valja injekcijske mešanice M4/8* (levo) in izločanje vode iz injekcijske mešanice M5/5 (desno)	44
Slika 35: Krčenje prizem injekcijskih mešanic M1 (levo), M3 (sredina) in M5 (desno)	47
Slika 36: Zbrane prizme M1, M2, M3, M4 in M5 (levo), razpokana prizma M3 (zgoraj desno) in določanje dimenzij s pomočjo kljunastega merila (spodaj desno)	47
Slika 37: Časovni potek stopnje karbonatizacije	62
Slika 38: Stopnja karbonatizacije za vzorce v NaOH po 105 dneh	63
Slika 39: Stopnja karbonatizacije vzorcev zaprtih v posode po 105 dneh.....	63
Slika 40: Primerjava cilindričnih vzorcev M5, M4, M3, M2 in M1 (od leve proti desni)	64
Slika 41: Časovni potek tlačnega preizkusa valja M2.....	65
Slika 42: Časovni potek tlačnega preizkusa valja M3.....	65
Slika 43: Časovni potek tlačnega preizkusa valja M4.....	66
Slika 44: Porušitev valja M3 po vezivu (levo) in valja M5 po vezivu ter materialu (sredina in desno) 66	
Slika 45: Časovni potek cepilnega nateznega preizkusa valja M4-9.....	75
Slika 46: Časovni potek cepilnega nateznega preizkusa valja M5-23.....	75
Slika 47: Potek karbonatizacije valja M2 (levo in desno zgoraj) in M4 (sredina in desno spodaj) – 35 dni.....	76
Slika 48: Potek karbonatizacije jedra valja M1 (levo) in M2 (desno) ter 1 cm karbonatiziranega zunanega plašča valja M1 (sredina) – 70 dni	76
Slika 49: Potek karbonatizacije jedra valja M2 (levo) in M4 (desno) ter 1,5 cm karbonatiziranega zunanega plašča valja M4 (sredina) – 105 dni	77

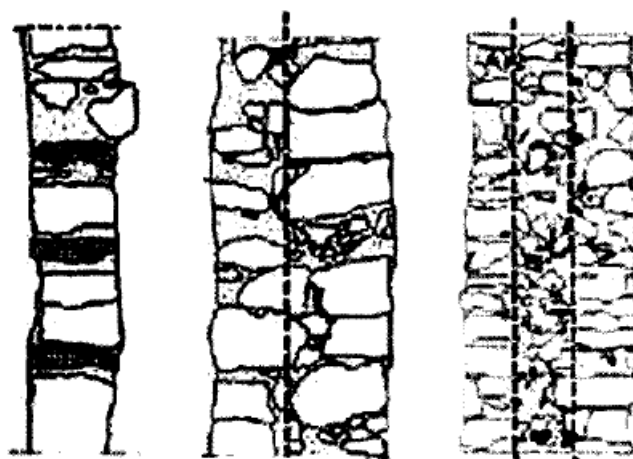
KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Praškovna difrakcijska rentgenska analiza vzorca bele dolomitne moke	8
Grafikon 2: Praškovna difrakcijska rentgenska analiza vzorca rjave dolomitne moke rjave.....	9
Grafikon 3: Primerjava rezultatov deleža injekcijskih mešanic s standardnim odklonom.....	40
Grafikon 4: Primerjava povprečnih prostorninskih mas v dveh časovnih obdobjih (35 in 70 dni)	46
Grafikon 5: Rezultati krčenja injekcijskih mešanic po 35 dneh.....	48
Grafikon 6: Primerjava rezultatov povprečnih tlačnih trdnosti za prizme sušene na zraku (35, 70 in 105 dni)	50
Grafikon 7: Povprečna tlačna trdnost za prizme v NaOH raztopini za časovni obdobji 70 in 105 dni..	51
Grafikon 8: Povprečna tlačnih trdnosti prizem zaprtih v plastičnih posodah za časovno obdobje 105 dni.....	53
Grafikon 9: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti prizem v treh različnih okoljih in treh časovnih obdobjih.....	54
Grafikon 10: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti prizem sušenih na zraku, izpostavljenih pospešenim pogojem staranja in zaprtih v plastičnih posodah za časovno obdobje 105 dni	55
Grafikon 11: Primerjava rezultatov povprečne upogibno naterzne trdnosti za prizme sušene na zraku za časovna obdobja 35, 70 in 105 dni	57
Grafikon 12: Primerjava rezultatov povprečnih upogibno natezne trdnosti za prizme negovane v NaOH raztopini pri povišani temperaturi za časovni obdobji 70 in 105 dni.....	58
Grafikon 13: Povprečna upogibna natezna trdnosti prizem zaprtih v plastičnih posodah za časovno obdobje 105 dni.....	59
Grafikon 14: Primerjava povprečno upogibno nateznih trdnosti prizem v treh različnih okoljih in treh časovnih obdobjih	60
Grafikon 15: Primerjava povprečnih upogibno nateznih trdnosti prizem sušenih na zraku, izpostavljenih pospešenim pogojem staranja in zaprtih v plastičnih posodah za časovno obdobje 105 dni.....	61
Grafikon 16: Primerjava rezultatov povprečnih tlačnih trdnosti valjev za časovna obdobja 35, 70 in 105 dni.....	68
Grafikon 17: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M1 v dveh časovnih obdobjih.....	69
Grafikon 18: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M2 v treh časovnih obdobjih	70
Grafikon 19: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M3 v treh časovnih obdobjih	71
Grafikon 20: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M4 v treh časovnih obdobjih	72
Grafikon 21: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M5 v dveh časovnih obdobjih.....	73
Grafikon 22: Primerjava rezultatov cepilne natezne trdnosti valja M4 in M5 za obdobje 70 dni.....	74
Grafikon 23: Sila – pomik pri cepilni natezni preiskavi valja M4 in M5.....	75

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

V starih mestnih jedrih je veliko objektov grajenih iz kamna oziroma mešanice kamna in opeke. Stavbe so v večini primerov zgrajene troslojno iz zunanjšega in notranjšega sloja iz delno oblikovanih in klesanih večjih kamnov ter vmesnega dela nasutega z drobirjem, medtem ko so tanjši zidovi zgrajeni dvoslojno z zunanjim in notranjim slojem ali enoslojno (Slika 1: da Porto in sod., 2003). Pri gradnji so za vezivo uporabljali apnene malte (Uranjek, 2008). Zidane stavbe so potresno zelo ranljive, saj je težko zagotoviti ustrezne potresne odpornosti objekta kot celote. Masivni zidovi dobro prenašajo vertikalne obremenitve, težava se pojavi pri horizontalnih obremenitvah. V zadnjih desetletjih je bilo na področju utrditve in sanacije obstoječih zidanih stavb narejenih veliko študij (Arrigler, A. 2013, Uranjek, M. 2008, Uranjek, M. 2011, Križnar, M., Cotič, P., in Bosiljkov, V. 2012 itd.), s katerimi lahko starim stavbam zagotovimo potresno odpornost. Za utrjevanje zidanih stavb uporabljamo različne tehnike na materialnem nivoju, kot so delno refugiranje malte v fugah, izvedba armiranih ometov, uporaba kompozitnih materialov z vlakni in sistematično injektiranje (Popivić, 2007) oziroma na konstrukcijskem nivoju vgradnja protipotresnih jeklenih vezi in sidranja ter povezovanja etažnih konstrukcij. Zaradi votlikavosti kamnitih zidov (vmesni del troslojnega zida) je mogoče mehanske lastnosti zidanih stavb izboljšati s postopkom sistematičnega injektiranja. Metoda ni učinkovita pri utrjevanju zidov, kjer je prispevek votlin v zidu manjši od 4 % (Penazzi in sod., 2001 povzeto po Uranjek, 2008).



Slika 1: Tipični prerezi zidanih stavb: enoslojni (levo), dvoslojni (sredina) in troslojni (desno) zid

(http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CIHC1_071_Da%20Porto%20F.pdf)

Sistematično injektiranje je vtiskovanje tekoče suspenzije v delno votel zid, s katerim se doseže ustrezna povezanost med posameznimi kamni in sloji zidu oziroma poveča homogenost zidovine.

Injektiranje je proces, s katerim le delno posežemo na zunanje vidne dele zidu, kar je bistvenega pomena pri utrjevanju kulturnozgodovinskih objektov (Uranjek, 2008).

Za injektiranje se uporabljajo apnene, cementne in polimerne ter kombinirane injekcijske mešanice, sestavljene iz apna, pucolanov in cementa. Na tržišču so v največji meri prisotne injekcijske mase na osnovi cementa in apnenno-cementne mešanice.

Za kulturnozgodovinske objekte, kjer se je kot vezivo uporabljalo apno (apnena malta), je najprimernejša uporaba historičnih materialov oziroma uporaba injekcijske mešanice na osnovi apna, saj se s tem v kamnit zid ne vnesejo novi nekompatibilitetni materiali. Problematično je predvsem v primeru, kadar so na zidovju freske, saj lahko pride do poškodb oziroma negativnih vplivov (Uranjek, 2008). Mehanske lastnosti apnenih injekcijskih mešanic so v primerjavi s cementnimi nižje. Pri obnovi kulturno zaščitenih objektih je temeljni princip konservatorske teorije avtentičnost gradiva (Vintzileou, E. in Miltiadou-Fezans, A. 2008 povzeto po Arrigler, 2013). Danes so na voljo različna vrsta apna oziroma materiali na bazi apna, ki povsem nadomestijo uporabo Portland cementa pri obnovi zgodovinskih stavb, zato uporaba cementa ni več potrebna (Russell, 2010). Slaba stran utrjevanja objektov z apnenimi injekcijskimi mešanicami je, da je proces karbonatizacije v zidu zelo počasen, zaradi omejenega dotoka kisika, čez karbonatizirane plasti.

Cementne injekcijske mešanice so se zaradi hitro naraščajočih trdnosti izkazale za zelo učinkovite, vendar imajo slednje pri injektiranju v zidove starih stavb tudi negativne učinke. Injekcijske mešanice na osnovi cementa predstavljajo originalni zidovini tuj material, ki ni kompatibilen z obstoječim materialom. Med njima lahko poteče kemijska reakcija, pri kateri nastanejo škodljivi produkti. Injekcijske mešanice imajo nizko sposobnost prodiranja v ozke razpoke in votline ter možnost pojava kristalizacije soli na površini ali blizu površine zidu (Vintzileou, E. in Tassios, T. P, 1995 povzeto po Arrigler, 2013). Do kristalizacije soli pride zaradi nastanka kapilarnega sistema z zapolnjevanjem praznin in votlin s kapilarno aktivnim cementnim kamnom in vode, ki potuje po zidu. Zaradi izhlapevanja vode na površini zidov se pod poroznimi in slabo sprijetimi ometi začnejo odlagati in kristalizirati soli. Posledica kristalizacije so poškodbe ometa, možne pa so poškodbe, pri katerih je ogrožena tudi stabilnost objekta. Injekcijske mešanice z vodo odbojnimi dodatki preprečujejo vlago v kamnitem zidovju, vendar pa dodatki močno zmanjšujejo trdnost strjene injekcijske mešanice (Tomažević in Apih, 1995 povzeto po Arrigler, 2013).

1.1 Namen magistrske naloge

Za zagotovitev kakovostne izvedbe utrjevanja zidanih stavb s sistematičnim injektiranjem je najpomembnejša izbira ustrezne injekcijske mešanice. V sklopu magistrske naloge smo pripravili injekcijske mešanice na osnovi hidratiziranega apna (apno, apno – tuf in apno – cement) in dolomitnega polnila. Pri uporabi hidratiziranega, zračnega apna v injekcijskih mešanicah, se pojavi težava pri strjevanju. Z raziskavami cilindričnih preizkušancev in standardnih prizem v različnih okoljih smo v časovnih obdobjih (35, 70 in 105 dni) želeli ugotoviti, kakšen je potek vezanje pripravljenih mešanic.

Apno kot vezivo smo izbrali, saj se je pri kamnitih zidovih uporabljala apnena malta, ki za vezanje potrebuje veliko časa. Slednji se ji z dodatki skrajša čas vezanja. Za vezanje malte v zidovih potrebujejo približno leto, z dodatkom tufa pa le dva meseca (Kurnjek, 2012).

1.2 Metode dela

Magistrska naloga je eksperimentalne narave in je v celoti zasnovana v obliki različnih preiskav svežih in strjenih injekcijskih mešanic. Namen opravljenih raziskav je bil postaviti osnovo za nadaljnje raziskave apnenih injekcijskih mešanic na osnovi hidratiziranega apna in dolomitnega polnila. Potek magistrske naloge je razdeljen na tri faze: preliminarnе laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice, pripravo in injektiranje cilindričnih preizkušancev ter mehanske raziskave strjene injekcijske mešanice na cilindričnih preizkušancih (kamniti valji) in standardnih prizmah.

V sklopu preliminarnih laboratorijskih raziskavah svežih injekcijskih mešanic smo določili optimalne injekcijske mešanice za injektiranje cilindričnih preizkušancev oziroma kamnitih valjev. Pripravili in testirali smo pet različnih injekcijskih mešanic. Za določitev sveže injekcijske mešanice smo upoštevali kriterija pretočnosti in izločanja vode.

V drugem delu magistrske naloge smo pripravili cilindrične preizkušance (kamnite valje), standardne kalupe za prizme in agregat. Za polnitev valjev višine 30 cm in premera 15 cm smo uporabili "istrski peščenjak", ki smo ga dobili iz kamnoloma Jelarji (Elerji). S tem smo simulirati jedro običajnega troslojnega kamnitega zidu. V zadnjem delu svežih injekcijskih mešanic smo injektirali cilindrične preizkušance ter pripravili standardne preizkušance dimenzij 40 x 40 x 160 mm³ za preverjanje mehanskih lastnosti strjenih mešanic.

V različnih časovnih obdobjih (35, 70 in 105 dni) smo izvajali preiskave strnjenih injekcijskih mešanic na cilindričnih preizkušancih (tlačna in cepilna natezna trdnost) in standardnih prizmah (tlačna in upogibna natezna trdnost, krčenje ter prostorninska masa). Del prizem smo izpostavili pospešenim pogojem staranja pri povišani temperaturi 60 °C v NaOH raztopini. Tekom preliminarnih raziskav smo prizme različnih injekcijskih mešanic zaprli v plastične posode brez dotoka svežega zraka. Z nestandardizirano preiskavo smo želeli preveriti in primerjati mehanske lastnosti standardnih prizem zaprtih v posodi, sušenih na zraku in negovanih v NaOH raztopini pri povišani temperaturi. Med preiskavami smo na valjih in prizmah s fenolftaleinskim testom spremljali stopnjo karbonatizacije.

Vse preiskave so bile izvedene v času od januarja do julija leta 2015 v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani.

2 UPORABLJENI MATERIALI

2.1 Sestave injekcijske mešanice

2.1.1 Veziva

Za pripravo injekcijskih mešanic se uporabljajo mineralna veziva, med katera uvrščamo ne-hidravlična veziva, ki se strjujejo na zraku, z ogljikovim dioksidom CO₂ in hidravlična veziva, ki se strjujejo na zraku in vodi. Med slednje uvrščamo hidravlično apno in razne cemente, med ne-hidravlična veziva pa spada gašeno – hidratizirano apno in mavec. Poleg naštetih se za pripravo injekcijskih mešanic uporablja tudi polimerna veziva (Uranjek, 2008). V magistrski nalogi smo za pripravo injekcijskih mešanic uporabili in kombinirali ne-hidravlično (hidratizirano) apno, tuf in cement.

2.1.1.1 Apno

Apno je mineralno vezivo, ki je poleg cementa najpogosteje uporabljeno vezivo v gradbeništvu. Pridobivamo ga z žganjem karbonatnih kamnin. Kot surovina se uporablja predvsem apnenec, možno pa ga je pridobivati iz marmorja in dolomita.

Glede na vrsto žgane mineralne surovine apna delimo v dve skupini:

- hidratizirano apno oziroma zračno apno je apno v prahu, ki ga pridobivamo z žganjem čistega apnenca brez primesi. Apno ne vsebuje hidravličnih komponent oziroma nima hidravličnih lastnosti, kar pomeni, da za vezanje potrebuje ogljikov dioksid CO₂. Hidratizirano apno poznamo pod imenom ne-hidravlično apno. Pridobivamo ga pri gašenju živega apna s teoretično določeno količino potrebne vode, ki je potrebna za hidratacijo (Young, 2008);
- hidravlično apno dobimo ob žganju in gašenju apnenca, ki vsebuje silikate (npr. glino), aluminate in nekatere železove okside. Pri žganju gline slednja postane reaktivna, s tem pa lahko veže v vlažnih pogojih brez ogljikovega dioksida. V stiku z vodo nastane kalcijev silikat hidrat (CSH faza), ki daje injekcijski mešanici osnovno trdnost. V primerjavi s hidratiziranim apnom imajo apnene injekcijske mešanice iz hidravličnega apna nižjo prepustnost vodne pare in poroznost, višjo tlačno trdnost in večjo odpornost na kristalizacijo soli (Young, 2008).

V sklopu magistrske naloge smo za pripravo injekcijskih mešanic uporabili hidratizirano oziroma gašeno apno v prahu, ki spada med zračna veziva. Apno za karbonatizacijo oziroma strjevanje potrebuje CO₂ iz zraka (Žarnić, 2003). V spodnji Preglednici 1 so prikazane kemijske lastnosti

uporabljenega apna, s katere lahko razberemo, da je vsebnost aktivnega CaO in MgO v apnu skoraj 95 % (Igmata d. d., 1998 povzeto po Benko, 2015).

Preglednica 1: Kemijske lastnosti apna

	Prosta voda	Žaroizguba	SiO ₂ +netopni	R ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Akt. CaO+MgO
%	0,25	26,41	1,01	0,23	69,86	1,98	0,26	94,71

2.1.1.2 Tuf

Tuf je piroklastična zelenkasta kamnina, ki jo po izvoru uvrščamo med sedimentne kamnine. Nastane ob vulkanskih izbruhih iz vulkanskega pepela, ki se useda na zemeljsko površje. Tuf spada med naravne pucolane, saj ima sposobnost vezanja. Glavne mineralne sestavine andezitnega tufa so steklasti vulkanski drobcici in zeolitni minerali (Buser, 1979). Injekcijskim mešanicam ga dodajamo zaradi hitrejšega vezanja in doseganja višjih trdnosti. V spodnji Preglednici 2 so prikazane kemijske lastnosti tufa (Štukovnik, 2015).

Preglednica 2: Kemijske lastnosti tufa

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
%	67,00	13,83	3,75	65,26	1,25	1,58	0,6	1,60

2.1.1.3 Cement

Cement je mineralno hidravlično vezivo, ki s primešano vodo prehaja v otrdelo cementno pasto ali cementni kamen. Glavna sestavina cementa je cementni klinker, ki ga pridobivamo s sintranjem laporjev in apnencev. V gradbeništvu se najpogosteje uporablja portlandski cement oziroma hidravlično vezivo klinker. V magistrski nalogi sem uporabil dve vrsti cementa, in sicer čisti portlandski cement CEM I 42,5 R in mešani portlandski cement CEM II/B-M 42,5 N. Kemijske lastnosti, ki so bile pridobljene na podlagi enega vzorca, so podane v spodnji Preglednici 3.

Preglednica 3: Kemijske lastnosti CEM I in CEM II/B-M

Cement		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
CEM I	%	21,25	5,60	2,23	60,4	3,32	0,91	0,39
CEM II/B-M	%	23,76	7,79	3,56	52,33	3,22	1,03	1,14

CEM I vsebuje minimalno 95 % Portland cementnega klinkerja in 5 % regulatorja vezanja (sadra). Specifična površina cementa je $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, medtem ko prostorninska masa zrna znaša $3,05 \text{ g}/\text{cm}^3$. CEM II/B-M vsebuje minimalno 65 % Portland cementnega klinkerja, do 35 % mešanih mineralnih dodatkov (kalcijevega elektrofilterskega pepela – W in apnenca – L) in regulatorja vezanja (sadra). Specifična površina cementa je $4070 \text{ cm}^2/\text{g}$, prostorninska masa zrna pa znaša $2,93 \text{ g}/\text{cm}^3$ (povzeto po specifikaciji slovenskega proizvajalca).

2.1.2 Voda – potreba po vodi

Za pripravo mešanic z vezivi je povsem primerna pitna voda. Slednja vsebuje drobne delce in soli, ki ustvarijo prevleke na agregatu in prekinitve med zrnca cementa. S tem bistveno vplivajo na proces hidratacije (Žarnić, 2003).

Pri injekcijskih mešanicah je pomembna ustrezna količina dodane vode oziroma vodovezivno razmerje, ki pomeni razmerje med maso dodane vode in maso veziva (apno, tuf in cement). Z večanjem vodovezivnega razmerja dosežemo dobre pretočnosti, obenem pa se injekcijskim mešanicam poslabšajo mehanske lastnosti. Slednja postane nestabilna oziroma pride do segregacije, do povečanega izločanja vode in do krčenja zaradi izhlapevanja vode. Injekcijski mešanici moramo dodati dovolj vode za doseganje ustrezne pretočnosti in sposobnosti injektiranja.

V magistrski nalogi smo uporabili izraz potreba po vodi, kar pomeni razmerje med maso dodane vode, ki jo mešanica potrebuje za doseganje ustrezne pretočnosti in maso suhe mešanice (polnilo in vezivo).

2.1.3 Polnilo

Fino mleta polnila v injekcijske mešanice dodajamo z namenom izboljšanja fizikalnih lastnosti, obenem pa pripomoremo k bolj ekonomični sestavi le-teh. Polnila v injekcijskih mešanicah zmanjšujejo pretočnosti, saj za popolno oblitje finih delcev potrebujejo večjo količino vode, obenem pa zmanjšujejo prekomerno izločanje vode in segregacijo (Atkinson, R. H. in Schuller, M. P., 1992 povzeto po Uranjek, 2008).

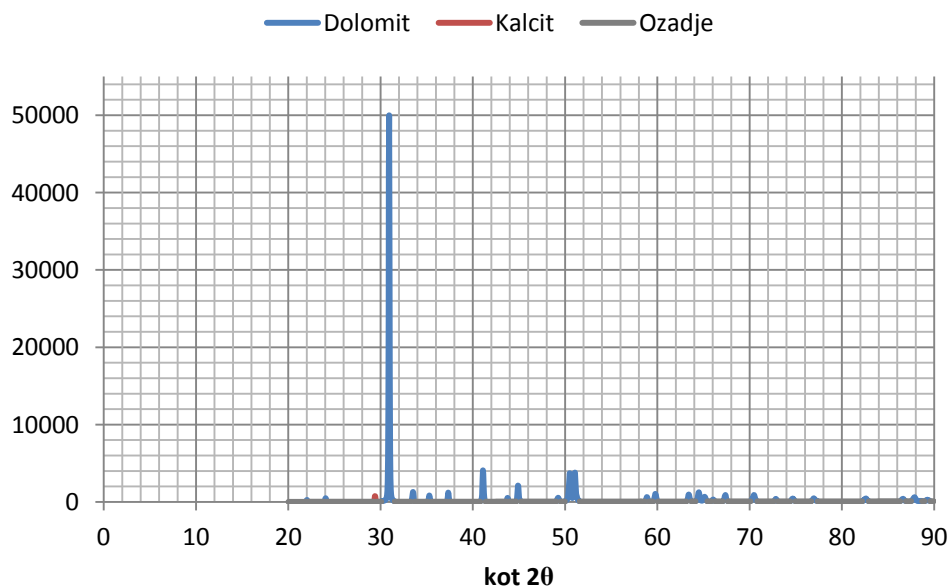
V injekcijskih mešanicah smo za polnilo uporabili dolomitno moko, ki jo pridobivamo z mletjem triasnega poznodiagenetskega dolomita iz osrednje Slovenije. Gre za svetlo siv dolomit z manjšimi razpokami velikosti od nekaj mm do 50 mm (Štukovnik in sod., 2014). Za pripravo injekcijskih mešanic smo uporabili dolomitno moko, ki smo jo predhodno presejali skozi sito velikosti 0,5 mm. V okviru diplomske naloge je bila določena prostorninska masa dolomitne moke iz omenjenega vira s pomočjo metode piknometra, ki znaša $2,69 \text{ g}/\text{cm}^3$ (Benko, 2015).

Tekom preliminarnih preiskav svežih injekcijskih mešanic smo iz kamnoloma dobili dve različni pošiljki dolomitne moke. Že z makroskopskim opisom smo opazili, da sta dolomitni moki različne barve (Slika 2). Prva pošiljka dolomitne moke je bila bolj rjave barve, druga pa bele barve. Tudi pri testih pretočnosti in pri izločanje vode je prišlo do razlik, ki bodo predstavljene v Poglavlju 4.

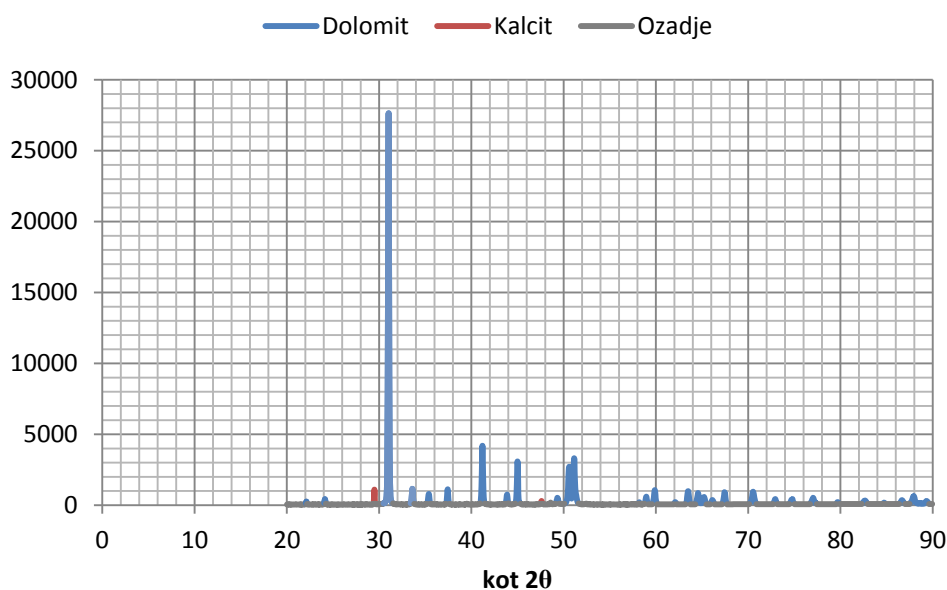


Slika 2: Različni dolomitni moki (rjava in bela dolomitna moka)

V sklopu magistrske naloge smo na podlagi praškovne difrakcijske rentgenske analize (XRD) določili mineraloško sestavo dolomitne moke. Domnevali smo, da prva pošiljka rjave dolomitne moke vsebuje manjši delež mineralov z železovim ionom. Na podlagi spodnjih grafikonov (Grafikon 1 in Grafikon 2) lahko razberemo, da sta dolomitni moki enaki in jih gradita minerala dolomit in kalcit. Rezultati XRD so pokazali, da železovi minerali v dolomitni moki niso prisotni. Iz doktorske disertacije Petre Štukovnik (Štukovnik, 2015) zasledimo, da 97 % pripada mineralu dolomit, mineralu kalcita pa približno 3 % (Štukovnik, 2015).



Grafikon 1: Praškovna difrakcijska rentgenska analiza vzorca bele dolomitne moke



Grafikon 2: Praškovna difrakcijska rentgenska analiza vzorca rjave dolomitne moke rjave

2.1.4 Dodatki

Za izboljšanje obdelovalnih lastnosti in pretočnosti, preprečevanju segregacije, zmanjšanju krčenja in doseganju ustreznih mehanskih karakteristik se injekcijskim mešanicam dodaja dodatke, ki zmanjšujejo vodovezivno razmerje oziroma potrebo po vodi (Uranjek, 2008). Plastifikatorji in superplastifikatorji so kemijski dodatki, ki se jih uporablja za betone, malte in injekcijske mešanice. Dodatki so površinsko aktivne snovi, ki delujejo na principu elektrostatične stabilizacije (odboja). Plastifikatorji izboljšujejo obdelanost mešanic in zmanjšujejo vodovezivno razmerje, superplastifikatorji pa vplivajo na disperzijo trdnih delcev in omogočajo visoko znižanje količin vode (Černilogar, 2011).

Pri injekcijskih mešanicah smo uporabili in primerjali kemijska dodatka oziroma superplastifikatorja za betone. Prvi dodatek je vodna raztopina na osnovi PCE iz vrst polikarboksidov, ki smo ga označili z oznako A, drugi pa prašnati dodatek z oznako B (Slika 3). Oba uporabljena superplastifikatorja sta dostopna na tržišču.



Slika 3: Superplastifikator A (levo) in B (desno)

2.2 Cilindrični preizkušanci – kamniti valji

2.2.1 Sestava kamnitih valjev – agregat ("istrski peščenjak")

Za polnitev valjev smo uporabili "istrski peščenjak", ki smo ga dobili iz kamnoloma Jelarji (Elerji), katerega upravlja podjetje Ruda d. o. o. Kamnolom, v katerem na klasični način pridobivajo peščenjak, se nahaja na Hrvatskem hribu blizu mejnega prehoda Škofije v neposredni bližini Kopra.

Celoten del Slovenske obale je zgrajen iz menjajočih plasti rjavih do sivo modrih peščenjakov, sivih do zelenorjavih laporjev, vložkov breč, konglomeratov in kalkarenitov. Naštete kamnine poznamo pod skupnim imenom fliš. Fliš ni kamnina, temveč zaporedje v morju odloženih klastičnih sedimentnih kamnin, ki nastanejo kot posledica delovanja podmorskih pobočnih plazov in kalnih tokov (Zorn, 2008).

V kamnolomu se nahajata dva različna oceanska peščenjaka sivo-modre in rjave barve, ki sta enakomerno dobro zrnata (Slika 4). Slednja se pojavljata v različno debelih plasteh. V sivo-modrem peščenjaku so lepo vidna kremenova zrna, med katerimi je vezivo karbonatnega izvora. Zunanji robovi peščenjaka so v večini primerov prepereli, kar spoznamo po rjavi barvi in slabši sprijetosti peščenih zrn. Na peščenjakih so opazni sledovi tokov in sledi organizmov (črvi in raki). V spodnji Preglednici 4 so predstavljene fizikalne lastnosti peščenjaka iz kamnoloma Jelarji.

Preglednica 4: Fizikalne lastnosti peščenjaka iz kamnoloma Jelarji (Slovenski naravni kamen, 1999)

Parameter	Vrednost
Prostorninska masa [kg/m^3]	2620
Poroznost [%]	4,0
Vpijanje vode [m/m]	1,02
Koeficient gostote [/]	0,960



Slika 4: Rjav in svetlo-siv peščenjak (levo) in plasti peščenjaka – fliša (desno)

3 STANDARDNE PREISKAVE INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Optimalne injekcijske mešanice smo določili na podlagi standardnih preiskav svežih in strjenih injekcijskih mešanicah. Izvedli smo osem standardnih preiskav, in sicer tri za sveže in pet za strjene injekcijske mešanice. Slednje smo izvajali na cilindričnih preizkušancih (valji) s premerom 15 cm in višino 30 cm ter na prizmah dimenzij 40 x 4 x 16 cm v treh časovnih obdobjih pri 35, 70 in 105 dni od injektiranja.

3.1 Opis standardnih preiskav sveže injekcijske mešanice

3.1.1 Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice

Prostorninsko maso sveže injekcijske mešanice smo določili po standardi SIST EN 1015-6 (SIST, 2007) s predpisano kovinsko cilindrično posodo z notranjim premerom $d = 125$ mm in prostornino 1 l (Slika 5). Po tehtanju prazne in polne posode smo prostorninsko maso sveže injekcijske mešanice izračunali po Enačbi 3.1:

$$p_m = \frac{(m_2 - m_1)}{V_v} \quad (3.1)$$

kjer je

p_m ... prostorninska masa sveže mešanice [kg/m^3]

m_1 ... masa prazne posode [g]

m_2 ... masa posode z injekcijsko mešanico [g]

V_v ... prostornina posode [l]



Slika 5: Določanje prostorninske mase – tehtanje prazne posode (levo) in tehtanje posode z injekcijsko mešanico (desno)

3.1.2 Pretočnost

Meritve pretočnosti smo opravili v skladu s standardom SIST EN 445 (SIST, 2008). Standarda za področje utrjevanja kamnitih zidanih stavb s sistematičnim injektiranjem ni, zato se preizkuse izvaja v skladu s standardom, ki je namenjen za cementne injekcijske mase za prednapete kable. Za določitev pretočnosti injekcijskih mešanic standard zahteva lijak prostornine $1,7 \text{ l} \pm 10 \%$ in spodnjo odprtino velikosti 1 cm (Slika 6). Za uspešno utrditev zidu s postopkom sistematičnega injektiranja je pretočnost injekcijskih mešanic ključnega pomena, saj lahko ob eventualnih nižjih delovnih pritiskih dosežemo kakovostno zapolnitev votlin in razpok v zidu (Uranjek, 2008).



Slika 6: Dimenzije lijaka (levo) in merjenje pretočnosti injekcijske mešanice (sredina in desno)

Pri testu pretočnosti smo merili čas, ki je potreben, da 1 l injekcijske mešanice steče skozi ustje lijaka. V predhodno navlažen lijak smo skozi sito velikosti 1,5 mm vlili pripravljeno injekcijsko mešanico. Pred tem smo s prstom zaprli spodnjo odprtino in pod lijak postavili posodo s prostornino 1 l. Istočasno, ko smo odmašili spodnjo odprtino lijaka, smo začeli meriti čas, ki je potreben, da 1 l injekcijske mešanice steče v spodnjo posodo. Za injekcijske mešanice smo upoštevali kriterij, da je zahtevan čas pretočnosti $t \leq 25$ s. Pretočnost smo določili po zaključnem mešanju in po poteku 30 minut. Med obema meritvama ne sme priti do razlike, večje od 10 % ($\Delta t \leq 10 \%$).

3.1.3 Izločanje vode

Izločanje vode sveže injekcijske mešanice smo določili po standardu SIST EN 455 (SIST, 2008) za injekcijske mase za prednapete kable. Izločanje vode izvajamo v predpisanem prozornem valju prostornine 100 ml, s premerom 25 mm, višino 250 mm in merilno skalo v ml v merilu 100 : 1 ml (Slika 7). Izločanje vode iz injekcijske mešanice nam kaže na ločevanje vode in veziva. Povečanega izločanja vode vodi do segregacije delcev in veziva, kar v praksi pomeni, da zgornji del injektiranega prostora v zidu ne bo ustrezno konsolidiran (Uranjek, 2008).



Slika 7: Meritve izločanja vode iz injekcijskih mešanic

V standardni valj vlijemo med 95 in 100 ml injekcijske mešanice iste šarže kot pri meritvah pretočnosti. Valj zaščitimo pred izhlapevanjem in ga postavimo na ravno površino, na kateri ni možnosti vibracij. Po preteku 3 ur s pomočjo merilne skale odčitamo količino vode, ki je ostane na površini injekcijske mešanice. Kriterij za ustrezno izločanje vode smo omejili na vrednost $\leq 2\%$. Izločanje vode izračunamo po Enačbi 3.2:

$$\text{Izločanje vode [\%]} = \frac{v_1}{v} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

kjer je

v_1 ... količina injekcijske mešanice [ml]

v ... količina vode nad injekcijsko mešanico po preteku 3 ur [ml]

3.2 Opis standardnih preiskav strjenje injekcijske mešanice na prizmah in valjih

3.2.1 Prostorninska masa strjene injekcijske mešanice

Prostorninsko maso strjenim prizmam smo določili skladno s standardom SIST EN 1015-10 (SIST, 2007) v dveh časovnih obdobjih pri starosti preizkušancev 35 in 70 dni. Prizme smo stekali, s pomočjo kljunastega merila pa smo jim izmerili vse tri dimenzije (l – dolžina, h – višina in b – širina). Prostorninsko maso strjenim prizmam smo določili po spodnji Enačbi 3.3:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.3)$$

kjer je

ρ ... prostorninska masa prizme [kg/m^3]

m ... masa prizme [ml]

V ... volumen prizme [m^3]

3.2.2 Tlačna trdnost prizem

Tlačno trdnost prizem smo izvedli v skladu s standardom SIST EN 1015-11 (SIST, 2007) na preostalih polovičkah prizem, na katerih smo določili upogibne natezne trdnosti. Preizkušance smo obremenjevali preko jeklenih ploščic dimenzij 40/40/12 mm (Slika 8). Na podlagi dobljene maksimalne tlačne sile smo po spodnji Enačbi 3.4 izračunali tlačno trdnost prizem:

$$f_c = \frac{F}{a^2} \quad (3.4)$$

kjer je

f_c ... tlačna trdnost preizkušanca [kN/cm²]

F ... maksimalna tlačna sila [kN]

a ... širina preizkušanca [cm]



Slika 8: Zasnova preizkusa tlačne trdnosti (levo) in preizkus tlačne trdnosti (sredina in desno)

3.2.3 Upogibna natezna trdnost prizem

Upogibno natezno trdnost smo določali skladno s standardom SIST EN 1015-11 (SIST, 2011) na prizmah velikosti 4/4/16 cm (Slika 10) s tritočkovnim upogibnim preizkusom (Slika 9). Izmerili smo maksimalno upogibno silo, pri kateri je prišlo do porušitve preizkušanca in izračunali upogibno natezno trdnost po Enačbi 3.5:

$$f_t = \frac{3 F l}{2 d_1 d_2^2} \quad (3.5)$$

kjer je

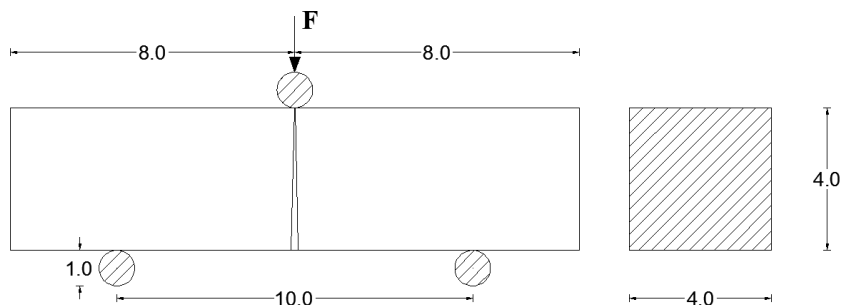
f_t ... upogibna natezna trdnost preizkušanca [kN/cm²]

F ... maksimalna upogibna sila [kN]

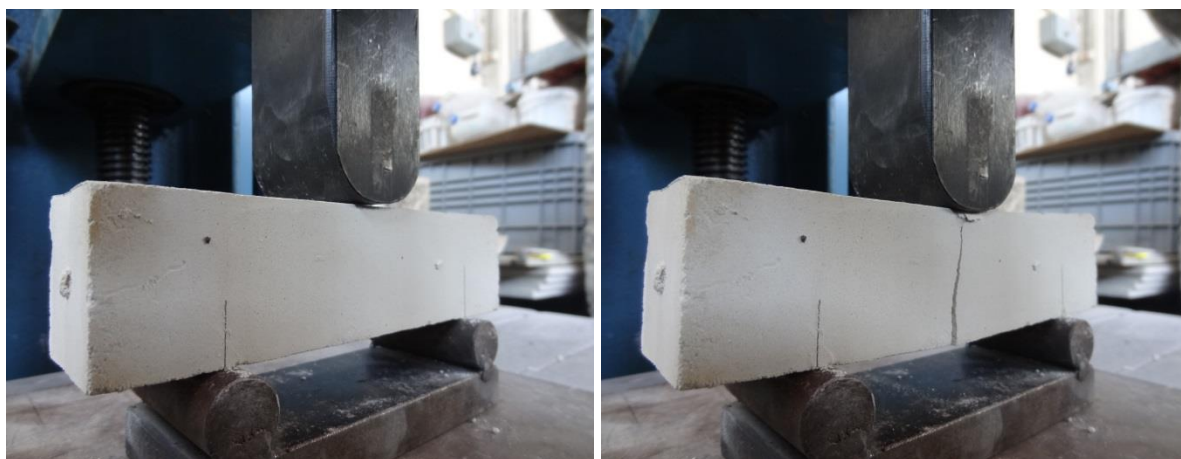
l ... razdalja med podporama [cm]

d_1 ... širina preizkušanca [cm]

d_2 ... višina preizkušanca [cm]



Slika 9: Zasnova preizkusa upogibne natezne trdnosti



Slika 10: Prikaz preizkusa upogibne natezne trdnosti pred začetkom (levo) in po končanem preizkusu (desno)

3.2.4 Tlačna trdnost valjev

Tlačno trdnost valjev smo določali na valjih višine 30 cm in premera 15 cm (Slika 11) skladno s standardom SIST EN 12390-3 (SIST, 2009). Zgornjo površino valjev smo pred pričetkom preizkusa zravnali z mavcem. S tem smo omogočili enakomeren vnos tlačne sile v valj. Med valjem in prešo smo postavili členek, da smo zagotovili boljši vnos tlačne sile. Tlačno trdnost valjev smo določili po Enačbi 3.6:

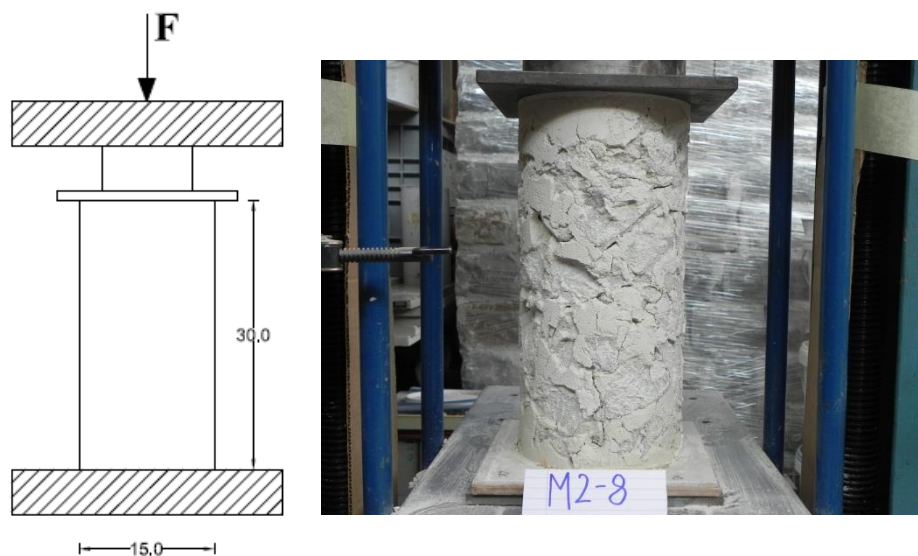
$$f_{cc} = \frac{F}{\pi r^2} \quad (3.6)$$

kjer je

f_{cc} ... tlačna trdnost preizkušanca [MPa]

F ... maksimalna tlačna sila [kN]

r ... polmer preizkušanca [cm]



Slika 11: Zasnovana preizkusa (levo) in prikaz preizkusa tlačne trdnosti preizkušanca M2-8 (desno)

3.2.5 Cepilna natezna trdnost valjev

Cepilno natezno trdnost (Slika 12) smo določali na podlagi standarda SIST EN 12390-6 (SIST, 2010). Preskušani valji so bili enakih dimenzij kot pri preiskavah tlačne trdnosti. S preiskavo smo določili največjo cepilno silo, na podlagi katere smo s spodnjo Enačbi 3.7 določili cepilno natezno trdnost:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi L d} \quad (3.7)$$

kjer je

f_{ct} ... cepilna natezna trdnost preizkušanca [MPa]

F ... maksimalna cepilna sila [kN]

L ... dolžina preizkušanca [cm]

d ... premer preizkušanca [cm]



Slika 12: Zasnovana preizkusa (levo) in prikaz preizkusa cepilne natezne trdnosti preizkušanca M4-19 (desno)

4 PRELIMINARNE PREISKAVE SVEŽIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Glavni namen preliminarnih raziskav svežih injekcijskih mešanic je bil določiti optimalno injekcijsko mešanico za injektiranje cilindričnih preizkušancev oziroma kamnitih valjev. V sklopu preiskav smo pripravili oziroma testirali pet injekcijskih mešanic na osnovi hidratiziranega apna in dolomitnega polnila:

- apnena injekcijska mešanica – M1;
- apnena injekcijska mešanica z dodatkom superplastifikatorja – M2;
- apnena injekcijska mešanica z dodatkom tufa – M3;
- apno-cementna injekcijska mešanica s cementom CEM II/B-M (42,5 N) – M4;
- apno-cementna injekcijska mešanica s cementom CEM I (42,5 R) – M5.

Kriterije in omejitve, s katerimi smo določili lastnosti svežih injekcijskih mešanic, smo prevzeli glede na že opisane standardne preiskave (Poglavje 3.1). Odločili smo se, da bomo za določitev svežih injekcijskih mešanic upoštevali kriterija pretočnosti in izločanje vode. Na podlagi postavljenih kriterijev smo v nadaljevanju izbrali injekcijske mešanice, s katerimi smo nadaljevali preiskave na strjenih standardnih prizmah in na cilindričnih preizkušancih. Poleg standardnih testov smo izbrane injekcijske mešanice vlili v standardne kalupe ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) in opazovali krčenje oziroma sušenje injekcijskih mešanic. Po 15 dneh smo razkalupljene prizme zaprli v plastične posode z omejenim dotokom svežega zraka oziroma ogljikovega dioksida CO_2 , ki je potreben za proces karbonatizacije. Z nestandardizirano preiskavo smo želeli preveriti in primerjati mehanske lastnosti standardnih prizem zaprtih v posodi, sušenih na zraku in negovanih v NaOH raztopini pri povišani temperaturi. Prizme smo preizkušali po 105 dneh od vlijanja v kalupe.

Tekom preliminarnih preiskav sveže injekcijske mešanice smo iz kamnoloma dobili dve različni pošiljki dolomitne moke (Poglavje 2). Prvotne preliminarne meritve so bile izvedene s prvo pošiljko rjave dolomitne moke. Pričakovali smo, da bodo rezultati pretočnosti in izločanja vode primerljivi oziroma, da ne bo velikih odstopanj. Izkazalo se je, da z drugo belo dolomitno moko potrebujemo manj vode, obenem pa imamo večjo izločanje vode iz injekcijske mešanice. Odstopanja kažejo na nestabilnost mešanice, kar je zelo neugodno predvsem za delo v praksi. Zaradi manjše količine rjave dolomitne moke smo v nadaljevanju pri injektiranju cilindričnih preizkušancev uporabili belo dolomitno moko.

4.1 Priprava injekcijskih mešaníc

Postopek priprave injekcijske mešanice je bil za vse mešanice enak. Na podlagi volumskega razmerja smo najprej stehali komponente mešanice (hidratizirano apno, dolomitno moko, tuf in cement), jih (odvisno od mešanice) premešali v posodi in presejali na situ velikosti 0,5 mm. V posodo za mešanje smo najprej vlili odmerjeno količino vode ter postopoma dodajali pripravljeno suho mešanico in vodo.

Vse injekcijske mešanice so bile pripravljene s specialnim mešalcem RILEM-CEM (Slika 13), ki se istočasno obrača okoli svoje vzdolžne in pogonske osi. Možni sta dve hitrosti mešanja, in sicer hitrost mešanja I – 140 ± 5 število obratov okoli lastne osi v minuti in 62 ± 5 število obratov okoli pogonske osi v minuti ter hitrost mešanja II – 285 ± 10 število obratov okoli lastne osi v minuti in 125 ± 10 število obratov okoli pogonske osi v minuti (Žarnić, 2009).



Slika 13: Mešalec RILEM-CEM z mešalno posodo in lopaticami (levo) in tehnica s pladnjem rjave dolomitne moke (desno)

V prvi fazi mešanja (do 1:30 min) je bil vklopljen mešalec na hitrost mešanja I, ko smo stresli celotno suho mešanico smo prestavili na višjo hitrost mešanja II. Glede na mešanico smo v mešalno posodo poleg vode dodajali še superplastifikator. Med samim mešanja smo z žlico preverili, ali se sestavine pravilno mešajo. Mešalec ima premajhno hitrost in neustrezno obliko mešalne posode oziroma lopatic, katere ne premešajo mešanice na ustrezen način. Pri mešanju injekcijskih mešaníc je pomemben čas mešanja, ki vpliva na konsistenco in kakovost mešanice. Pri vseh mešanícah smo upoštevali enak čas mešanja (6 min). V spodnji Preglednici 5 so predstavljene sestave (komponente) injekcijskih mešaníc.

Preglednica 5: Povzetek sestav (komponent) injekcijskih mešanic

Injekcijska mešanica	Vezivo			Polnilo	Superplastifikator	
	Apno	Tuf	Cement	Dolomitna moka	A	B
M1	X			X		
M2	X			X	X	
M3	X	X		X	X	
M4	X		X	X		X
M5	X		X	X		X

4.2 Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M1

Pri prvi injekcijski mešanici M1 smo kombinirali hidratizirano apno, dolomitno moko in vodo. Slednjo smo mešanici dodajali po potrebi z namenom doseganja ustrezne pretočnosti in konsistence. Delež posameznih komponent smo določili na podlagi volumskega razmerja med vezivom (apno) in polnilom (dolomitna moka) v razmerju 1 : 3.

V začetni fazi preiskav svežih injekcijskih mešanic M1 smo s spreminjanjem količin dodatne vode iskali optimalno mešanico, ki bi zadostila kriteriju pretočnosti in izločanju vode. V primeru, da izmerjena pretočnost takoj po mešanju ni ustrezala kriteriju $t \leq 25$ s, jo po 30 minutah nismo ponovno izmerili kot tudi nismo izvedli izločanja vode. Iz spodnje Preglednice 6 je razvidno, da kriteriju pretočnosti ustrezata mešanici M1/1 in M1/4, kriteriju izločanje vode pa delno ustreza le mešanica M1/4, saj je delež izločanje vode večji od 2,0 %, kolikor je še dovoljeno po standardu (Slika 15).

Preglednica 6: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M1 (21. 1. 2015)

Oznaka mešanice		M1/1	M1/2	M1/3	M1/4
Masa veziva [g]:	apno	300	300	300	300
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328	2328	2328
Masa dodane vode [g]		940	760	800	810
Prostorninska masa [kg/m^3]		1868	/	/	1924
vodo/vezivno razmerje (v/v)		3,13	2,53	2,67	2,70
masno razmerje – potreba po vodi		0,36	0,29	0,30	0,31
Pretočnost [s]	takoj	12,48	240	28	24,67
	po 30 min	13,7	/	/	24,90
Izločanje vode	v [ml]	96	/	/	96
	v_1 [ml]	10	/	/	2,1
	[%]	10,4	/	/	2,2

Pri standardnem testu pretočnosti smo opazili, da so se na situ, skozi katerega smo vlili pripravljeno mešanico, nabrale grudice apna velikosti do 0,5 cm. Težavo smo skušali rešiti z dodajanjem različnih odstotkov superplastifikatorja, vendar brez uspeha. V vreči, v kateri je bilo shranjeno apno, so bile grudice apna. Težavo smo rešili, da smo suho mešanico dolomitne moke in apna (Slika 14) presejali skozi sito velikosti 0,5 mm.



Slika 14: Mešanica dolomitne moke in apna z grudicami (levo) pred in po sejanju skozi sito velikosti 0,5 mm (desno)

Injekcijsko mešanico M1/4 smo ponovili z drugo pošiljko dolomitne moke in ugotovili, da pride do odstopanj (Preglednica 7). Mešanica potrebuje manj vode za doseganje želene konsistence oziroma pretočnosti, izločanje vode pa je večje (Slika 15). Pri mešanici M1/4 je bilo izločanje vode na meji, nova injekcijska mešanica M1/6 pa je krepko preseglo dovoljeno vrednost (3,7 %).

Preglednica 7: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M1 (9. 3. 2015)

Oznaka mešanice		M1/4	M1/5	M1/6
Masa veziva [g]:	apno	300	300	300
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328	2328
Masa dodane vode [g]		810	810	790
Prostorninska masa [kg/m ³]		1924	1948	1968
vodo/vezivno razmerje (v/v)		2,70	2,70	2,63
masno razmerje – potreba po vodi		0,31	0,31	0,30
Pretočnost [s]	takoj	24,67	19,16	24,20
	po 30 min	24,90	17,45	23,93
Izločanje vode	v [ml]	96	94,5	95
	v ₁ [ml]	2,1	3,5	3,5
	[%]	2,2	3,7	3,7



M1/4 – 2,1 %

M1/6 – 3,7 %

Slika 15: Izločanje vode iz injekcijske mešanice M1/4 – 2,1 % pred (levo) in po poteku treh ur (desno) ter iz injekcijske mešanice M1/6 – 3,7 % pred (levo) in po poteku treh ur (desno)

Izločanje vode iz injekcijske mešanice smo poskušali zmanjšati, da smo hidratizirano apno za 24 ur namočili v odmerjeni količini vode. Iz hidratiziranega praha smo dobili apneno kašo. Predvidevali smo, da bo injekcijska mešanica z apneno kašo potrebovala manjšo količino vode za doseganje ustrezne konsistence. Ta pristop se ni obnesel, saj se je iz injekcijske mešanice izločilo med 4 in 5 % vode. Kljub težavam z izločanjem vode in drugačni pošiljki dolomitne moke, smo se odločili, da bomo injekcijsko mešanico M1/6 uporabili pri izdelavi standardnih prizem in pri injektiranju kamnitih valjev.

Zaradi prevelikega izločanja vode se nam je na vrhu standardnih kalupov nabrala voda (Slika 16). Posledica tega je neenakomerno sušenja oziroma izhlapevanje vode, kar je vodilo do krčenja prizem. Na sredini prizem so se pojavile vertikalne razpoke, ki niso segale do vrha vzorca (Slika 16).



Slika 16: Izločanje in nabiranje vode na kalupu (levo) in prizme apnene injekcijske mešanice M1 (desno)

4.3 Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M2

Injekcijsko mešanico M2 smo prvotno pripravili na osnovni osnovne injekcijske mešanice M1/4 (hidratizirano apno, rjava dolomitna moka in voda). Injekcijski mešanici smo dodali še superplastifikator. Glavni cilj dodajanja superplastifikatorja je bil zmanjšanje deleža vode (potreba po vodi) pri ohranjanju ustreznega časa pretočnosti. Primerjali oziroma analizirali smo dva različna superplastifikatorja A in B. Procent superplastifikatorja smo izračunali glede na maso veziva (hidratizirano apno). Glede na ugotovitve iz injekcijske mešanice M1 smo v nadaljevanju vse suhe komponente mešanice (apno in dolomitna moka) presejali skozi sito velikost 0,5 mm. S tem ukrepom smo preprečili, da bi znotraj injekcijske mešanice imeli grudice hidratiziranega apna.

Delež superplastifikatorja A (1 % na maso veziva) smo povzeli po ugotovitvah, ki jih je navedel v svoji doktorski nalogi M. Uranjek (Uranjek, 2011). Pri večjem deležu superplastifikatorja od 2,0 in 2,5 mas. % se izboljša pretočnost, vendar injekcijska mešanica lahko postane nestabilna in pride do segregacije težjih delcev. Pri mešanicah z 1,0 mas. % dodanega superplastifikatorja pride do manjše segregacije trdih delcev oziroma izločanje vode. Uranjek je ugotovil, da 24 ur po zamešanju, je na trdnosti najbolj pridobila mešanica z 1,0 mas. % dodanega superplastifikatorja (Uranjek, 2011).

V začetni fazi raziskav smo želeli preveriti, kako vpliva superplastifikator A na osnovno mešanico M1/4. Na maso veziva (apna) smo dodali 1,0 % superplastifikatorja A (3,0 g). Slednjega smo mešanici dodali med mešanjem v mešalno posodo. S tem ukrepom smo dosegli boljšo pretočnost (24,67 s – 16,05 s) in obdelanost injekcijske mešanice M2/1. V nadaljevanju smo kljub zmanjšani količine vode (M2/2) dosegali zahtevano pretočnost ter izločanje vode, ki je bilo na meji dovoljenega, in sicer 2,1 % (Slika 17). V Preglednici 8 so zbrani rezultati s superplastifikatorjem A.

Preglednica 8: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M2 s superplastifikatorjem A (2. 2. 2015)

Oznaka mešanice		M2/1	M2/2
Masa veziva [g]:	apno	300	300
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328
Dodatek [g]:	superplastifikator A	3,0	3,0
Masa dodane vode [g]		810	770
Prostorninska masa [kg/m ³]		1932	1970
vodo/vezivno razmerje (v/v)		2,70	2,57
masno razmerje – potreba po vodi		0,31	0,29
Pretočnost [s]	takoj	16,05	20,40
	po 30 min	16,9	21,67
Izločanje vode	v [ml]	95	95
	v ₁ [ml]	2,0	2,0
	[%]	2,1	2,1

V nadaljevanju smo preverili prašnat superplastifikator B. Upoštevali smo navodila proizvajalca in za pripravo recepture za apneno injekcijsko mešanico dodali 2,0 % superplastifikatorja B (6,0 g) glede na maso veziva. Superplastifikator smo dodali suhi mešanici predno smo stresli v mešalno posodo. Tudi v tem primeru smo dosegli boljšo pretočnost (24,67 s–16,37 s), vendar se nam je po treh urah izločilo več vode. Kljub temu, da smo za 40 g zmanjšali količino vode in dosegali zahtevano pretočnost, smo imeli ponovno težave pri izločanju vode iz injekcijske mešanice M2/5 (Slika 17). Rezultati preiskav s superplastifikatorjem B so prikazani v spodnji Preglednici 9.

Preglednica 9: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M2 s superplastifikatorjem B (2. 2. 2015)

Oznaka mešanice		M2/3	M2/4	M2/5
Masa veziva [g]:	apno	300	300	300
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328	2328
Dodatek [g]:	superplastifikator B	6,0	6,0	6,0
Masa dodane vode [g]		810	750	770
Prostorninska masa [kg/m ³]		1920	1950	1950
vodo/vezivno razmerje (v/v)		2,70	2,50	2,57
masno razmerje – potreba po vodi		0,31	0,29	0,29
Pretočnost [s]	takoj	16,37	29,8	24,40
	po 30 min	15,9	/	24,80
Izločanje vode	v [ml]	95	/	95,5
	v ₁ [ml]	3,0	/	2,5
	[%]	3,2	/	2,6

Na podlagi rezultatov smo ugotovili, da imata injekcijski mešanici M2/1 in M2/3 podobno pretočnost, pri obeh pa predstavlja težavo preveliko izločanje vode.

Injekcijsko mešanico M2/2 smo tekom preliminarnih raziskav preverili z drugo pošiljko dolomitne moke. Podobno kot pri injekcijski mešanici M1/6 smo tudi v tem primeru za doseganje ustrezne konsistence potrebovali manjšo količino vode, izločanje vode pa je bilo večje (Slika 17). Rezultati in sestave injekcijskih mešaníc so zbrani v Preglednici 10. Za nadaljnje raziskave smo se odločili uporabiti injekcijsko mešanico M2/7 s superplastifikatorjem A.

Preglednica 10: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M2 (9. 3. 2015)

Oznaka mešanice		M2/2	M2/6	M2/7
Masa veziva [g]:	apno	300	300	300
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328	2328
Dodatek [g]:	superplastifikator A	3,0	3,0	3,0
Masa dodane vode [g]		770	770	750
Prostorninska masa [kg/m ³]		1970	1970	1974
vodo/vezivno razmerje (v/v)		2,57	2,57	2,50
masno razmerje – potreba po vodi		0,29	0,29	0,29
Pretočnost [s]	takoj	20,4	16,33	21,14
	po 30 min	21,67	16,71	22,51
Izločanje vode	v [ml]	95	96	95
	v ₁ [ml]	2,0	3,0	3,0
	[%]	2,1	3,1	3,2



M2/2 – 2,1%

M2/5 – 2,6 %

M2/7 – 3,2 %

Slika 17: Izločanje vode iz injekcijske mešanice M2/2 – 2,1 % , M2/5 – 2,6 % in M2/7 – 3,2 % pred (levo) in po poteku treh ur (desno)

Rezultati vzorcev (krčenje in razpoke) standardnih prizem za injekcijske mešanice M2 so bile podobne injekcijski mešanici M1. Prav tako je prišlo do velikega izločanja vode in do pojava vertikalnih razpok.

4.4 Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M3

Tretji injekcijski mešanici M3 smo poleg hidratiziranega apna, dolomitne moke in superplastifikatorja dodali tuf (Slika 18), ki velja za tradicionalni material. Tuf, vulkanski pepel je fino mlet pucolan, ki zaradi finih delcev potrebuje veliko količino vode, kar injekcijski mešanici zmanjšuje pretočnost. Da bi ohranili ustrezno pretočnost oziroma konsistenco, moramo injekcijski mešanici obvezno dodati superplastifikator. Tuf se injekcijskim mešanicam dodaja zaradi hitrejšega vezanja in doseganja višjih trdnosti. Upoštevali smo enako volumsko razmerje med vezivom (apno) in polnilom (dolomitna moka) v razmerju 1 : 3. Mešanici smo dodali 10 % tufa (263 g) na celotno maso veziva in polnila. Tuf smo obravnavali kot vezivo. Vodovezivno razmerje smo računali kot razmerje mase vode proti masi apna in tufa.

V začetni fazi raziskav smo želeli določiti osnovno mešanico (M3/1) brez uporabe superplastifikatorja (Preglednica 11). Mešanica je bila gosta, viskozna, vendar kljub temu je bila pretočnost ($t = 0$ min) pod 25 s (19,02 s). Po preteku 30 minut smo ponovno preverili pretočnost, ki pa ni bila ustrezna (29,02 s). Vzroka za to je tuf, ki je med in po mešanju nase vezal vodo iz mešanice in s tem spremenil konsistenco injekcijske mešanice, ki je postala čedalje bolj viskozna. V nadaljevanju smo mešanici (v mešalno posodo) dodali 1 % superplastifikatorja A, ki smo ga določili glede na maso apna in tufa (5,63 g). Tudi pri injekcijski mešanici M3/3 smo ugotovili, da po preteku 30 minut čas pretočnosti ni ustrezen (36,05 s). Zaradi kasnejšega vpijanja vode mešanica ni stabilna oziroma ni primerna za injektiranje kamnitih valjev. Težavo smo skušali rešiti, da smo tuf preko noči (24 ur) namočili v odmerjeni količini vode.

Preglednica 11: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M3 (3. 2. 2015)

Oznaka mešanice		M3/1	M3/2	M3/3
Masa veziva [g]:	apno	300	300	300
	tuf	263	263	263
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328	2328
Dodatek [g]:	superplastifikator A	/	5,63	5,63
Masa dodane vode [g]		1080	920	960
Prostorninska masa [kg/m^3]		1846	/	1886
vodo/vezivno razmerje (v/v)		1,92	1,63	1,71
masno razmerje – potreba po vodi		0,37	0,32	0,33
Pretočnost [s]	takoj	19,02	36,72	22,25
	po 30 min	29,67	/	36,05
Izločanje vode	v [ml]	95	/	96
	v_1 [ml]	3,0	/	2,0
	[%]	3,2	/	2,1

Tuf smo namočili v posodah, v katere smo vlili odmerjeno količino vode (500 g). Slednjo smo upoštevali pri celotni količini vode v injekcijski mešanici. Ugotovili smo, da injekcijske mešanice potrebuje več vode za doseganje ustrezne konsistence. Iz spodnje Preglednice 12 lahko ugotovimo, da v primeru, če je tuf predhodno namočen, se po 30 minutah konsistenca injekcijske mešanice ne spremeni. Injekcijska mešanica M3/6 ustreza pretočnosti (21,59 s / 22,96 s), vendar je izločanje vode previsoko in znaša 5,7 %. Slednje smo želeli zmanjšati s superplastifikatorjem A (M3/8), vendar še vedno je večje od 2 %. Zaradi prisotnosti tufa so bile mešanice temno zelene barve in "tekočo viskozne". Pri izvajanju testa pretočnosti se je na straneh standardnega lijaka nabrala debela viskozna obloga mešanice (Slika 18). Kljub temu, da nismo dosegli kriterija izločanja vode $\leq 2\%$ (Slika 18), smo izbrali injekcijsko mešanico M3/8.

Preglednica 12: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M3 (4. 2. 2015)

Oznaka mešanice		M3/4	M3/5	M3/6	M3/7	M3/8
Masa veziva [g]:	apno	300	300	300	300	300
	tuf	263	263	263	263	263
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328	2328	2328	2328
Dodatek [g]:	superplastifikator A	/	/	/	5,63	5,63
Masa dodane vode [g]		1120	1165	1175	1030	1080
Prostorninska masa [kg/m^3]		1816	1816	1824	/	1836
vodo/vezivno razmerje (v/v)		1,99	2,07	2,09	1,83	1,92
masno razmerje – potreba po vodi		0,39	0,40	0,41	0,36	0,37
Pretočnost [s]	takoj	360	25,8	21,59	160	23,02
	po 30 min	/	29,5	22,96	/	22,38
Izločanje vode	v [ml]	/	95	96	/	96
	v_1 [ml]	/	4,0	5,5	/	3,0
	[%]	/	4,2	5,7	/	3,1

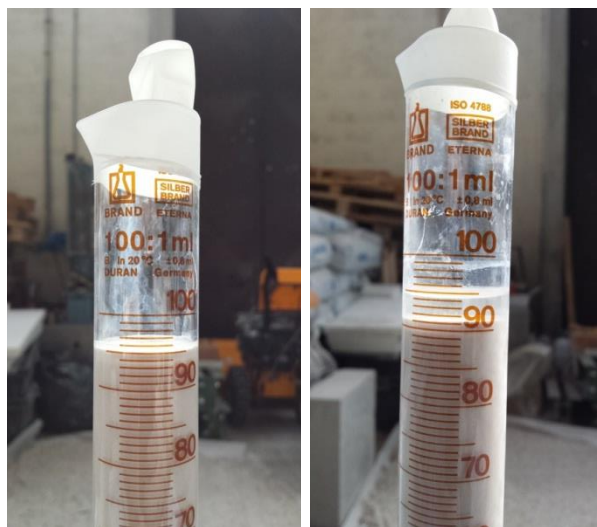


Slika 18: Viskozna obloga injekcijske mešanice M3 (levo), komponente injekcijske mešanice (sredina) in izločanje vode M3/8 – 3,1 % (desno)

Tudi pri tretji injekcijski mešanici M3/8 se je izkazalo, da z belo dolomitno moko potrebujemo manj vode za doseganje ustrezne pretočnosti. Težavo ponovno prestavlja izločanje vode, ki je pri injekcijski mešanici M3/9 4,2 % (Slika 19). Rezultati preiskav apnene mešanice z dodatkom tufa namočenega 24 ur v vodi so prikazani v spodnji Preglednici 13.

Preglednica 13: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M3 (3. 3. 2015)

Oznaka mešanice		M3/8	M3/9
Masa veziva [g]:	apno	300	300
	tuf	263	263
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328
Dodatek [g]:	superplastifikator A	5,63	5,63
Masa dodane vode [g]		1080	1050
Prostorninska masa [kg/m ³]		1836	1872
vodo/vezivno razmerje (v/v)		1,92	1,87
masno razmerje – potreba po vodi		0,37	0,36
Pretočnost [s]	takoj	23,02	21,44
	po 30 min	22,38	23,07
Izločanje vode	v [ml]	96	95
	v ₁ [ml]	3,0	4
	[%]	3,1	4,2



Slika 19: Izločanje vode iz mešanice M3/9 – 4,2 % pred (levo) in po poteku treh ur (desno)

Zaradi težav z izločanjem vode smo poskušali, da smo tuf dve minuti namočili v vodi in nato primešali suhe komponente. Predvidevali smo, da bo tuf nase vezal odvečno vodo in s tem ohranil ustrezno pretočnost. Zadeva se ni obnesla, saj se je iz injekcijske mešanice ponovno izločilo od 3 do 4 % vode, obenem pa je pretočnost po 30 minutah preseгла mejo 25 s. Injekcijsko mešanico M3/9 smo poskušali tudi s superplastifikatorjem B, vendar procenta izločanja vode nismo zmanjšali. Glede na to, da

potrebujemo stabilno mešanico po 30 minutah, smo se kljub težavam z izločanjem vode odločili, da bomo injekcijsko mešanico M3/9 uporabili pri izdelavi standardnih prizem in pri injektiranju kamnitih valjev.

Tekom preliminarnih preiskav smo na standardnih prizmah injekcijske mešanice M3 opazili izrazito krčenje prizem (Slika 20) v primerjavi z injekcijskimi mešanicami M1 in M2. Na vrhu prizem se je nabrala sol, ki je posledica vsebnosti tufa in ne predstavlja večjih težav v kamnitih zidovih (Slika 20). Prav tako so se po vzorcih pojavile vertikalne razpoke in luščenje vrhnje površine.



Slika 20: Izrazito krčenje (levo) in pojav izločanja soli iz injekcijske mešanice M3 (desno)

4.5 Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M4

Injekcijska mešanica M4 je pripravljena iz hidratiziranega apna, dolomitne moke, superplastifikatorja in cementa CEM II/B-M. Gre za komercialen Portlandski mešani cement trdnostnega razreda 42,5 z običajno zgornjo trdnostjo (N). Pri injekcijske mešanici M4 so osnovne komponente cement (vezivo), hidratizirano apno (vezivo) in dolomitna moka (polnilo) v volumskem razmerju 1 : 2 : 3. Preliminarne preiskave injekcijske mešanice so bile v primerjavi z injekcijskimi mešanicami M1, M2 in M3 v celoti izvedene z belo dolomitno moko.

V začetni fazi preiskav smo s spreminjanjem količin dodatne vode iskali osnovno injekcijsko mešanico brez superplastifikatorja. Kriteriju pretočnosti in izločanju vode je ustrezala injekcijska mešanica M4/3, ki je bila zelo tekoča. Med mešanjem smo opazili, da se je ob straneh in na sredini mešalne posode izločila oziroma nabrala voda – "linija vode" (Slika 21). Zaradi hitrega vezanja injekcijske mešanice (uporaba cementa) po treh urah nismo imeli težav z izločanjem vode. Količine sestavin injekcijske mešanice ter rezultati pretočnosti in izločanja vode so prikazani v spodnji Preglednici 14.

Preglednica 14: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M4 (12. 2. 2015)

Oznaka mešanice		M4/1	M4/2	M4/3
Masa veziva [g]:	apno	480	480	480
	cement	467	467	467
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	1862	1862	1862
Dodatek [g]:	superplastifikator	/	/	/
Masa dodane vode [g]		945	1010	1040
Prostorninska masa [kg/m ³]		/	/	1854
vodo/vezivno razmerje (v/v)		1,00	1,07	1,10
masno razmerje – potreba po vodi		0,34	0,36	0,37
Pretočnost [s]	takoj	170	31	20,50
	po 30 min	/	/	23,50
Izločanje vode	v [ml]	/	/	95
	v ₁ [ml]	/	/	1,0
	[%]	/	/	1,05

V nadaljevanju smo preverili učinek delovanja superplastifikatorja A in B. Na maso veziva (apna in cement) smo dodali 1,0 % superplastifikatorja A (9,47 g). Slednjega smo mešanici dodali med mešanjem v mešalno posodo. Injekcijska mešanica M4/6 je bila izrazito tekoča in je ustrezala kriteriju pretočnosti kot tudi kriteriju izločanja vode ≤ 2 % (Slika 21). Pri uporabi prašnega superplastifikatorja B smo upoštevali navodila proizvajalca in za pripravo recepture za apnenocementno injekcijsko mešanico dodali 2,0 % superplastifikatorja B (9,34 g) glede na maso cementa. Ugotovili smo, da je mešanica M4/8 za doseganje ustrezne konsistence potrebovala več vode (70 g), da je bolj gosta in lepljiva kot injekcijska mešanica M4/6. Slednje je zelo pomemben faktor pri injektiranju kamnitih valjev oziroma zidov. Rezultati preiskav s superplastifikatorjema so prikazani v spodnji Preglednici 15.

Preglednica 15: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M4 (16. – 17. 2. 2015)

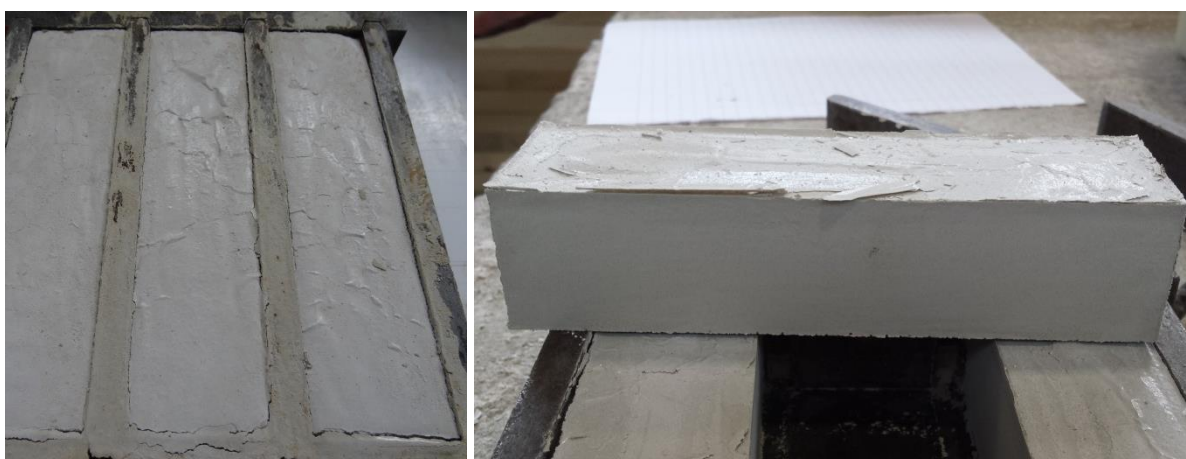
Oznaka mešanice		M4/4	M4/5	M4/6	M4/7	M4/8
Masa veziva [g]:	apno	480	480	480	480	480
	cement	467	467	467	467	467
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	1862	1862	1862	1862	1862
Dodatek [g]:	supeplastifikator A/B	9,47/A	9,47/A	9,47/A	9,34/B	9,34/B
Masa dodane vode [g]		870	940	920	960	990
Prostorninska masa [kg/m ³]		/	1882	1894	/	1893
vodo/vezivno razmerje (v/v)		0,92	0,99	0,97	1,01	1,05
masno razmerje – potreba po vodi		0,31	0,33	0,33	0,34	0,35
Pretočnost [s]	takoj	43	17,71	23,89	31,18	23,66
	po 30 min	/	17,66	22,78	/	24,09
Izločanje vode	v [ml]	/	95,5	96	/	95,5
	v ₁ [ml]	/	0,50	1,0	/	1,0
	[%]	/	0,52	1,04	/	1,05



Slika 21: Efekt izločanja vode v mešalni posodi (levo) in na mešalnih lopatkah (sredina) ter izločanje vode M4/8 – 1,05 % (desno)

Na podlagi rezultatov smo ugotovili, da je za injektiranje kamnitih zidov primerna apneno-cementna injekcijska mešanica s cementom CEM II/B-M (42,5 N) z dodatkom prašnega superplastifikatorja B (M4/8). Slednja je tekoča in obenem zelo lepljiva naprava injekcijski mešanici M4/6 s superplastifikatorjem A. Izbrano injekcijsko mešanico M4/8 bomo uporabili pri izdelavi standardnih prizem in pri injektiranju valjev.

Zaradi minimalnega izločanja vode iz injekcijskih mešanic M4/8 nismo opazili vertikalnih razpok in izrazitega krčenja. Prizme so bile svetlo sive barve, homogene in kompaktne (Slika 22). V primerjavi z ostalimi prizmami (M1, M2 in M3) so se apneno-cementne prizme zaradi vsebnosti cementa hitro strdile.



Slika 22: Minimalno izločanje vode iz kalupe (levo) in apneno-cementne injekcijske prizme M4 (desno)

4.6 Laboratorijske preiskave sveže injekcijske mešanice M5

Zadnja injekcijska mešanica M5 je po sestavi in razmerju komponent (1 : 2 : 3) enaka injekcijski mešanici M4. Pri M5 smo uporabili komercialni Portlandski cement CEM I trdnostnega razreda 42,5 z visoko zgornjo trdnostjo (R). Želeli smo preveriti, kako na injekcijske mešanice vpliva različen cement.

Ugotovili smo, da v primerjavi z injekcijsko mešanico M4 pri pretočnosti oziroma izločanju vode ni bistvenih razlik, če uporabimo črni cementa CEM I. Tudi v tem primeru je bila gosta in lepljiva apneno -cementna injekcijska mešanica z dodatkom prašnatega plastifikatorja B (M5/5). Slednjo bomo uporabili pri izdelavi standardnih prizmah in pri injektiranju valjev. Bistvene razlike med injekcijskima mešanicama M4 in M5 se bodo pokazale pri analizi rezultatov preiskav (tlačna, upogibna in cepilna trdnost) strjenjih injekcijskih mešanicah. Preliminarni rezultati in količine sveže injekcijske mešanice so prikazane v spodnji Preglednici 16.

Preglednica 16: Sestave in rezultati preiskav sveže injekcijskih mešanice M5 (18. 3. 2015)

Oznaka mešanice		M5/1	M5/2	M5/3	M5/4	M5/5
Masa veziva [g]:	apno	480	480	480	480	480
	cement	475	475	475	475	475
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	1854	1862	1862	1862	1862
Dodatek [g]:	superplastifikator A/B	/	9,55/A	9,55/A	9,5/B	9,5/B
Masa dodane vode [g]		1050	890	930	980	1020
Prostorninska masa [kg/m ³]		1854	/	1886	/	1878
vodo/vezivno razmerje (v/v)		1,10	0,93	0,97	1,03	1,07
masno razmerje – potreba po vodi		0,37	0,32	0,33	0,35	0,36
Pretočnost [s]	takoj	24,40	34,92	23,89	30,90	22,05
	po 30 min	23,53	/	24,58	/	21,39
Izločanje vode	v [ml]	96	/	95	/	95
	v ₁ [ml]	1,0	/	1,0	/	1,0
	[%]	1,04	/	1,05	/	1,05

Standardne prizme iz injekcijske mešanice M5 so bile podobne prizmam iz injekcijske mešanice M4. Tudi v tem primeru ni prišlo do prevelikega izločanja vode in do pojava vertikalnih razpok. Prizme so bile temno sive, homogene in kompaktne.

4.7 Povzetek svežih injekcijskih mešanic

V sklopu preliminarnih raziskav svežih injekcijskih mešanic smo določiti optimalne injekcijske mešanice, s katerimi bomo injektirali pripravljene valje in napolnili standardne kalupe. V spodnji Preglednici 17 so podane sestave in rezultati izbranih svežih injekcijskih mešanic.

Preglednica 17: Sestave in rezultati preiskav svežih injekcijskih mešanic M1, M2, M3, M4 in M5

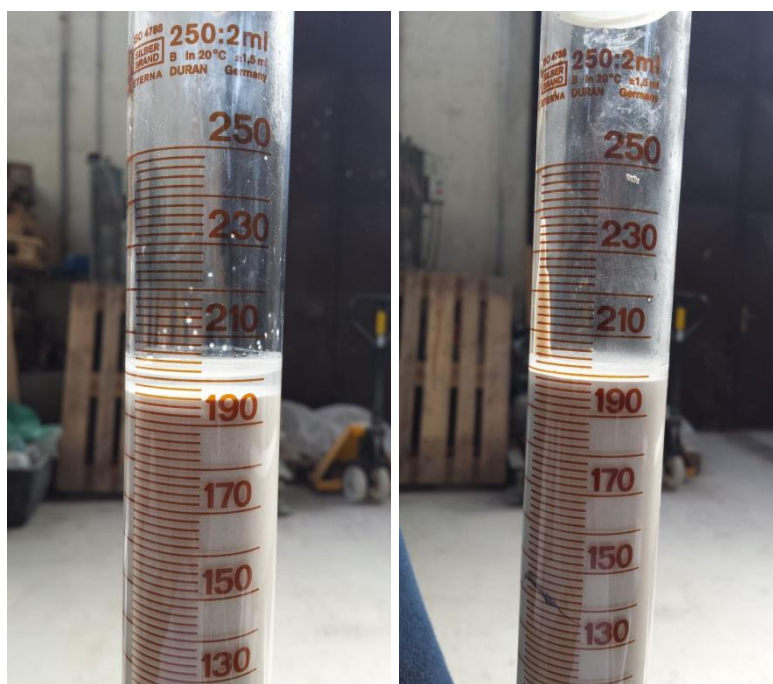
Oznaka mešanice		M1/6	M2/7	M3/9	M4/8	M5/5
Masa veziva [g]:	apno	300	300	300	480	480
	Tuf (T) / cement (C)	/	/	263/T	467/C	475/C
Masa polnila [g]:	dolomitna moka	2328	2328	2328	1862	1862
Dodatek [g]:	superplastifikator A/B	/	3,0/A	5,63/A	9,34/B	9,5/B
Masa dodane vode [g]		790	750	1050	990	1020
Prostorninska masa [kg/m^3]		1968	1974	1872	1893	1878
vodo/vezivno razmerje (v/v)		2,63	2,5	1,87	1,05	1,07
masno razmerje – potreba po vodi		0,3	0,29	0,36	0,35	0,36
Pretočnost [s]	takoj	24,20	21,14	21,44	23,66	22,05
	po 30 min	23,93	22,51	23,07	24,09	21,39
Izločanje vode	v [ml]	95	95	95	95,5	95
	v_l [ml]	3,5	3	4	1,0	1,0
	[%]	3,7	3,2	4,2	1,05	1,05

4.8 Nestandardna preiskava izločanja vode iz sveže injekcijske mešanice M1/6

V okviru preliminarnih preiskav svežih injekcijskih mešanic smo izvedli nestandardni preizkus izločanja vode iz injekcijske mešanice M1/6. Izbrane injekcijske mešanice M1/6, M2/7 in M3/9 ustrezajo le kriteriju pretočnosti ($t \leq 25$ s), kriteriju izločanja vode ($v \leq 2$ %) pa ne ustrezajo. Apneno-cementni injekcijski mešanici M4/8 in M5/5 ustrezata tako pretočnosti kot tudi izločanju vode. Odločili smo se, da preverimo, kakšno bo izločanje vode, če v merski valj kapacitete 250 ml vlijemo injekcijsko mešanico M1/6, v drugi valj pa injekcijsko mešanico M1/6 skupaj s peščenjakom frakcije 16/32. Predvidevali smo, da bo peščenjak vpil izločeno vodo in s tem se bo zmanjšal procent izločene vode. Naša predvidevanja so se izkazala za pravilna, saj se je v valju 2 s peščenjakom in injekcijsko mešanico M1/6 po 3 urah izločilo 1,0 % – 2 ml vode, medtem ko se je v valju 1 z injekcijsko mešanico M1/6 izločilo 2,5 % – 5 ml (Slika 23). Rezultati izločanja vode so zbrani v spodnji Preglednici 18.

Preglednica 18: Izločanje vode iz injekcijske mešanice brez (levo) in s peščenjakom (desno)

Valja 1 (M1/6)	Izločanje vode			Valja 2 (M1/6 + peščenjak 16/32)	Izločanje vode		
	po 3 urah	v [ml]	201			po 3 urah	v [ml]
v_I [ml]		5		v_I [ml]	2		
[%]		2,5		[%]	1,0		
po 24 urah	v [ml]	201		po 24 urah	v [ml]	201	
	v_I [ml]	10			v_I [ml]	4	
	[%]	5,0			[%]	2,0	



Slika 23: Izločanje vode po 3 urah iz mešanice M1/6 brez peščenjaka – 2,5 % (levo) in s peščenjakom – 1,0 % (desno)

Na podlagi nestandardnega testa injekcijske mešanice M1/6 smo se odločili, da bomo predhodno izbrane injekcijske mešanice, pri katerih smo imeli težave z izločanjem vode (M1/6, M2/7 in M3/9), uporabili pri injektiranju cilindričnih preizkušancev in polnjenju kalupov za standardne prizme. Pri cilindričnih preizkušancev ne bo težav z izločanjem vode, saj bo slednjo vpil agregat (peščenjak). Težava se bo pojavila pri standardnih prizmah, ki bodo zaradi prevelikega izločanja vode razpokale.

4.8.1 Standardni test vpijanje vode peščenjaka

Na podlagi izvedene nestandardne preiskave izločanja vode iz injekcijske mešanice M1/6 smo s standardnim testom vpijanja vode želeli določiti, kakšno je dejansko vpijanje peščenjaka. Preiskavo vpijanja vode smo opravili na vzorcih sivo-modrega in na rjavem peščenjaku. Vzorce iz kamnoloma Jelarji smo v laboratoriju za nekaj dni pustili sušiti na atmosferi. V času, ko smo vzorce dobili iz kamnoloma, so bili le-ti vlažni. Posušene vzorce smo tehtali (M) in jih za 24 ur sušili v sušilnici pri temperaturi 110 ± 5 °C do stalne mase (M_4). Nato smo vzorce ponovno tehtali (M_4) in jih za 24 ur potopili v vodo. Preizkušance smo z brisačo osušili (površinska voda) in jih ponovno tehtali (M_1). Vpijanje vode WA_{24} [%] smo izračunali po spodnji Enačbi 4.8, rezultati pa so zbrani v Preglednici 19:

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (4.8)$$

M_1 – masa z vodo nasičenega, površinsko suhega vzorca [g],

M_4 – masa suhega vzorca sušenega 24 ur pri temperaturi 110 ± 5 °C [g].

Preglednica 19: Rezultata vpijanja vode WA_{24} za sivo-modri (levo) in rjav peščenjak (levo)

sivo-modri peščenjak		rjav peščenjak	
WA_{24} [%]	1,10	WA_{24} [%]	1,90

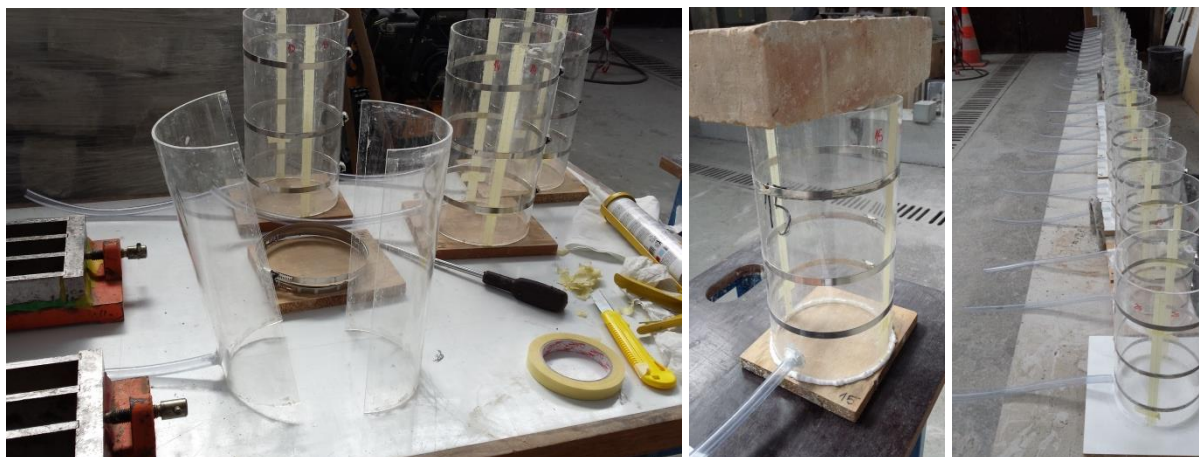
Iz Preglednice 19 opazimo, da imamo nekoliko višji odstotek vpijanja vode WA_{24} , kot so ga navedli v knjigi Slovenski naravni kamen (Slovenski naravni kamen, 1999), kjer je le-to znašalo 1,02 % (Poglavje 2).

5 PRIPRAVA IN INJEKTIRANJE CILINDRIČNIH PREIZKUŠANCEV IN PRIZEM

Večina masivnih zidov je zgrajenih troslojno z zunanjsima slojema iz delno oblikovanih kamnov ter vmesnega dela iz manjših kamnov in drobirja, ki ostane pri oblikovanju zunanjih slojev zidu. Osrednji del zidu je delno votel, brez povezanosti (homogenosti) med posameznimi kamni in sloji zidu. Glavni namen izdelave cilindričnih preizkušancev je simulirati jedro običajnega troslojnega kamnitega zidu (Uranjek, 2008). S postopnim injektiranjem predhodno izbranih svežih injekcijskih mešanic smo zapolnili cilindrične preizkušance. Deleže posameznih frakcij smo povzeli po magistrski nalogi Mojmirja Uranjeka (Uranjek, 2008). Pripravljenih je bilo 25 valjev oziroma po 5 valjev na vsako injekcijsko mešanico. Poleg cilindričnih preizkušancev smo pripravili standardne kalupe za izdelavo prizem. Zaradi velikega izločanja vode smo robove oziroma stike delov kalupov vodotesno zaprli s plastelinom. Slednji je preprečil, da bi voda, ki se je izločila iz injekcijske mešanice, odtekala iz kalupov. Zaradi lažjega kasnejšega odstranjevanja prizem smo kalupe namazali z mineralnim oljem.

5.1 Priprava cilindričnih preizkušancev – kamniti valji

Valje smo izdelali iz dveh delov valjastih kalupov iz pleksi stekla. Na stiku so bili zalepljeni z vodoodpornim lepilnim trakom in dodatno utrjeni s tremi kovinskimi objemkami (Slika 24). Sestavljene valje smo s silikonom pritrdili na lesene podstavke. Na spodnjem delu valja je bila PVC cevka premera $d = 10$ mm, preko katere se je od spodaj navzgor injektiralo preizkušance. Valji so višine $v = 30$ cm in premer $d = 15$ cm.



Slika 24: Sestavljanje in pripravljanje valjev za injektiranje

Po zgledu magistrske naloge Mojmirja Uranjeka smo določili deleže posameznih frakcij. Uranjek, ki je preiskave valjev že izvajal, je na podlagi porušenega kamnitega objekta izdelal karakteristično sejalno krivuljo in določil štiri frakcije: 45/63, 32/45, 16/32 in 8/16 mm. V valju delež posameznih frakcij znašal 37 % celotne mase za frakcijo 45/63 mm in 32/45 mm, 25 % celotne mase za frakcijo

16/32 mm in 1 % celotne mase frakcije za 8/16 mm. Kose peščenjakov smo drobili s pomočjo preše, macole in kladiva (Slika 25). Zdrobljen peščenjak smo nato presejali skozi sita (Slika 26).



Slika 25: Drobiljenje peščenjakov s pomočjo kladiva (levo) in preše (desno)



Slika 26: Sejalna analiza peščenjaka – frakcija 45/63, 32/45, 16/32 in 8/16 (od desne proti levi)

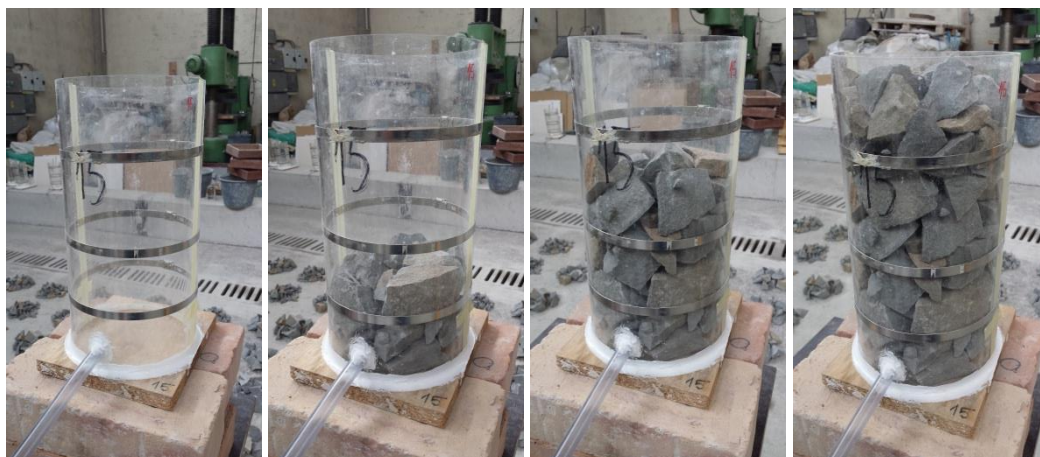
Za vse preizkušance je bil postopek priprave enoten. 1/3 višino kalupa smo postopoma napolnili s frakcijami 45/63, 16/32, 32/45 in 8/16. Postopek smo ponovili še za preostali 2/3 oziroma dokler ni bil zapolnjen celoten kalup (Slika 27). V en valj smo naložili po 7 kg peščenjaka. Za vsako frakcijo peščenjaka smo določili maso:

$$m_{45/63 \text{ mm}} = 7 \text{ kg} * 0,37 = 2,59 \text{ kg} \quad (5.9)$$

$$m_{32/45 \text{ mm}} = 7 \text{ kg} * 0,37 = 2,59 \text{ kg} \quad (5.10)$$

$$m_{16/32 \text{ mm}} = 7 \text{ kg} * 0,25 = 1,75 \text{ kg} \quad (5.11)$$

$$m_{8/16 \text{ mm}} = 7 \text{ kg} * 0,01 = 0,07 \text{ kg} \quad (5.12)$$



Slika 27: Prikaz postopnega 1/3 polnjenja cilindričnega valja s frakcijami peščenjaka

S cilindričnimi valji smo simulirali približek dejanskega stanja jedra zidu. Na naslednji način smo pripravili 25 valjev oziroma 5 valjev za vsako injekcijsko mešanico (Slika 28). Vse cilindrične preizkušance smo stekali brez in s peščenjakom. Iz razlik mas smo v nadaljevanju določili maso, delež in volumen injekcijske mešanice v valju (Poglavje 5.2).



Slika 28: Pripravljene cilindrični vzorci za injektiranje

5.2 Injektiranje cilindričnih preizkušancev

Zadnja faza svežih injekcijskih mešanic je bilo injektiranje cilindričnih preizkušancev ter vlivanje injekcijskih mešanic v standardne kalupe. V času injektiranja smo za predhodno izbrane injekcijske mešanice potekali testi pretočnosti in izločanja vode. S tem smo želeli preveriti, da je pripravljena injekcijska mešanica enaka predhodno izbrani injekcijski mešanici. Mešanje injekcijskih mešanic je potekalo v specialnem mešalcu RILEM-CEM, v katerem smo naenkrat lahko zamešali do 2 litra injekcijske mešanice. Za en valj smo potrebovali okoli 4 litre mešanice, za kar smo potrebovali do tri mešanja. Pred pričetkom mešanja smo za injekcijsko mešanico suhe komponente stekali, presejali in

shranili v vrečke. Za vseh 25 valjev je bilo potrebno pripraviti 75 vrečk. Za vsako injekcijsko mešanico smo pripravili po 5 valjev, 4 kalupe za M1/6, M2/7 in M3/9 (12 prizem na mešanico) in 3 kalupe na mešanici M4/8 in M5/5 (9 prizem na mešanico). Skupno je bilo izdelanih 25 valjev in 54 standardnih prizem.

Injektiranje valjev je potekalo od spodaj navzgor preko PVC cevi, ki je bila s silikonom pritrjena na valjast kalup pleksi stekla. Injektirali smo z napravo, katero uporabljajo za injektiranje manjših razpok v zidu (Slika 29). Čas injektiranja je bil glede na lastnosti injekcijske mešanice različen in se je gibal od 7 do 15 minut. Z injekcijsko mešanico, ki je ostala v posodi za injektiranje, smo napolnili pripravljene standardne kalupe za prizme.

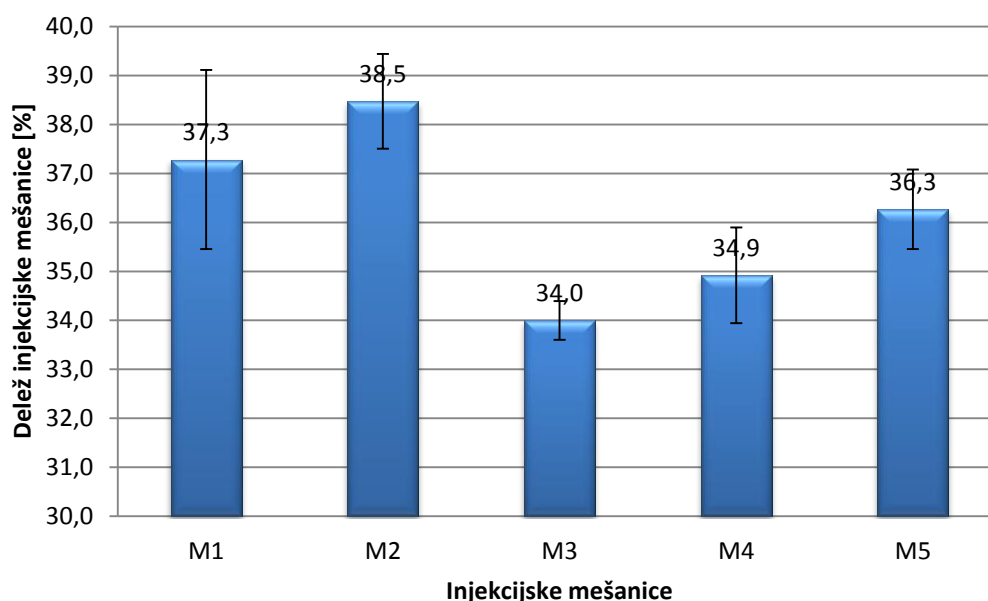


Slika 29: Injektiranje cilindričnih valjev in polnjenje standardnih kalupov za prizme

Na podlagi mase praznih valjev, mase valjev napolnjenih s peščenjakom in mase valjev s peščenjaki ter injekcijsko mešanico smo določili maso injekcijske mešanice. S pomočjo znane prostorninske mase injekcijskih mešanic smo izračunali volumen injekcijske mešanice v valju ter njen delež. Primerjava povprečnih rezultatov injekcijskih mešanic je prikazana v spodnji Preglednici 20.

Preglednica 20: Primerjava povprečnih rezultatov injekcijskih mešanic v cilindričnih preizkušancih

Injekcijska mešanica	Masa IM [kg]	Prostorninska masa IM [kg/m^3]	Votlikavost [%]	Volumen IM [l]	Volumen valja [l]	Delež IM [%]
M1	3,8	1940	26,0	2,0	5,3	37,3
M2	4,0	1952	25,5	2,0	5,3	38,5
M3	3,3	1854	29,2	1,8	5,3	34,0
M4	3,5	1874	28,5	1,9	5,3	34,9
M5	3,5	1846	29,5	1,9	5,3	36,3



Grafikon 3: Primerjava rezultatov deleža injekcijskih mešanic s standardnim odklonom

5.3 Rezultati preiskav izbranih svežih injekcijskih mešanic

5.3.1 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M1/6

Injekcijsko mešanico M1/6 smo na dan injektiranja pripravili po recepturi, ki smo jo dobili pri preliminarnih preiskavah svežih injekcijskih mešanicah. Za polnitev 5 valjev (M1-1, M1-2, M1-3, M1-4 in M1-5) in 12 prizem smo potrebovali 15 injekcijskih mešanic. Izvedli smo standardna testa pretočnosti in izločanja vode ter določili prostorninsko maso injekcijske mešanice. Dobljeni rezultati pretočnosti so bili odlični in niso odstopali od predhodnih preiskav. Tudi izločanje vode je bilo boljše, vendar še vedno nad dovoljeno mejo 2 % (Preglednica 21).

Preglednica 21: Rezultati sveže injekcijske mešanice M1/6 (30. 3. 2015)

Injekcijska mešanica	v/v masno razmerje	Prostorninska masa [kg/m ³]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
			takoj	po 30 min.	v [ml]	v _f [ml]	[%]
M1	0,30	1940	23,74	22,50	97	2,5	2,6

Pripravljena mešanica nam pri injektiranju ni delala težav. Povprečen čas injektiranja za en valj je bil okoli 7 minut. Po pričakovanju na vrhu valjev ni prišlo do nabiranja izločene vode, saj je le-to vpil peščenjak, voda se je nabrala na vrhu standardnih kalupov (Slika 30). Po injektiranju smo opazili, da se v valju injekcijska mešanica začela krčiti, na vrhu valja pa se je posedla za kakšen mm (Slika 30).



Slika 30: Določanje prostorninske mase M1/6 (levo), težava z izločanjem vode iz standardnih kalupov (sredina) in posedanje injekcijske mešanice (desno)

5.3.2 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M2/7

Priprava injekcijske mešanice M2/7 je bila podobna injekcijski mešanici M1/6, le da smo v tem primeru mešanici v mešalno posodo dodali procent superplastifikatorja A (Slika 31). Ponovno smo za 5 valjev (M2-6, M2-7, M2-8, M2-9 in M2-10) in 12 prizem zamešali 15 injekcijskih mešanic. Za pripravo treh injekcijskih mešanic smo potrebovali okoli 20 minut.



Slika 31: Prikaz priprave injekcijske mešanice M2/7 v mešalni posodi

Izločanje vode iz injekcijske mešanice M2/7 je bilo na meji dovoljenega, časa pretočnosti pa sta pod 25 s in tudi razlika med njima ni večja od 10 % (Preglednica 22).

Preglednica 22: Rezultati sveže injekcijske mešanice M2/7 (31. 3. 2015)

Injekcijska mešanica	Potreba po vodi v/v	Prostorninska masa [kg/m ³]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
			takoj	po 30 min.	v [ml]	v ₁ [ml]	[%]
M2	0,29	1952	21,94	23,50	95	2	2,1

Pripravljena mešanica nam tudi v tem primeru pri injektiranju ni delala težav. Povprečen čas injektiranja za en valj je tudi tokrat znašal okoli 7 minut. Na vrhu valjev se voda ni nabrala, se je pa ponovno nabrala na standardnih kalupih. Tudi injekcijska mešanica M2/7 se je za kakšen mm posedla in skrčila znotraj kalupa (Slika 32).



Slika 32: Krčenje injekcijske mešanice M2/7 v cilindričnih preizkušancih

5.3.3 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M3/9

Največ časa pri pripravi injekcijske mešanice in največ težav pri injektiranju nam je povzročala injekcijska mešanica M3/9, ki je vsebovala tuf. Zaradi vpijanja vode oziroma spreminjanja konsistence injekcijske mešanice smo pred injektiranjem tuf 24 ur namočili v vodi. Dobljeni rezultati pretočnosti so bili odlični, saj sta oba časa bila pod 25 s. Test izločanja vode je bil večji od 2 %, vendar manjši kot pri preliminarnih raziskavah (4,2 %). Rezultat testa sveže injekcijske mešanice je prikazan v Preglednici 23. Za pripravo 5 valjev (M3-11, M3-12, M3-13, M3-14 in M3-15) in 12 prizem smo zamešali 15 injekcijskih mešaníc, po tri za vsak valj.

Preglednica 23: Rezultati sveže injekcijske mešanice M3/9 (1. 4. 2015)

Injekcijska mešanica	Potreba po vodi v/v	Prostorninska masa [kg/m ³]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
			takoj	po 30 min.	v [ml]	v ₁ [ml]	[%]
M3	0,36	1854	22,37	24,50	95	3	3,2

Pri injektiranju cilindričnih valjev nam je zaradi viskoznosti injekcijske mešanice le-ta začela dvigovati kamne iz valja. Pomagali smo si z leseno desko, s katero smo preprečili dvigovanje kamnov. V primerjavi s prejšnjima injektiranjema je bil tokratni čas injektiranja nekoliko daljši in je znašal okoli 15 minut. Zaradi vsebnosti tufa so bili valji temnejše barve. Na vrhu valjev (Slika 33) in prizem se je izločila sol, ki je posledica vsebnosti tufa. Večjo težavo predstavlja veliko krčenje injekcijskih mešanic, ki je posledica relativno velike količine vode. Posledica izločanja vode je tudi luščenje vrhnjih delov prizem. Po injektiranju smo na valjih skozi pleksi steklo opazili, da je prišlo do krčenja injekcijske mešanice, kar se je odražalo tudi na vrhu valja, ki se je za 0,5 mm posedel (Slika 33).



Slika 33: Krčenje injekcijskih prizem (levo), krčenje injekcijske mešanice v valju (sredina) in posedanje injekcijske mešanice ter izločanje soli (desno)

5.3.4 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice M4/8 in M5/5

Cementno-apneni injekcijski mešanici M4/8 in M5/5 smo na dan injektiranja pripravili po recepturi, ki smo jo dobili pri preliminarnih preiskavah svežih injekcijskih mešanic. Pri preiskavah nam je težavo povzročala injekcijska mešanica M4/8, pri kateri čas pretočnosti ni bil pod 25 s. Izkazalo se je, da je injekcijska mešanica z 900 g vode nestabilna, zato smo količino vode povečali na 1020 g. S tem ukrepom smo zagotovili stabilnost mešanice oziroma enake lastnosti injekcijske mešanice M4/8*. Injekcijska mešanica M5/5 nam pri preiskavah ni delala težav. Za polnitev 10 valjev (5 na mešanico) in 18 prizem (9 na mešanico) smo potrebovali 30 injekcijskih mešanic. Dobljeni rezultati pretočnosti in izločanja vode so zbrani v Preglednici 24.

Preglednica 24: Rezultati sveže injekcijske mešanice M4/8* in M5/5 (2. – 3. 4. 2015)

Injekcijska mešanica	Potreba po vodi v/v	Prostorninska masa [kg/m ³]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
			takoj	po 30 min.	v [ml]	v ₁ [ml]	[%]
M4	0,36	1874	24,5	23,90	95	1	1,05
M5	0,36	1862	23,5	22,90	95	1	1,05

Pripravljeni mešanici nam pri injektiranju nista delali težav. Povprečen čas injektiranja za en valj je bil tokrat okoli 10 minut. V primerjavi z ostalimi valji so slednji bili zaradi uporabe cementa temne barve. Zaradi manjšega procenta izločanja vode nismo imeli težav s krčenjem prizem in posedanjem injekcijske mešanice (Slika 34).



Slika 34: Valja injekcijske mešanice M4/8* (levo) in izločanje vode iz injekcijske mešanice M5/5 (desno)

6 ANALIZA REZULTATOV PREISKAV STRJENIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC

V zadnji fazi raziskav smo v različnih časovnih obdobjih (35, 70 in 105 dni) izvajali preiskave strjenih injekcijskih mešanic na cilindričnih preizkušancih in prizmah. Vzorce smo razkalupili pred prvim sklopom preiskav in jih sušili v laboratoriju na atmosferskih pogojih. Na valjih smo v različnih časovnih obdobjih izvajali preiskave tlačne trdnosti, cepilno natezno trdnost pa smo določili na vzorcih starosti 70 dni. Na standardnih prizmah smo izmerili krčenje, prostorninsko maso in določili tlačno ter upogibno natezno trdnost. Tekom preiskav smo na valjih in prizmah s fenolftaleinskim testom spremljali stopnjo karbonatizacije. Fenolftaleinsko metodo smo izvedli po standardu SIST EN 14630 (SIST, 2006), s katerim se ugotavlja globina karbonatizacije v strjenem betonu. Preizkuse strjene injekcijske mešanice smo opravili na petindvajsetih valjih in štirinpetdesetih prizmah.

35 dni po injektiranju smo del vzorcev prizem izpostavili pospešenim pogojem staranja pri povišani temperaturi 60 °C v NaOH raztopini. Na staranih prizmah smo po 70 in 105 dnevih izvedli upogibne in tlačne preiskave. Pospešeni pogoji staranja so bili zasnovani na osnovi realnih pogojev, katerim je lahko material tekom življenjske dobe izpostavljen. Raztopina NaOH se uporablja za preiskave potencialne alkalne reaktivnosti agregatov po standardu ASTM C227-10 (ASTM, 2010). Koncentracija raztopine je bila eno-molarna (1M). Referenčne prizme smo negovali na zraku, da je proces karbonatizacije zagotovil ustrezno stabilnost in trdnost prizem.

Tekom preliminarnih preiskav sveže injekcijske mešanice smo po 15 dneh razkalupljenja prizme zaprli v plastične posode z omejenim dotokom svežega zraka oziroma ogljikovega dioksida CO₂, ki je potreben za karbonatizacijo. Z nestandardizirano preiskavo smo želeli preveriti in primerjati mehanske lastnosti standardnih prizem zaprtih v posodi, sušenih na zraku in negovanih v NaOH raztopini pri povišani temperaturi. Prizme smo preizkušali po 105 dneh od vlijanja v kalupe.

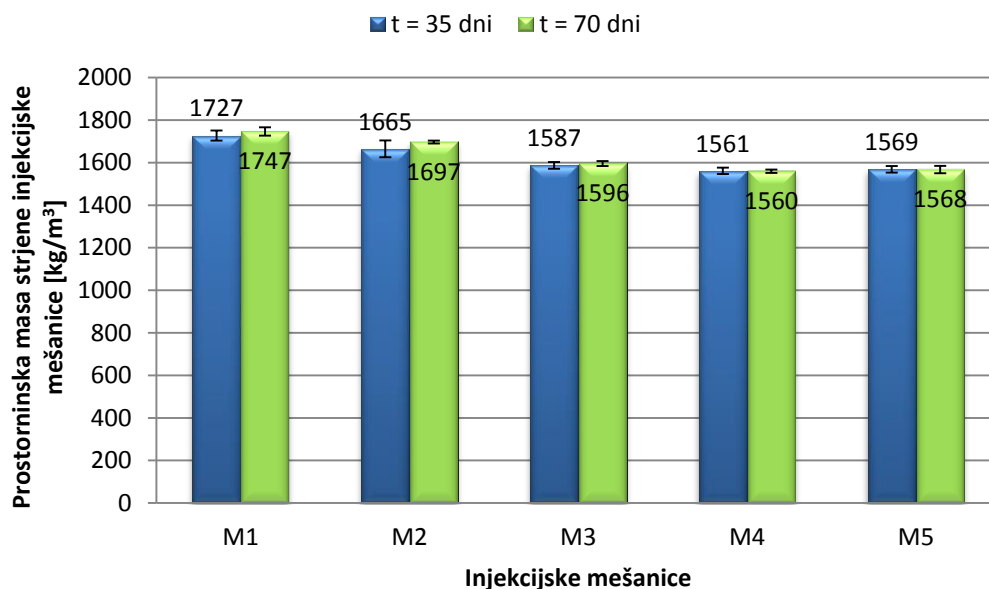
6.1 Analiza rezultatov preiskav prizem

6.1.1 Prostorninska masa strjenih injekcijskih mešanic

Prostorninsko maso strjene injekcijske mešanice smo določili v dveh časovnih obdobjih pri starosti preizkušancev 35 in 70 dni. Zaradi manjšega števila prizem po 105 dnevih nismo določili prostorninske mase. Slednjo smo določili, da smo prizme stehali in jim z kljunastim merilom izmerili vse tri dimenzije. V spodnji Preglednici 25 so prikazane povprečne vrednosti prostorninske mase v časovnih obdobjih 35 in 70 dni.

Preglednica 25: Primerjava povprečnih prostorninske mase in koeficient variacije strjene injekcijske mešanice v dveh časovnih obdobjih (35 in 70 dni)

Injekcijska mešanica	Povprečna prostorninska masa ρ [kg/m ³]					
	$t = 35$ dni			$t = 70$ dni		
	Št. prizem	ρ [kg/m ³]	Koef. variacije [%]	Št. prizem	ρ [kg/m ³]	Koef. variacije [%]
M1	12	1727	1,4	4	1747	1,1
M2	12	1665	2,4	3	1697	0,4
M3	12	1587	1,0	4	1596	0,7
M4	9	1561	1,0	4	1560	0,5
M5	9	1569	1,0	4	1568	1,1

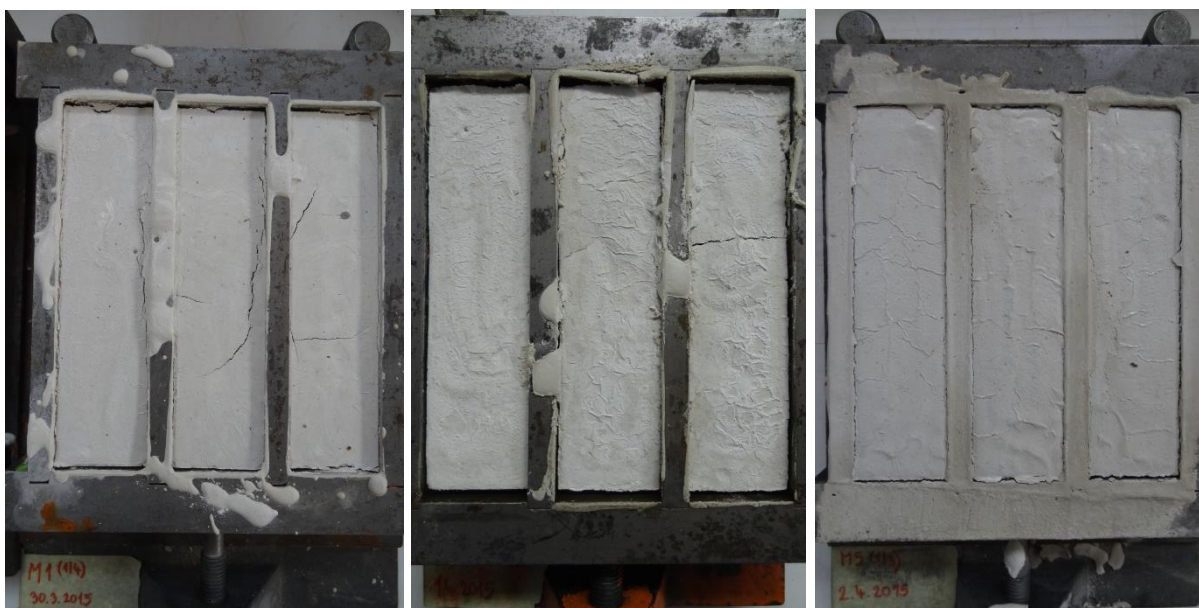


Grafikon 4: Primerjava povprečnih prostorninskih mas v dveh časovnih obdobjih (35 in 70 dni)

Iz Preglednice 25 in Grafikona 4 je razvidno, da imata po 35 dneh največjo prostorninsko maso strnjena apnena injekcijska mešanica M1, najmanjšo prostorninsko maso pa strjnjeni apneno-cementni injekcijski mešanici M4 in M5. Največji koeficient variacije (raztros rezultatov) je imela injekcijska mešanica M2, ki je največ odstopala od povprečja v masi in volumnu. V obdobju 70 dni je prišlo do manjših sprememb prostorninske mase. Zaradi karbonatizacije in povečanja volumna apna so se za malenkost povečale mase prizem oziroma prostorninske mase (M1, M2 in M3). Največji raztros podatkov (odstopanje od povprečja v masi in volumnu) sta imeli injekcijski mešanici M1 in M5.

6.1.2 Krčenje prizem

Že pri preliminarnih preiskavah svežih injekcijskih mešanic smo ugotovili, da zaradi prevelikega izločanja vode oziroma potrebe po vodi, pride do krčenja prizem in s tem do nastanka razpok. Posledica prekomernega krčenja injekcijske mešanice je zmanjšanje sprijemnosti (adhezijo) z gradniki zidu. Krčenje prizem smo določili s pomočjo kljunastega merila, s katerim smo izmerili dimenzije prizme (l – dolžina, h – višina in b – širina). Najbolj razpokane so bile prizme injekcijskih mešanic M1 in M2, najmanj oziroma brez razpok pa prizme injekcijske mešanice M4 in M5 (Slika 35).



Slika 35: Krčenje prizem injekcijskih mešanic M1 (levo), M3 (sredina) in M5 (desno)

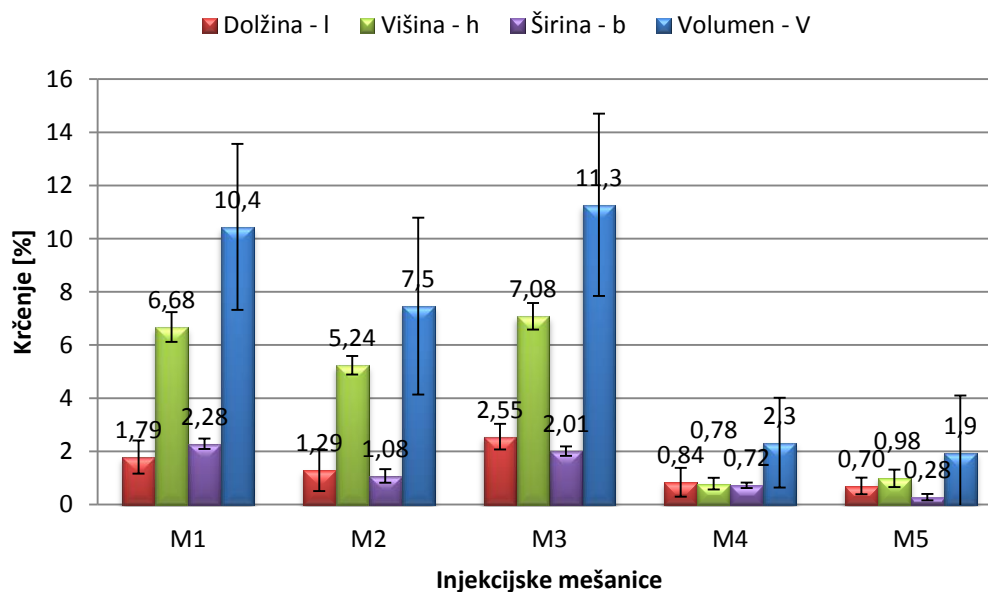


Slika 36: Zbrane prizme M1, M2, M3, M4 in M5 (levo), razpokana prizma M3 (zgoraj desno) in določanje dimenzij s pomočjo kljunastega merila (spodaj desno)

Iz spodnje Preglednice 26 in Grafikona 5 je razvidno, da smo največje povprečno volumsko spremembo izmerili pri injekcijski mešanici M3, kjer je potreba po vodi največja. Slednja se je največ skrčila v dolžini za 2,55 % in po višini za 7,08 %. Po širini se je najbolj skrčila injekcijska mešanica M1 za 2,28 %. Kljub veliki potrebi po vodi so se najmanj skrčile prizme injekcijske mešanice M4 in M5, kjer je bila volumska sprememba okoli 2 %. Glede na delež krčenja bi bilo smiselno zmanjšati potrebo po vodi, vendar v tem primeru ne bi dosegli ustrezne pretočnosti sveže injekcijske mešanice.

Preglednica 26: Primerjava krčenja in potrebe po vodi pri injekcijskih mešanicah po 35 dneh

IM	Št. prizem	Dolžina		Višina		Širina		Volumen		Potreba po vodi
		l [mm]	Δl [%]	h [mm]	Δh [%]	b [mm]	Δb [%]	V [cm ³]	ΔV [%]	
M1	12	157,14	1,79	37,33	6,68	39,09	2,28	229	10,4	0,30
M2	12	157,94	1,29	37,91	5,24	39,57	1,08	237	7,5	0,29
M3	12	155,91	2,55	37,17	7,08	39,20	2,01	227	11,3	0,37
M4	9	158,66	0,84	39,69	0,78	39,71	0,72	250	2,3	0,36
M5	9	158,88	0,70	39,61	0,98	39,89	0,28	251	1,9	0,36



Grafikon 5: Rezultati krčenja injekcijskih mešanic po 35 dneh

6.1.3 Tlačna trdnost prizem

Povprečno tlačno trdnost f_{cc} prizem smo določili v treh časovnih obdobjih pri starosti preizkušancev 35, 70 in 105 dni. V sklopu raziskav smo del prizem izpostavili pospešenim pogojem staranja pri povišani temperaturi 60 °C v NaOH raztopini in jim po 70, 105 dnevih opravili tlačne preiskave. Obenem smo tlačno trdnost določili na prizmah, ki smo jih v času preliminarnih preiskav zaprli v

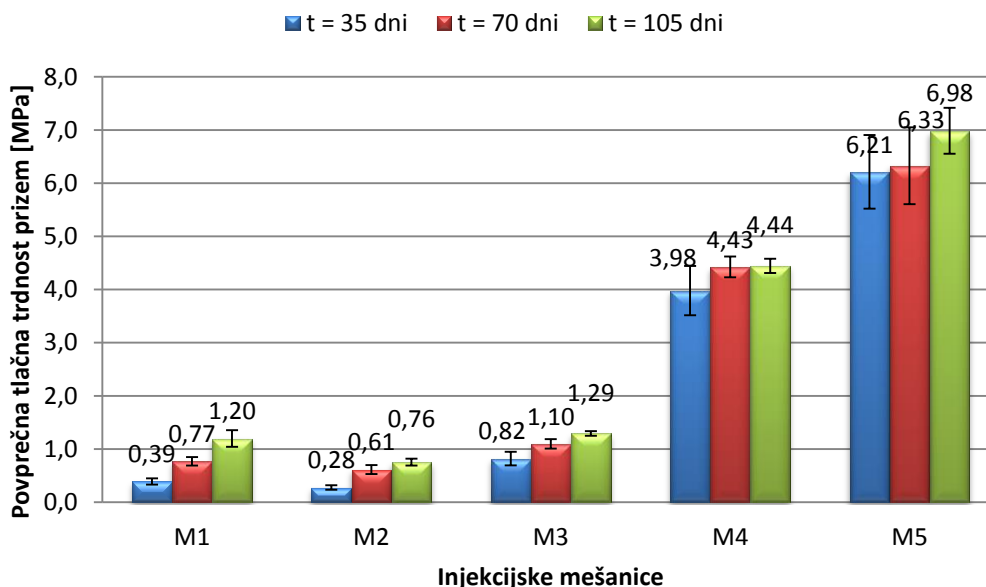
plastične posede brez dotoka svežega zraka. Želeli smo primerjati mehanske lastnosti standardnih prizem oziroma vezanje injekcijske mešanice v različnih pogojih. Za določitev tlačne trdnosti smo uporabili polovičke prizem, ki so ostale od upogibnega preizkusa.

6.1.3.1 Tlačna trdnost prizem sušenih na zraku

Po 35 dneh sta pričakovano najvišjo povprečno tlačno trdnost dosegli injekcijski mešanici M5 6,21 MPa (CEM I) in M4 3,98 MPa (CEM II/B-M). Preostale injekcijske mešanice M1, M2 in M3 so dosegle nižje vrednosti od 0,28 do 0,82 MPa. Pri vseh injekcijskih mešanicah je bil raztros rezultatov velik in je pri vseh presegel 10 %. Trend naraščanja tlačne trdnosti se je nadaljeval tudi na preizkušancih v obdobju 70 dni. Največji prirastek tlačne trdnosti smo zabeležili pri injekcijski mešanici M4, najmanjšega pa pri M5. Tudi pri 70 dni starih vzorcih je bil raztros rezultatov velik med 4,4 in 13,6 %. Pri starosti 105 dni se je trend rasti tlačne trdnosti nadaljeval. Največjo tlačno trdnost in največji prirastek tlačne trdnosti smo zabeležili pri injekcijski mešanici M5 6,98 MPa. V primerjavi s prejšnjimi raztrosi je bil tokratni raztros podatkov veliko manjši. Rezultati povprečnih tlačnih trdnosti so prikazani v Preglednici 27 in na Grafikonu 6.

Preglednica 27: Rezultati povprečne tlačne trdnosti prizem sušenih na zraku (35, 70 in 105 dni)

Injekcijska mešanica	Čas [t]	Sila F [kN]	f_{mc} [MPa]	Koef. variacije [%]
M1	35 dni	0,60	0,39	14,9
M1	70 dni	1,17	0,77	10,4
M1	105 dni	1,83	1,20	13,1
M2	35 dni	0,43	0,28	15,3
M2	70 dni	0,96	0,61	13,6
M2	105 dni	1,17	0,76	8,6
M3	35 dni	1,24	0,82	14,8
M3	70 dni	1,67	1,10	8,2
M3	105 dni	1,95	1,29	3,4
M4	35 dni	6,29	3,98	11,7
M4	70 dni	6,89	4,43	4,4
M4	105 dni	7,00	4,44	3,0
M5	35 dni	9,88	6,21	11,1
M5	70 dni	10,04	6,33	11,4
M5	105 dni	11,08	6,98	6,2



Grafikon 6: Primerjava rezultatov povprečnih tlačnih trdnosti za prizme sušene na zraku (35, 70 in 105 dni)

Pri vseh strjenih injekcijski mešanicah smo tekom časovnega obdobja zabeležili pričakovan trend rasti tlačne trdnosti (Grafikon 6). Najboljše tlačne rezultate smo pričakovano dosegli pri apneno-cementnih injekcijskih mešanicah M4 in M5. Do podobnega zaključka (največja trdnost apneno-cementnih injekcijskih mešanic) sta prišla Alja Arrigler (Arrigler, 2013) in Mojmir Uranjek (Uranjek, 2008). V primeru, ko so mehanske lastnosti injekcijske mešanice boljše kot mehanske lastnosti obstoječega veziva v zidu, se poleg nosilnosti zidu poveča tudi togost zidu. V kolikor želimo ohraniti duktilno obnašanje zidu, se morajo tlačne trdnosti injekcijske mešanice gibati v okviru tlačnih trdnosti veziva v zidu (Uranjek, 2008).

Presenetljivo je, da smo pri prizmah injekcijske mešanice M1 dobili večje tlačne trdnosti kot pri prizmah injekcijske mešanice M2. Mešanici imata enak volumski delež komponent, razlikujeta pa se v različni količini vode in v dodatku. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da na tlačno trdnost vplivata količina vode, ki je bila v primeru M2 manjša in dodatek superplastifikator.

6.1.3.2 Tlačna trdnost prizem pri pospešenih pogojih staranja

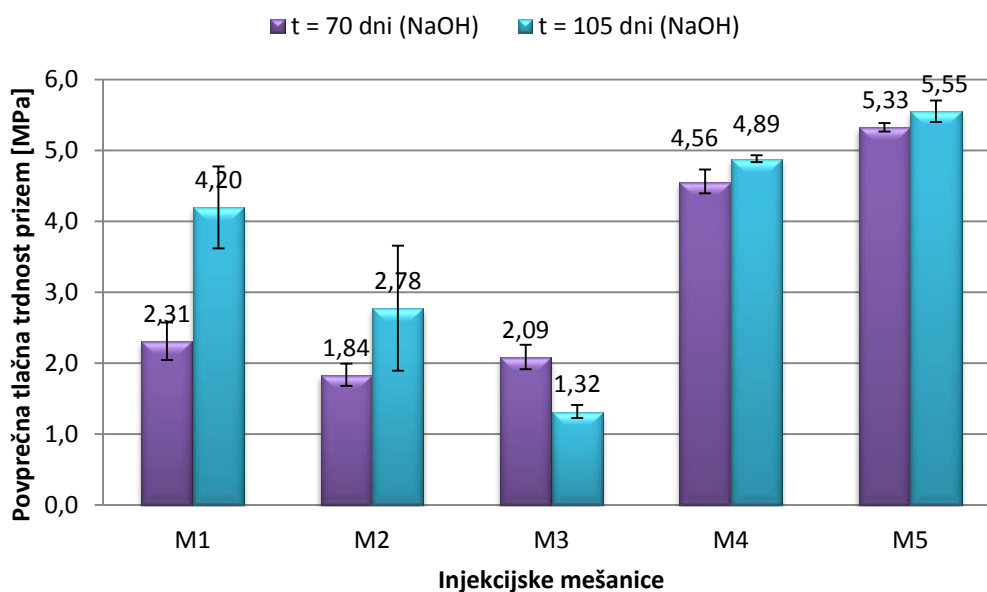
Na vzorcih izpostavljenih pospešenim pogojem staranja smo pri starosti 70 in 105 dni izvedli meritve tlačne trdnosti. Vzorce smo po razkalupljenju pri starosti 35 dni potopili v raztopino 1M NaOH v deionizirano vodo. Iz spodnje Preglednice 28 in Grafikona 7 opazimo, da so se vrednosti povprečne tlačne trdnosti v primerjavi z vzorci, ki so bili starani na zraku, povečale. Predvidevamo, da je v vzorcih potekla alkalno-karbonatne reakcije – ACR dolomitnega polnila in apnenega veziva. Pri ACR

reakciji pride do procesa dedolomitizacije in tvorbe sekundarnega CaCO_3 v bližini spremenjenih zrn, s tem pa do spremembe mikrostrukture (Štukovnik in sod., 2014).

Iz Grafikona 7 opazimo, da imamo v časovnem obdobju 70 dni trend rasti povprečne tlačne trdnosti. Po pričakovanju smo največjo vrednosti dobili za apneno -cementne vzorce 5,33 MPa, najmanjšo pa za apneno injekcijsko mešanico M2 s superplastifikatorjem 1,84 MPa. Pri 105 dnevuh opazimo, da pri vzorcu z dodatkom tufa M3, pride do padca povprečne tlačne trdnosti. Eden izmer možnih razlogov je, da se ACR počasneje razvija zaradi vpliva pucolanske reakcije (Štukovnik in sod., 2013). V vseh ostalih primerih se povprečne tlačne trdnosti povečajo. Največji prirastek zasledimo pri vzorcu M1, kjer se vrednost poveča skoraj za dvakratni faktor.

Preglednica 28: Povprečni rezultati tlačne trdnosti prizem v NaOH raztopini za časovni obdobji 70 in 105 dni

Injekcijska mešanica	Čas [t]	Sila F [kN]	f_{mc} [MPa]	Koef. variacije [%]	
raztopina - NaOH	M1	70 dni	3,57	2,31	11,4
	M1	105 dni	6,44	4,20	13,8
	M2	70 dni	2,89	1,84	8,5
	M2	105 dni	4,37	2,78	31,7
	M3	70 dni	3,13	2,09	8,3
	M3	105 dni	2,00	1,32	7,0
	M4	70 dni	7,22	4,56	3,7
	M4	105 dni	7,71	4,89	1,0
	M5	70 dni	8,52	5,33	1,1
	M5	105 dni	8,80	5,55	2,7



Grafikon 7: Povprečna tlačna trdnost za prizme v NaOH raztopini za časovni obdobji 70 in 105 dni

Dobljeni rezultati injekcijskih mešanic so primerljivi z rezultati v doktorski disertaciji Petre Štukovnik (Štukovnik, 2015), ki je raziskovala vpliv okolja na historične materiale z mineralnim vezivom. Mehanske lastnosti se na vzorcih, ki so bili izpostavljeni ekstremnim pogojem (NaOH raztopina in temperatura 60 °C), ohranijo. Razlog za ohranitev in izboljšanje mehanskih lastnosti je ACR, ki vpliva na trdnost stika med agregatnim zrnem in vezivom. Apnene malte v ekstremnih pogojih praviloma niso obstojne, saj je apneno vezivo zračno vezivo, z uporabo dolomitnega agregata pa pride do poteka ACR, ki vpliva predvsem na tlačno trdnost (Štukovnik, 2015).

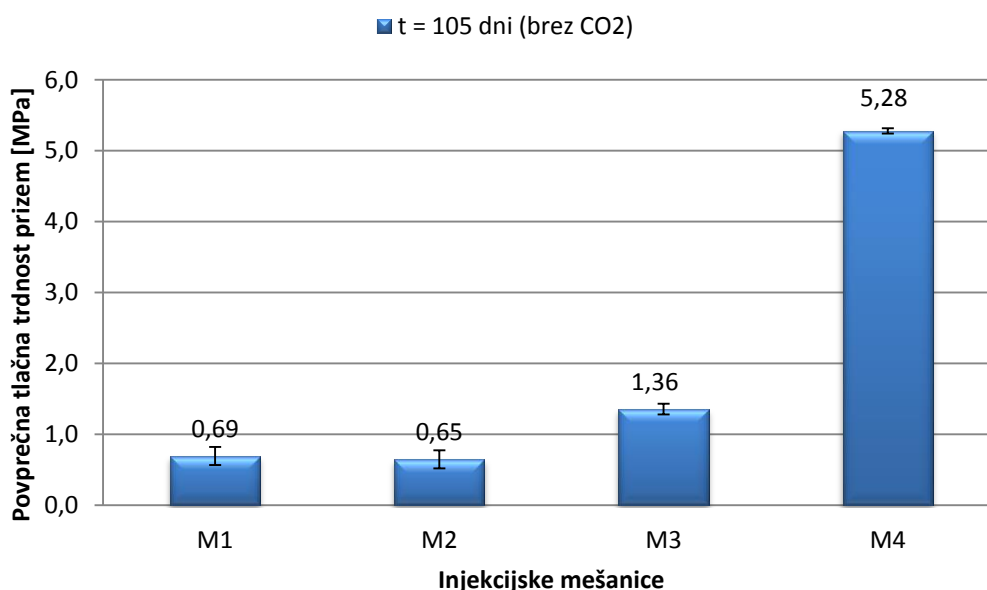
6.1.3.3 Tlačna trdnost prizem zaprtih v plastičnih posodah

Tekom preliminarnih preiskav sveže injekcijske mešanice (Poglavje 4) smo po 15 dneh standardne prizme razkalupili in jih zaprli v plastične posode. S tem smo ponazorili jedro zida, v katerem ni dostopa svežega zraka oziroma CO₂, ki je potreben za karbonatizacijo apna. Posode s prizmami smo odprli po 105 dneh. V posodah je bil močen zatohel vonj po sveži injekcijski mešanici, na dnu in ostenju posode pa se je nabral kondenz. Prizme so bile vlažne. Tlačne trdnosti smo izvedli na vzorcih injekcijske mešanice M1, M2, M3 in M4 (zaradi težav vzorcev M5 nismo upoštevali).

Na podlagi povprečnih tlačnih trdnosti smo ugotovili, da kljub pomanjkanju CO₂, pride do procesa vezanja injekcijske mešanice. Predvidevamo, da poteče reakcija med dolomitnim polnilom in mineralnim vezivom in s tem pride do povečanja tlačnih trdnosti skozi čas. Največje vrednosti smo pričakovano dobili za apneno-cementne vzorce 5,28 MPa, najmanjše pa za apneno injekcijsko mešanico M2 s superplastifikatorjem 0,65 MPa (Preglednica 29). Tudi v tem primeru smo pri vzorcu M2, pri katerem smo uporabili manjšo količino vode in superplastifikator A, zabeležili manjše tlačne trdnosti v primerjavi z vzorci M1 (Grafikon 8).

Preglednica 29: Povprečne tlačne trdnosti prizem zaprtih v plastičnih posodah brez CO₂

Injekcijska mešanica		Čas [t]	Sila F [kN]	f_{mc} [MPa]	Koef. variacije [%]
zaprte CO ₂	M1	105 dni	1,07	0,69	8,8
	M2		1,01	0,65	6,3
	M3		2,02	1,36	8,5
	M4		8,41	5,28	7,5

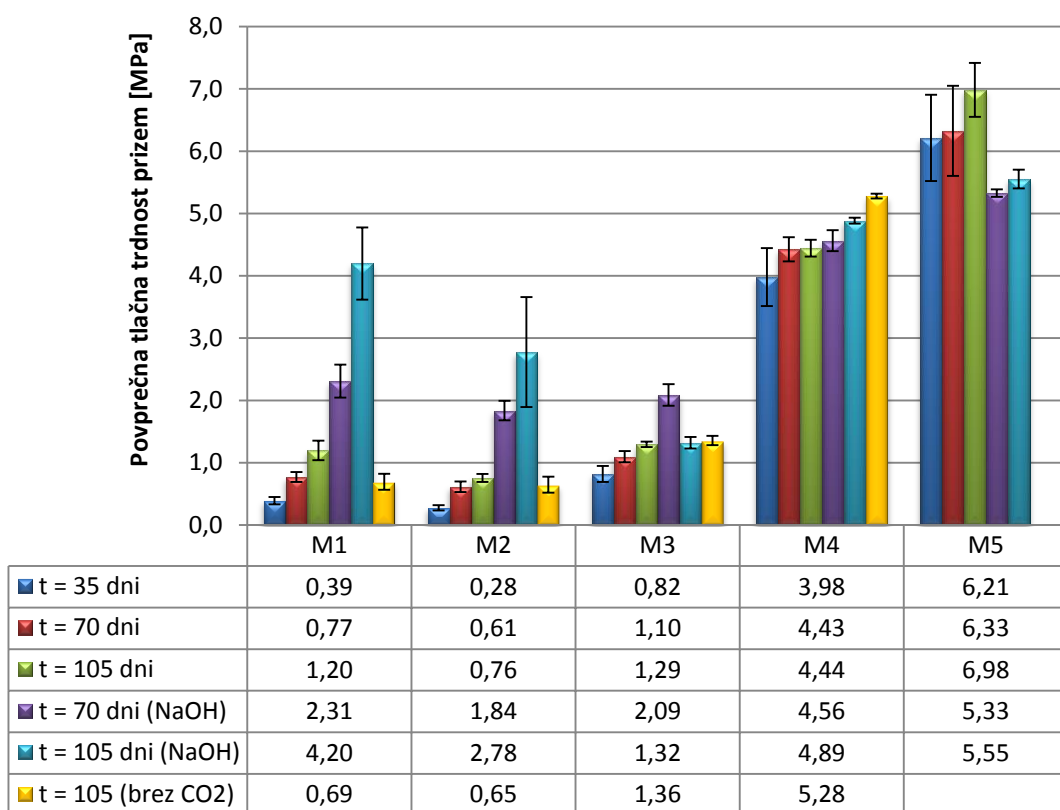


Grafikon 8: Povprečna tlačnih trdnosti prizem zaprtih v plastičnih posodah za časovno obdobje 105 dni

6.1.3.4 Diskusija

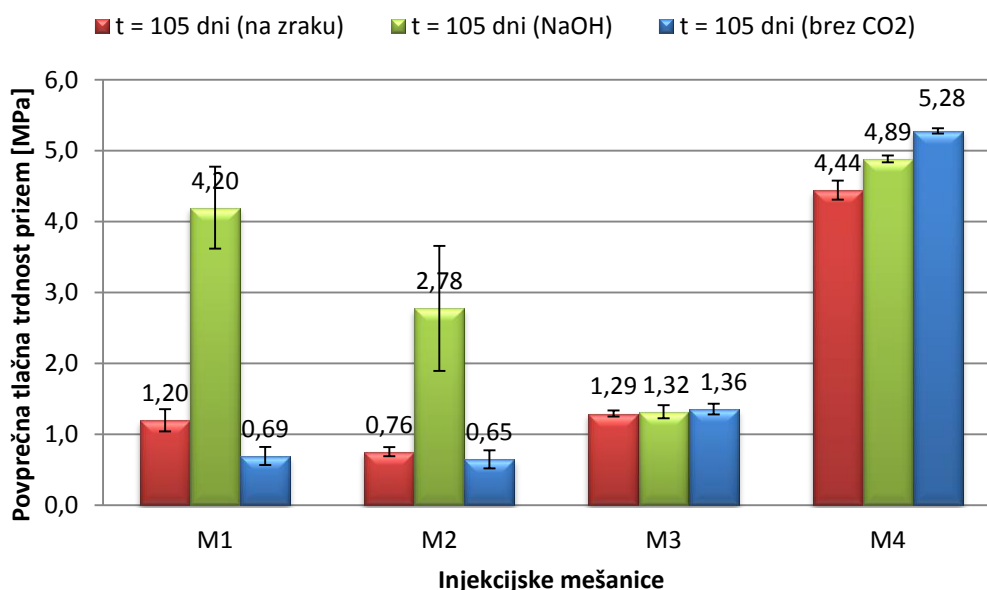
Za prizme sušene na zraku smo tekom časovnega obdobja zabeležili pričakovan trend rasti povprečne tlačne trdnosti. Največje vrednosti smo dobili za apneno-cementne prizme, najmanjše pa za apnene prizme s superplastifikatorjem A. Na podlagi injekcijskih mešanic M1 in M2 smo ugotovili, da na tlačno trdnost vplivata količina vode in superplastifikator (Grafikon 9).

V primerjavi z vzorci, ki so bili sušeni na zraku in vzorcih izpostavljenih pospešenim pogojem staranja v časovnem obdobju 70 dni, opazimo skok povprečne tlačne trdnosti za injekcijske mešanice M1, M2, M3 in M4 (Grafikon 9). Predvidevamo, da je v vzorcih potekla alkalno-karbonatne reakcije – ACR dolomitnega polnila in mineralnega veziva. Pri injekcijski mešanici M5 smo zabeležili padec povprečne tlačne trdnosti (5,33 MPa). Tudi po preteku 105 dni se je povprečna tlačna trdnost vzorcev M5 povečala (5,55 MPa), vendar je še vedno nižja od vzorcev sušenih na zraku (6,98 MPa). Opazen je počasen trend rasti. Največji prirastek povprečne tlačne trdnosti opazimo pri vzorcih M1 (4,20 MPa), kjer se je vrednost povečala za skoraj dvakratni faktor. Presenetljiv je padec povprečne tlačne trdnosti pri vzorcih z dodatkom tufa M3 (1,32 MPa), pri katerem smo dobili podobne vrednosti kot pri vzorcih sušenih na zraku (1,29 MPa). Možno je, da se zaradi prisotnosti pucolanske reakcije ACR počasneje razvije (Štukovnik in sod., 2013).



Grafikon 9: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti prizem v treh različnih okoljih in treh časovnih obdobjih

Pri vzorcih, ki so bili zaprti v plastičnih posodah, smo pri injekcijski mešanici M3 in M4 dobili presenetljivo večje povprečne tlačne trdnosti kot pri vzorcih sušenih na zraku v obdobju 105 dni (Grafikon 10). Pri injekcijskih mešanicah M1 in M2 tega trenda ne zasledimo. Presenetljivo je tudi dejstvo, da smo pri vzorcih M4, ki so bili izpostavljeni pospešenim pogojem staranja, dosegli manjšo tlačno trdnost 4,89 MPa kot pri vzorcih zaprtih v posodah 5,28 MPa. Podobno je učinkovalo pri vzorcu M3, vendar do tega pride, ker se ACR počasneje razvija zaradi vpliva pucolanske reakcije (Štukovnik in sod., 2013).



Grafikon 10: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti prizem sušenih na zraku, izpostavljenih pospešenim pogojem staranja in zaprtih v plastičnih posodah za časovno obdobje 105 dni

Iz rezultatov povprečne tlačne trdnosti za časovno obdobje 105 dni lahko sklepamo, da ima ACR vpliv na mehanske karakteristike injekcijskih mešanic. Domnevamo, da pri vzorcih skozi daljšo časovno obdobje poteče reakcija med dolomitnim polnilom in mineralnim vezivom in s tem pride do povečanja tlačnih trdnosti skozi čas.

6.1.4 Upogibna natezna trdnost prizem

Povprečno upogibno natezno trdnost f_{mf} smo določali na celih prizmah v treh časovnih obdobjih. Zaradi izločanja vode oziroma krčenja injekcijskih mešanic je bilo veliko prizem razpokanih, kar je pomenilo, da smo za preiskave imeli na voljo malo vzorcev. Kljub temu, smo del prizem 35 dni po injektiranju izpostavili pospešenim pogojem staranja pri povišani temperaturi v NaOH raztopini in po 70 ter 105 dnevno opravili upogibno natezne preiskave. Slednje smo prav tako izvedli na vzorcih zaprtih v plastičnih posodah po 105 dnevno. Upogibna natezna trdnost strjene injekcijske mešanice je bolj kot tlačna trdnost parameter, ki kaže na sposobnost mešanice, da zagotovi ustrezno povezanost posameznih slojev zidu (Uranjek, 2008).

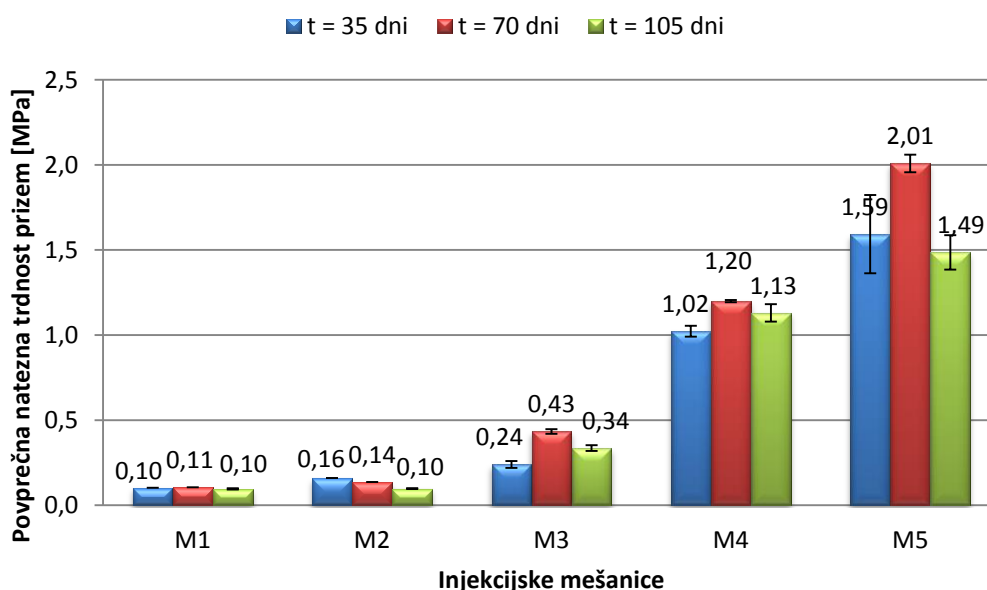
6.1.4.1 Upogibno natezna trdnost prizem sušenih na zraku

Najvišjo upogibno natezno trdnost sta po 35 dneh dosegli apneno-cementni injekcijski mešanici M4 1,02 MPa in M5 1,59 MPa (Grafikon 11). Preostale injekcijske mešanice M1, M2 in M3 so dosegle bistveno nižje vrednosti od 0,1 do 0,24 MPa. Zaradi majhnega števila vzorcev injekcijski mešanici M1 in M2 nismo mogli statistično obdelati oziroma določiti standardnega odklona in koeficienta variacije. Največji raztros podatkov je imela injekcijska mešanica M5, in sicer 14,5 %, najmanj pa injekcijska mešanica M4 z 3,1 % koeficientom variacije.

Trend naraščanja upogibno natezne trdnosti se je nadaljeval tudi na preizkušancih v obdobju 70 dni. Največji prirastek tlačne trdnosti smo zabeležili pri injekcijski mešanici M5 (2,01 MPa). Pri injekcijskih mešanicih M1 in M2 se upogibna trdnost ni bistveno spremenila. Rezultati niso povsem zanesljivi, saj smo na voljo imeli le po en preizkušanec. Pri 70 dni starih vzorcih je bil raztros rezultatov manjši med 0,54 in 3,15 %. Pri preizkušancih starih 105 dni smo pričakovali rast upogibno natezne trdnosti, vendar je pri injekcijskih mešanicih M2, M3, M4 in M5 prišlo do presenetljivega padca. Rezultati povprečne upogibno natezne trdnosti so prikazani v Preglednici 30 in na Grafikonu 11.

Preglednica 30: Rezultati povprečne upogibno natezne trdnosti prizem sušenih na zraku v treh časovnih obdobjih

Injekcijska mešanica	Čas [t]	Sila F [kN]	f_{mf} [MPa]	Koef. variacije [%]
M1	35 dni	0,04	0,10	0,0
M1	70 dni	0,04	0,11	0,0
M1	105 dni	0,04	0,10	4,3
M2	35 dni	0,05	0,16	0,0
M2	70 dni	0,05	0,14	0,0
M2	105 dni	0,04	0,10	1,3
M3	35 dni	0,09	0,24	8,4
M3	70 dni	0,17	0,43	3,2
M3	105 dni	0,14	0,34	4,9
M4	35 dni	0,43	1,02	3,1
M4	70 dni	0,49	1,20	0,5
M4	105 dni	0,47	1,13	4,5
M5	35 dni	0,67	1,59	14,5
M5	70 dni	0,85	2,01	2,6
M5	105 dni	0,63	1,49	6,8



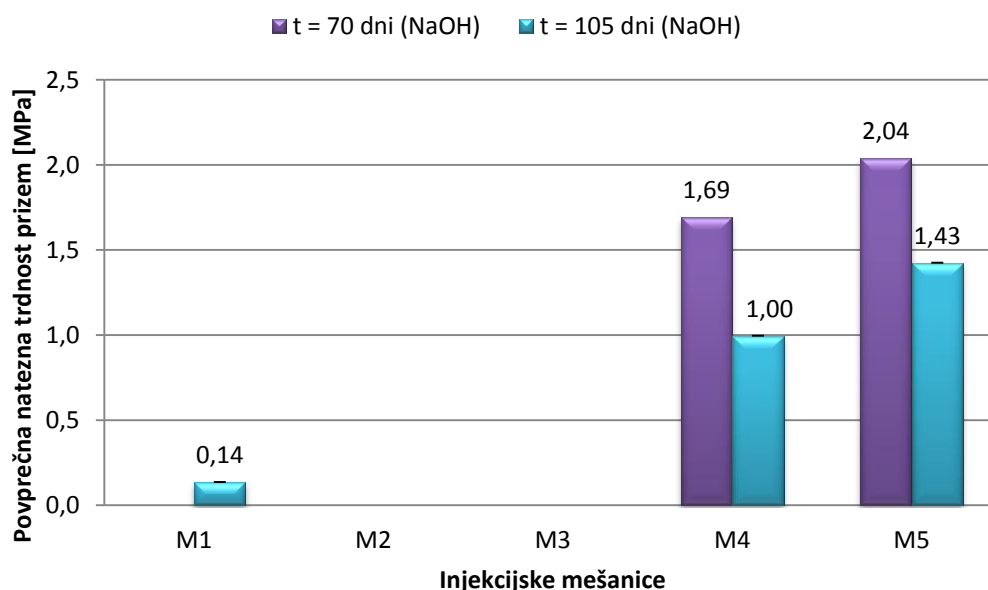
Grafikon 11: Primerjava rezultatov povprečne upogibno natezne trdnosti za prizme sušene na zraku za časovna obdobja 35, 70 in 105 dni

6.1.4.2 Upogibno natezna trdnost prizem pri pospešenih pogojih staranja

Meritve upogibno natezne trdnosti smo izvajali na vzorcih izpostavljenih pospešenim pogojem staranja pri starosti 70 in 105 dni. Zaradi manjšega števila vzorcev oziroma poškodovanih vzorcev (razpoka na sredini vzorca), meritev za injekcijski mešanici M2 in M3 nismo izvedli. Iz spodnje Preglednice 31 in Grafikona 12 opazimo, da so se vrednosti povprečne upogibno natezne trdnosti (M4 in M5) v primerjavi z vzorci starani na zraku znatno povečale ($f_{mf/M4} = 1,69$ MPa in $f_{mf/M5} = 2,04$ MPa). Po 105 dnevuh smo ponovno zasledili padec upogibno natezne trdnosti ($f_{mf/M4} = 1,00$ MPa in $f_{mf/M5} = 1,43$ MPa). Rezultati niso povsem zanesljivi, saj smo zaradi manjšega števila vzorcev imeli na razpolago le po en vzorec za vsako meritev.

Preglednica 31: Rezultati poprečne upogibne natezne trdnosti prizem izpostavljenih pospešenim pogojem staranja v NaOH raztopini za časovni obdobji 70 in 105 dni

Injekcijska mešanica	Čas [t]	Sila F [kN]	f_{mf} [MPa]	Koef. variacije [%]	
NaOH	M1	105 dni	0,06	0,14	0,0
	M4	70 dni	0,71	1,69	0,0
	M4	105 dni	0,42	1,00	0,0
	M5	70 dni	0,87	2,04	0,0
	M5	105 dni	0,60	1,43	0,0



Grafikon 12: Primerjava rezultatov povprečnih upogibno natezne trdnosti za prizme negovane v NaOH raztopini pri povišani temperaturi za časovni obdobji 70 in 105 dni

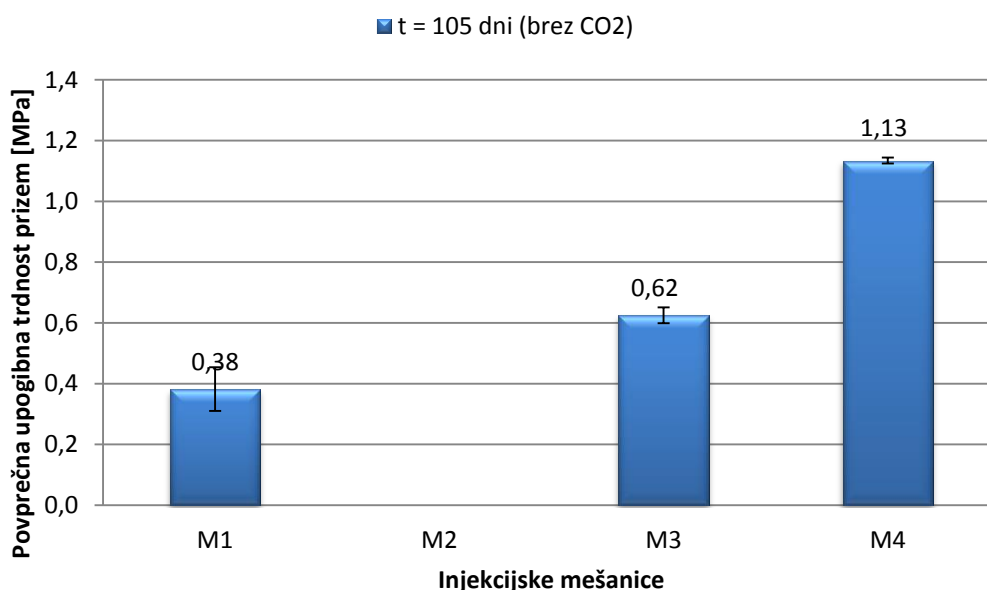
6.1.4.3 Upogibno natezna trdnost prizem zaprtih v plastičnih posodah

Na vzorcih, ki smo zaprli v plastične posode, smo po 105 dnevih izvedli meritve upogibno natezne trdnosti (M1, M3 in M4). Zaradi manjšega števila vzorcev oziroma poškodovanih vzorcev (razpoka na sredini vzorca) meritev za injekcijsko mešanico M2 nismo izvedli.

Največje vrednosti smo pričakovano dobili za apneno-cementne vzorce 1,13 MPa, najmanjše pa za apneno injekcijsko mešanico M1 0,38 MPa (Preglednica 32). Na podlagi povprečne upogibno natezne trdnosti smo ugotovili, da kljub pomanjkanju CO₂, pride do procesa vezanja injekcijske mešanice.

Preglednica 32: Povprečne upogibno natezne trdnosti prizem zaprtih v plastičnih posodah brez CO₂

Injekcijska mešanica		Čas [t]	Sila F [kN]	f_{mc} [MPa]	Koef. variacije [%]
zaprite CO ₂	M1	105 dni	0,15	0,38	5,7
	M3		0,24	0,62	0,0
	M4		0,48	1,13	9,3

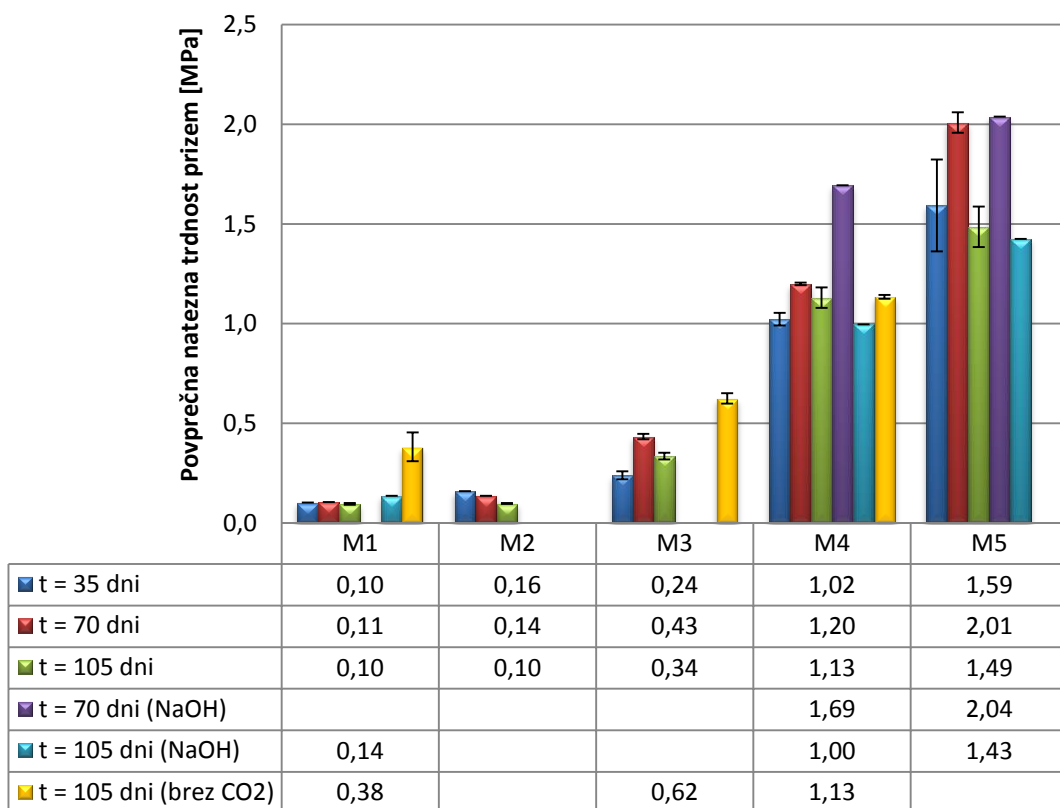


Grafikon 13: Povprečna upogibna natezna trdnosti prizem zaprtih v plastičnih posodah za časovno obdobje 105 dni

6.1.4.4 Diskusija

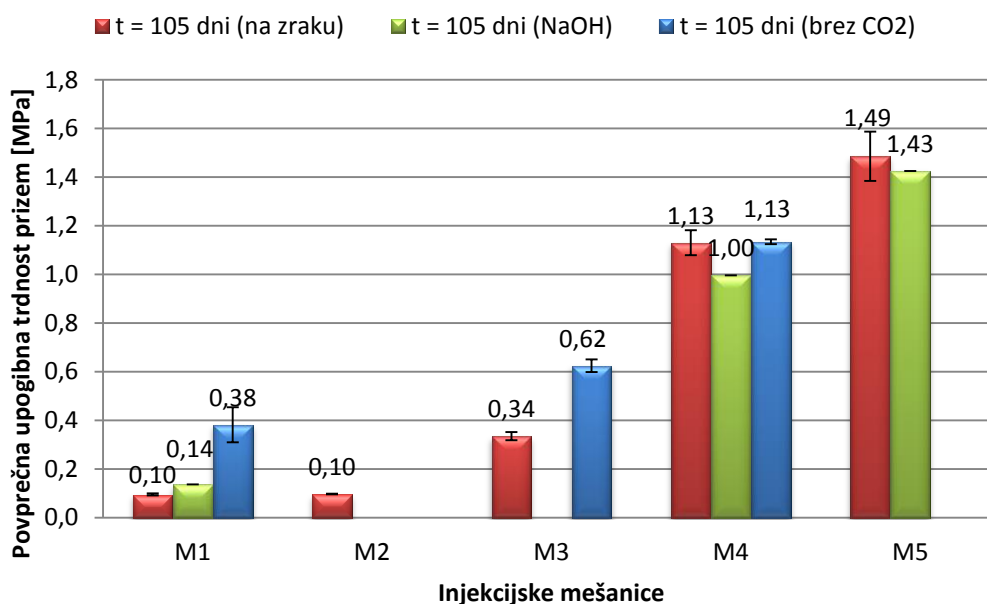
Za prizme sušene na zraku smo tekom časovnega obdobja 35 in 70 dni zabeležili pričakovan trend rasti povprečne upogibno natezne trdnosti. Največje vrednosti smo dobili za apneno-cementne prizme najmanjše pa za apnene prizme M1. Po 105 dneh smo pri vseh vzorcih zabeležili presenetljiv padec upogibno natezne trdnosti (Grafikon 14).

V primerjavi z vzorci, ki so bili sušeni na zraku in pri vzorcih izpostavljenih pospešenim pogojem staranja v NaOH raztopini v časovnem obdobju 70 dni, opazimo pričakovan skok povprečne upogibno natezne trdnosti za injekcijske mešanice M4 in M5 (Grafikon 14). Največji prirastek upogibne trdnosti smo zabeležili pri vzorcih M4. Predvidevamo, da je v vzorcih potekala alkalno-karbonatna reakcija – ACR dolomitnega polnila in mineralnega veziva. Po preteku 105 dni smo prav tako zasledili padec upogibne natezne trdnosti. Presenetljive so vrednosti vzorcev v NaOH raztopini, ki so nižje od vzorcev sušenih na zraku. Rezultati niso povsem zanesljivi, saj smo zaradi manjšega števila vzorcev imeli na razpolago le po en vzorec za vsako meritev.



Grafikon 14: Primerjava povprečno upogibno nateznih trdnosti prizem v treh različnih okoljih in treh časovnih obdobjih

Pri vzorcih, ki so bili zaprti v plastičnih posodah, opazimo, da smo v obdobju 105 dni presenetljivo dobili večje povprečno upogibno natezne trdnosti kot pri vzorcih sušenih na zraku in izpostavljenih pospešenim pogojem staranja (Grafikon 15). Rezultati niso povsem zanesljivi, saj smo preizkušali manjše število vzorcev. Podobno kot pri tlačni trdnosti, smo tudi pri upogibno natezni trdnosti prišli do podobnega predvidevanja, da v vzorcih poteče reakcija med dolomitnim polnilom in mineralnim vezivom in s tem pride do povečanja upogibno nateznih trdnosti.



Grafikon 15: Primerjava povprečnih upogibno nateznih trdnosti prizem sušenih na zraku, izpostavljenih pospešenim pogojem staranja in zaprtih v plastičnih posodah za časovno obdobje 105 dni

6.1.5 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem (fenolftaleinski test)

Na polovičkah prizem smo tekom raziskav v različnih časovnih obdobjih s fenolftaleinskim testom spremljali stopnjo karbonatizacije. Na spodnjih slikah 37, 38 in 39 so prikazani prerezi prizem, na katerih je prikazan potek karbonatizacije v različnih pogojih. Na prereze smo s pršenjem nanесли fenolftalein, ki pokaže stopnjo oziroma globino karbonatizacije. Pri pH večjih od 9,2 se površina obarva v roza vijolično barvo, kar pomeni, da proces karbonatizacije še poteka (Likar, 2006).

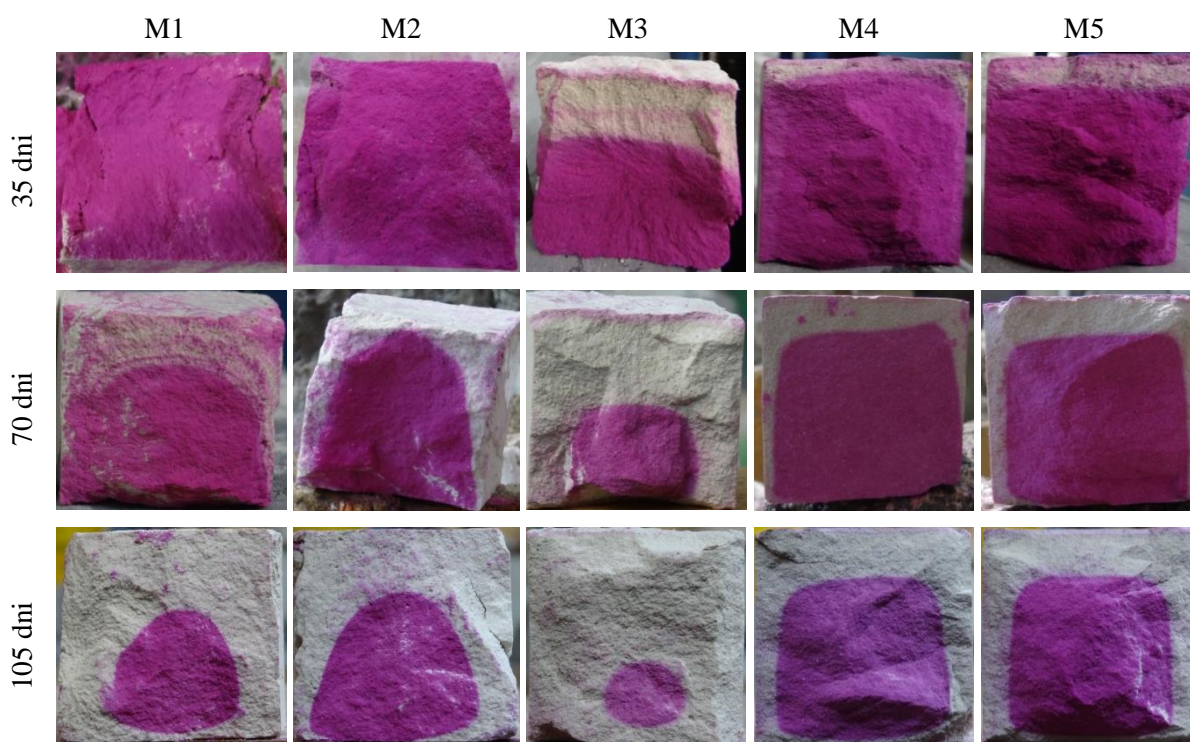
6.1.5.1 Stopnja karbonatizacije standardnih prizme sušenih na zraku

V prvih 35 dneh je bila za vzorce M1 in M2 evidentirana nizka stopnja karbonatizacije. Pri apnenocementnih vzorcih je karbonatiziral vrhnji 4 mm del prizem. Največ karbonatizacije je poteklo na apnenih prizmah z dodatkom tufa. V začetnem obdobju 35 dni je proces karbonatizacije potekal od zgoraj navzdol, saj so bile prizme v kalupih in v stiku z zrakom oziroma CO₂ je bila le zgornja površina.

Potek karbonatizacije se je nadaljeval tudi v časovnem obdobju 70 dni, v katerem so bile vse stranice prizme izpostavljene atmosferskim pogojem. Na slikah opazimo, da je karbonatizacija potekla na treh straneh od zunaj proti jedru vzorca. Kljub temu, da smo prizme postavili na majhne kovinske

kroglice in s tem omogočili dotok zraka, je proces karbonatizacije na spodnjih straneh majhen. Največjo karbonatizirano površino ima ponovno vzorec M3, znotraj se lepo opazi, da proces karbonatizacije še ni zaključen.

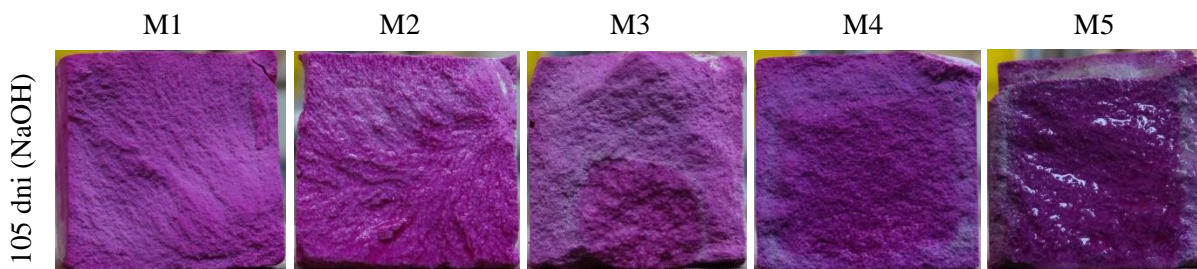
Fenolftaleinski test je pokazal, da proces karbonatizacije po 105 dneh še poteka. Na spodnjih slikah opazimo, da je vzorec M3 že v večini karbonatiziral, najmanj pa sta karbonatizirala apneno-cementna vzorca M4 in M5. V primerjavi z ostalima časovnima obdobjema opazimo, da je karbonatizacija potekla na spodnji strani prizem. Slednje so bile celoten čas sušenja postavljene v enakem položaju kot v standardnih kalupih.



Slika 37: Časovni potek stopnje karbonatizacije

6.1.5.2 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem pri pospešenih pogojih staranja

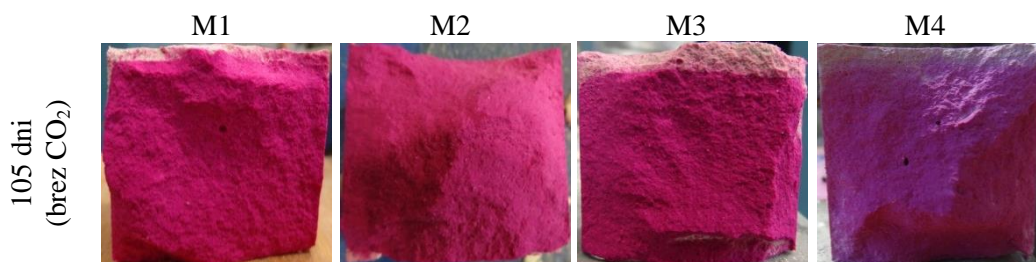
Na standardnih prizmah izpostavljenim pospešenim pogojem staranja (raztopina NaOH in temperatura 60°C), smo ugotovili, da proces karbonatizacije ne poteka, saj so obarvane v roza vijolično barvo (Slika 38). Teste smo opravili z raztopino zasičenih površinsko suhih vzorcih. Na vzorcih M3, M4 in M5 so opazna različno obarvana območja. Glede na rezultate tlačne trdnosti (povečanje tlačne trdnosti v 1M raztopini NaOH), predvidevamo, da poteče reakcija med dolomitno moko in mineralnim vezivom (ACR).



Slika 38: Stopnja karbonatizacije za vzorce v NaOH po 105 dneh

6.1.5.3 Stopnja karbonatizacije standardnih prizem zaprtih v plastičnih posodah

Na standardnih prizmah zaprtih v plastičnih posodah smo ugotovili, da proces karbonatizacije še poteka, saj so obarvane v roza barvo (Slika 39). Na vrhu prizem opazimo manjši del, ki je karbonatiziral v času, ko so bile prizme v standardnih kalupih in izpostavljene atmosferskim pogojem. V prizmah je prišlo do novega kemijskega procesa, ki je omogočil vezanje injekcijske mešanice. Z nestandardno metodo (fenolftaleinski test in mehanske lastnosti prizem) smo dokazali, da kljub pomanjkanju CO_2 , pride do procesa vezanja injekcijske mešanice. Dejstvo je, da smo šele po 15 dneh prizme zaprli v posode in da so se v tem času vezale s CO_2 . Za nadaljnje nove raziskave bi morali prizme takoj po vlitju skupaj s kalupi zapreti v plastične posode in jih kasneje tudi mikroskopsko analizirati. Šele tedaj bi dobili prave in optimalne rezultate.



Slika 39: Stopnja karbonatizacije vzorcev zaprtih v posode po 105 dneh

6.1.5.4 Diskusija

Na polovičkah prizem, ki so se sušile na zraku v različnih časovnih obdobjih, opazimo znaten potek karbonatizacije. Največjo karbonatizirano površino ima vzorec M3 z dodatkom tufa. Na slikah 37 je lepo viden potek karbonatizacije od zunanje površine proti jedru vzorca. Pri vzorcih izpostavljenim pospešenim pogojem staranja in vzorcih zaprtih v posodah, karbonatizacija ni potekla, saj so vzorci v celoti obarvani v roza vijolično barvo. Glede na povečanje rezultatov tlačne trdnosti v 1M raztopini NaOH, predvidevamo, da poteče reakcija med dolomitno moko in mineralnim vezivom (ACR). Na

vzorcih zaprtih v posodah smo na podlagi fenolftaleinski test dokazali, da kljub pomanjkanju CO₂, pride do procesa vezanja injekcijske mešanice.

6.2 Analiza rezultatov preiskav cilindričnih vzorcev

6.2.1 Razkalupljenje cilindričnih vzorcev

Pred začetkom prvih preiskav so bili cilindrični vzorci 35 dni zaprti v pleksi stekla in izpostavljeni atmosferskim pogojem sušenja. V tem času so se vzorci sušili le skozi zgornjo odprto površino. Največ težav pri razkalupljenju smo imeli z valji injekcijskima mešanicama M1 in M2 na osnovi hidratiziranega apna, ki za strjevanje oziroma karbonatizacijo potrebuje ogljikov dioksid – CO₂ iz zraka. Injekcijski mešanici M1 in M2 se zaradi omejenega dotoka sveže zraka nista strdili. Hidratizirano apno ne vsebuje hidravličnih komponent oziroma nima hidravličnih lastnosti, pri katerem z vodo nastane kalcijev silikat hidrat (CSH faza), ki daje injekcijski mešanici osnovno trdnost (Uranjek, 2008). Pri razkalupljenju valjev M1 in M2 je odpadel zunanji – obodni sloj injekcijske mešanice (Slika 40). V celoti je ostal le zgornji del, kateri je bil v stiku z zrakom in je že karbonatiziral. Injekcijska mešanica je imela vonj po sveži mešanici, bila je vlažna, sveža in krhka. Pri razkalupljenju valjev M3, M4 in M5 nismo imeli težav, saj smo pri slednjih poleg hidratiziranega apna uporabili dodatna mineralna veziva (tuf – M3 in cement – M4 in M5), ki vežejo tudi na osnovi vode.



Slika 40: Primerjava cilindričnih vzorcev M5, M4, M3, M2 in M1 (od leve proti desni)

6.2.2 Tlačna trdnost valjev

Tlačno trdnost f_{mc} razkalupljenih cilindrov dimenzij $v = 30$ cm in $d = 15$ cm smo določili pri starosti 35, 70 in 105 dni. Valje smo sušili na zraku. Zaradi manjšega števila vzorcev (5 vzorcev na vsako mešanico) in želji, da bi preverili valje v različnih časovnih obdobjih, smo tlačno trdnost pri različni

starosti določili na enem oziroma dveh valjih. Prav zaradi manjšega števila vzorcev raztrosa oziroma koeficienta variacije rezultatov ni bilo mogoče analizirati. Pred pričetkom tlačnega preizkusa smo zgornjo površino valjev zaradi neravnin izravnali z mavcem. S tem smo omogočili enakomeren vnos tlačne sile v preizkušance.

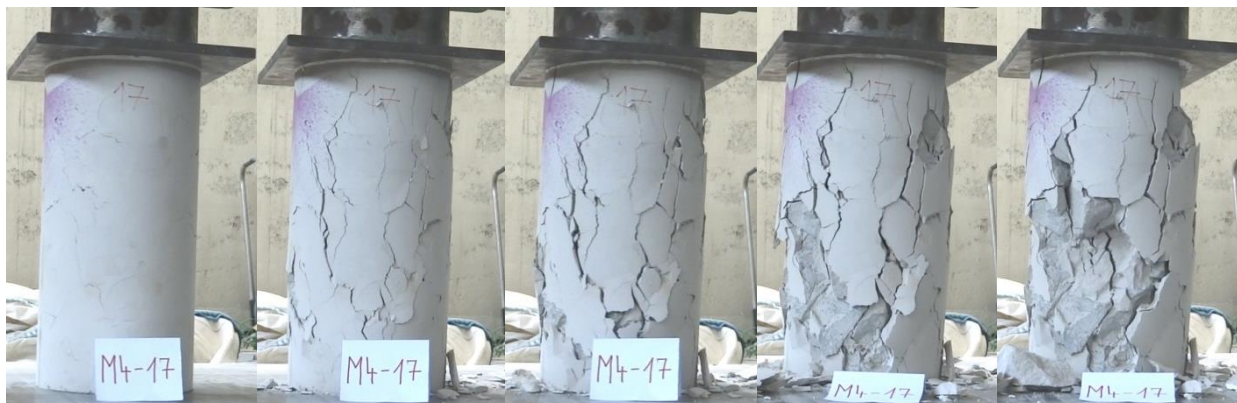
V začetni fazi je pri vseh preizkušancih prišlo do formiranja vertikalnih razpok. Slednje so bile najbolj opazne na vzorcih M4 in M5, ki so imeli po večini nerazpokan oziroma nepoškodovan zunanji sloj. Formiranje vertikalnih razpok se ni opazilo na vzorcih M1 in M2, kjer je pri razkalupljenju zunanji "krovni" sloj v večini odpadel. V nadaljevanju vnosa obremenitve je prišlo do širjenja razpok, izbočenja osrednjega dela preizkušanca in do manjših lokalnih porušitev. V tej fazi je bila dosežena maksimalna tlačna sila in pomik. Pred porušitvijo vzorca smo preizkus prekinili. Na spodnjih slikah 41, 42 in 43 so prikazani časovni poteki preiskav tlačne trdnosti. Pri injekcijskih mešanicah M1, M2 in M3 je prišlo do porušitev po vezivu, pri M4 in M5 pa po vezivu in materialu (Slika 44).



Slika 41: Časovni potek tlačnega preizkusa valja M2



Slika 42: Časovni potek tlačnega preizkusa valja M3



Slika 43: Časovni potek tlačnega preizkusa valja M4



Slika 44: Porušitev valja M3 po vezivu (levo) in valja M5 po vezivu ter materialu (sredina in desno)

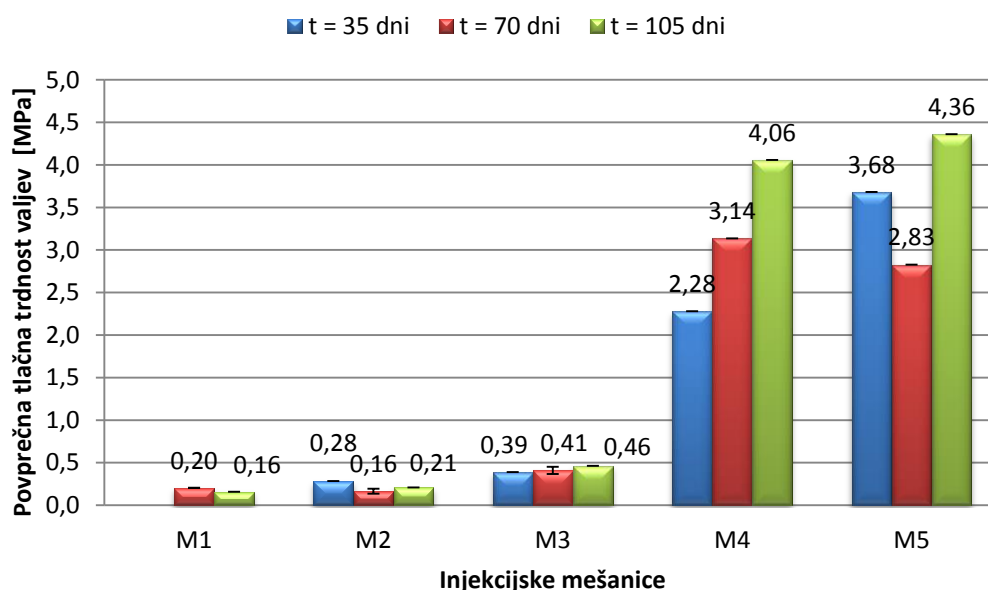
Po razkalupljenju smo pričakovano največje vrednosti tlačne trdnosti dobili pri vzorcih injektiranih z apnenno-cementnima mešanicama, pri valju M5 (CEM I) $f_{cc} = 3,68$ MPa in pri valju M4 (CEM II/B-M) $f_{cc} = 2,28$ MPa. Najmanjšo vrednost tlačne trdnosti smo dobili pri preizkušancu M2, in sicer $f_{cc} = 0,28$ MPa. Vzorec M1, ki smo ga označili z *, je bil preskušan na preši oziroma stiskalnici, ki ima pri tako majhnih porušnih silah napako (porušna sila je bila pod mejo natančnosti stroja), zato ga v nadaljevanju nismo upoštevali. V drugi fazi raziskav, po 70 dneh od injektiranja, ni prišlo do bistvenih sprememb tlačnih trdnosti. Največjo vrednost tlačne sile smo dobili pri M4 $f_{cc} = 3,14$ MPa. Pri valju M5 $f_{cc} = 2,83$ MPa pride do presenetljivega padca tlačne trdnosti. Razlog je verjetno v raztrosu rezultatov, saj smo imeli na voljo le po en preizkušanec. Po 105 dnevih se je le pri valjih M3 in M4 nadaljeval trend rasti tlačne trdnosti. Najvišjo vrednost tlačne trdnosti smo ponovno dobili pri valju M5 $f_{cc} = 4,36$ MPa, medtem ko smo najmanjše tlačne trdnosti dosegli pri vzorcih M1 in M2 (Preglednica 33).

Preglednica 33: Rezultati povprečne tlačne trdnosti valjev v treh časovnih obdobjih

Injekcijska mešanica	Čas [t]	Sila F [kN]	Radij r [cm]	f_{cc} [MPa]
M1	35 dni	5,00*	7,5	0,28
M1	70 dni	3,60	7,5	0,20
M1	105 dni	2,81	7,5	0,16
M2	35 dni	5,04	7,5	0,28
M2	70 dni	2,91	7,5	0,16
M2	105 dni	3,70	7,5	0,21
M3	35 dni	6,87	7,5	0,39
M3	70 dni	7,23	7,5	0,41
M3	105 dni	8,17	7,5	0,46
M4	35 dni	40,28	7,5	2,28
M4	70 dni	55,44	7,5	3,14
M4	105 dni	71,73	7,5	4,06
M5	35 dni	65,08	7,5	3,68
M5	70 dni	49,98	7,5	2,83
M5	105 dni	77,07	7,5	4,36

* rezultat ni merodajen – dobljen pod mejo natančnosti stroja

Iz spodnjega Grafikona 16 opazimo, da pri kamnitih valjih M1, M2 in M3 tekom raziskav ne pride do bistvenih razlik tlačne trdnosti. Pri prizmah smo za vse injekcijske mešanice zabeležili trend rasti tlačne trdnosti, pri valjih pa tega ne moremo trditi. Razlika je zaradi pogojev sušenja valjev in prizem. Slednje so bistveno manjše in se lažje sušijo v primerjavi z valji, ki potrebujejo več časa, da pride do postopne karbonatizacije jedra valja. Ob tvorbi kalcijevega karbonata pride do povečanja volumna in s tem do zmanjšanja por ter do povečanja kompaktnosti zunanjega oboda. Zaradi omejenega dotoka zraka v jedru ne pride do procesa karbonatizacije oziroma je slednje dolgotrajno. V primeru, da bi za raziskave vzeli daljši časovni interval, bi verjetno dobili večje razlike tlačne trdnosti.

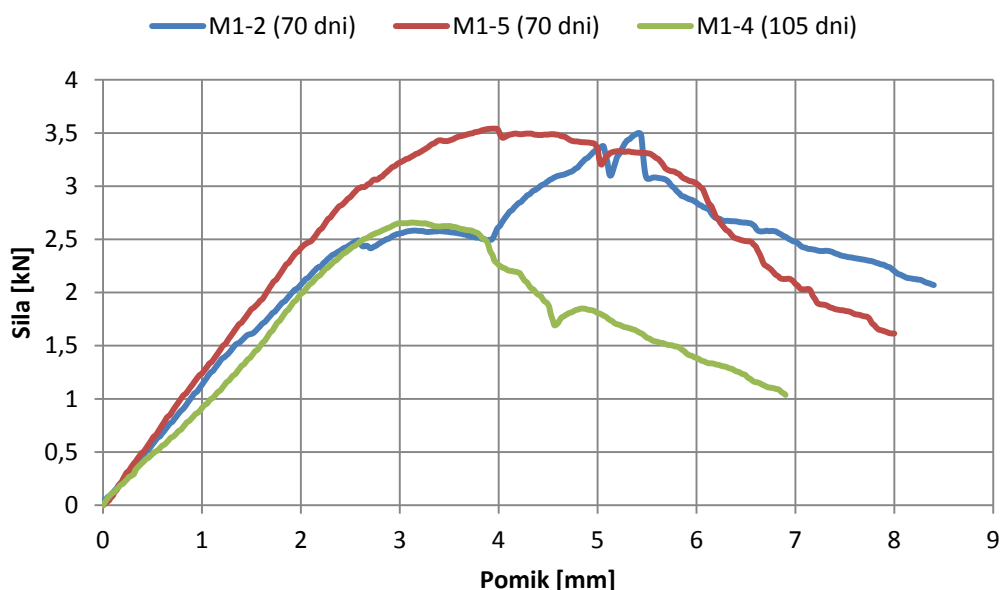


Grafikon 16: Primerjava rezultatov povprečnih tlačnih trdnosti valjev za časovna obdobja 35, 70 in 105 dni

6.2.2.1 Grafi sila – pomik pri tlačni obremenitvi

Med izvajanjem tlačnih raziskav smo za vse preizkušance v različnih časovnih obdobjih pridobili sovisnost med silo in pomikom zgornje glave preskuševalnega stroja (direktne meritve deformacij z merskimi lističi zaradi stanja obodnih površin preskušancev niso bile možne). Vsem valjem smo določili pomik pri maksimalni tlačni sili. Na spodnjih Grafikonih 17, 18, 19, 20, in 21 so prikazani grafi sila – pomik za kamnite valje.

Pri kamnitem valju M1, začetne meritve tlačne sile v odvisnosti od pomika pri 35 dni starih vzorcih, nismo izvedli. Pri 70 dni starih vzorcih opazimo, da sta se valja različno obnašala. Pri obeh je pričela sila naraščati takoj po nanosu obremenitev, kasneje je bil njun odziv na obremenitev drugačen (Grafikon 17). Pri vzorcu M1-5 opazimo, da je po doseženi maksimalni sili 3,62 kN sila začela padati, medtem ko pri vzorcu M1-2 po platoju zabeležimo ponoven skok tlačne sile. Maksimalna sila 3,58 kN je primerljiva s silo valja M1-5, vendar poteka grafa nista enaka. Skok tlačne sile lahko razložimo, da se je v valju ponovno formiral mehanizem (naleganje med zrnji), ki je prevzel večje obremenitve. Presenetljiv rezultat smo dobili pri 105 dni starem vzorcu. Slednji je prenesel manjšo tlačno silo 2,81 kN in pomik 3,14 mm. Potek grafa je podoben valju M1-2, vendar smo pri valju M-4 zabeležili padec sile, medtem ko pri valju M1-2 pride do skoka tlačne sile. Potek vzorca pri starosti 105 ni povsem zanesljiva, saj smo imeli na voljo le en preizkušanec.

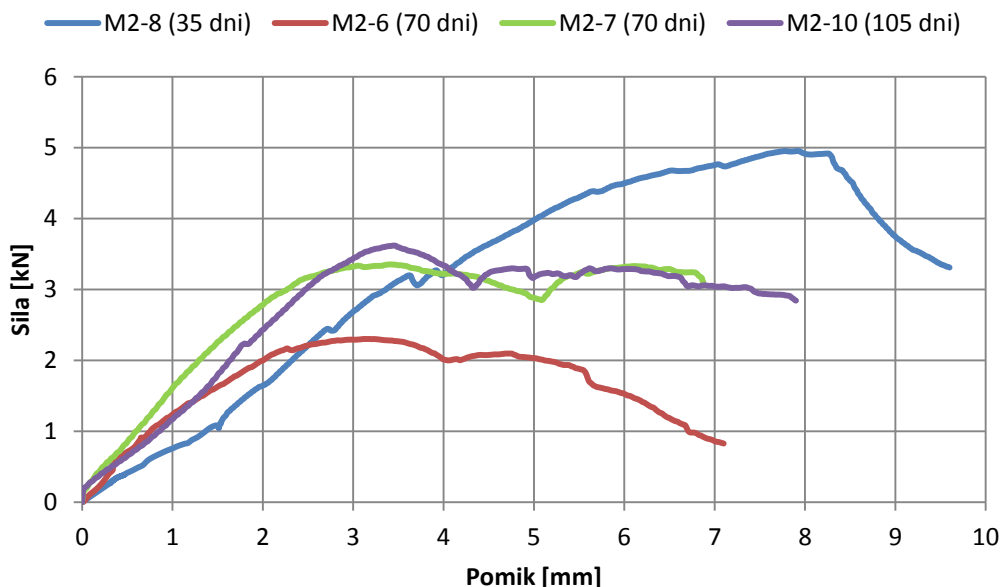


Grafikon 17: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M1 v dveh časovnih obdobjih

Preglednica 34: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M1

IM	M1-2 (70 dni)	M1-5 (70 dni)	M1-4 (150 dni)
F_{MAX} [kN]	3,58	3,62	2,81
u_{Fmax} [mm]	5,41	3,95	3,14

Iz spodnjega grafikona 18 opazimo, da je bil začetni odziv kljub isti injekcijski mešanici M2 pri vseh preizkušancih različen. Razlog je nehomogenost vzorcev. Slednji so bili sestavljeni iz enakega deleža agregata, vendar sama postavitev oziroma zlaganje agregata se od preizkušanca do preizkušanca kljub enakemu zlaganju razlikuje. Presenetljivo največjo silo 5,04 kN in pomik 7,78 mm smo dobili pri 35 dni starem preizkušancu M2-8. V primerjavi z ostalimi valji je prenesel veliko večje pomike, kar pomeni, da se je obnašal zelo duktilno. Za takšen nenavaden odziv je možno, da so znotraj valja, ki je bil vlažen in svež delovale tudi adhezivne sile. Kljub različnim maksimalnim silam, pri 70 in 105 dni starih vzorcih, opazimo podobno obnašanje. Po doseženi maksimalni sili je slednja začela padati, nato pa se je z vzpostavitvijo novega mehanizma prenosa obremenitve znotraj preskušanca sila ponovno začela rasti, vendar ni preseгла maksimalne sile.

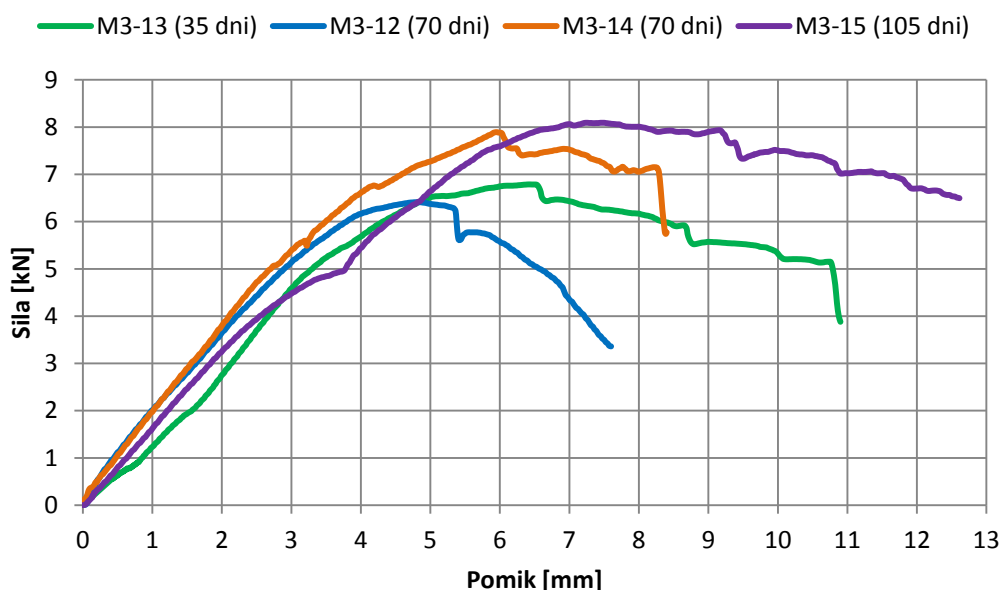


Grafikon 18: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M2 v treh časovnih obdobjih

Preglednica 35: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M2

IM	M2-8 (35 dni)	M2-6 (70 dni)	M2-7 (70 dni)	M2-10 (150 dni)
F_{MAX} [kN]	5,04	2,38	3,44	3,70
u_{Fmax} [mm]	7,78	3,19	3,41	3,46

Pri valjih iz injekcijske mešanice M3 smo v različnih časovnih obdobjih dobili podobne grafe sila – pomik (Grafikon 19). Začetni odzivi valjev so zelo podobni. Po doseženi maksimalni sili je sledil manjši hiter padec sile, nato pa je bil odziv na obremenitev za posamezni valj drugačen. Največjo silo 8,09 kN in pomik 7,49 mm smo dosegli na vzorcu M3-15 starem 105 dni. Pri 70 dni starih vzorcih opazimo, da sta se valja drugače obnašala. Pri valju M3-14 smo dobili večjo silo kot pri valju M3-12. Pri slednjemu smo zabeležili manjšo silo in pomik kot pri 35 dni staremu preizkušancu M3-13, kar dokazuje na veliko nehomogenost vzorcev.

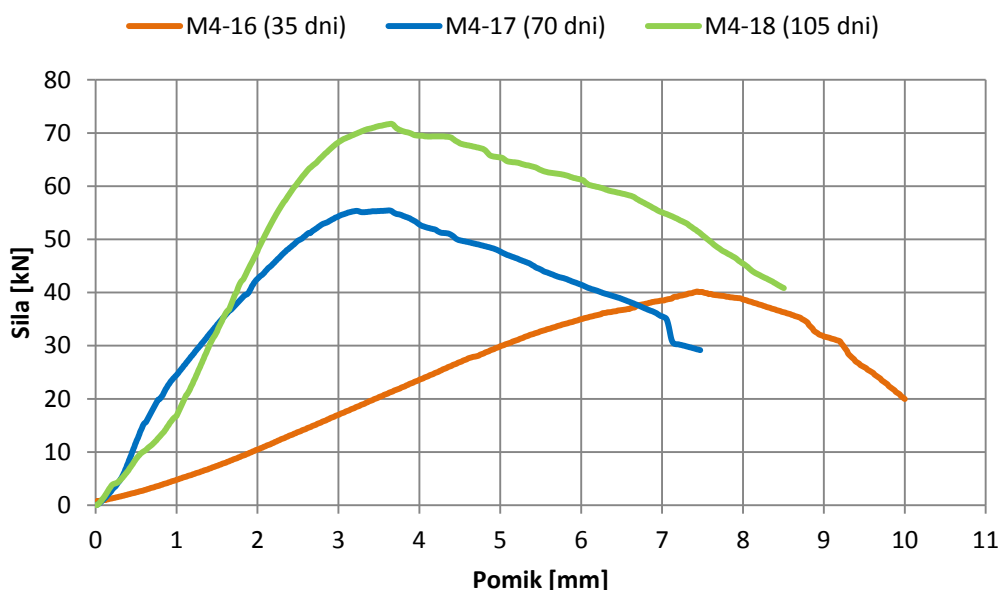


Grafikon 19: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M3 v treh časovnih obdobjih

Preglednica 36: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M3

IM	M3-13 (35 dni)	M3-12 (70 dni)	M3-14 (70 dni)	M3-15 (150 dni)
F_{MAX} [kN]	6,87	6,49	7,97	8,17
u_{Fmax} [mm]	6,44	4,60	5,94	7,49

Pri valjih iz injekcijske mešanice M4 smo v časovnem obdobju 70 in 105 dni dobili podobna grafa sila – pomik (Grafikon 20). Začetni odziv valja M4-17 in M4-18 je različen (različna naklona), kasnejša odziva na obremenitev po doseženi maksimalni sili pa sta podobna (padeč sile). Valja sta dosegla maksimalno silo pri skoraj enakem pomiku ($u_{FmaxM4-17(70\text{ dni})} = 3,63\text{ mm}$ in $u_{FmaxM4-18(105\text{ dni})} = 3,65\text{ mm}$). Največjo maksimalno silo smo pričakovano dobili na 105 dni starem vzorcu in sicer 71,73 kN. Presenetljiv je potek grafa pri 35 starem valju M4-16, kjer je naklon grafa izredno položen v primerjavi z ostalima grafoma. Valj M4-16 je prenesel veliko manjšo maksimalno silo 40,28 kN, obenem pa je prenesel največji pomik 7,44 mm pri dani sili, kar pomeni, da se je obnašal duktilno. Pri vseh valjih je porušitev potekala po stikih agregatnih zrn in po injekcijski mešanici.

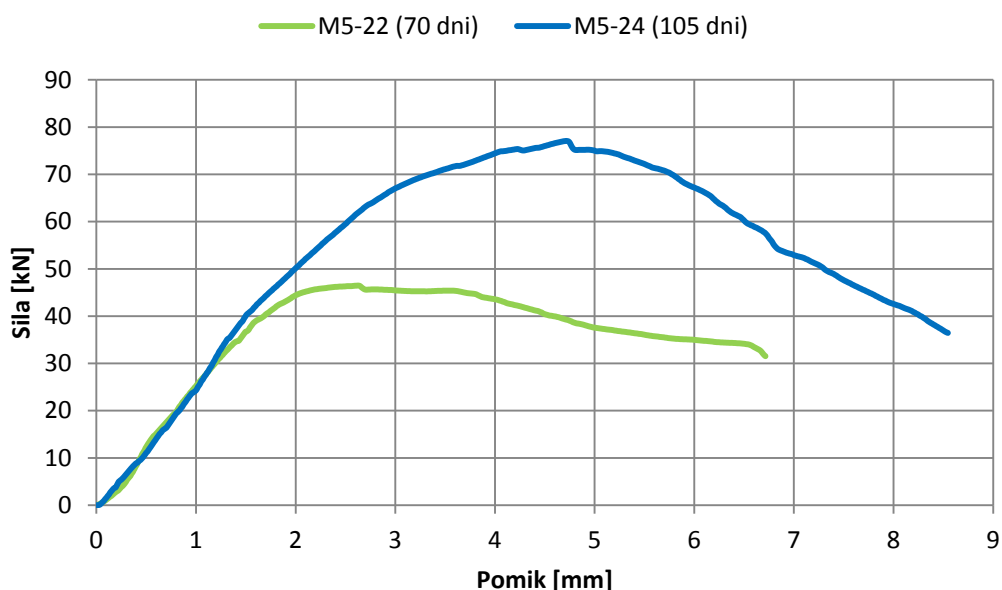


Grafikon 20: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M4 v treh časovnih obdobjih

Preglednica 37: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M4

IM	M4-16 (35 dni)	M4-17 (70 dni)	M4-18 (150 dni)
F_{MAX} [kN]	40,28	55,44	71,73
u_{Fmax} [mm]	7,44	3,63	3,65

Pri kamnitem valju M5, začetnega odziva grafa sila – pomik pri 35 dni starem vzorcu, nismo izvedli, saj smo preiskavo izvedli brez induktivnih merilcev, s katerimi merimo pomike. Izmerili smo le maksimalno silo, ki je znašala 65,08 kN. V primerjavi z grafi valjev M4 je pri valjih M5 začetni odziv zelo podoben (Grafikon 21). Pri obeh je pričela sila naraščati takoj po nanosu obremenitve. Po doseženi maksimalni sili pa je njun odziv na obremenitev drugačen. Pri valju M5-24 začne sila hitreje padati, medtem ko pri valju M5-22 sila pada veliko počasneje. Največjo tlačno silo smo dosegli pri valju M5-24 77,07 kN ter pomik 4,71 mm. Pri valju M5-22 starem 70 dni smo dosegli manjšo silo kot pri valju M5-21 starem 35 dni. Razlog je verjetno v raztrosu rezultatov, saj smo imeli na voljo le en preizkušaneec.



Grafikon 21: Sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev M5 v dveh časovnih obdobjih

Preglednica 38: Maksimalne sile in pomik tlačnih preizkav valjev M5

IM	M5-21 (35 dni)	M5-22 (70 dni)	M5-24 (150 dni)
F_{MAX} [kN]	65,08	46,47	77,07
u_{Fmax} [mm]	/	2,62	4,71

6.2.3 Cepilna natezna trdnost valjev

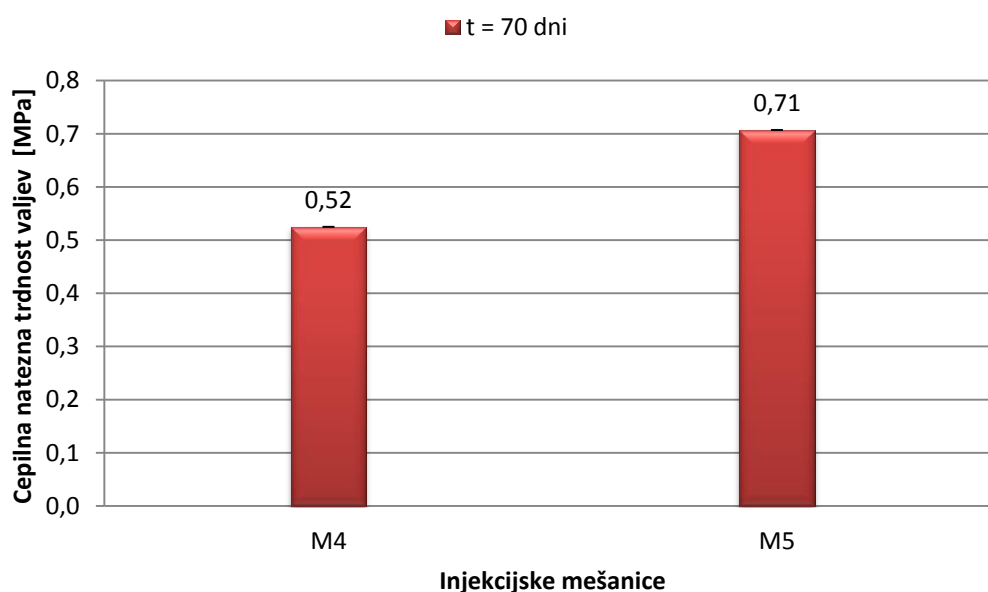
Cepilno natezno trdnost f_{ct} valjev smo določili pri starosti 70 dni na vzorcu M4 in M5. Zaradi manjšega števila vzorcev smo cepilno natezno trdnost za posamezno vrsto injekcijske mešanice določili le na enem valju. Raztrosa oziroma koeficienta variacije ni bilo mogoče analizirati. Za preostale vzorce cepilne natezne trdnosti nismo izvedli, saj je obstajala verjetnost, da bi predvsem vzorci M1 in M2 pred pričetkom testa razpadli.

Natezna trdnost in sprijemne trdnosti s posameznimi gradniki zidu so po ugotovitvah raziskovalcev na področju utrjevanja večslojnih kamnitih zidov z injektiranjem bistvena lastnost strjene injekcijske mešanice. Pri povečani obremenitvi zaradi nepovezanosti posameznih slojev zidu velikokrat pride do razrivanja oziroma celo do izpadanja delov zunanjih slojev preden se vzpostavi mehanizem za sprejem obtežbe med gradniki v zidovini, zato je cepilna natezna trdnost utrjenega jedra mehanska lastnost, s katero lahko boljše kot s tlačno trdnostjo valja ocenimo odpornost utrjenega zidu (Uranjek, 2008). Na podlagi preizkušanja valjev smo opazovali povezavo med kamni in injekcijsko mešanico, s čimer smo simulirali povezavo posameznih gradnikov in slojev zidu. Rezultati cepilne natezne trdnosti kažejo na dober stik med kamni in injekcijsko mešanico. Med samim testom je opaziti (Sliki 45 in 46), da ne

pride do izpadanja posameznih kamnov, temveč do večjih blokov kamnov z injekcijsko mešanico. Največjo natezno trdnost smo dosegli s cementom CEM I in sicer $f_{ct} = 0,71$ MPa (Preglednica 39).

Preglednica 39: Rezultati cepilne natezne trdnosti za valja M4 in M5

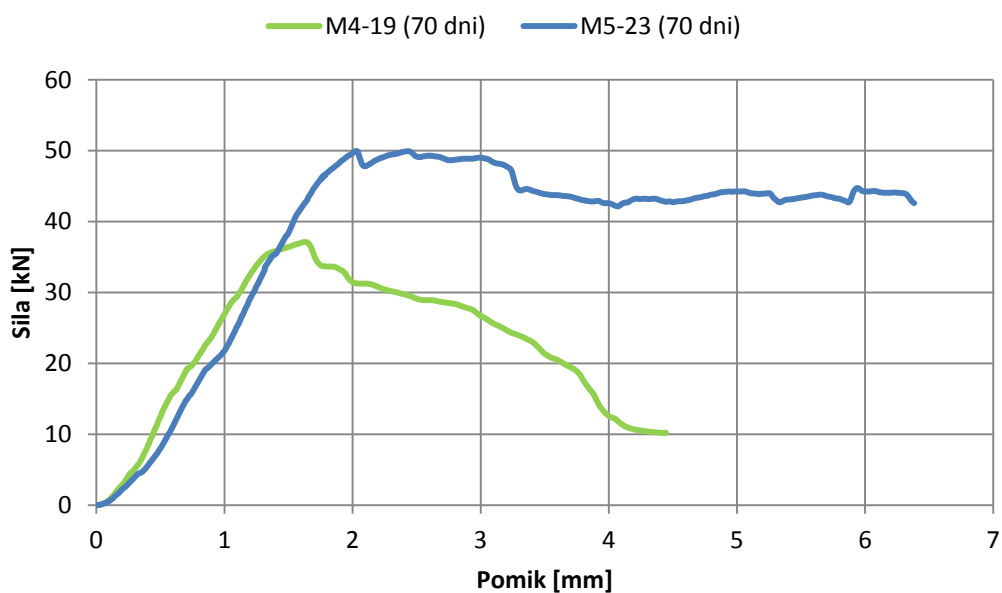
Injekcijska mešanica	Čas [t]	Sila F [kN]	Premer d [cm]	Višina l [cm]	f_{ct} [MPa]
M4-19	70 dni	37,1	15	30	0,52
M5-23	70 dni	50,0	15	30	0,71



Grafikon 22: Primerjava rezultatov cepilne natezne trdnosti valja M4 in M5 za obdobje 70 dni

6.2.3.1 Graf sila – pomik pri cepilni obremenitvi

Pri valjih iz injekcijske mešanice M4 in M5 smo v časovnem obdobju 70 dni dobili različna odziva grafa sila – pomik (Grafikon 23). Po doseženi maksimalni sili 37,1 kN je pri valju M4-19 prišlo do hitrega padca sile, medtem ko se je pri valju M5-23 ($F = 49,98$ kN) ustvaril plato, kjer je sila padala zelo počasi. Med samim preizkusom valja M4-19 je prišlo do izpadanja večjih kosov agregata in injekcijske mešanice, kar pri valju M5-23 nismo opazili. Predvidevamo, da je pri valju M5-23 porušitev potekala po stikih s kamni, medtem ko je pri valju M4-19 prišlo do porušitve naravnost čez kamne. Kljub velikim deformacijam se je pri valju M5-23 ustvaril mehanizem, ki je omogočil prenos oziroma konstanten nivo cepilne sile.



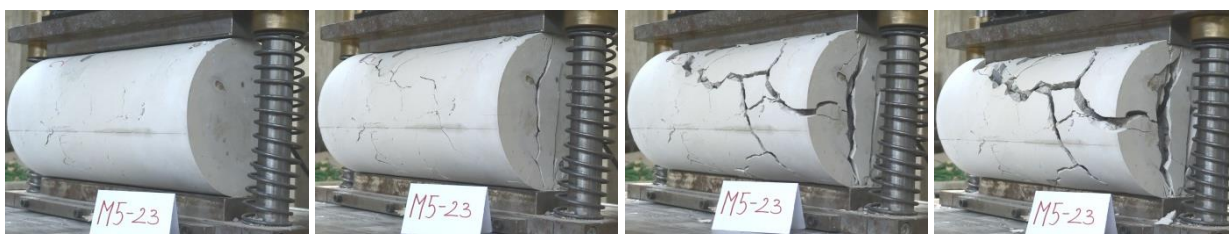
Grafikon 23: Sila – pomik pri cepilni natezni preiskavi valja M4 in M5

Preglednica 40: Maksimalni sili in pomika cepilno nateznih preizkav valjev M4 in M5

IM	M4-19 (70 dni)	M5-23 (70 dni)
F_{MAX} [kN]	37,11	49,98
u_{Fmax} [mm]	1,63	2,03



Slika 45: Časovni potek cepilnega nateznega preizkusa valja M4-9



Slika 46: Časovni potek cepilnega nateznega preizkusa valja M5-23

6.2.4 Stopnja karbonatizacije cilindričnih preizkušancev (fenolftaleinski test)

Podobno kot pri standardnih prizmah smo tekom raziskav s fenolftaleinskim testom spremljali stopnjo karbonatizacije na valjih. Ugotovili smo, da je po preteku 35 dni od injektiranja, karbonatiziral le vrhnji del valja, ki je bil ves čas sušenja izpostavljen atmosferskim pogojem (Slika 47). Zaradi omejitve dotoka svežega zraka (kalup iz pleksi stekla) je v osrednjem delu valja proces karbonatizacija še potekal.



Slika 47: Potek karbonatizacije valja M2 (levo in desno zgoraj) in M4 (sredina in desno spodaj) – 35 dni

Potek karbonatizacije se je nadaljeval tudi v časovnem obdobju 70 dni, v katerem so bili valji v celoti (razen spodnje površine) izpostavljeni atmosferskim pogojem. Na Sliki 48 opazimo, da je pri valju M1 karbonatiziral okoli 1 cm celotnega zunanjšega plašča. V jedru vzorca pa proces karbonatizacije še poteka.



Slika 48: Potek karbonatizacije jedra valja M1 (levo) in M2 (desno) ter 1 cm karbonatiziranega zunanjšega plašča valja M1 (sredina) – 70 dni

Po 105 dneh se je karbonatizacija proti jedru valja (zunanjega oboda) nadaljevala (Slika 49). Opazili smo, da se je v primerjavi s 70 dni starimi vzorci potek karbonatizacije upočasnil. Ob tvorbi kalcijevega karbonata pride do povečanja volumna in s tem do zmanjšanja por ter do povečanja kompaktnosti zunanjega oboda. Zaradi omejenega dotoka zraka v jedru ne pride do procesa karbonatizacije oziroma je slednje dolgotrajno.



Slika 49: Potek karbonatizacije jedra valja M2 (levo) in M4 (desno) ter 1,5 cm karbonatiziranega zunanjega plašča valja M4 (sredina) – 105 dni

7 ZAKLJUČEK

Za kulturnozgodovinske objekte, kjer se je kot vezivo uporabljalo apno (apnena malta), je najprimernejša uporaba historičnih materialov oziroma uporaba injekcijske mešanice na osnovi apna, saj se s tem v kamnit zid ne vnese novih (potencialno nekompatibilnih) materialov. Pri sistematičnem injektiranju je pomembna izbira ustrezne injekcijske mešanice, zato smo v magistrski nalogi pripravili in testirali injekcijske mešanice na osnovi dolomitnega polnila z različnimi mineralnimi vezmi.

V sklopu preliminarnih laboratorijskih preiskav svežih injekcijskih mešanic smo izdelali pet injekcijskih mešanic (M1, M2, M3, M4 in M5) na osnovi hidratiziranega apna, apna z dodatkom tufa in ter apna in cementa v razmerju 2 : 1. Rezultati meritev so pokazali, da le apneno-cementni mešanici M4 in M5 ustrezata kriterijema pretočnosti in izločanju vode. Injekcijske mešanice M1, M2 in M3 so imele težavo s prekomernim izločanjem vode. Z nestandardno preiskavo izločanja vode smo dokazali, da v cilindričnih preizkušancih ne bo težav z izločanjem vode, saj bo slednjo vpil peščenjak. Težavo smo imeli pri standardnih prizmah, ki so zaradi prevelikega izločanja vode razpokale.

Preiskave strjenih injekcijskih mešanic smo izvedli na cilindričnih preizkušancih (kamniti valji) in prizmah standardnih dimenzij. Valje smo napolnili s peščenjakom in s tem ponazorili jedro običajnega troslojnega kamnitega zidu. Prizmam smo določili tlačno trdnost, upogibno natezno trdnost, prostorninsko maso in krčenje, valjem pa tlačno in cepilno trdnost.

Meritve krčenja oziroma spremembo volumna smo določili po razkalupljenju prizem. Zaradi prevelike izločanja vode je prišlo do krčenja in do nastanka razpok. Najbolj razpokane so bile prizme injekcijske mešanice M1 in M2, pri katerih je bilo največje izločanje vode, najmanj oziroma brez razpok pa so bile prizme injekcijske mešanice M4 in M5. Največje volumsko spremembo smo izmerili pri injekcijski mešanici M3 z dodatkom tufa, ki se je največ skrčila v dolžini in širini. Najmanj so se skrčile apneno-cementne prizme M4 in M5.

Meritve tlačnih in upogibnih trdnosti smo izvajali v treh časovnih obdobjih (35, 70 in 105 dni) na vzorcih, ki so bili izpostavljeni različnim pogojem staranja na zraku (atmosferski pogoji), pri povišani temperaturi 60 °C v NaOH raztopini in v zaprtih plastičnih posodah z omejenim dotokom svežega zraka. Za prizme sušene na zraku smo tekom časovnega obdobja zabeležili pričakovan trend rasti tlačne in upogibne trdnosti. Pri temperaturi 60 °C in izpostavljenosti raztopini NaOH smo dobili relativno visoke trdnosti, kljub temu, da je tovrstno okolje izrazito neugodno za mehanske karakteristike apnenih mešanic. Domnevamo, da se je v prizmah razvila alkalno-karbonatna reakcija med dolomitnim polnilom in mineralnim vezivom. Tudi pri vzorcih, ki so bili zaprti v plastičnih posodah brez dotoka svežega zraka zasledimo presenetljivo dobre trdnosti. Predvidevamo, da je kljub

pomanjkanju ogljikovega dioksida, ki je potreben za karbonatizacijo, prišlo do novega kemijskega procesa, ki je omogočal vezanje injekcijske mešanice.

Do podobnega zaključka smo prišli pri analizi prizem s fenolftaleinskim testom. Na polovičkih prizem, ki so se skozi časovna obdobja sušile na zraku, opazimo znaten potek karbonatizacije od zunanje površine proti jedru vzorca. Pri vzorcih izpostavljenih pospešenim pogojem staranja in vzorcih zaprtih v posodah, karbonatizacija ni potekla, saj so vzorci v celoti obarvani v roza vijolično barvo. Glede na povečanje rezultatov tlačne trdnosti v 1M raztopini NaOH, predvidevamo da poteče ACR reakcija med dolomitno moko in mineralnim vezivom. Na vzorcih, ki so bili zaprti v posodah, smo dokazali, da kljub pomanjkanju CO₂ pride do procesa vezanja injekcijske mešanice.

Pri analizi valjev smo v različnih časovnih obdobjih ugotovili, da so razlike tlačne trdnosti v primerjavi s prizmami veliko manjše. Razlog je v sušenju vzorcev, saj so valji večji in potrebujejo več časa do postopne karbonatizacije vzorca. Najvišje vrednosti tlačne trdnosti cilindrov so bile dosežene pri preizkušancih M4 in M5, pri katerih je bil uporabljen cement. Na podlagi grafov sila – pomik smo ugotovili, da so se valji kljub isti injekcijski mešanici obnašali različno, kar kaže na nehomogenost vzorcev (zlaganje peščenjaka v kalupe). Pri valjih starih 35 dni smo opazili, da so prenesli večje pomike oziroma da so se obnašali bolj duktilno. Pri cepilni natezni trdnosti smo pri vzorcih M4 in M5 ugotovili, da imamo dober stik med agregatom in injekcijsko mešanico, kar je odločilnega pomena pri utrjevanju večslojnih kamnitih zidov.

S fenolftaleinskim testom smo potrdili domnevo o počasni karbonatizaciji kamnitih valjev. Slednja je najhitreje potekla v obdobju po razkalupljenju, nato pa se je proces upočasnil. Ob tvorbi kalcijevega karbonata je prišlo do povečanja volumna in s tem do zmanjšanja por ter do povečanja kompaktnosti zunanjega oboda. Zaradi omejenega dotoka zraka je potek karbonatizacija v jedru dolgotrajen.

Dejstvo je, da pri injektiranju apnenih mešanic, imajo slednje pomanjkljivost počasnega strjevanja v zaprtih prostorih ter manjše trdnostne karakteristike v primerjavi s cementnimi mešanicami. V magistrski nalogi smo na podlagi mehanskih karakteristik standardnih prizem dokazali, da kljub ekstremnim pogojem in pomanjkanju CO₂, pri apnenih mešanicah pride do procesa strjevanja injekcijske mešanice. Domnevamo, da med dolomitnim polnilom in mineralnim vezivom pride do tvorbe alkalno-karbonatne reakcije (ACR). Da bi z zagotovostjo lahko razložili zgoraj navedene ugotovitve, bi potrebovali dodatna znanja s področja kemije in dodatne preiskave. Z rezultati smo postavili osnovo za nadaljnje raziskave apnenih injekcijskih mešanic na osnovi hidratiziranega apna in dolomitnega polnila.

VIRI

- Arrigler, A. 2013. Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Konstrukcijska smer (samozaložba A. Arrigler): 164 str.
- ASTM. 2010. ASTM C227-10 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method). ASTM International, West Conshohocken.
- Benko, Z. 2015. Vpliv kemijskih dodatkov in alkalnega okolja na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic z dolomitno moko. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Operativno gradbeništvo (samozaložba Z. Benko): 30 str.
- Buser, S. 1979. Geološka karta SFRJ. 1:100.000. Tolmač lista Celje. L 33-67., Beograd, Zvezni geološki zavod: 69 str.
- Černe, N. 2012. In-situ in laboratorijske preiskave historičnih malt. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Prometna smer (samozaložba N. Černe): 87 str.
- Černilogar, L. 2011. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. http://www.tkk.si/si/files/default/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf (Pridobljeno 11. 7. 2015.)
- da Porto, F., Valluzzi, M. R., Modena, C., 2003. Investigations for the knowledge of multi-leaf stone masonry walls. http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CIHC1_071_Da%20Porto%20F.pdf (Pridobljeno 26. 7. 2015.)
- Hohnjec, A. 2011. Slovenski naravni kamen. Diplomsko naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba A. Hohnjec): 46 str.
- Kikelj, K. 2006. Vpliv vrste apna, dodatkov in tehnik izdelave na karakteristike apnenih fasad. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Operativno gradbeništvo (samozaložba K. Kikelj): 128 str.

- Kovač, D. 2014. Vpliv pospešil vezanja in lahkega polnila na lastnosti apnenih injekcijskih mešanic. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Kovač): 34 str.
- Križnar, A. 2006. Slog in tehnika srednjeveškega stenskega slikarstva na slovenskem. Ljubljana, ZRC SAZU: 300 str.
- Kržan, M., Cotič, P., Bosiljkov, V. 2012. Laboratorijske preiskave troslojnih kamnitih zidov. V: Zbornik 34. Zborovanja gradbenih konstrukterjev Slovenije, Bled, Hotel Golf, 11. – 12. oktober 2012. Ljubljana : Slovensko društvo gradbenih konstrukterjev, 2012: 203 – 210 str.
- Kurnjek, L. 2012. Ciklo – program za analizo rezultatov histereznega odziva zidov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Kurnjek): 94 str.
- Likar, A., 2006. Sanacija in zaščita betonskih objektov, poškodovanih zaradi korozije armature. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Likar): 85 str.
- Mirtič, B., Mladenovič, A., Ramovš, A., Senegačnik, A., Vesel, J., Vižintin, N., 1999. Slovenski naravni kamen. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije: 131 str.
- Popović, M. 2007. Rekonstrukcije zidanih stavb in vpliv utrditvenih ukrepov na njihovo trajnost, Gradbeni vestnik 56 1 – 2: str 3 – 9. http://www.gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/49-7_clanek_sl.pdf (Pridobljeno 25. 7. 2015.)
- Russell, H. 2010. Materials and Skills for Historic Building Conservation. Construction Management & Economics 28: 101 – 102 str.
- Stermšek, L. 2013. Vpliv dodatkov na lastnosti injekcijskih mas z apnenim vezivom. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Stermšek): 26 str.
- SIST EN 445 : 2008. Injekcijska masa za prednapete kable – Preskusne metode.

- SIST EN 1015-6:1999/A1:2007. Metode preskušanja zidarskih malt – 6. del: Ugotavljanje prostorninske mase sveže malte.
- SIST EN 1015-10:2001/A1:2007. Metode preskušanja zidarskih malt – 10. del: Določevanje suhe prostorninske mase strjene malte.
- SIST EN 1015-11:2001/A1:2007. Metode preskušanja zidarskih malt – 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.
- SIST EN 12390-3:2009. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev.
- SIST EN 12390-6:2010. Preskušanje strjenega betona – 6. del: Natezna razcepna trdnost preskušancev.
- SIST EN 14630:2006. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij - Preskusne metode - Ugotavljanje globine karbonatizacije v strjenem betonu z fenolftaleinsko metodo.
- 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): 108 str.
- Štukovnik, P., Prinčič, T., Pejovnik, R. S., Bokan Bosiljkov, V. 2014. Alkali-carbonate reaction in concrete and its implications for a heigh rate of long-term compressive strength increase. *Construction and Building Materials* 50,0: 699 – 702 str.
- Štukovnik, P., Marinšek, M., Bosiljkov, B. V. 2013. Vpliv alkalno-karbonatne reakcije na lastnosti malt. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Zbornik konstrukterjev: zbornik 35. zborovanja gradbenih konstrukterjev Slovenije, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 147 – 154 str.
- Tomaževič, M. Apih, V. 1993. Ojačevanje kamnitega zidovja z zidovju prijaznim injektiranjem. *Gradbeni vestnik* 42: 45 – 28 str.
- Torraca, G. 2009. *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. Los Angeles, The Gette Institute: 193 str.

- 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.
- 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.
- Zorn, M. 2008. Erozijski procesi v slovenski Istri. Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: 423 str.
- Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.
- Žarnić, R. Bosiljkov, V., Bokan-Bosiljkov, V., 2009. Gradiva – Vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.
- Young, R. 2008. Lime-based plasters renders and washes. V: Forsyth, M. (ur.). Materials and Skills for Historic Building Conservation. Oxford, Blackwell Publishing Ltd: 56 – 91 str.