

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*



Podiplomski program Gradbeništvo
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Mojmir Uranjek

Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine

Magistrska naloga št. 205

Mentor:

doc. dr. Vlatko Bosiljkov

Ljubljana, 9. 10. 2008

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MOJMIR URANJEK
univ.dipl.inž.grad.

**PROBLEMATIKA INJEKTIRANJA ZIDOV
OBJEKTOV KULTURNE DEDIŠČINE**

MAGISTRSKO DELO

PODIPLOMSKI ŠTUDIJ KONSTRUKCIJSKE SMERI

Ljubljana, 2008

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

Jamova 2, p.p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**PODIPLOMSKI
ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA**

Konstrukcijska smer

Kandidat:

MOJMIR URANJEK, univ.dipl.inž.grad.

**Problematika injektiranja zidov objektov
kulturne dediščine**

Magistrsko delo št.: 205

**Problems in Case of Grout Injection of Heritage
Buildings Walls**

Master of Science Thesis No.: 205

Komisija za zagovor:

Mentor:

doc. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

prof. dr. Goran Turk

Član:

izr. prof. dr. Roko Žarnić

Član:

prof. dr. Zorislav Sorić

Datum zagovora: 9. 10. 2008

Ljubljana, oktober 2008

[illegible]

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MOJMIR URANJEK** izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom:
»**PROBLEMATIKA INJEKTIRANJA ZIDOV OBJEKTOV KULTURNE DEDIŠČINE**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 6. oktober 2008

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 69.059.25/.3:692.2:719(043.3)
Avtor: Mojmir Uranjek
Mentor: doc. dr. Vlatko Bosiljkov
Naslov: Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine
Obseg in oprema: 166 str., 17 pregl., 74 sl., 30 en.
Ključne besede: injektiranje, kamniti zid, utrjevanje, kulturna dediščina, preliminarne preiskave, »in situ« preiskave, navodila

Izvleček

Namen dela je prispevati k vzpostavitvi jasnih pravil in metodologije dela na področju utrjevanja večslojnih kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov s sistematičnim injektiranjem, kjer tehnična regulativa še ne obstaja. Slednje je še posebej problematično v primeru injektiranja zidov objektov kulturne dediščine, pri utrjevanju katerih so zaradi strožjih zahtev in omejitev pogosto potrebne dodatne preiskave in napotki pri projektiranju in pri izvedbi del. V prvi vrsti so podana navodila ter preiskave, potrebne za ugotavljanje stanja in vrste kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov, v nadaljevanju so podani kriteriji in nabor preiskav za ugotavljanje lastnosti suhe, sveže pripravljene in strjene injekcijske mešanice, v zaključni fazi pa navodila za zagotavljanje kakovostne izvedbe in kontrole del. Prvi del preiskav predstavljajo preliminarne preiskave, smiselno razdeljene na štiri sklope. Pri vsaki izmed preiskav v prvih treh sklopih so definirani kriteriji, na podlagi katerih so mešanice razvrščene v kakovostne razrede A, B in C. V četrtem, zadnjem sklopu preliminarnih preiskav, so izvedene preiskave cilindričnih preskušancev, ki ponazarjajo utrjeno kamnito jedro zidu. Drugi del preiskav pomeni praktično aplikacijo uporabe izbranih injekcijskih mešanic pri utrditvi izbranih zidnih slopov kamnitega objekta (»in situ« preiskave). Pri ugotavljanju kakovosti injektiranja je prikazana možnost kombiniranja rezultatov georadarskih in termografskih meritev. V zadnjem delu naloge so podana navodila za zagotavljanje kakovostne izvedbe injektiranja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 69.059.25/.3:692.2:719(043.3)
Author: Mojmir Uranjek
Supervisor: doc. dr. Vlatko Bosiljkov
Title: Problems in case of grout injection of heritage buildings walls
Notes: 166 p., 17 tab., 74 fig., 30 eq.
Key words: grout injection, stone masonry, strengthening, heritage buildings, preliminary research, »In situ« research, guidelines

Abstract

The purpose of the present work is to contribute to the establishment of standards and methodology of work in the field of strengthening multiple leaf stone and stone-brick walls with grout injection, where such standards don't exist. This is especially problematic in case of grout injection of heritage buildings walls, where, because of strict requirements and limitations, there is a necessity of supplementary research and directions, both in planning and in actual execution of the work. Firstly the rules and the needed research to determine the state and the type of stone masonry are presented. Criteria and the list of the research to determine the characteristics of dry, fresh and hardened injection grout is given. At the end, guidelines to assure the quality control of the work are presented. The first part of the research is represented by preliminary research that consists of four segments. In each segment, criteria is given, on base of which grouts are positioned in quality classes A, B and C. In the fourth segment of the preliminary research, cylindrical specimens that represent the strengthened internal core of the wall are analysed. The second part of the research is practical, »in situ« application of selected injection grouts in strengthening of chosen stone masonry walls by means of grout injection technique. To determine the quality of strengthening, the possibility of combining results from GPR (ground penetrating radar) and IR (infra red) thermography methods is shown. In the last part of the work, guidelines for quality execution of strengthening by means of grout injection technique are presented.

ZAHVALA

Kar nekaj strokovnjakov iz različnih področij je s svojimi izkušnjami in napotki vplivalo na izvedbo raziskovalnega dela, ki sem ga opravljal v okviru magisterija, vsakemu izmed njih sem za hvaležen za izkazano pomoč.

V prvi vrsti se želim zahvaliti svojemu mentorju doc. dr. Vlatku Bosiljkovu, ki je s svojim znanjem, usmeritvami in doslednostjo občutno vplival na pravilen potek in kakovost opravljenega raziskovalnega dela. Za koristne napotke in pomoč se zahvaljujem izr. prof. dr. Roku Žarniću in doc. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov. Zmeraj so mi bili z nasveti pripravljeni pomagati Vera Vrbovšek, Boštjan Gerbec, Samo Gostič, Edo Vugrinec in Blaž Dolinšek. Svoje videnje problematike injektiranja in koristne usmeritve pri varovanju zaključnih slojev zidov objektov kulturne dediščine so mi posredovali strokovnjaki ZVKDS RC: Igor Peršolja, Ivo Nemec in Jelka Kuret. Pri izvedbi preliminarnih preiskav so mi pomagali Sebastijan Žnidaršič, Franci Čepin in Josip Bengez. Za vestno lektoriranje dela se zahvaljujem svoji svakinji Mojci Uranjek.

Izvedbo »in situ« preiskav je omogočil direktor podjetja Gras d.o.o. Matevž Bergant in vodja izvedbe del Franc Vugrinec. Pri delu sta me podprla direktor matičnega podjetja Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o. Igor Janežič in predsednik uprave ZRMK Holding d.d. mag. Gojmir Černe. Raziskovalno delo je delno financiralo Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport in Ministrstvo za okolje in prostor.

Za vsestransko podporo, vodstvo in zaščito, hvala mojemu Bogu, mojim pastorjem in mojim staršem.

Magistrsko delo posvečam svojemu očetu Mihaelu, ki me je vedno spodbujal k širjenju obzorij in pridobivanju novih znanj. Hvala ati!

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Opis problematike.....	1
1.2	Cilj dela in uporabljene metode.....	2
1.2.1	Prispevek in namen raziskovalnega dela	2
1.2.2	V sklopu naloge izvedene preiskave	3
1.2.2.1	Preliminarne laboratorijske preiskave	3
1.2.2.2	»In situ« preiskave	4
2	PREGLED LITERATURE.....	6
2.1	Uvod.....	6
2.2	Zahteve pri utrjevanju objektov s poudarkom na objektih kulturne dediščine	6
2.2.1	Določila listin in priporočila konservatorskih centrov	6
2.2.2	Veljavni zakoni in predpisi	8
2.3	Vrste injekcijskih mešanic	10
2.3.1	Apnene injekcijske mešanice.....	10
2.3.2	Cementne injekcijske mešanice	12
2.3.3	Cementne injekcijske pene	14
2.3.4	Kombinirane injekcijske mešanice.....	14
2.3.5	Polimerne injekcijske mešanice	15
2.4	Vpliv sestave (kompozicije), dodatkov in postopka priprave na lastnosti injekcijskih mešanic.....	16
2.4.1	Sestava (kompozicija) injekcijske mešanice.....	16
2.4.1.1	Veziva	16
2.4.1.2	Voda.....	16
2.4.1.3	Polnila	16
2.4.1.4	Dodatki.....	17
2.4.2	Finost mletja.....	18
2.4.3	Zrnavost	19
2.4.4	Mešanje	19
2.4.5	Negovanje.....	20
2.5	Metode preiskovanja zidov	20
2.5.1	Nedestruktivne preiskave (NDT)	20
2.5.2	Delno destruktivne preiskave (DDT)	22
2.5.3	Destruktivne preiskave (DT)	23
2.6	Vrste kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov.....	24
2.7	Vpliv sistematičnega injektiranja na mehanske lastnosti kamnitih zidov.....	29
2.6.1	Rezultati preiskav posameznih avtorjev	29
2.6.1.1	Tomažević in Apih.....	29
2.6.1.2	Vinzileou in Tassios.....	31
2.6.1.3	Da Porto.....	33
2.6.1.4	Miltiadou-Fezans	34
2.6.1.5	Toumbakari.....	34

3	UTRJEVANJE ZIDOV S SISTEMATIČNIM INJEKTIRANJEM	36
3.1	Uporaba metode skozi zgodovino	36
3.2	Tehnologija sistematičnega injektiranja.....	36
3.3	Uporabnost metode in ostale tehnike utrjevanja kamnitih zidov	38
3.3.1	Oblaganje zidov z armiranobetonskimi ometi.....	38
3.3.2	Prezidavanje zidov	39
3.3.3	Prefugiranje zidov	40
3.3.4	Prefugiranje zidov z armiranjem fug	40
3.3.5	Vgradnja prečnih sider	41
3.3.6	Vgradnja zainjektiranih sider	42
4	VZROKI ZA NAPAKE PRI SISTEMATIČNEM INJEKTIRANJU IN POŠKODBE ZAKLJUČNIH SLOJEV.....	43
4.1	Nepoznavanje strukture (morfologije) zidov	43
4.1.1	Posledice nepoznavanja strukture zidu	43
4.2	Nekompatibilnost vgrajenih materialov z obstoječimi v zidu	44
4.2.1	Kemijska nekompatibilnost	44
4.2.1.1	Sulfatna reakcija	44
4.2.1.2	Alkalno-silikatna reakcija	45
4.2.1.3	Alkalno-karbonatna reakcija	46
4.2.1.4	Eflorescenca soli	46
4.2.1.5	Degradacija, povzročena z restavriranjem in utrjevanjem objektov	47
4.2.2	Mehansko-fizikalna nekompatibilnost.....	49
4.3	Nepoznavanje vlažnosti zidov	50
4.3.1	Vzroki vlage v zidovih	50
4.3.2	Posledice prekomerne vlažnosti	51
4.4	Napake med izvedbo	51
4.4.1	Neustrezna priprava mešanice.....	51
4.4.2	Prekinitve delovnega procesa.....	52
4.4.3	Neustrezna priprava zidu	52
4.4.3.1	Razporeditev in gostota vrtin	52
4.4.3.2	Omočenje zidu	53
4.4.4	Neustrezni pritiski	54
4.4.5	Nepravilen potek injektiranja.....	54
4.4.6	Delno injektiranje.....	54
5	IZVEDENE PREISKAVE IN ANALIZA REZULTATOV	55
5.1	Preliminarne laboratorijske preiskave	55
5.1.1	Suha injekcijska mešanica	56
5.1.1.1	Vsebnost kloridov	56
5.1.1.2	Vsebnost sulfatov	57
5.1.1.3	Vsebnost alkalij.....	58
5.1.1.4	Vsebnost vodotopnih nitratov	59
5.1.2	Sveža injekcijska mešanica.....	60
5.1.2.1	Potreba po vodi	60
5.1.2.2	Prostorninska masa sveže mešanice	61
5.1.2.3	Obdelavnost	63
5.1.2.4	Pretočnost	63
5.1.2.5	Izločanje vode	65
5.1.2.6	Vodozadržnost	67

5.1.3 Strjena injekcijska mešanica.....	69
5.1.3.1 Sprememba prostornine.....	69
5.1.3.2 Prostorninska masa strjene mešanice	71
5.1.3.3 Upogibna natezna trdnost	73
5.1.3.4 Tlačna trdnost	75
5.1.3.5 Cepilna natezna trdnost	77
5.1.3.6 Meritve sprijemne trdnosti - »pull off« test	79
5.1.3.7 Koeficient kapilarnega vpijanja vode.....	82
5.1.3.8 Materialna homogenost in kompaktnost vzorcev	84
5.1.4 Ocena mešanic in izbira ustreznih za nadaljnje preiskave	86
5.1.5 Preiskave kamna	89
5.1.6 Preiskave cilindričnih preskušancev	92
5.1.6.1 Priprava preskušancev	92
5.1.6.2 Tlačna trdnost	95
5.1.6.3 Cepilna natezna trdnost	98
5.1.6.4 Diagrami napetost - specifična deformacija.....	100
5.1.6.5 Primerjava in vrednotenje rezultatov posameznih preiskav	104
5.2 »In situ« preiskave zidov in izvedba injektiranja	111
5.2.1 Nedestruktivne preiskave (NDT)	112
5.2.1.1 Georadarske meritve	112
5.2.1.2 Termografske meritve	114
5.2.1.3 Meritve vlage	115
5.2.2 Delno destruktivne preiskave (DDT)	117
5.2.3 Izvedba sistematičnega injektiranja	118
6 NAVODILA ZA ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTNE IZVEDBE INJEKTIRANJA.....	120
6.1 Poznavanje materialnih lastnosti in strukture zidov.....	120
6.1.1 Predhodne preiskave strukture - injektabilnosti zidov.....	120
6.1.2 Predhodne preiskave osnovnih gradnikov zidu-kamnov, malte in ometov.....	121
6.2 Lastnosti injekcijskih mešanic, pomembne za kakovostno izvedbo	121
6.2.1 Suha injekcijska mešanica.....	122
6.2.2 Sveže pripravljena injekcijska mešanica	122
6.2.3 Strjena injekcijska mešanica.....	123
6.3 Omejitev vlažnosti zidov	124
6.3.1 Omejitev dostopa vodi	125
6.3.1.1 Izvedba drenaže in odvodnjavanja ob objektu	125
6.3.1.2 Izvedba hidrofobnih (vodoodbojnih) sanacijskih ometov.....	125
6.3.2 Preprečitev kapilarnega dviga.....	125
6.3.2.1 Izvedba hidroizolacijske bariere.....	125
6.3.2.2 Izvedba hidrofobnega sistematičnega injektiranja.....	126
6.4 Izvajalski ukrepi.....	127
6.4.1 Priprava zidu in izvedba injektiranja.....	127
6.4.1.1 Izdelava testnega polja injektiranja	127
6.4.1.2 Določitev ustreznih pritiskov injektiranja.....	127
6.4.1.3 Določitev globine, naklona in razporeditve vrtin	127
6.4.1.4 Omočenje zidu	127
6.4.1.5 Postopno napredovanje injektiranja	128
6.4.2 Varovanje zaključnih slojev	128
6.4.2.1 Izvedba podpornega opaža.....	128
6.4.2.2 Snemanje freske in ponovna namestitve.....	129

6.5	Kontrola kakovosti.....	129
6.5.1.1	Kontrola ustreznosti priprave zidu.....	129
6.5.1.2	Kontrola injekcijske mešanice.....	129
6.5.1.3	Kontrola injektiranja med in po izvedbi.....	130
7	ZAKLJUČKI.....	131
7.1	Rezultati preiskav in ugotovitve.....	131
7.1.1	Preliminarne preiskave	131
7.1.2	»In situ« preiskave	133
7.1.3	Napotki za nadaljnje delo	133
8	POVZETEK.....	134
9	SUMMARY.....	135
VIRI	.....	136
	UPORABLJENI VIRI	136
	OSTALI VIRI.....	144

KAZALO SLIK

<i>Slika 1.1: a) Kamniti zid z vmesnimi votlinami, grajen iz apnenca (Tomažević, 2007), b) zid grajen iz apnenca in peščenjaka</i>	1
<i>Slika 2.1: Določanje faktorja zanesljivosti CF (Gostič in Dolinšek, 2006)</i>	10
<i>Slika 2.2: a) Površinska sonda na vogalnem delu zidu, b) globinska sonda izvedena do sredine zidu</i>	22
<i>Slika 2.3: Sondiranje zidu z izvedbo vrtin: a) vrtina v zidu, b) izvrtano jedro</i>	22
<i>Slika 2.4: Prikaz »in situ« strižne preiskave z razporeditvijo merilnih mest (Bosiljkov, 2006)</i>	24
<i>Slika 2.5: Razvrstitev prereзов večslojnih kamnitih zidov v posamezne razrede (Binda in sod., 2006)</i>	26
<i>Slika 2.6: Sestava večslojnih kamnitih zidov v posameznih italijanskih pokrajinah (Binda in sod., 1999)</i>	27
<i>Slika 3.1: a) Naprava za sistematično injektiranje, b) aplikacija postopka na cerkvi Sv. Antona v Kobaridu</i>	37
<i>Slika 3.2: Izvedba vrtin in namestitev injekcijskih nastavkov v zidu (Identification of Strengthening Strategies, 2006)</i>	37
<i>Slika 3.3: Primer utrditve zidu z armiranobetonskim ometom (Bergant in sod., 1998)</i>	39
<i>Slika 3.4: Prezidava poškodovanega zidnega vogala in izvedba vertikalne armiranobetonske vezi (Bergant in sod., 1998)</i>	39
<i>Slika 3.5: a), b) Očiščene in poglabljene fuge, c) nanos prvega sloja malte, d) končno stanje (Corradi in sod., 2006)</i>	40
<i>Slika 3.6: Prefugiranje z armiranjem fug v primeru zunanjih slojev iz polne opeke (Binda, 2006)</i>	41
<i>Slika 3.7: a) Pritrjevanje prečnih sider s krivljenjem v primeru rebraste armature</i>	41
<i>Slika 3.8: a) Zainjektirana sidra v večslojnem kamnitem zidu, b) »šivanje zidu« (Van Gemert in sod., 1999)</i>	42
<i>Slika 4.1: Primer duktilnega obnašanja zidu: zgornji del zidu je posedek podpornega stebra arkade prenesel brez večjih razpok (Van Rickstal, 2000)</i>	49
<i>Slika 5.1: Vsebnost kloridov (Cl^-) v utežnih %</i>	56
<i>Slika 5.2: Vsebnost sulfatov (SO_3) v v utežnih %</i>	57
<i>Slika 5.3: Vsebnost alkalij (Na_2O, K_2O) v utežnih %</i>	58
<i>Slika 5.4: Vsebnost vodotopnih nitratov ($NaNO_3$, KNO_3) v posameznem vzorcu v utežnih %</i>	59
<i>Slika 5.5: Potreba po vodi (v/m) upoštevana pri pripravi mešanic</i>	61
<i>Slika 5.6: a) Tehtanje prazne posode, b) tehtanje posode napolnjene s sveže pripravljeno mešanico</i>	62
<i>Slika 5.7: Lijak za merjenje pretočnosti</i>	64
<i>Slika 5.8: Izmerjene vrednosti pretočnosti takoj po zamešanju in po preteku 30 min.</i>	64
<i>Slika 5.9: Valji premera $d=25$ mm in višine $v=250$ mm za meritve izločanja vode</i>	66
<i>Slika 5.10: Izločanje vode v % po 3 urah</i>	66
<i>Slika 5.11: Določanje vodozadržnosti</i>	68
<i>Slika 5.12: Vodozadržnost in relativna izgube vode v %</i>	68
<i>Slika 5.13: Merjenje spremembe prostornine na valjih</i>	70
<i>Slika 5.14: Sprememba prostornine (ΔV) v % s prikazom kriterijev, izmerjena v šestih obdobjih</i>	70
<i>Slika 5.15: Prikaz spreminjanja prostornine (ΔV) v % s časom</i>	71
<i>Slika 5.16: Zasnova preizkusa upogibne natezne trdnosti</i>	73
<i>Slika 5.17: Upogibne trdnosti preskušancev, iz vrednotene v treh časovnih obdobjih</i>	74
<i>Slika 5.18: Zasnova preizkusa tlačne trdnosti</i>	76
<i>Slika 5.19: Tlačna trdnost preskušancev iz vrednotena v treh časovnih obdobjih</i>	76
<i>Slika 5.20: Preskušanec po preiskavi cepilne natezne trdnosti</i>	78
<i>Slika 5.21: Cepilna natezna trdnost preskušancev, iz vrednotena po 90 dneh</i>	78
<i>Slika 5.22: a) Opaženje kamnite podlage-substrat, b) izvedba krožnih utorov v delno strjeni mešanici, c) izvedba »pull off« testa</i>	80
<i>Slika 5.23: Preiskava kapilarnega vpijanja vode</i>	82
<i>Slika 5.24: Rezultati meritev kapilarnega srka prizem v različnih časovnih obdobjih</i>	83
<i>Slika 5.25: Prerez vzorcev po preiskavi upogibne natezne trdnosti</i>	85
<i>Slika 5.26: a) Tlačne preiskave kamnitih vzorcev peščenjaka, b) tlačne preiskave kamnitih vzorcev apnenca</i>	89
<i>Slika 5.27: Določevanje vodovpojnosti vzorcev vsled kapilarnega dviga</i>	91
<i>Slika 5.28: Rezultati meritev kapilarnega dviga kamnitih vzorcev v različnih časovnih obdobjih</i>	91
<i>Slika 5.29: Kalup pripravljen za vgradnjo kamna</i>	93
<i>Slika 5.30: Sejalna krivulja - zastopanost frakcij pri pripravi cilindričnih preskušancev</i>	93
<i>Slika 5.31: Priprava cilindričnih preskušancev: a) sejanje kamna, b) preskušanci pripravljeni za injektiranje</i>	94

Slika 5.32: Injektiranje preskušanca A3/3	95
Slika 5.33: Preskušanec C2/1 pred začetkom preiskave tlačne trdnosti	96
Slika 5.34: Preskušanec C2/1 po končani preiskavi tlačne trdnosti	96
Slika 5.35: Tlačne trdnosti cilindrov (f_{cc}).....	97
Slika 5.36: Cilinder po preiskavi cepilne natezne trdnosti.....	99
Slika 5.37: Cepilna natezna trdnost cilindrov (f_{ctc}).....	99
Slika 5.38: Diagram napetost - specifična deformacija za preskušance A3-1, A3-2 in A3-3	101
Slika 5.39: Diagram napetost - specifična deformacija za preskušance A4-1, A4-2 in A4-3	101
Slika 5.40: Diagram napetost - specifična deformacija za preskušance A5-1, A5-2 in A5-3.....	102
Slika 5.41: Diagram napetost - specifična deformacija za preskušance C1-1, C1-2 in C1-3	102
Slika 5.42: Diagram napetost - specifična deformacija za preskušance C2-1, C2-2 in C2-3	103
Slika 5.43: Primerjava povprečnih vrednosti modula elastičnosti $E_{30-60\%}$ in strižnega modula $G_{30-60\%}$ ter njunega medsebojnega razmerja.....	103
Slika 5.44: Primerjava tlačnih trdnosti mešanic f_{cg} in cilindrov f_{cc} , s cepilnimi nateznimi trdnostmi mešanic f_{ctg} in cilindrov f_{ctc}	106
Slika 5.45: Primerjava deleža porušitve po kamnu s cepilnimi nateznimi trdnostmi mešanic f_{ctg} in cilindrov f_{ctc}	106
Slika 5.46: Ocena prerezov cilindrov po cepilni preiskavi	107
Slika 5.47: Primerjava modul. elastičnosti $E_{30-60\%}$ s tlačno trd. cilindra f_{cc} in tlačno trd.meš. f_{cg}	108
Slika 5.48: Primerjava str. mod. $G_{30-60\%}$ s cep. nat. trd. cilindra f_{ctc} in cep. nat. trd. meš. f_{ctg}	108
Slika 5.49: Razmerje med vertikalno specifično deformacijo ε_1 pri doseženi tlačni trdnosti in tlačno trdnostjo cilindra f_{cc} ter tlačno trdnostjo mešanice f_{cg}	109
Slika 5.50: Prikaz odvisnosti tlačne trdnosti cilindra f_{cc} od tlačne trdnosti mešanice f_{cg}	110
Slika 5.51: Pozicije analiziranih zidov-slopov v sklopu »in situ« preiskav.....	111
Slika 5.52: Izvedba georadarskih meritev.....	113
Slika 5.53: Georadarski profili zidnega slopa 1-C, izmerjeni pred injektiranjem na višinah 100, 130 in 160 cm	113
Slika 5.54: a) Digitalni in b) termografski posnetek zidnega slopa 1-C1 z notranje strani, 28 ur po injektiranju, z označenimi georadarskimi profili na višinah 160, 130 in 100 cm.....	114
Slika 5.55: Mesta meritve vlage na zidnem slopu 1-C1	115
Slika 5.56: a) Površinsko sondiranje b) globinsko sondiranje zidov	117
Slika 6.1: Izvedba hidroizolacijske bariere (F. Vugrinec).....	126

LIST OF FIGURES

Fig. 1.1: a) Stone masonry wall with voids built with limestone (Tomažević, 2007),.....	1
Fig. 2.1: Determining of confidence factor CF (Gostič in Dolinšek, 2006).....	10
Fig. 2.2: a) Surface sound at the corner of the wall, b) depth sound executed to the middle of the wall.....	22
Fig. 2.3: Sounding of the wall with drilling: a) hole in the wall, b) drilled core	22
Fig. 2.4: »In situ« shear test with arrangement of measuring positions (Bosiljkov, 2006).....	24
Fig. 2.5: Classification of multiple leaf stone masonry walls sections in classes (Binda et al., 2006).....	26
Fig. 2.6: Composition of multiple leaf stone masonry walls in some parts of Italy (Binda et al., 2006).....	27
Fig. 3.1: a) The apparatus for grout injection, b) application of the procedure on the church of St. Anton in Kobarid	37
Fig. 3.2: Setting up of the holes and injection pipes in the wall (Identification of Strengthening Strategies, 2006)	37
Fig. 3.3: Example of strengthening of the wall with reinforced concrete coat (Bergant et al., 1998).....	39
Fig. 3.4: Reconstruction of damaged wall corner and construction of vertical reinforced concrete tie (Bergant et al., 1998)	39
Fig. 3.5: a), b) Cleaned and deepened fugues, c) first layer of mortar, d) final situation (Corradi in sod., 2006).....	40
Fig. 3.6: Repointing with reinforcing of fugues in case of external leaves made of brick (Binda, 2006)	41
Fig. 3.7: a) Fixing of transversal anchors with bending in case of reinforced steel bars, b) with screwing in case of threaded bars (Valuzzi, 2004).....	41
Fig. 3.8: a) Grouted anchors in multiple leaf stone masonry wall, b) »sewing of the wall« (Van Gemert et al., 1999).....	42
Fig. 4.1: Example of ductile behaviour of the wall: no larger cracks have formed in the upper section of the wall because of the settlement of supporting pillar of the arcade (Van Rickstal, 2000)	49
Fig. 5.1: Chlorides content (Cl^-) in % by mass.....	56
Fig. 5.2: Sulfate content (SO_3) in % by mass.....	57
Fig. 5.3: Alkali content (Na_2O , K_2O) in % by mass.....	58
Fig. 5.4: Water soluble nitrates content ($NaNO_3$, KNO_3) in % by mass.....	59
Fig. 5.5: Water-binder ratio used for preparation of injection grouts	61
Fig. 5.6: a) Weighing of empty vessel, b) weighing of the vessel filled with freshly prepared injection grout	62
Fig. 5.7: Cone for measurement of fluidity.....	64
Fig. 5.8: Measured values of fluidity immediately after preparation and after 30 min.	64
Fig. 5.9: Cylinders of diameter $d=25$ mm and height $v=250$ mm for bleeding test.....	66
Fig. 5.10: Bleeding in % after 3 hours.....	66
Fig. 5.11: Determination of water retentivity	68
Fig. 5.12: Water retentivity and relative loss of water in %.....	68
Fig. 5.13: Measurements of volume change on cylinders.....	70
Fig. 5.14: Volume change (ΔV) in % with criterion, measured in six time periods	70
Fig. 5.15: Volume change (ΔV) in % in different time periods	71
Fig. 5.16: Scheme of flexural strength test	73
Fig. 5.17: Flexural strength of specimens in three time periods.....	74
Fig. 5.18: Scheme of compressive strength test	76
Fig. 5.19: Compressive strength of specimens in three time periods	76
Fig. 5.20: Specimen after tensile splitting test	78
Fig. 5.21: Tensile splitting strength of specimens after 90 days	78
Fig. 5.22: a) Panelling of substrate, b) execution of circular grooves in partly hardened injection grout, c) execution of »pull off« test.....	80
Fig. 5.23: Water absorption test of specimens.....	82
Fig. 5.24: Results of water absorption due to capillary action in different time periods.....	83
Fig. 5.25: Cross section of specimens after flexural strength test.....	85
Fig. 5.26: a) Compression tests on sandstone specimens, b) compression tests on limestone specimens	89
Fig. 5.27: Determination of water absorption of specimens due to capillary action	91
Fig. 5.28: Results of water absorption due to capillary action in different time periods.....	91
Fig. 5.29: Mould prepared for building in of stones	93
Fig. 5.30: Sieve chart- distribution of aggregate size for cylindrical specimens	93

Fig. 5.31: Preparation of cylindrical specimens: a) sieving of aggregate b) specimens prepared for injection grouting	94
Fig. 5.32: Grout injection of specimen A3/3	95
Fig. 5.33: Specimen C2/1 before the compression strength test	96
Fig. 5.34: Specimen C2/1 after the compression strength test	96
Fig. 5.35: Compression strength of cylindrical specimens (f_{cc})	97
Fig. 5.36: Cylinder after tensile splitting test	99
Fig. 5.37: Tensile splitting strength of cylinders (f_{ctc})	99
Fig. 5.38: Stress-strain diagram for specimens A3-1, A3-2 and A3-3	101
Fig. 5.39: Stress-strain diagram for specimens A4-1, A4-2 and A4-3	101
Fig. 5.40: Stress-strain diagram for specimens A5-1, A5-2 and A5-3	102
Fig. 5.41: Stress-strain diagram for specimens C1-1, C1-2 and C1-3	102
Fig. 5.42: Stress-strain diagram for specimens C2-1, C2-2 and C2-3	103
Fig. 5.43: Comparison of average values of modulus of elasticity $E_{30-60\%}$, shear modulus $G_{30-60\%}$ and ratio between both	103
Fig. 5.44: Comparison of compressive strengths of grouts f_{cg} and cylinders f_{cc} , with tensile splitting strengths of grouts f_{ctg} and cylinders f_{ctc}	106
Fig. 5.45: Comparison of fracture area by stone with tensile splitting strengths of grouts f_{ctg} and cylinders f_{ctc}	106
Fig. 5.46: Evaluation of cross sections of cylinders after tensile splitting test	107
Fig. 5.47: Comparison of mod. of el. $E_{30-60\%}$ with compr. str. of cylinder f_{cc} and compr. str. of grout f_{cg}	108
Fig. 5.48: Comparison of shear mod. $G_{30-60\%}$ with tensile splitting strength of cylinder f_{ctc} tensile splitting strength of grout f_{ctg}	108
Fig. 5.49: Ratio between vertical strain ε_1 at compressive strength, compressive strength of cylinder f_{cc} , and compressive strength of grout f_{cg}	109
Fig. 5.50: Dependence between compressive strength of cylinder f_{cc} and compressive strength of grout f_{cg}	110
Fig. 5.51: Positions of analysed walls in case of »in situ« tests	111
Fig. 5.52: GPR measurements	113
Fig. 5.53: GPR profiles of the wall 1-C1 measured before injection grouting on height 100, 130 and 160 cm	113
Fig. 5.54: a) Digital and b) termographical shot of wall 1-C1 from inside, 28 hours after injection grouting with GPR profiles marked on heights 160, 130 and 100 cm	114
Fig. 5.55: Measuring positions for moisture determination in wall 1-C1	115
Fig. 5.56: a) Surface sounding b) depth sounding of the wall	117
Fig. 6.1: Execution of hydro isolation barrier (F. Vugrinec)	126

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 2.1: Tipične mehanske lastnosti gradnikov zgodovinskega kamnitega in mešanega zidovja (Tomažević in Apih, 1993).....</i>	<i>25</i>
<i>Preglednica 2.2: Celotna širina, razmerje med zunanjsima in notranjim slojem ter sestava troslojnih kamnitih zidov, izmerjena na laboratorijskih preskušancih in na terenu (Bosiljkov in sod., 2004).....</i>	<i>28</i>
<i>Preglednica 2.3: Mehanske lastnosti kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov pred in po injektiranju (Tomažević in Apih, 1993).....</i>	<i>30</i>
<i>Preglednica 2.4: Mehanske lastnosti troslojnih kamnitih zidov pred in po injektiranju (Vintzileou in Tassios, 1995).....</i>	<i>32</i>
<i>Preglednica 2.5: Rezultati preiskav troslojnih kamnitih zidov pred in po injektiranju (povzeto in prilagojeno po da Porto in sod., 2003).....</i>	<i>33</i>
<i>Preglednica 2.6: Rezultati preiskav troslojnih kamnitih zidov pred in po injektiranju (Miltiadou-Fezans in sod., 2003).....</i>	<i>34</i>
<i>Preglednica 2.7: Rezultati preiskav troslojnih kamnitih in opečnih zidov pred in po injektiranju (Toumbakari in sod., 2005).....</i>	<i>35</i>
<i>Preglednica 5.1: Priprava sveže injekcijske mešanice.....</i>	<i>60</i>
<i>Preglednica 5.2: Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice.....</i>	<i>62</i>
<i>Preglednica 5.3: Prostorninska masa strjene mešanice, izvrednotena v treh časovnih obdobjih.....</i>	<i>72</i>
<i>Preglednica 5.4: Sprijemna trdnost f_u na dveh substratih: apnencu in peščenjaku.....</i>	<i>81</i>
<i>Preglednica 5.5: Izvedene preiskave in določitev kakovostnega razreda mešanice (A, B, C) glede na kriterije posameznih preiskav.....</i>	<i>87</i>
<i>Preglednica 5.6: Rezultati preiskav kamnitih vzorcev iz apnenca in peščenjaka.....</i>	<i>90</i>
<i>Preglednica 5.7: Primerjava povprečnih vrednosti prispevka votlin, količine vtisnjene mešanice, mešalnega razmerja in pretočnosti mešanice ter časa injektiranja cilindričnih preskušancev.....</i>	<i>95</i>
<i>Preglednica 5.8: Primerjava vrednosti, izvrednotenih pri preizkusu tlačnih in cepilnih nateznih trdnosti za mešanice (prizme in valje) in cilindre, pri preskušancih starih 90 dni.....</i>	<i>105</i>
<i>Preglednica 5.9: Meritve vlage v odvzetih vzorcih pred ter 10, 28 in 90 dni po injektiranju.....</i>	<i>116</i>
<i>Preglednica 5.10: Vrednosti meritev izvedenih pri spremljavi injektiranja.....</i>	<i>118</i>

LIST OF TABLES

Table 2.1: Typical mechanical properties of the components of historical masonry and stone-masonry walls (Tomažević in Apih, 1993)	25
Table 2.2: Total width, ratio between outer and inner leafs and composition of three leaf masonry walls, measured on laboratory samples and on field (Bosiljkov et al., 2004).....	28
Table 2.3: Mechanical properties of stone and stone-brick masonry walls before and after injection grouting (Tomažević in Apih, 1993)	30
Table 2.4: Mechanical properties of three leaf stone masonry walls before and after injection grouting (Vintzileou in Tassios, 1995).....	32
Table 2.5: Results of tests on three leaf stone masonry walls before and after injection grouting (summarized and adapted after da Porto et al., 2003).....	33
Table 2.6: Results of tests on three leaf stone masonry walls before and after injection grouting (Miltiadou-Fezans et al., 2003)	34
Table 2.7: Results of tests on three leaf stone and brick masonry walls before and after injection grouting (Toumbakari et al., 2005)	35
Table 5.1: Preparation of fresh injection grout.....	60
Table 5.2: Bulk density of freshly prepared injection grout.....	62
Table 5.3: Bulk density of hardened injection grout in three time periods	72
Table 5.4: Adhesive strength f_u on two substrates: limestone and sandstone	81
Table 5.5: Performed tests and determining of quality class of injection grout (A, B, C) regarding the criteria of separate tests.....	87
Table 5.6: Results of tests performed on limestone and sandstone specimens	90
Table 5.7: Comparison of average values of presence of cavities, quantity of injection grout, water binder ratio, fluidity of injection grout and time of injection grouting of cylindrical specimens	95
Table 5.8: Comparison compressive and tensile splitting strength tests results for injection grouts (prisms and cylinders) and cylinders on 90 days old specimens	105
Table 5.9: Measurements of moisture in samples taken before and 10, 28 and 90 days after injection grouting	116
Table 5.10: Values measured before and between injection grouting	118

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

A	.....	testna površina pri preskusu sprijemne trdnosti
A_c	.....	prerez cilindra
A1-A7	.....	oznake apnenih in kombiniranih cementno-apnenih injekcijskih mešanic
a	.....	širina preskušanca pri preskusu tlačne trdnosti
b	.....	širina preskušanca pri preskusu upogibne natezne trdnosti
C1, C2	.....	oznake cementnih injekcijskih mešanic
CF	.....	faktor zanesljivosti (confidence factor)
c.o.v.	.....	koeficient variacije
DT	.....	destruktivne preiskave
DDT	.....	delno destruktivne preiskave
d	.....	premer preskušanca pri preskusu cepilne natezne trdnosti, višina preskušanca pri preskusu upogibne natezne trdnosti
d_a	.....	premer armaturne palice
E	.....	modul elastičnosti zidu
E_w	.....	modul elastičnosti zidu
$E_{30-60\%}$	.....	sekantni modul elastičnosti izrednoten med 30 in 60% dosežene tlačne trdnosti cilindra
ε	.....	dielektrična konstanta pri georadarskih meritvah
ε_1	.....	vertikalna specifična deformacija
ε_2	.....	horizontalna specifična deformacija
ε_d	.....	diagonalna specifična deformacija
$\Delta\varepsilon_{1(30-60\%)}$	.....	razlika med vertikalno spec. deformacijo pri 30 in pri 60% tlačne trdnosti
$\Delta\varepsilon_{2(30-60\%)}$	.....	razlika med horizontalno spec. deformacijo pri 30 in pri 60% tlačne trdnosti
F	.....	maksimalna dosežena sila pri preskusu upogibne natezne trdnosti prizem, tlačne trdnosti prizem in cilindrov ter cepilne natezne trdnosti prizem, valjev in cilindrov
F_u	.....	sila pri porušitvi pri preskusu sprijemne trdnosti
FGG	.....	fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
f_c	.....	tlačna trdnost preskušanca
f_{cA}	.....	tlačna trdnost kamnitega vzorca apnenca
f_{cP}	.....	tlačna trdnost kamnitega vzorca peščenjaka
f_{cv}	.....	tlačna trdnost obstoječega veziva v zidu
f_{cg}	.....	tlačna trdnost injekcijske mešanice
f_{ct}	.....	cepilna natezna trdnost preskušanca
f_{ctc}	.....	cepilna natezna trdnost cilindra
f_{cc}	.....	tlačna trdnost cilindra
$f_{cc30\%}$	.....	30% dosežene tlačne trdnosti cilindra
$f_{cc60\%}$	.....	60% dosežene tlačne trdnosti cilindra
f_{cw}	.....	tlačna trdnost zidu
f_t	.....	upogibna natezna trdnost preskušanca
f_{tw}	.....	natezna trdnost zidu
f_u	.....	sprijemna trdnost (»pull off«)
f_{uA1-7}	.....	sprijemna trdnost (»pull off«) apnenih in kombiniranih mešanic

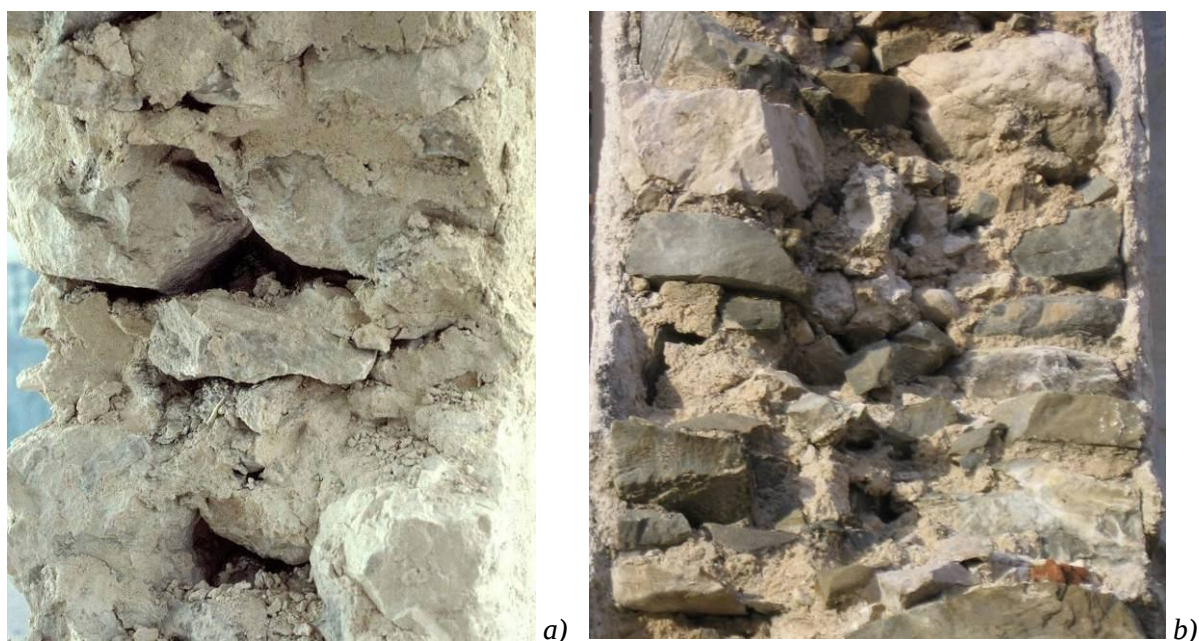
f_{uC1-2}	.....	sprijemna trdnost (»pull off«) cementnih mešanic
f_{tk}	.....	karakteristična natezna trdnost armature
f_{yk}	.....	karakteristična meja elastičnosti armature
G_w	.....	strižni modul zidu
$G_{30-60\%}$	.....	strižni modul cilindra izrednoten med 30 in 60% dosežene tlačne trdnosti
GPR	.....	georadar (ground penetrating radar)
GI ZRMK	.....	gradbeni inštitut ZRMK
h_1	.....	začetna globina mešanice pri mer. spr. prostornine
h_2	.....	globina mešanice v izbranem časovnem intervalu pri mer. spr. prostornine
IR	.....	infra rdeče (infrared)
l	.....	dolžina preskušanca, razmik med podporama pri preskusu upogibne natezne trdnosti
l_a	.....	dolžina armaturene palice
l_s	.....	sidrna dolžina armaturene palice
m	.....	masa preskušanca pri določevanju prost.mase strjene mešanice
m_1	.....	masa prazne posode pri določevanju prostorninske mase sveže mešanice, masa kalupa v suhem stanju pri določevanju vodozadržnosti
m_2	.....	masa posode skupaj z mešanico pri določevanju prostorninske mase sveže mešanice, masa filterskega papirja v suhem stanju pri določevanju vodozadržnosti
m_3	.....	masa kalupa skupaj z mešanico pri določevanju vodozadržnosti
m_4	.....	masa z vodo prepojenega filterskega papirja pri določevanju vodozadržnosti
m_5	.....	masa mešanice brez kalupa pri določevanju vodozadržnosti
NDT	.....	nedestruktivne preiskave
p	.....	pritisk injektiranja
R	.....	koeficient korelacije
ρ	.....	prostorninska masa preskušanca strjene mešanice
ρ_m	.....	prostorninska masa sveže mešanice
ρ_s	.....	prostorninska masa suhih kamnitih preskušancev
ρ_v	.....	prostorninska masa vodozasičenih kamnitih preskušancev
stdev	.....	standardna deviacija
σ_c	.....	napetost pri preskusu tlačne trdnosti cilindra
t	.....	čas pretočnosti
V	.....	prostornina preskušanca pri določevanju prost. mase strjene mešanice
V_v	.....	prostornina posode za določevanje prostorninske mase sveže mešanice
ΔV	.....	sprememba prostornine
v	.....	količina mešanice pri določevanju izločanja vode
v_v	.....	hitrost elektromagnetnega valovanja pri georadarskih meritvah
v_1	.....	količina vode nad mešanico po preteku 3 ur pri določevanju izločanja vode
$\nu_{30-60\%}$	.....	poissonovo število izrednoteno med 30 in 60% dosežene tlačne trdnosti
v/m	.....	potreba po vodi (vodovezivno razmerje)

W_1	.....	potreba po vodi (vodo vezivno razmerje) pri določevanju vodozadržnosti
W_2	.....	vsebnost vode v mešanici pri določevanju vodozadržnosti
W_3	.....	masa absorbirane vode pri določevanju vodozadržnosti
W_4	.....	relativna izguba vode pri določevanju vodozadržnosti
WRV	.....	vodozadržnost
ZVKD RC	.....	zavod za varstvo kulturne dediščine, restavratorski center

1 UVOD

1.1 Opis problematike

Velik del zidov naše stavbne dediščine je grajen iz kamna oziroma iz mešanice opeke in kamna. Masivnejši zidovi so največkrat grajeni troslojno (zunanja sloja iz delno oblikovanih, klesanih ali lomljenih kamnov, vmesni del iz drobirja in manjših kamnov), tanjši zidovi pa običajno dvoslojno (slika 1.1). Kot vezivo med posameznimi gradniki zidu je praviloma uporabljena apnena malta. Kakovost in mehanske lastnosti uporabljene malte so odvisne od vrste in količine veziva ter od čistosti uporabljenega agregata -peska. Nosilnost kamnitih zidov napram vertikalnim obremenitvam običajno ni problematična, napram horizontalnim pa kljub eventualni pravilni tlorisni zasnovi zidov pogosto ni zadostna, da bi bilo mogoče zagotoviti ustrezno potresno odpornost objekta kot celote. Mehanske lastnosti kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov z določeno votlikavostjo je mogoče izboljšati z utrditvijo s postopkom sistematičnega injektiranja. Bistvo metode je vtiskovanje tekoče suspenzije (cementne, apnene ali polimerne) v delno votel zid, s čimer po strditvi materiala dosežemo ustrezno povezanost (homogenost) med posameznimi kamni in sloji zidu.



Slika 1.1: a) Kamniti zid z vmesnimi votlinami, grajen iz apnenca (Tomažević, 2007), b) zid grajen iz apnenca in peščenjaka

Fig. 1.1: a) Stone masonry wall with voids built with limestone (Tomažević, 2007),
b) stone masonry wall built with limestone and sandstone

Kakovost metode se, poleg tega da izboljšamo trdnostne karakteristike zidu, kaže tudi v tem, da se izognemo neželenim posegom na zunanjih, vidnih delih zidu, kar je bistvenega pomena pri utrjevanju kulturnozgodovinskih objektov.

Sanacija in utrjevanje kulturnozgodovinskih objektov oziroma spomenikov zahteva interdisciplinaren pristop, zato je potrebno poleg gradbene upoštevati tudi konservatorsko in restavratorsko stroko. Načelo restavriranja kulturnozgodovinskih spomenikov je, da naj bi se pri posegih v konstrukcijo uporabljali tradicionalni materiali oziroma materiali, ki so tem čim bližji po mehansko-fizikalnih in kemijskih lastnostih.

Utrjevanje zidov s sistematičnim injektiranjem je lahko problematično predvsem v primerih, kadar so na zidovju, ki ga utrjujemo, freske ali druge poslikave, saj lahko pride do poškodb oziroma negativnih vplivov na zaključne sloje zidu. Poškodbe, ki se lahko pojavijo na ometih in površinskih obdelavah, so odvisne od več dejavnikov, zato je potrebno poznavanje vrste in lastnosti posameznih gradnikov zidu, sestave in mehansko-fizikalnih lastnosti injekcijskih mešanic, ki jih vgrajujemo, in okoliščin ter vzrokov za nastanek poškodb. Med in po izvedeni utrditvi s postopkom sistematičnega injektiranja je potrebno preprečiti poškodbe ometa in poslikav in hkrati, kar je za varnost in stabilnost objekta ključnega pomena, zagotoviti ustrezno nosilnost in obnašanje pri vplivu rednih in izrednih obremenitev (na primer potres).

1.2 Cilj dela in uporabljene metode

1.2.1 Prispevek in namen raziskovalnega dela

Obstoječa tehnična regulativa na področju injektiranja obravnava injektiranje kabelskih prednapetih sider in jeklenih vrvi s cementnimi injekcijskimi mešanicami za premostitvene in ostale inženirske objekte. Že veljavni standardi SIST EN 445:2007, SIST EN 446:2007 in SIST EN 447:2007, ki bodo v prihodnosti nadomestili za avtocestni program obvezno verzijo iz leta 1996 (SIST EN 445-447:1998), opredeljujejo zahteve za cementne injekcijske mešanice na omenjenem področju, medtem ko v primeru utrjevanja kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov s sistematičnim injektiranjem standardi ne obstajajo.

Gradbeni izvajalci in nadzorniki se pri sistematičnem injektiranju kamnitih zidov največkrat zanašajo na lastne izkušnje in ekspertizo, vendar so pogoste napake in nezadostna kakovost izvedenih del znak, da tudi to področje gradbeništva potrebuje tehnično regulativo v smislu harmoniziranih standardov.

Delo je izdelano z željo prispevati k vzpostavitvi sistematično urejenih pravil, ki bi opredelila potek dela, sestavo injekcijske mešanice za različne vrste zidov in kriterije za doseganje ustrezne kakovosti pri utrjevanju kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov z določeno votlikavostjo s postopkom sistematičnega injektiranja. Na podlagi rezultatov raziskav in ugotovitev drugih avtorjev ter upoštevanjem rezultatov lastnih preiskav so podana navodila in nabor potrebnih preiskav za ugotavljanje stanja in vrste zidov, opredeljeni so kriteriji za izbiro optimalne mešanice in navodila za zagotavljanje kakovostne izvedbe in kontrole del. V delu je obravnavan tudi vpliv sistematičnega injektiranja na mehanske lastnosti zidu, vpliv vsebnosti potencialno škodljivih snovi v mešanicah na zaključne sloje zidu in problemi kompatibilnosti med vgrajenimi in obstoječimi materiali v zidu. Rezultati preiskav bodo v pomoč pri nadaljnjem razvoju materialov za injektiranje in poznavanju njihovega vpliva na omete in površinske obdelave ter mehansko stabilnost in odpornost objektov, ki jih utrjujemo.

Ugotovitve pri izvedbi preliminarne preiskav in podana navodila za zagotavljanje kakovostne izvedbe ter kontrole del so bila praktično aplicirana in preskušena pri izvedbi »in situ« preiskav na konkretnem objektu. Rezultati »in situ« preiskav so zaradi vsebinskih okvirjev na tem mestu podani v delni obliki, skladno z dinamiko izvedenega. Spremenljive terenske razmere so bile dober pokazatelj robustnosti analiziranih injekcijskih mešanic, hkrati pa so omogočile preverbo nekaterih metod, uporabljenih v sklopu preliminarne preiskav pri dejanski izvedbi utrjevanja zidov s sistematičnim injektiranjem.

1.2.2 V sklopu naloge izvedene preiskave

1.2.2.1 Preliminarne laboratorijske preiskave

Namen preliminarne laboratorijske preiskave je bil podati mehanske, kemijske in fizikalne kriterije ter smernice za izbiro optimalne mešanice v posameznih konkretnih primerih uporabe. Preiskavam je bilo podvrženo devet injekcijskih mešanic, dobavljivih na slovenskem tržišču. Ker proizvajalci praviloma ne razkrivajo točne komponentne sestave svojih proizvodov, je bil naveden splošen opis, zapisan v tehničnih listih, iz katerega je bilo mogoče razbrati vrsto uporabljenega veziva ter navodila za hrambo in pripravo posamezne mešanice. Apnene mešanice so bile označene z oznakami A1, A2, A4 in A6, kombinirane cementno-apnene mešanice z A3, A5 in A7, cementne pa z oznakama C1 in C2.

Izvedene preliminarne laboratorijske preiskave smo razdelili na štiri sklope. V prvem sklopu je bila s kemijskimi preiskavami analizirana vsebnost potencialno škodljivih snovi v suhi injekcijski mešanici, in sicer vsebnost kloridov, sulfatov, alkalij in nitratov.

V drugem sklopu preiskav je bil poudarek na obnašanju sveže pripravljene injekcijske mešanice, kjer je bila merjena pretočnost in izločanje vode, ter izvedena kategorizacija mešanic glede na vodovezivna razmerja in obdelavnost.

Tretji, najobsežnejši sklop v okviru preliminarne preiskav, so predstavljale preiskave in obnašanje strjene injekcijske mešanice. Tu je bila spremljana sprememba prostornine, izvajane meritve upogibne, tlačne in natezne cepilne trdnosti preskušancev, izveden je bil »pull off« test na dveh substratih (apnenec in peščenjak), meritve kapilarnega dviga in vrednotena homogenost ter razpokanost preskušancev.

Četrty sklop preliminarne preiskav so predstavljale preiskave cilindričnih preskušancev višine $v=30$ cm in premera $d=15$ cm, ki smo jih pripravili iz kamnov, dobavljenih iz porušenega objekta s kamnitimi zidovi. Namen preiskave je bil ponazoriti utrjeno kamnito jedro zidu in ovrednotiti vpliv mehanskih lastnosti injekcijskih mešanic na kakovost vgrajevanja ter mehanske lastnosti preskušanca.

Pri vsaki izmed izvedenih preiskav so bile določene mejne vrednosti in kriteriji z namenom uvrstitve posamezne mešanice v kakovostni razred. Določeni so bili trije kakovostni razredi mešanic, kot sledi: mešanice visoke kakovosti (razred A), mešanice srednje kakovosti (razred B) in mešanice nizke kakovosti (razred C). Pri doseganju kriterijev za posamezni kakovostni razred je bilo dopuščeno 10 % odstopanja od mejnih vrednosti.

1.2.2.2 »In situ« preiskave

»In situ« preiskave na dejanskem objektu pomenijo kontinuirano nadaljevanje izvedenih preliminarne preiskav. Zaradi časovnih in vsebinskih okvirjev obravnavane problematike, rezultati »in situ« preiskav v delu niso podani v celoti.

»In situ« preiskave so bile izvajane na objektu s kamnitimi zidovi v Posočju. S štirimi mešanicami, izbranimi na podlagi rezultatov preliminarne preiskav, so bili sistematično zainjektirani štirje vzorčni zidovi (slopi), ki bodo preskušeni za določitev strižne nosilnosti. Štirje zidovi bodo preskušani 180 dni po opravljenem sistematičnem injektiranju, eden pa v obstoječem, nezainjektiranem stanju. Prednost izvedbe preiskav »in situ« je, da se preskuša zidovje dejanskega objekta, kar je bistvenega pomena za

verodostojnost preiskav, saj je z zidanjem vzorčnih zidov v laboratoriju težko realno ponazoriti oziroma upoštevati vse parametre stanja zidov na terenu.

V sklopu »in situ« preiskav so bile izvajane tudi georadarske meritve in meritve s termokamero (NDT-preiskava). Z georadarskimi meritvami smo ugotavljali delež votlin v posameznem zidu. Rezultate georadarskih meritev smo primerjali z rezultati termografskih meritev, ki so v primeru injektiranja s cementnimi injekcijskimi mešanicami, zaradi sproščanja hidratacijske toplote dober pokazatelj uspešnosti sistematičnega injektiranja.

Pred in po izvedenem sistematičnem injektiranju vzorčnih zidnih slopov je bila v različnih časovnih intervalih spremljana tudi stopnja navlaženosti zidovja. Pri meritvah vlage sta bili uporabljeni dve metodi, in sicer smo stopnjo navlaženosti merili gravimetrično in z elektronskim vlagomerom.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 Uvod

Med pregledom strokovne in znanstvene literature smo ugotovili, da je bilo na področju utrjevanja kamitih zidov s sistematičnim injektiranjem veliko narejenega v sosednji Italiji, kjer so se s to problematiko med drugimi ukvarjali Binda (Binda in Baronio, 1992, Binda in Saisi, 2001, Binda in sod., 1997, Binda, 2003, Binda in sod., 2003, Binda, 2005, Binda, 2006, Binda in sod., 2006, Binda, 2007, Binda in sod., 2007), Collepardi (Collepardi, 1990, Collepardi, 1999), da Porto (da Porto in sod., 2003), Valluzi (Valluzi in sod., 2001, Valluzi in sod., 2003, Valluzi in sod., 2004). Koristne napotke in informacije smo našli tudi pri belgijskih avtorjih, kot so Van Rickstal (Van Rickstal, 2000, Van Rickstal in sod., 2002), Van Gemert (Van Gemert in sod., 1999) in Schueremans (Schueremans in sod.), ter pri grških raziskovalcih, kot so Toumbakari (Toumbakari, 2002, Toumbakari in sod., 2005), Vintzileou (Vintzileou in Tassios, 1995, Vintzileou 2006, Vintzileou in sod., 2006) in Kalagri (Kalagri in sod., 2007). Raziskave na tem področju, pri katerih sta sodelovala in jih izvajala Apihova (Apih in sod., 1986, Apih in sod., 1987, Apih, 1991) in Tomaževič (Tomaževič in sod., 1989, Tomaževič in sod., 1992, Tomaževič in Apih, 1993), so v osemdesetih in devetdesetih letih prejšnjega stoletja potekale tudi v Sloveniji, in sicer v sklopu takratnega Zavoda za raziskavo materialov in konstrukcij.

V tem poglavju smo obravnavali določila listin in zakonov, vrste injekcijskih mešanic in vpliv sestave na njihove lastnosti, vrste kamnitih in kamnito-opečnih zidov z navedbo metod preiskovanja zidov in povzetke raziskav posameznih avtorjev, ki so se ukvarjali s problematiko določevanja vpliva sistematičnega injektiranja na mehanske lastnosti zidov.

2.2 Zahteve pri utrjevanju objektov s poudarkom na objektih kulturne dediščine

2.2.1 Določila listin in priporočila konservatorskih centrov

Restavratorske in konservatorske službe so svoje zahteve pri sanaciji in utrjevanju objektov kulturne dediščine med ostalim predstavile v Beneški in Krakovski listini. Problematike uporabe modernih tehnik utrjevanja se dotika 10. člen Beneške listine iz leta 1964:

»V primerih kjer se tradicionalne tehnike izkažejo kot nezadostne, je mogoče objekt zgodovinskega pomena konsolidirati z uporabo katerekoli moderne tehnike za konserviranje in konstrukcijsko utrditev, katere učinkovitost je bila prikazana z znanstvenimi podatki in potrjena z izkušnjami.«
(Beneška listina, 1964)

V 10. členu listine, sprejete v Krakowu leta 2000, se zahteve restavratorjev in konservatorjev še zaostrijo:

»Tehnike za ohranjanje se morajo navezovati - izhajati iz interdisciplinarnih znanstvenih raziskav materialov in tehnologij, uporabljenih za popravilo konstrukcije in/ali restavriranje objektov kulturne dediščine. Pri izbiri posega je potrebno upoštevati originalno funkcijo in zagotoviti kompatibilnost z obstoječimi materiali, strukturami in arhitekturnimi vrednotami. Vsak nov material in tehnološki postopek bi moral biti natančno testiran, primerjan z drugimi in razumljen pred uporabo. Čeprav je lahko dejansko uporabljena nova tehnika bistvenega pomena za ohranitev obstoječe stavbe, je potreben dosleden monitoring v luči doseženih rezultatov, upoštevajoč obnašanje skozi čas in možnost eventualne reverzibilnosti. Posebno pozornost je potrebno posvetiti izpopolnjenju našega znanja na področju tradicionalnih materialov in tehnik in njihovo primerno nadaljnjo uporabo v kontekstu moderne družbe, upoštevajoč, da predstavljajo pomembno komponento kulturne dediščine.«
(Krakovska listina, 2000)

Problematika poznavanja obstoječih materialov v objektih kulturne dediščine in metodologija za formulacijo novih je bila prvič sistematično obdelana v priporočilih ICCROM iz leta 1982, kjer so bili izpostavljeni naslednji splošni vidiki (Toumbakari, 2002):

- v smislu razvoja materialov za popravilo ali materialov, ki bi lahko nadomestili obstoječe (originalne), je potrebna vzporedna raziskava tako novih kot tudi obstoječih materialov;
- novi materiali morajo biti jasno karakterizirani in zelo dobro dokumentirani;
- karakterizacija in testiranje sanacijskih materialov bi morala biti standardizirana.

V smislu formulacije materialov za restavriranje ICCROM priporoča preverjanje in upoštevanje naslednjih postavk (ICCROM, 1982, cit. po Toumbakari, 2002):

- mehanska odpornost,
- nastanek nevarnih stranskih produktov,
- obnašanje v prisotnosti vode (v tekočem in plinastem agregatnem stanju),
- ekspanzija zaradi toplote ali vode,

- modifikacije zaradi preperevanja,
- izvedba (*čim bolj preprosta in zanesljiva*)
- omejitve glede reverzibilnosti,
- estetski vidik,
- označevanje in dokumentiranje dodanih materialov.

2.2.2 Veljavni zakoni in predpisi

V nadaljevanju podajamo posamezne člene zakonov in predpisov, ki se tičejo utrjevanja objektov, s poudarkom na objektih kulturne dediščine. Kulturnovarstvena soglasja in pogoje, ki jih je potrebno upoštevati pri posegih v objekte kulturne dediščine, opredeljujeta 28. in 29. člen Zakona o varstvu kulturne dediščine (ZVKD-1, UL RS št.16/2008).

V prvem odstavku 28. člena so podrobneje opisani posegi, za katere je potrebno pridobiti kulturnovarstveno soglasje:

(1) »Kulturnovarstveno soglasje je treba pridobiti za: posege v spomenik; posege v vplivno območje spomenika, če to obveznost določa akt o razglasitvi; posege v varstvena območja dediščine; posege v registrirano nepremično dediščino ali v enoto urejanja prostora, če to obveznost določa prostorski akt za raziskavo dediščine.«

Kulturnovarstvene pogoje opisuje 29. člen:

(1)»Pred izdajo kulturnovarstvenega soglasja, razen za soglasje za raziskave ali za iskanje arheoloških ostalin, je treba pridobiti kulturnovarstvene pogoje zavoda.«

(2) »V vlogi za pridobitev kulturnovarstvenih pogojev je treba navesti namen posega in priložiti projektno dokumentacijo, ki jo za pridobitev projektnih pogojev predpisujejo predpisi, ki urejajo graditev. Kadar gre za poseg, za katerega ni predpisano gradbeno dovoljenje, je potrebno vlogi priložiti ustrezno skico in opis posega.«

(3) »Zavod s kulturnovarstvenimi pogoji določi zahteve, ki jih mora izpolnjevati projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja ali druga projektna dokumentacija, potrebna za izvedbo posegov, in zahteve glede strokovne usposobljenosti izvajalcev specializiranih del.«

(4) »Kulturnovarstveni posegi se določijo: za poseg v registrirano nepremično dediščino: v skladu z določbami prostorskega akta ali akta o določitvi varstvenih območij dediščine; za poseg v spomenik ali vplivno območje spomenika: v skladu z aktom o razglasitvi ali z določbami prostorskega akta oziroma akta o določitvi varstvenih območij dediščine.«

(5) »Zavod lahko s kulturnovarstvenimi pogoji kot pogoj za pridobitev kulturnovarstvenega soglasja določi obveznost oprave predhodnih raziskav ali obveznost priprave konservatorskega načrta.«

(6) »Obveznost oprave predhodnih raziskav se lahko določi, če se upravičeno domneva, da je v nepremičnini, ki je predmet posegov, neodkrita dediščina, in grozi nevarnost za njeno poškodovanje ali uničenje.«

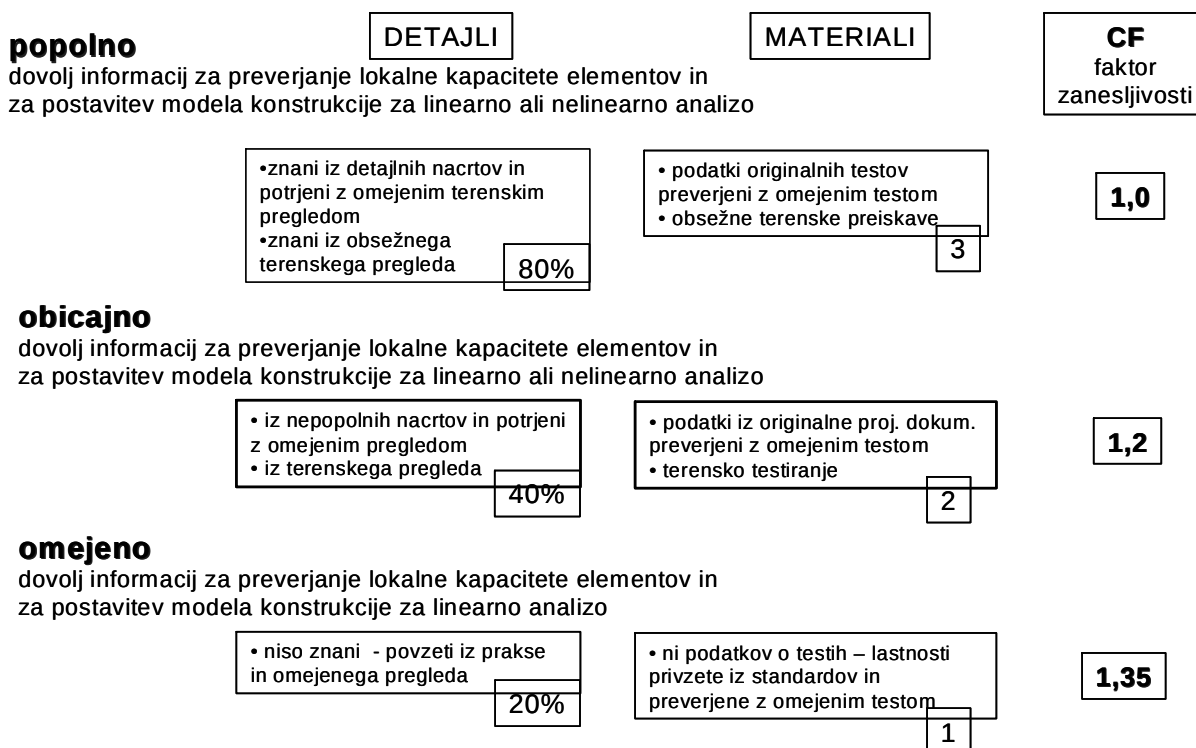
(7) »Priprava konservatorskega načrta se lahko zahteva, če: je nameravani poseg kompleksen; grozi nevarnost uničenja ali ogrožanja varovanih vrednot; je treba pri posegu izvesti konservatorsko-restavratorska dela.«

(8) »Konservatorski načrt je potreben vedno, kadar gre za posege v strukturne elemente spomenika.«

Področje projektiranja objektov kulturne dediščine je obravnavano v 8.členu Zakona o spremembah in dopolnitvah zakona o graditvi objektov (ZGO-1B, 2007), kjer je navedeno:

»V objektih, varovanih na podlagi predpisov s področja varstva kulturne dediščine, lahko projektirane in izvedene rešitve odstopajo od predpisanih bistvenih zahtev, vendar samo pod pogojem, da z odstopanjem ni ogrožena varnost objekta, življenje in zdravje ljudi, promet, sosednji objekti ali okolje.«

Standard SIST EN 1998-3:2005 - Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3. del: Ocena in prenova stavb zahteva, da se pri izračunu nosilnosti konstrukcijskih elementov karakteristična trdnost materiala zmanjša za predpisan varnostni faktor zanesljivosti v odvisnosti od stopnje poznavanja (nivoja vedenja) geometrije konstrukcije, izvedbe detajlov in materiala. Faktor zanesljivosti CF izberemo glede na raven vedenja o konstrukciji:



Slika 2.1: Določanje faktorja zanesljivosti CF (Gostič in Dolinšek, 2006)

Fig. 2.1: Determining of confidence factor CF (Gostič in Dolinšek, 2006)

V informativnem aneksu C, 3. dela Evrokoda 8 (SIST EN 1998-3: 2005), ki obravnava priporočila za projektiranje utrjevanja zidanih objektov na potresnih področjih, se točka C.5.1.6 nanaša na utrjevanje zidov z jedrom iz drobirja oziroma utrjevanje večslojnih zidov:

»Nevezano jedro zidu iz drobirja je mogoče utrditi s cementno injekcijsko mešanico, če je penetracija mešanice zadovoljiva. Če obstaja verjetnost, da bo adhezija mešanice slaba, je potrebno sistematično injektiranje dopolniti z prečnimi jeklenimi sidri, s katerimi jedro povežemo z zunanjimi sloji zidu.«

2.3 Vrste injekcijskih mešanic

2.3.1 Apnene injekcijske mešanice

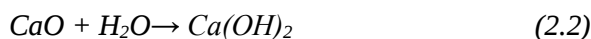
S stališča kompatibilnosti z originalnimi materiali v kamnitih zidovih je v večini primerov (starejši objekti, kjer vezivo predstavlja apnena malta) najprimernejša uporaba apnenih injekcijskih mešanic. Tako klasična kot hidravlična veziva na osnovi apna se že stoletja uporabljajo pri gradnji objektov. Apno so znali proizvajati že Egipčani, v večjem obsegu pa so ga uporabljali Grki in Rimljani. V začetku se je apno skupaj z vodo in peskom uporabljalo za pripravo na zraku strjujoče se malte. Kasneje je bilo ugotovljeno, da z dodajanjem vulkanskega pepela - poculanov (nahajališče v okolici

kraja Pozzuoli), malta dobi hidravlične lastnosti, kar pomeni, da se lahko strjuje tudi pod vodo. Čeprav se odkritje hidravličnih malt pripisuje Rimljanom, so že Feničani in Izraelci v 10. stoletju pr. n. št., poznali hidravlične malte za zaščito objektov, izpostavljenih vodi (akvedukti, pomoli, rezervoarji). Rezervoarji za pitno vodo, ki jih je v Jeruzalemu ukazal zgraditi kralj Solomon, so bili na primer zgrajeni s hidravlično malto, dobljeno z mešanjem apna in zdrobljene gline (Colleparidi, 1990).

V današnjem času se apno pridobiva z žganjem apnenca v pečeh pri temperaturi okoli 950 °C. Pri tem procesu pride do kemijske reakcije (enačba 2.1), rezultat katere je tako imenovano **živo apno**. Živo apno je material v kosih, ki se nato melje v fini prah.



Z dodajanjem vode živemu apnu oziroma gašenjem dobimo **apneno kašo** (angl. lime putty) oziroma **gašeno apno**. Kemijska reakcija (enačba 2.2), ki pri tem poteče, je izjemno eksotermna, sprosti se temperatura do 100 °C, zaradi česar prihaja do izparevanja vode.



Pri apneni kaši gre za tradicionalen način proizvodnje hidratiziranega apna z dodatno količino vode, ki je potrebna za zagotovitev poteka kemijske reakcije zaradi uporabe dokaj nezanesljivih izkustvenih metod gašenja oziroma dodajanja vode.

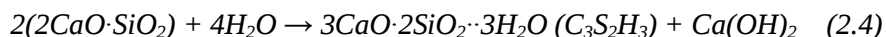
Hidratizirano apno je gašeno apno, ki ga pridobivamo z dodajanjem točno določene, teoretično potrebne količine vode (približno 33 % mase živega apna), pri čemer se vsa voda porabi za kemijsko reakcijo, rezultat pa je suho in praškasto vezivo. Ne glede na izpolnjevanje (v večini primerov) zahteve po kompatibilnosti z obstoječimi materiali v zidu, se v primeru injektiranja z injekcijskimi mešanicami na osnovi hidratiziranega apna pojavljajo problemi pri strjevanju takšne injekcijske mešanice v zidu. Hidratizirano apno kot zračno vezivo za strjevanje oziroma karbonatizacijo potrebuje CO₂ iz zraka, zato se je v praksi dogajalo, da se apnene mešanice v zidu, kjer je dostop zraka otežkočen, niso strdile še daljše obdobje. Hidratizirano apno ne vsebuje hidravličnih komponent in zato nima hidravličnih lastnosti.

Hidravlično apno dobimo z dodajanjem hidravličnih komponent hidratiziranemu apnu, pri čemer dosežemo želene hidravlične lastnosti. Hidravlično apno se je začelo proizvajati sredi 18. stoletja z žganjem laporastih in glinastih apnencev z vsebnostjo do 20 % gline pri temperaturi 900 °C. Pri žganju nastane tudi nekaj cementnih mineralov (C₃S, C₃A) s hidravličnimi lastnostmi, podobno kot pri cementu. Pri reakciji hidravličnega apna z vodo tako nastane kalcijev silikat hidrat (CSH faza), ki daje materialu osnovno trdnost.

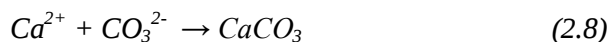
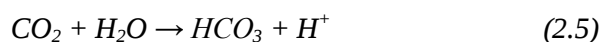
Strjevanje hidravličnega apna poteka kot kombinacija hidratacije in karbonatizacije. Proces hidratacije je hiter in vključuje nastanek silikatne faze. Primer hidratacije dikalcijevega silikata, ki je običajna faza v primeru naravnih hidravličnih apen, je podan v enačbah 2.3 in 2.4:



oziroma s preglednejšim zapisom:



Hkrati s hidratacijo poteka skozi daljše obdobje tudi karbonatizacija kalcijevega hidroksida. Proces karbonatizacije zahteva ločitev ogljikovega dioksida in vode, da nastane ogljikova kislina, preden pride do nastanka kalcijevih ionov, kot prikazujejo enačbe od 2.5 do 2.8.



Prednost hidravličnega apna v primerjavi s hidratiziranim apnom je, da za proces vezanja ni nujno potrebna prisotnost zraka, saj lahko veže tudi v vodi. Z uporabo hidravličnega apna dosežemo časovno sprejemljivo naraščanje trdnostnih karakteristik, vendar se tako kot v primeru hidratiziranega apna pojavljajo težave pri zagotavljanju nizkega vodovezivnega razmerja.

2.3.2 Cementne injekcijske mešanice

Cement kot vezivo, v kontekstu kompatibilnosti z vezivi, uporabljenimi pri gradnji večine objektov kulturne dediščine, zaradi svoje kemijske sestave sicer ni povsem primeren. Možne so namreč kemijske reakcije z materiali v obstoječem zidu in posledičen nastanek škodljivih produktov, kot sta etringit in tumasit. Dodatna pomanjkljivost cementnih mešanic je potencialna segregacija težjih delcev in izločanje vode cementne mešanice, kar zmanjšujemo z dodajanjem stabilizatorjev. Slaba stran je tudi možnost pojava eflorescence soli na površini zidu, kar preprečujemo z uporabo mešanic z nizko vsebnostjo alkalij, in sicer manj kot <0.1 % ut. (angl. oznaka low alkali). Prednost uporabe cementnih injekcijskih mešanic je ugodna cena in hitro naraščanje trdnostnih karakteristik. Cementnim mešanicam običajno dodajamo superplastifikatorje, s katerimi dosežemo ustrezno pretočnost in zmanjšamo vodovezivno razmerje na sprejemljivo raven.

Ne glede na v prejšnjem odstavku navedene pomanjkljivosti, se je pri nas in tudi drugod po svetu veliko število objektov uspešno utrdilo s cementnimi mešanicami. Dobre rezultate s cementnimi

injekcijskimi mešanicami z vodoodbojnimi (hidrofobnimi) dodatki sta dosegla Apihova in Tomažević (Tomažević in Apih, 1989). Ugotovila sta, da se osnovna trdnost injekcijske mešanice z vodoodbojnimi dodatki, s katerimi preprečujemo kapilarni dvig sicer zmanjša, kar pa ne vpliva na potresno odpornost utrjenega zidu. Dodatki za hidrofobiranje namreč zmanjšujejo kot omočljivosti, ki je v korelaciji s površinsko napetostjo, kar vpliva na zmanjšanje stopnje hidratacije. Slednje pomeni omejen dostop vode do cementnih zrn, nižjo stopnjo zreagiranosti in posledično nižjo trdnost takšne injekcijske mešanice. Injektiranje s cementnimi mešanicami z vodoodbojnimi dodatki se pri nas skoraj praviloma uporablja pri zidovih, ki so v stiku z okoliškim terenom, saj želimo na ta način omejiti dostop vode in pojav kapilarnega dviga. Uporaba injekcijskih mešanic z vodoodbojnimi dodatki ni priporočljiva v zidovih višjih nadstropij, ker bi s tem preprečili prost prehod vlage skozi zidove.

Osnova surovina za pridobivanje cementa so minerali, ki se po izkopu drobijo, dobljeno surovinsko mineralno mešanico pa se po kemijski analizi dopolni z manjkajočimi sestavinami, v glavnem z apnom (CaO) in kremenčevim peskom (SiO_2). Mešanica se žge v rotacijski peči do temperature 1450°C , pri čemer nastane cementni klinker, ki ga tvorijo porozne granule premera nekaj centimetrov. Klinker se hladi do sobne temperature in po dodajanju do 10 % sadre (CaSO_4) melje v prah, s čimer dobimo portland cement. Komponentna sestava cementnega klinkerja je sledeča: CaO -komponenta C (62-67 %), SiO_2 -komponenta S (19-25 %), Al_2O_3 -komponenta A (2-8 %), Fe_2O_3 -komponenta F (1-5 %), SO_4 -komponenta S, primesi (nevezan CaO do 2 %, MgO do 5 %), alkalije (K_2O , Na_2O). Minerali, ki tvorijo cementni klinker, so sestavljeni iz prej navedenih komponent, in sicer so to: trikalcijev silikat ali alit C_3S (3CaO , SiO_2) 40-70 %, dikalcijev silikat ali belit C_2S (2CaO , SiO_2) 5-30 %, trikalcijev aluminat C_3A (3CaO , Al_2O_3) 7-15 % in tetrakalcijev aluminat ali ferit C_4AF (4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Hidratacija oziroma proces vezanja in strjevanja cementa po zamešanju z vodo je odvisna predvsem od vodo-cementnega razmerja, pri čemer so možni trije primeri: 1. prenizko v/c razmerje - premalo vode za popolno hidratacijo (kot posledica del cementa ne veže); 2. idealno v/c razmerje - hidratizira ves cement; 3. previsoko v/c razmerje - odvečna voda se namesti v kapilarnih porah. Časovni potek naraščanja trdnosti posameznih mineralov cementa je različen. Najhitreje pridobiva trdnost C_3S , ki po 2-3 dneh doseže več kot polovico trdnosti, ki jo ima po 28 dneh. C_2S trdnost pridobiva počasi, vendar po 90 dneh njegova trdnost znaša priližno polovico C_3S in se mu po 180 dneh po trdnostnih karakteristikah približa. K trdnosti najmanj prispevata C_3A in C_4AF . Zaradi hitrega vezanja prevladujočega C_3S in toplote, ki se pri tem razvije, prihaja do nastanka razpok (Žarnić, 1999).

2.3.3 Cementne injekcijske pene

Utrjen zid bi moral prenesti napetosti, ki jih povzročijo diferenčni pomiki posameznih gradnikov zidu, do katerih lahko pride zaradi temperaturnih sprememb ali sprememb obtežbe. Takšno obnašanje utrjenega zidu omogoča uporaba cementnih injekcijskih pen. Kot izstopajoče mehanske lastnosti cementne injekcijske pene je potrebno izpostaviti nizko specifično težo, nizke trdnostne karakteristike in svojstveno sposobnost »absorpcije napetosti«. Cementne injekcijske pene imajo sposobnost znatnega deformiranja in redistribucije koncentriranih napetosti pri konstantnih obremenitvah. Te edinstvene lastnosti predstavljajo dobro alternativo pri protipotresnem utrjevanju zidanih objektov. Specifično težo strjene cementne injekcijske mešanice je mogoče uravnavati s količino uvedene pene v mešanico in z dodajanjem polnil, kot je na primer pesek. V splošnem pride pri vrednostih pod 400 kg/m^3 do nestabilnega materiala, medtem ko se učinek penjenja izniči, ko slednje presežejo 1600 kg/m^3 . Običajno se uporablja cementna injekcijska pena s specifično težo sveže pripravljene mešanice $720\text{--}800 \text{ kg/m}^3$, ki jo dobimo z mešanjem pene v cementno injekcijsko mešanico z vodovezivnim razmerjem 0,45. Bistvena prednost cementnih injekcijskih pen je majhen delež uporabljene vode - ta je v primerjavi z običajnimi injekcijskimi mešanicami manjši za 50 % (Jeffs, 2001).

Cementne injekcijske pene imajo poleg naštetih gotovo prednost tudi v smislu omejevanja kapilarnega dviga zaradi velike količine zračnih - vodonepropustnih mehurčkov. Pomislek, ki bi ga lahko imeli v primeru sistematičnega injektiranja zidov s cementnimi injekcijskimi penami, je vprašljiva sprijemnost s podlago in sposobnost zaplnitve manjših votlin v zidu.

2.3.4 Kombinirane injekcijske mešanice

Da bi eliminirali slabosti in izkoristili prednosti klasičnih apnenih oziroma cementnih injekcijskih mešanic, so raziskovalci pričeli z razvojem kombiniranih injekcijskih mešanic. Kombinirane ali sestavljene injekcijske mešanice kot kompozicija apna, poculanov in cementa predstavljajo ob upoštevanju ustreznih mešalnih razmerij alternativo klasičnim injekcijskim mešanicam.

Zmanjšana količina cementa v mešanici posledično pomeni manjšo vsebnost kalcijevih aluminatov in alkalij, ki bi v kombinaciji z obstoječimi materiali v zidu lahko povzročili tvorbo škodljivih produktov. Vsebnost poculanov pa zaradi poculanske reakcije vpliva na izboljšanje mehanskih lastnosti in zaradi tvorbe CSH-faze, ki zapira pore in prostor med zrni, izboljša obstojnost proti atmosferskim vplivom. S preiskavami je bilo ugotovljeno, da so kombinirane mešanice vsaj 2-3 tedne po vgradnji zelo občutljive na pogoje negovanja. Izmerjeni skrčki prizem $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$, negovanih v kontrolirani atmosferi (95 % rel. vlage in temperaturi 20°C), so znašali 0,031-0,045 %, medtem ko so vrednosti

skrčkov prizem, negovanih v običajnih pogojih (50 % rel. vlage in temperatura 20 °C), dosegle 0,137-0,154 %. Ta razlika je pomemben pokazatelj, saj lahko krčenje zmanjša adhezijo z obstoječimi materiali v zidu, hkrati pa lahko povzroči nastanek mikrorazpok v materialu (Toumbakari, 2002).

Začetni razvoj trdnosti kombinirane injekcijske mešanice narekuje cementni delež v kompoziciji, saj se hidravlična aktivnost poculanov začne šele po približno 30 dneh. Ugotovljeno je, da pri mešanicah s 30 % - deležem cementa utežno, začetna trdnost ni odvisna od razmerja apna in poculanov, ampak se razlike zaradi različnih razmerij apna in poculanov začnejo kazati šele po 60 dneh. Časovni razvoj upogibnih trdnosti kaže, da je minimalno potreben delež cementa v kompoziciji 30 %, saj pride v nasprotnem primeru po preteku 180 dni do zmanjšanja upogibnih trdnosti na ničelne vrednosti. Slednje je pripisati zakasneli hidravlični reakciji med apnom in poculani, zaradi katere pride do destruktivnih sil na že hidratizirano strukturo cementnega dela (Van Gemert in sod., 1999).

2.3.5 Polimerne injekcijske mešanice

Polimerne injekcijske mešanice (na primer epoksidne smole) imajo odlične mehanske lastnosti: visoke vrednosti tlačnih in nateznih trdnosti ter zelo dobro sprijemljivost (adhezijo) na suhe podlage. Bistvene prednosti polimernih injekcijskih mešanic v primerjavi z ostalimi je tudi možnost doseganja zahtevane viskoznosti, odsotnost trdih delcev, ki bi lahko zmanjševali pretočnost, zaradi svoje sestave pa niso občutljive na izgubo vode. Dobro se izkažejo v primeru naknadnega injektiranja, kjer po prvem injektiranju s klasičnimi recepturami s hidravličnimi vezivi nismo uspeli zapolniti vseh votlin. Vse to jim daje v posameznih primerih prednost pred hidravličnimi vezivi. Na drugi strani so takšne mešanice zelo drage, njihove adhezijske lastnosti na mokri podlagi so slabe, zaradi povsem drugačnih lastnosti v primerjavi z originalnim materialom lahko popolnoma spremenijo gradbeno-fizikalne lastnosti zidu, njihova uporaba pa v skladu z zahtevami Beneške listine, vsaj v primeru utrjevanja objektov kulturne dediščine, ne glede na navedene prednosti, ni sprejemljiva (Van Rickstal in sod.).

2.4 Vpliv sestave (kompozicije), dodatkov in postopka priprave na lastnosti injekcijskih mešanic

2.4.1 Sestava (kompozicija) injekcijske mešanice

2.4.1.1 Veziva

Pri proizvodnji injekcijskih mešanic se uporabljajo mineralna veziva, med katere spadajo nehidravlična veziva, ki se strjujejo in trdnost ohranjajo samo na zraku, in hidravlična veziva, ki se strjujejo tako na zraku kot tudi v vodi. Med nehidravlična veziva spadata gašeno apno in mavec, med hidravlična pa hidravlično apno in razne vrste cementa. Za pripravo injekcijskih mešanic je mogoče uporabiti tudi polimerna veziva.

2.4.1.2 Voda

Na splošno velja, da je pitna voda primerna za pripravo mešanic z vezivi. Drobni delci (glina, organske snovi) in soli, ki so razpršene v vodi, ustvarjajo prevleke na agregatu in prekinitve med zrnici cementa ter s tem bistveno vplivajo na proces hidratacije in sprijemnost cementne paste z agregatom (Žarnić, 1999).

Pravilna količina deleža vode, ki jo dodamo injekcijski mešanici, je zelo pomembna, saj lahko na eni strani z visokimi vodovezivnimi razmerji dosežemo dobre pretočnosti, na drugi strani pa so mešanice z visokim deležem dodane vode nagnjene k segregaciji.

2.4.1.3 Polnila

Kot polnilo pri pripravi injekcijskih mešanic lahko uporabimo gašeno apno, agregate, na primer kremenčev pesek in pucolane (vulkanski pepel, kremenčeva moka). Z uporabo fino mletih polnil, kot sta gašeno apno in kremenčev pesek, ki ju dodajamo običajnemu cementnemu vezivu, ki samo sicer ne zadosti kriterijem zrnivosti, je mogoče proizvesti visoko injektabilno injekcijsko mešanico z ustreznimi krivuljami zrnivosti. Slednje še posebej drži v primeru uporabe ustreznih mešalnih aparatov (Paillere in sod., 1992). Dobra lastnost kremenčevega peska je, da pripomore k zmanjšanju krčenja mešanice in hkrati k cenejši - bolj ekonomični sestavi mešanice. Dodajanje fino mletih polnil sicer zmanjšuje pretočnost, vendar na drugi strani vpliva na zmanjševanje izločanja vode in segregacije (Atkinson in Schuller, 1992).

Pucolani se običajno uporabljajo kot nadomestek za cementna veziva, njihova prednost je, da gre za sestavine z izjemno majhnimi delci. V splošnem fino mleti pucolani (vulkanski pepel, amorfna mikrokremenica, tufi, elektrofiltrski pepel), veziva in polnila (kremenčeva in apnenčeva moka) vplivajo na zmanjšanje pretočnosti, saj potrebujejo za popolno oblitje zelo finih delcev večjo količino vode. Tako mešanice z dodanimi fino mletimi sestavinami (pucolani, polnili) za doseganje ustrezne pretočnosti zahtevajo uporabo superplastifikatorjev (Atkinson in Schuller, 1992).

2.4.1.4 Dodatki

Dodatki se injekcijskim mešanicam dodajajo za izboljšanje obdelovalnih lastnosti in pretočnosti, preprečevanje segregacije, kompenzacijo krčenja in doseganje ustreznih mehanskih karakteristik.

Plastifikatorji izboljšajo obdelavnost mešanic in omogočajo zmanjšanje vodovezivnega razmerja pri željeni obdelavnosti. Po sestavi gre običajno za organske smole ter naravne in umetne detergente (Bosiljkov, 1996, Žarnić, 1999).

Superplastifikatorji vplivajo na disperzijo trdnih delcev, kar pozitivno vpliva na pretočnost hidravličnih injekcijskih mešanic (Miltiadou, 2007). Superplastifikatorji omogočijo redukcijo deleža vode v mešanici na sprejemljivo raven, ne da bi vplivali na zahtevano pretočnost (Van Rickstal, 2000).

Dodatki za nabrekanje so koristni za redukcijo plastičnega krčenja predvsem pri mešanicah z visokim deležem vode.

Vodoodbojni (hidrofobni) dodatki se v procesu strjevanja hidravličnega veziva vgradijo v nastajajoči kapilarni sistem. Na površini kapilar se pojavijo nepolarne organske molekule, ki povečajo omočilni kot vode in s tem preprečijo nastanek vodnega filma v gradivu. Vodoodbojni dodatki so na poseben način pripravljene soli maščobne kisline, ki se v prašni ali tekoči obliki vsipajo neposredno v mešalnik, v katerem se pripravlja injekcijska mešanica. Slaba stran vodoodbojnih dodatkov je, da močno zmanjšajo trdnost strjene injekcijske mešanice (Tomažević in Apih, 1993).

Aeranti omogočajo vgrajevanje zračnih por v svežo mešanico. Izboljšajo zmrzlinso odpornost in omogočajo nižje vrednosti vodovezivnega razmerja. Mešanice z dodanimi aeranti imajo večinoma nižje tlačne trdnosti, slabšo sprijemnost s podlago, so manj trajne, njihova sposobnost zadrževanja je slabša kot pri primerljivih mešanicah (Bosiljkov, 1996, Žarnić, 1999).

Pospeševalci in upočasnjevalci vezanja vplivajo na časovni potek vezanja mešanic tudi v primeru manj ustreznih pogojev zaradi prenizkih ali previsokih temperatur okolja. Pospeševalci vezanja

(akceleratorji) starejše generacije so bili izdelani na osnovi kloridov, novejši pa so sestavljeni na osnovi karbonatov, silikatov, aluminatov in organskih snovi.

2.4.2 Finost mletja

Finost mletja trdnih delcev (veziva, polnila, pucolanov, dodatkov) ocenimo s pomočjo njegove specifične površine. Specifično površino predstavlja razvita površina zrn v 1 gramu fino praškastega materiala. Specifično površino najpogosteje določamo s pomočjo Blainovega permeabilimetra, s katerim merimo čas, ki je potreben za prehod določene količine zraka skozi vzorec materiala, ki je zbit po predpisanem postopku in pod določenimi pogoji. Daljši čas prehoda zraka skozi zbit vzorec pomeni večjo specifično površino oziroma bolj fino mletje materiala. Dobljene vrednosti specifične površine analiziranega materiala izražamo v cm^2/g .

Finost mletja v primeru cementnih injekcijskih mešanic vpliva na proces hidratacije. Finejši cementi med hidratacijo razvijejo več toplote in se bolj krčijo, hkrati pa dosegajo višje trdnosti. Hidratacija se razvija na površini zrn, zato fina zrna popolneje hidratizirajo (Žarnić, 1999).

Kot ugotavlja Paillere (Paillere in sod., 1992), ki je preiskoval lastnosti cementnih injekcijskih mešanic, je z mešanicami z večjo specifično površino ($>3500 \text{ cm}^2/\text{g}$) mogoče doseči boljše rezultate pri injektiranju manjših razpok, saj ne prihaja do tvorbe grudic. Preiskave, ki jih je avtor izvajal z injektiranjem peščenega stolpca, kažejo, da z mešanicami z majhno specifično površino ($<3000 \text{ cm}^2/\text{g}$) ne moremo penetrirati v stolpec s peskom frakcije 0,63/1,25 mm. Z mešanicami z večjo specifično površino ($>3000 \text{ cm}^2/\text{g}$) je sicer mogoče doseči zadostno injektabilnost, vendar pa kriterij specifične površine sam ni zadosten. To je pokazala primerjava rezultatov mešanice s specifično površino $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, kjer je slednja penetrirala v peščen stolpec do višine 20 cm, nato pa je prišlo do zaustavitve, medtem ko je injektiranje mešanice s specifično površino $3560 \text{ cm}^2/\text{g}$, potekalo nemoteno skozi celotno višino peščenega stolpca, in sicer je omenjena mešanica dosegla višino 36 cm v 6 sekundah.

2.4.3 Zrnastost

Paillere (Paillere in sod., 1992) poudarja, da specifična površina ni zadosten kriterij za zagotavljanje injektabilnosti mešanice, bistven kriterij je tudi zrnastost materiala. Da bi cementna injekcijska mešanica uspešno zapolnila majhne razpoke v zidovju brez tvorbe grudic, mora biti premer največjega zrna v mešanici manjši kot najmanjša razpoka v zidu, ki ga utrjujemo. Avtor je vpliv zrnastosti mešanice na injektabilnost ugotavljal s preizkusom injektiranja peščenega stolpca, ki smo ga omenili v prejšnji točki. Uporabil je tri različne peščene frakcije, s čimer je simuliral različno velikost razpok v zidu. Frakcija 0,16/0,8 mm je predstavljala razpoke širine 0,1-0,2 mm, frakcija 0,63/1,25 mm razpoke širine 0,2-0,4 mm in frakcija 1,6/2,5 mm razpoke, širše od 0,4 mm. Avtor ugotavlja, da je injektabilnost analiziranih cementnih mešanic, ki zadostijo določenemu kriteriju zrnastosti - vsa zrna manjša od 80 μm in manj kot 12 % zrn, večjih od 32 μm - primerljiva ali celo boljša kot pri polimernih injekcijskih mešanicah.

2.4.4 Mešanje

Paillere (Paillere in sod., 1992) je vpliv mešanja na lastnosti injekcijskih mešanic preiskoval s tremi različnimi načini mešanja. Pri prvem načinu (M1) je mešanje potekalo z mešalcem z visokimi obrati in sicer z močjo 600 W in 8000 obrati na minuto, pri čemer je čas mešanja znašal 6 minut. Drugi način (M2) je zajemal 2-minutno obdelavo z ultrazvokom, nato pa še 4 minut mešanja z mešalcem iz prvega načina (M1). Pri tretjem načinu (M3) je znašal čas obdelave mešanic z ultrazvokom 2 minuti. V primeru M2 in M3 je bila uporabljena naprava za tako imenovano ultrazvočno mešanje z močjo 250 W in frekvenco 20 kHz. Najboljše rezultate je avtor dosegel s kombiniranim načinom mešanja (M2), injektabilnost analiziranih mešanic pa mu je uspelo izboljšati tudi s tretjim načinom mešanja (M3).

Tudi ostali avtorji poudarjajo vpliv mešanja na lastnosti, predvsem injektabilnost injekcijskih mešanic. Tako Miltiadoujeva (Miltiadou in sod., 2007) poudarja, da je mogoče pretočnost hidravličnih injekcijskih mešanic drastično izboljšati z izbiro primernega postopka mešanja. Avtorica navaja, da je mogoče z mešanjem z mešalcem z visokimi obrati (M1) in z ultrazvokom (M3) »razbiti«
grudice in doseči boljšo pretočnost mešanice.

2.4.5 Negovanje

Razmere v notranjosti s sistematičnim injektiranjem utrjenega kamnitega zidu so drugačne od razmer, v katerih so bile negovane obravnavane injekcijske mešanice. Ne glede na to, predstavlja obnašanje mešanic v laboratorijskih razmerah dober približek in pokazatelj obnašanja mešanic v razmerah na terenu.

2.5 Metode preiskovanja zidov

Da bi s čim večjo natančnostjo ocenili strukturo, stanje in mehanske lastnosti zidov, uporabljamo različne metode preiskovanja. V splošnem ločimo nedestruktivne preiskave (NDT), delno destruktivne preiskave (DDT) in destruktivne preiskave (DT), pri čemer lahko zanesljive rezultate, ki so potrebni za uspešno obnovo oziroma rekonstrukcijo objekta, dobimo le s kombinacijo dveh ali več metod (Bosiljkov, 2006). Pred izbiro ustrezne metode za diagnosticiranje zidovja ter določevanjem strategije preiskovanja je bistveno poiskati odgovore na naslednja vprašanja: katere informacije potrebujemo, kakšna naj bo stopnja natančnosti, s katero metodo bomo izpolnili svoje potrebe in katere odločitve nameravamo sprejeti na podlagi dobljenih rezultatov (Binda in sod., 2006).

2.5.1 Nedestruktivne preiskave (NDT)

Georadar (ground penetrating radar) predstavlja nedestruktivno tehniko za preiskave naravnih in umetnih medijev debeline od nekaj centimetrov do nekaj deset metrov. Metoda temelji na oddajanju in sprejemanju visokofrekvenčnih elektromagnetnih valov. Georadarske meritve se najpogosteje izvajajo s klasično refleksijsko mersko z oddajno-sprejemno anteno, ki lahko več kot 200-krat na sekundo odda in sprejme nazaj odbite elektromagnetne valove. Ko oddani elektromagnetni signal doseže elektromagnetno mejo, se del energije odbije in registrira s sprejemno anteno, del pa nadaljuje širjenje skozi medij do naslednje elektromagnetne meje. Ker se dielektrične lastnosti (v_v -hitrost elektromagnetnega valovanja, ϵ -dielektrična konstanta) med različnimi mediji medsebojno razlikujejo, lahko določimo meje med njimi. Votlina v notranjosti zidu tako predstavlja idealen medij brez dušenja signala ($\epsilon=1$, $v_v=0.3$ m/ns) in se elektromagnetno izrazito razlikuje od kamnine ($\epsilon=5-9$, $v_v=0,10-0,13$ m/ns), kar omogoča zanesljivo pozicioniranje votlin v zidu. Z injekcijsko maso zapolnjena votlina predstavlja ostro elektromagnetno anomalijo z močnim dušenjem elektromagnetnih valov in zmanjšanjem hitrosti širjenja elektromagnetnega valovanja ($\epsilon=25$, $v_v=0,06$ m/ns). Metoda je primerna za ugotavljanje uspešnosti sistematičnega injektiranja zidov z izvedbo in primerjavo meritev pred in po izvedenem posegu (Živanović, 2003).

Z **mikroseizmično tomografijo** analiziramo prehod akustičnih valov v frekvenčnem območju od 4 do 20.000 Hz (Binda in sod., 2006). Metoda omogoča definiranje nehomogenosti v zidu z analiziranjem hitrosti širjenja valov v materialu.

Pri metodi »**udarec-odmev**« (**»impact-echo«**) s točkovnim udarcem kladiva povzročimo akustični impulz, ki nato potuje po materialu. Nizkofrekvenčne odboje valov med zunanji in notranji plastmi zidu (votline, nezveznosti) uporabimo za meritve resonančnih frekvenc in določanje konstrukcijske homogenosti materiala (Binda in sod., 2006).

Metodo s kladivom (sonic test) uporabljamo za meritve časa prehoda zvočnih impulzov skozi zidane konstrukcije pri frekvencah med 20 in 20.000 Hz. Na podlagi časa prehoda in izvednotene hitrosti zvočnega impulza dobimo osnovne informacije o kakovosti in homogenosti preiskovanega zidu. Na hitrost prehoda zvočnega impulza vplivajo materiali, ki sestavljajo zid, in območja nehomogenosti, votlin in poškodb. Metoda je uporabna za kvalitativno oceno stanja zidov in kontrolo uspešnosti utrditvenih tehnik, kot je sistematično injektiranje (Binda in sod., 2006).

Geoelektrične metode so bile prvotno razvite za raziskavo zemljin, njihova uporaba pa se je kot zelo učinkovita izkazala tudi pri nedestruktivnih preiskavah zidov. Metoda omogoča prikaz skritih anomalij: posameznih slojev zidu, votlin, različnih materialov, poškodb. Gre za vnos električnega toka v preiskovan zid skozi pare točkovnih elektrod, pri čemer so inducirani potenciali izmerjeni na elektrodah nameščenih na nasprotni strani zidu (Binda in sod., 2006).

Pri **radiografiji (radiography)** obsevamo zid z gama žarki, pri čemer ugotavljamo skrite diskontinuitete: ojačitve, luknje, sidra in razpoke. Za uspešnost metode je nujno obojestransko obsevanje. Uporaba tehnike pri zidovih zahteva zmogljivo opremo in je zaradi varnostnih ukrepov največkrat uporabna v kontroliranem okolju laboratorijev (Van Rickstal, 2002).

Z **infrardečo termografijo** merimo toplotno sevanje, ki leži v infrardečem delu elektromagnetnega spektra. Termokamera ali termografska kamera, ki jo pri tem uporabljamo, nam omogoči grafični prikaz porazdelitve površinskih temperatur na predmetu ali objektu. S termografijo običajno odkrivamo napake objektov, kot so toplotni mostovi, netesnost ovoja zgradbe in slabo vgrajena okna, vendar pa je metoda uporabna tudi za kontrolo uspešnosti sistematičnega injektiranja.

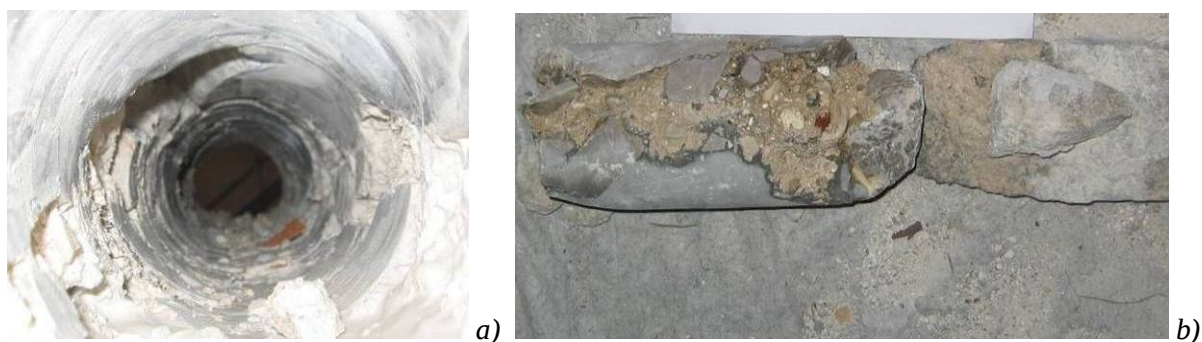
Z **mikrovalovno metodo (microwave borehole method)** ugotavljamo vsebnost vlage v zidu. Gre za merjenje prehoda mikrovalov med dvema vrtinama premera $1=2\text{mm}$, ki ju izvrtamo na razdalji okoli 50 mm. Ker metoda zahteva zgolj vrtine majhnega premera, jo opredeljujemo kot kvazi nedestruktivno metodo (Binda in sod., 2006).

2.5.2 Delno destruktivne preiskave (DDT)

S **sondiranjem**, ki je lahko **površinsko** ali **globinsko**, v praksi največkrat ugotavljamo stanje, strukturo in materialne lastnosti zidov. Pri površinskih sondah odstranimo omete, kar običajno storimo na vogalih ali križanjih zidov, pri čemer preverjamo pravilnost zidave (zidne zveze), eventualne prezidave, za nadaljnje preiskave pa lahko odvzamemo tudi manjše vzorce materiala (kamna, opeke, malte). Globinsko sondiranje običajno izvajamo ob in delno pod temelji zidov za ugotavljanje globine, morebitnih razširitev, stanja temeljev in vrste podlage pod temelji. Zid lahko globinsko sondiramo z odstranjevanjem posameznih gradnikov zidu, na primer manjših kamnov zunanega sloja, s čimer preiščemo (vrsta malte, drobirja, prisotnost votlin) osrednji del zidu. Pri ugotavljanju strukture zidov uporabljamo tudi sondiranje z vrtanjem vrtin - jeder, ki so navadno premera 100 mm. Metoda je uporabna tudi za oceno uspešnosti sistematičnega injektiranja.



Slika 2.2: a) Površinska sonda na vogalnem delu zidu, b) globinska sonda izvedena do sredine zidu
Fig. 2.2: a) Surface sound at the corner of the wall, b) depth sound executed to the middle of the wall



Slika 2.3: Sondiranje zidu z izvedbo vrtin: a) vrtina v zidu, b) izvrtano jedro
Fig. 2.3: Sounding of the wall with drilling: a) hole in the wall, b) drilled core

Metodo z **jeklenimi blazinami (flat jack)** uporabljamo za ugotavljanje lokalnega tlačnega napetostnega stanja v zidu. Gre za dve medsebojno zvarjeni tanki jekleni pločevini, na katerih sta na dveh mestih privarjeni šobi za vtiskanje olja. Širina jeklene blazine običajno ustreza širini sloja zidu, ki ga preiskujemo, medtem ko dolžina ni predpisana.

Uporabimo lahko metodo z enojno ali dvojno jekleno blazino. Poglavitna razlika med obema je, da nam uporaba enojne jeklene blazine omogoča ugotavljanje lokalnih tlačnih napetosti v zidu, z uporabo dvojne jeklene blazine pa lahko poleg slednjega iz rezultatov preizkusa dobimo tudi razmerje med napetostmi in specifičnimi deformacijami.

Pri metodi z enojno jekleno blazino na površino zidu namestimo dilatometre, nakar v zid zarežemo tanek utor. V utor namestimo jekleno blazino in vanjo s hidravlično črpalko vtiskamo olje, dokler z povečevanjem tlaka ne dosežemo prvotnih razdalj (pred izvedbo utora) med bazami dilatometrov. Z nadaljnjim vnosom sile je mogoče oceniti tlačno trdnost zidu.

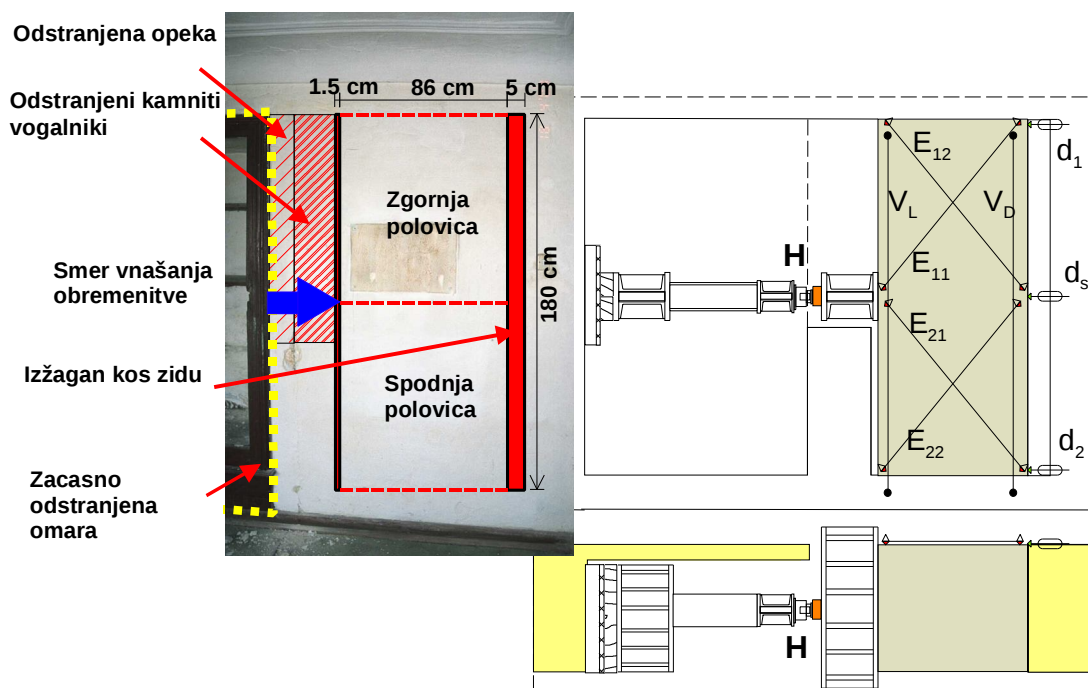
Pri metodi z dvema jeklenim blazinama v zid na ustrezni medsebojni razdalji izrežemo tanka utora, v katera namestimo jekleni blazini. V enaki medsebojni razdalji na ustreznih mestih pod zgornjim in nad spodnjim rezom pritrdimo baze za tri do štiri dilatometre in izmerimo razdalje pred in po rezanju utorov. V utora vstavimo jekleni blazini in vanju vtiskamo olje ter med povečevanjem tlaka spremljamo razdalje med bazami dilatometrov. Pri tem sklepamo, da je v trenutku, ko dosežemo razdaljo, izmerjeno pred rezanjem utorov, tlak olja v jekleni blazini enak tlačnim napetostim v zidu. Preiskavo je mogoče nadaljevati do nastanka navpičnih razpok, s čimer lahko okvirno ocenimo tlačno trdnost zidu (Tomažević, 2007).

Pri **videoboroskopiji** vrtine preiskujemo s kamero, pri čemer ugotavljamo strukturo zidov (prisotnost votlin, vrsto gradnikov v prerezu zidu, zapolnjenost spojnic z malto).

2.5.3 Destruktivne preiskave (DT)

Destruktivne preiskave zidov se običajno izvajajo na licu mesta (»in situ«), mogoč pa je tudi izrez in prenos dela zidu v laboratorij, kjer nadaljujemo s preiskavami. Zaradi zahtevnosti varovanja med transportom preskušanca je postopek prenosa delov zidu in preiskovanje v laboratoriju manj uporaben. Pri preiskavah »in situ« določamo natezno (na konzolno ali polno vpeto pripravljenih preskušancih) ali tlačno trdnost zidov. Potresno obtežbo zidu pri preskušanju ponazorimo z vsiljevanjem horizontalnih pomikov, kar storimo s pomočjo hidravličnega bata, pri čemer konzolno pripravljen preskušanec po potrebi dodatno obremenimo v vertikalni smeri. Obnašanje zidu med preiskavo

spremljamo s horizontalno nameščenimi merilci pomikov in diagonalno nameščenimi dilatometri. Velikost sile, s katero preko hidravličnega bata obremenjujemo preskušane, merimo z dinamometrom.



Slika 2.4: Prikaz »in situ« strižne preiskave z razporeditvijo merilnih mest (Bosiljkov, 2006)

Fig. 2.4: »In situ« shear test with arrangement of measuring positions (Bosiljkov, 2006)

2.6 Vrste kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov

Lokalni, lomljeni ali delno oblikovani kamen je vse do začetka dvajsetega stoletja, na odročnih območjih Slovenije pa vse do druge svetovne vojne, predstavljal poceni ali celo edino dostopno gradivo za zidanje nosilnih zidov objektov. Opeka navadnega formata se je uporabljala le lokalno, in sicer za ločne konstrukcije nad okni in vrati, občasne poravnave kamnitih zidov in posamezne vložke med kamni (Bergant in Dolinšek, 2006).

Kamniti zidovi običajnih stanovanjskih ali gospodarskih objektov na podeželju so zidani iz lomljenega kamna ali rečnega proda, in sicer največkrat iz dveh zunanjih plasti iz večjih kamnov, z vmesnim delom, ki ga tvorijo manjši kamni, običajno apnena malta z blatnim peskom, drobir in posamezne votline, pri čemer so povezovalni kamni med posameznimi sloji zidu redki. Večji del uporabljenega kamnitega gradiva ruralnega dela zgornjega Posočja, Kozjanskega in Gorenjske predstavljata apnenec in peščenjak, pojavlja pa se tudi skriljavec.

Na ožjem območju zgornjega Posočja - v Bovcu in okolici, sta v objektih največkrat zastopani dve vrsti kamna, in sicer tako imenovani dachsteinski apnenec in flišni peščenjak. Pomembnejši objekti v mestnih ali vaških središčih so grajeni bodisi iz opeke bodisi iz dokaj kakovostne homogene mešanice kamnov in opeke, povezane z apneno malto, z manjšim prispevkom votlin. Pravilno ali delno klesan kamen je uporabljen redkeje, če že, je to v primeru sakralnih ali drugih pomembnejših objektov. Ponekod so iz klesanega kamna grajeni zgolj vogali, ostali deli zidu so pozidani iz neobdelanega ali grobo obdelanega kamenja. V starem mestnem jedru Ljubljane je bil za gradnjo kamnitih zidov običajno uporabljen sljudnat kremenov peščenjak in apnenec, v primeru mešanega kamnito-opečnega zidu pa poleg teh še opeka.

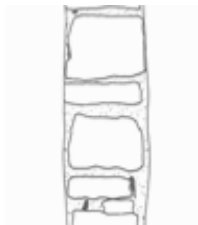
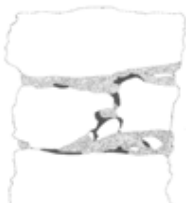
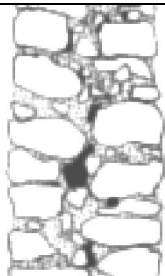
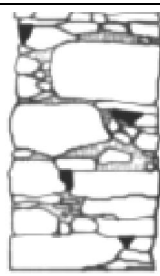
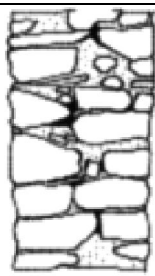
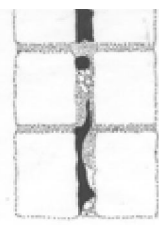
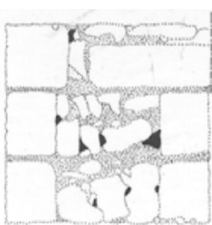
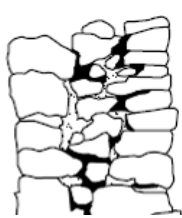
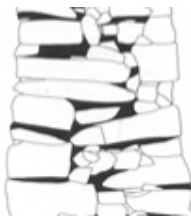
Preiskave iz različnih objektov na območju stare Ljubljane odvzetih vzorcev so pokazale, da sta bila za pripravo malte uporabljena apno in nepran pesek v razmerju 1:2,5 (Tomažević in sod., 1989). Kakovost malte je med drugim odvisna tudi od kakovosti peska. V primeru čistega rečnega peska je bila dosežena dobra kakovost malte in zidovja, medtem ko je v primeru, da je bil za pripravo malte uporabljen blaten pesek ali z zemljo pomešan pesek, kakovost malte in zidovja zelo slaba. Nekatere tipične vrednosti mehanskih lastnosti materialov, iz katerih je sezidano kamnito ali mešano zidovje zgodovinskih stavb, so navedene v preglednici 2.1 (Tomažević in Apih, 1993).

Preglednica 2.1: Tipične mehanske lastnosti gradnikov zgodovinskega kamnitega in mešanega zidovja (Tomažević in Apih, 1993)

Table 2.1: Typical mechanical properties of the components of historical masonry and stone-masonry walls (Tomažević in Apih, 1993)

Vrsta zidu	Kamen	Opeka		Malta		
	Tlačna trdnost (MPa)	Dimenzije (mm)	Tlačna trdnost (MPa)	Granulacija peska	Sestava malte	Tlačna trdnost (MPa)
Kamen	40-70	-	-	0-10 mm	1 : 2,5	0,5
Mešano	40-70	150/100/50	15	0-5 mm	1 : 2,5	1,0
Mešano	40-70	150/100/50	15	0-8 mm	1 : 2,5	0,5

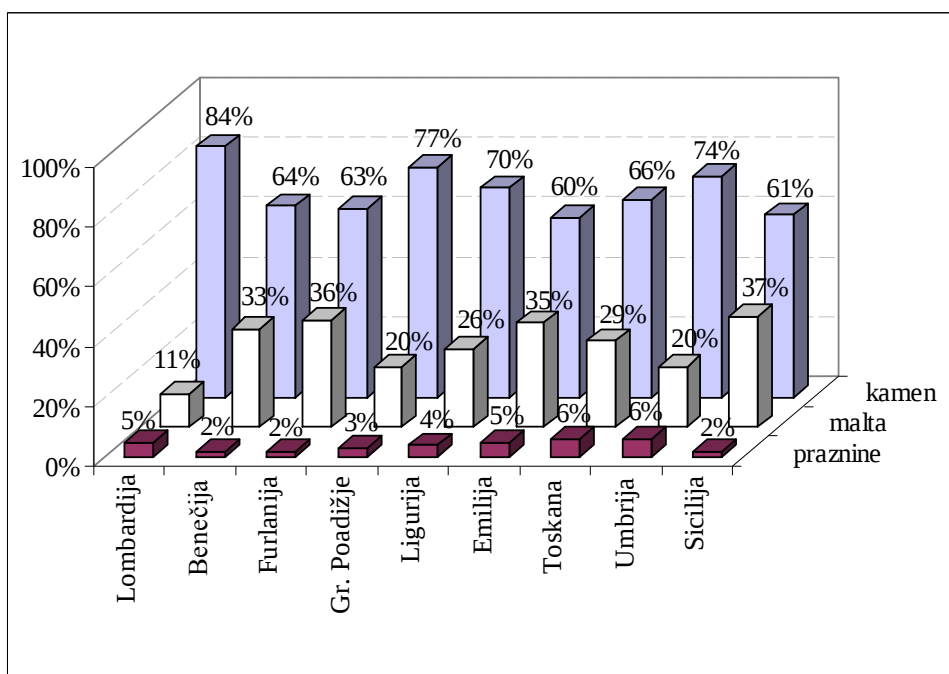
V smislu klasifikacije posameznih vrst kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov je bilo precej narejenega v sosednji Italiji. Tako Binda (Binda in sod., 2006) razvršča zidove v posamezne razrede, kot sledi (slika 2.5): razred A (homogen kompakten enoslojen zid), razred B (dvoslojen zid), razred C (troslojen zid), razred D (suh zid - brez veziva). Čeprav nismo zasledili strokovne literature, v kateri bi bili sistematično obdelani prerezi zidov na področju Slovenije, je avtor magistrske naloge v svoji strokovni praksi zasledil predvsem zidove razredov B in C, prikazane na sliki 2.5.

RAZRED A: HOMOGEN-KOMPAKTEN ENOSLOJEN ZID			
Tanek enoslojen zid - večinoma en kamen v prerezu		Širok enoslojen zid - več kamnov v prerezu	
 A1, d=25cm  A2, d=40cm		 A3, d=68cm	
RAZRED B: DVOSLOJEN ZID			
Dva sloja brez povezave	Povezava slojev s prekrivanjem posameznih kamnov		Povezava slojev z dolgimi kamni po celotnem prerezu zidu
 B1, d=52cm	 B2, d=48cm	 B3, d=53cm	 B4, d=53cm
RAZRED C: TROSLOJEN ZID			
Zunanja sloja iz klesanega kamna in vmesni sloj različnih širin iz drobirja in manjših kamnov		Zunanja sloja iz neobdelanega kamna in vmesni sloj iz drobirja in manjših kamnov	
 C1, d=30cm	 C2	 C3, d=59cm	 C4, d=80cm
		 C5, d=50cm	
RAZRED D: SUH ZID - BREZ VEZIVA			
 D1, d=70cm			

Slika 2.5: Razvrstitev prerezov večslojnih kamnitih zidov v posamezne razrede (Binda in sod., 2006)

Fig. 2.5: Classification of multiple leaf stone masonry walls sections in classes (Binda et al., 2006)

Večslojne kamnite zidove, prikazane na sliki 2.5, je pogosto najti v starih zidanih objektih. Večslojni kamniti zidovi manjših - preprostejših objektov, so običajno debeline $d=50-70$ cm, sestavljajo pa jih dva ali trije medsebojno nepovezani sloji, z zunanjsima slojema iz grobo oblikovanih kamnov. V Italiji opravljene raziskave kažejo, da je povprečna debelina takšnih zidov okoli 50 cm, pri čemer znaša razmerje debelin zunanjih in notranjega sloja 1 : 0,5. Delež kamnja v prerezu takšnega zidu znaša minimalno 60 %, s povprečnimi vrednostmi okoli 68,8 %. Malta predstavlja 11-37 % prereza, medtem ko je delež votlin v splošnem več kot 2 % in jih je mogoče razvrstiti v dve skupini: 1,13-3,80 % in 11,05-14,04 %. V tem kontekstu lahko različna povezanost materiala v osrednjem sloju in adhezija med posameznimi sloji zidu, potencialna prisotnost prečnih elementov (kamnov) in različen delež votlin pomenijo občutne razlike med posameznimi zidovi in njihovim obnašanjem (Bosiljkov in sod., 2004).



Slika 2.6: Sestava večslojnih kamnitih zidov v posameznih italijanskih pokrajinah (Binda in sod., 1999)

Fig. 2.6: Composition of multiple leaf stone masonry walls in some parts of Italy (Binda et al., 2006)

Z upoštevanjem rezultatov terenskih preiskav (slika 2.6) in kriterija, da zidovi s prispevkom votlin pod 4 % niso injektabilni (Penazzi in sod., 2001), je mogoče predvideti, na katerih območjih bomo z metodo utrditve s postopkom sistematičnega injektiranja bolj in na katerih manj uspešni oziroma kje je tak način utrjevanja smiseln. V sklopu obsežnih raziskav, opravljenih na politehniški univerzi v Milanu, je bilo analiziranih skoraj 100 različnih prerezov večslojnih kamnitih zidov. Raziskava je

vključevala zidove obstoječih objektov in zidove, sezidane v laboratoriju, z namenom določanja tipičnih lastnosti. Rezultati raziskave so podani v preglednici 2.2 (Bosiljkov in sod., 2004).

Preglednica 2.2: Celotna širina, razmerje med zunanjsima in notranjim slojem ter sestava troslojnih kamnitih zidov, izmerjena na laboratorijskih preskušancih in na terenu (Bosiljkov in sod., 2004)

Table 2.2: Total width, ratio between outer and inner leafs and composition of three leaf masonry walls, measured on laboratory samples and on field (Bosiljkov et al., 2004)

Oznaka zidu	Širina zidu		Sestava zidu		
	skupna (cm)	razmerje med zun. in not. sloji	kamen (%)	malta (%)	votline (%)
Povprečne vrednosti lab. preskušancev	40	1 : 1	-	-	12-13,75
Povprečne vrednosti obstoječih zidov	53	1 : 0,55	67,87	28,39	3,74
Maksimalne vrednosti obstoječih zidov	66	1 : 0,78	84,50	36,46	11,05
Minimalne vrednosti obstoječih zidov	36	1 : 0,40	55,61	12,60	0,38
Predlagane vrednosti za pripravo lab. preiskušancev	50	1 : 0,78	68	17-22	10-15

Omenjena raziskava je pokazala, da sta pri gradnji običajno pojavljata apnenec in peščenjak. Največja dolžina kamnov iz apnenca se giblje med 15 in 60 cm, s povprečjem 30 cm. Dimenzije kamnov iz peščenjaka znašajo med 15 in 25 cm. Povprečna tlačna trdnost apnenca je okoli $f_{cA}=80$ MPa, peščenjaka pa $f_{cP}=100$ MPa. V večini primerov kamenje povezuje apneno vezivo. Tlačne trdnosti veziva se gibljejo med $f_c=1,2$ MPa in $f_c=8,7$ MPa. Dimenzije fug so zaradi uporabe grobo oblikovanega kamenja različne, vrednosti variirajo med 1 in 4 cm (Bosiljkov in sod., 2004).

2.7 Vpliv sistematičnega injektiranja na mehanske lastnosti kamnitih zidov

2.6.1 Rezultati preiskav posameznih avtorjev

Namen sistematičnega injektiranja je z zapolnitvijo vseh votlin utrditi šibko jedro zidu in izboljšati njegovo povezavo z zunanjima slojema. V največ primerih osrednji sloj oziroma jedro zidu tvorijo ostanki kamnov, ki so bili uporabljeni za gradnjo zunanjih slojev in malta. S preiskavami, ki so simulirale zunanji sloj in šibko jedro zidu, je bilo ugotovljeno, da znaša tlačna trdnost osrednjega sloja (jedra) zidu v neutrjenem stanju zgolj 4 % tlačne trdnosti zunanjega sloja, kar je jasen pokazatelj, da se v primeru večslojnih zidov večina obtežbe prenaša na zunanja sloja (Oliveira in sod., 2006).

Dostopni eksperimentalni rezultati potrjujejo hipotezo, da v primeru utrditve zidu s postopkom sistematičnega injektiranja, tlačna trdnost injekcijske mešanice ni glavni parameter, ki vpliva na obnašanje zainjektiranega zidu. Če je torej glavna funkcija injekcijske mešanice, da poveže različne sloje in dele zidu, bi moral iti razvoj primarno v smeri izboljšanja sprijemne in natezne trdnosti mešanic kot izboljšanja ostalih mehanskih lastnosti (Toumbakari, 2002). Rezultati preiskav, ki jih je opravil Van Gemert (Van Gemert, 1999) prav tako kažejo, da tlačna trdnost injekcijske mešanice ni bistven parameter za povečanje mehanskih lastnosti injektiranih zidov. Veliko pomembnejša parametra sta togost in sprijemna trdnost (sprijemnost) z gradniki zidu, ki ga utrjujemo. Te lastnosti omejujejo horizontalno deformabilnost različnih slojev zidu in s tem zmanjšujejo možnost odpiranja razpok.

Stopnja povečanja nosilnosti je odvisna od kakovosti obstoječega zidu. Če je zid šibek, je stopnja povečanja visoka, v primeru zidovja dobre kakovosti pa povečanje ni tako izrazito (Tomažević, 1999).

2.6.1.1 Tomažević in Apih

Kot navajata Tomažević in Apihova (Tomažević in Apih, 1993), se potresna odpornost kamnitih zidov, zainjektiranih s cementno suspenzijo, bistveno poveča. S preiskavami sta ugotovila, da je potresna odpornost s cemetom zainjektiranega zidu lahko tudi več kot dvakrat večja od odpornosti osnovnega zidu. Pri tem je bila stopnja povečanja sicer odvisna od kakovosti osnovnega zidu, vendar pa so bile mehanske karakteristike zidov po injektiranju ne glede na vrsto in trdnost osnovnega zidu precej podobne.

Preglednica 2.3: Mehanske lastnosti kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov pred in po injektiranju (Tomažević in Apih, 1993)

Table 2.3: Mechanical properties of stone and stone-brick masonry walls before and after injection grouting (Tomažević in Apih, 1993)

Vrsta zidu	Opis preiskav	Tlačna trd. inj. meš. f_{cg} (MPa)	Tlačna trd. zidu f_{cw} (MPa)	Natezna trd. zidu f_{tw} (MPa)	Modul elastičnosti E_w (MPa)	Strižni modul G_w (MPa)
Neobdelan kamen, dva sloja, blaten pesek	pred injektiranjem po injektiranju (* 1 zid)	- 33	0,5 1,0	0,02 0,12	197 825	70 100
Neobdelan kamen, dva sloja, čisti pesek	pred injektiranjem po injektiranju (* 6 zidov)	- 33	0,77 2,14	0,10 0,25	390 2744	87 145
Neobdelan kamen, dvasloja, čisti pesek	pred injektiranjem po injektiranju (** 1 zid)	- 31	- -	0,10 0,14	- -	- 100
Neobdelan kamen, mešan zid, čisti pesek	pred injektiranjem po injektiranju (** 3 zidovi)	- 24	- -	0,14 0,19	- -	40 450

* v laboratoriju sezidani vzorci; **»in situ« preiskave

Avtorja ugotavljata, da ne glede na to, da so vrednosti tlačne trdnosti za injektiranje uporabljenih mešanic variirale od $f_{cg}=7$ MPa do $f_{cg}=32$ MPa, razlike praktično niso vplivale na potresno odpornost zainjektiranih zidov. Kot možno razlago za takšne rezultate avtorja navajata, da tlačno in natezno trdnost kamnitih zidov določa osnovna malta, ki prenaša zunanjo obtežbo s kamna na kamen. Ker pri preizkusih, ki sta jih izvajala, injekcijska mešanica ni prodrla v osnovno malto (kar je potrdil tudi pregled zidov po preiskavi), se trdnost osnovne malte in s tem trdnost zidu ni spremenila, ne glede na trdnost injekcijske mešanice pa se je z injektiranjem izboljšala povezanost posameznih kamnov. S tem ko poveže kamenje in prepreči ločevanje, razcepljenje in izbočenje posameznih nosilnih slojev zidu, injekcijska mešanica aktivira celotno možno nosilnost osnovnega zidu, pri čemer tlačna trdnost injekcijske mešanice niti ni toliko pomembna za doseganje zadovoljive povezave, je pa spodnja meja trdnosti injekcijske mešanice pogojena s trdnostjo originalnega veziva v zidu (Tomažević in Apih, 1993).

Tomažević je nazorno opisal obnašanje v laboratoriju sezidanih zidov med preiskavo, tako pri aplikaciji vertikalne kot tudi kombinirane vertikalne in horizontalne obtežbe. Med preiskavo so bili merjeni relativni pomiki med zgornjim in spodnjim robom zidu in specifične deformacije v obeh diagonalnih smereh. Pri preiskavah zidov z vertikalno obtežbo so razpoke najprej nastajale v neposredno obremenjenih kamnih, kjer so lokalne napetosti na stikih kamne razcepile. Šele kasneje so

se razpoke, ki so vedno potekale v vertikalni smeri, razširile tudi na druge dele zidu. Pred poružitvijo so popustile vezi med obema slojema zidu: po nastanku razpok v srednjem delu zidu sta se zunanja sloja začela izbočati, pri čemer je bila na tej točki preiskava zaradi možnosti hipne porušitve prekinjena.

Pri kombiniranih strižnih preiskavah z vertikalno in horizontalno obtežbo so prve razpoke nastajale pri deformaciji $\varepsilon_d=3,0-4,0$ ‰. Razpoke so bile, kolikor je bilo to mogoče zaradi strukture zidovja, orientirane v diagonalni smeri. Razpoke niso bile omejene samo na malto na stikih med posameznimi kamni, pač pa jih je bilo že od vsega začetka videti tudi v kamnih. S povečanimi deformacijami, predvsem pa s ponavljanjem obremenjevanja pri doseženi nosilnosti in pri večjih deformacijah ($\geq \varepsilon_d=7,0$ ‰), so se razpoke močno razširile. Tako kot pri preiskavi zidov z vertikalno obtežbo, je tudi pri preiskavi zidov s kombinirano vertikalno in horizontalno obtežbo prišlo do razslojevanja zidov po vmesnem sloju. Razpadanje posameznih delov zidov je povzročilo veliko upadanje nosilnosti, kar je bilo povod za prekinitve preiskave (Tomaževič in sod., 1989).

2.6.1.2 Vintzileou in Tassios

Preiskave mehanskih lastnosti na troslojnih kamnitih zidovih sta izvajala tudi Vintzileou in Tassios (Vintzileou in Tassios, 1995), iz vrednotene vrednosti povzemamo v preglednici 2.4. Vsi zidovi dolžine $l=0,60$ m, višine $v=1,20$ m in debeline $d=0,40$ m, so bili sezidani v laboratoriju. Debelina zunanjih slojev je znašala približno 13 cm, debelina srednjega sloja pa približno 14 cm. V dveh primerih (zidova št 1 in 3), je bila na bočnih delih zidov izvedena prečna povezava.

Potek preiskave je bil sledeč: zidovi št. 1, 2, 3, 4, 5 in 6 so bili obremenjeni v tlaku do maksimalne tlačne trdnosti nato pa razbremenjeni. Naslednji korak je bil utrjevanje omenjenih zidov z injektiranjem in nato obremenjevanje v tlaku do porušitve. Zidova št. 7 in 8 sta bila utrjena pred aplikacijo obremenitve, nato pa obremenjena v tlaku do porušitve.

Preglednica 2.4: Mehanske lastnosti troslojnih kamnitih zidov pred in po injektiranju (Vintzileou in Tassios, 1995)

Table 2.4: Mechanical properties of three leaf stone masonry walls before and after injection grouting (Vintzileou in Tassios, 1995)

Oznaka zidu	Prečne ojačitve Da/Ne	Opis preiskav	Tlačna trdnost inj. meš. f_{cg} (MPa)	Tlačna trdnost zidu f_{cw} (MPa)	Modul* elastičnosti E_w (MPa)	Vertikalna def. pri doseženi tlačni trdnosti ϵ_1 (‰)
1	Da	pred injektiranjem po injektiranju	- 30	2,10 3,10	7000 6250	1,04 0,60
2	Ne	pred injektiranjem po injektiranju	- -	1,30 -	2706 -	- -
3	Da	pred injektiranjem po injektiranju	- 30	2,40 4,30	5000 5971	1,41 1,10
4	Ne	pred injektiranjem po injektiranju	- 30	1,60 -	4442 -	0,80 -
5	Ne	pred injektiranjem po injektiranju	- 30	1,70 4,20	5670 7778	2,80 1,20
6	Ne	pred injektiranjem po injektiranju	- 13	1,35 4,05	5625 8438	0,58 1,00
7	Ne	pred injektiranjem po injektiranju	- 30	- 3,70	- 15413	- 0,90
8	Ne	pred injektiranjem po injektiranju	- 13	- 3,00	- 3333	- 0,90

*sekantni modul elastičnosti je bil izvrednoten pri 1/3 dosežene tlačne trdnosti zidu

Utrjevanje zidov z injektiranjem cementnih mešanic se je izkazalo kot zelo učinkovito: tlačna trdnost zidu po injektiranju se je povečala za 50 do 200 % v primerjavi z neutrenim zidom. Z injektiranjem se je povečala togost zidov, po injektiranju se je zmanjšal skrčec pri maksimalni doseženi tlačni trdnosti. Razlog za tako izboljšane mehanske lastnosti je uspešna homogenizacija, ki je bila dosežena zahvaljujoč penetraciji injekcijske mešanice v votline in razpoke osrednjega in zunanjih slojev, kot tudi med stike posameznih slojev. Na ta način so se troslojni zidovi obnašali skoraj kot enoslojni. Iz preglednice je razvidno, da je tlačna trdnost zidu št. 8, ki je bil utrjen z injekcijsko mešanico z nižjo tlačno trdnostjo $f_{cg}=13$ MPa, nižja od tlačne trdnosti zidu št. 7, ki je bil utrjen z injekcijsko mešanico višje tlačne trdnosti, in sicer $f_{cg}=30$ MPa. To razliko in razliko pri modulih elastičnosti je mogoče pripisati tlačni trdnosti injekcijske mešanice. Vendar je na drugi strani zid št. 6, čeprav je bil utrjen z injekcijsko mešanico nižje tlačne trdnosti, dosegel tlačne trdnosti primerljive z zidovi, ki so bili utrjeni z injekcijsko mešanico višje tlačne trdnosti. Možna razlaga za to je, da so bila prvotno šibka mesta, ki so bila poškodovana pri prvotnem obremenjevanju zidov v neutrenem stanju, sedaj utrjena, pri čemer je prišlo do boljše penetracije injekcijske mešanice zaradi formacije mikrorazpok. Avtorja navajata, da zaradi relativno majhnega števila preskušancev ni mogoče podati zanesljivih zaključkov o vplivu trdnosti injekcijske mešanice na mehanske lastnosti zidu. Poudarjata tudi, da je natezna trdnost

injekcijske mešanice tista, od katere je, bolj kot od njene tlačne trdnosti, odvisna povezava kamnitega gradiva v osrednjem sloju (jedru) zidu (Vintzileou in Tassios, 1995).

2.6.1.3 Da Porto

V nadaljevanju podajamo rezultate preiskav, ki jih je s svojimi sodelavci izvajala F. da Porto (da Porto in sod., 2003). Dimenzije v laboratoriju sezidanih troslojnih kamnitih zidov so znašale: dolžina $l=0,80$ m, višina $v=1,50$ m in debelina $d=0,50$ m. Debelina posameznega zunanjega sloja zidu je znašala 18 cm. Pri zidovih z oznakami 5I1, 6I1, 1I2 in 8I2 je bila maksimalna tlačna trdnost izvednotena pred in po utrditvi s sistematičnim injektiranjem. Pri zidovih 13I1 in 16I2 so se tlačne trdnosti preskušale samo po izvedeni utrditvi.

Preglednica 2.5: Rezultati preiskav troslojnih kamnitih zidov pred in po injektiranju (povzeto in prilagojeno po da Porto in sod., 2003)

Table 2.5: Results of tests on three leaf stone masonry walls before and after injection grouting (summarized and adapted after da Porto et al., 2003)

Oznaka zidu	Opis preiskav	Tlačna trdnost inj. meš. f_{cg} (MPa)	Tlačna trdnost zidu f_{cw} (MPa)	Modul* elastičnosti E_w (MPa)	Vertikalna def. pri doseženi tlačni trdnosti ε_1 (‰)
5I1	pred injektiranjem po injektiranju	- 5,1	1,45 2,49	2390 2273	3,63 0,49
6I1	pred injektiranjem po injektiranju	- 5,1	1,95 2,49	2029 3093	4,57 0,36
13I1	pred injektiranjem po injektiranju	- 5,1	- 2,54	- 3992	- 0,55
1I2	pred injektiranjem po injektiranju	- 3,2	1,97 2,57	1450 3449	6,21 0,58
8I2	pred injektiranjem po injektiranju	- 3,2	1,91 1,82	1559 2367	6,22 0,73
16I2	pred injektiranjem po injektiranju	- 3,2	- 2,48	- 1223	- 1,07

*sekantni modul elastičnosti, izvednoten pri 30-60 % dosežene tlačne trdnosti zidu

Iz rezultatov v zgornji preglednici je mogoče razbrati, da so se tlačne trdnosti zidov po utrditvi s sistematičnim injektiranjem povečale tudi za več kot 50 %. Injektiranje je prav tako povečalo togost zidov. Ne glede na različno tlačno trdnost uporabljene injekcijske mešanice $f_{cg}=5,1$ MPa (I1) in $f_{cg}=3,2$ MPa (I2), pri čemer je v obeh primerih šlo za apneno injekcijsko mešanico, so bile končne vrednosti izvednotenih tlačnih trdnosti obakrat približno enake. Utrditev troslojnih zidov s sistematičnim injektiranjem je učinkovito preprečila razslojevanje posameznih slojev zidu (da Porto in sod., 2003).

2.6.1.4 Miltiadou-Fezans

Androniki Miltiadou-Fezans je s sodelavci (Miltiadou-Fezans in sod., 2006) preskušala šest kamnitih v laboratoriju sezidanih troslojnih zidov, in sicer tri pod klasično tlačno obremenitvijo in tri pod diagonalno natezno obremenitvijo. V nadaljevanju podajamo rezultate 3 zidov, preskušanih s klasično tlačno preiskavo (preglednica 2.6). Preskušanci so imeli sledeče dimenzije: dolžina $l=1,04$ m, višina $v=1,20$ m, debelina $d=0,45$ m. Za injektiranje sta bili uporabljeni dve injekcijski mešanici: kombinirana - I1 (bel cement, apno, pucolan) in apnena - I2 (hidravlično apno).

Preglednica 2.6: Rezultati preiskav troslojnih kamnitih zidov pred in po injektiranju (Miltiadou-Fezans in sod., 2003)

Table 2.6: Results of tests on three leaf stone masonry walls before and after injection grouting (Miltiadou-Fezans et al., 2003)

Oznaka zidu	Opis preiskav	Tlačna trdnost inj. meš.* f_{cg} (MPa)	Tlačna trdnost zidu f_{cw} (MPa)	Modul elastičnosti E_w (MPa)	Vertikalna def. pri doseženi tlačni trdnosti ε_1 (‰)
1	pred injektiranjem po injektiranju	- 4,50 (I2)	1,82 3,00	1000 1200	- 1,76
2	pred injektiranjem po injektiranju	- 8,16 (I1)	1,74 3,75	1440 1550	1,60 2,50
3	pred injektiranjem po injektiranju	- 4,50 (I2)	2,26 3,73	1500 1300	2,25 3,39

*vrednosti pri starosti 90 dni

Rezultati izvedenih preiskav kažejo na precejšnje izboljšanje mehanskih lastnosti utrjenega zidu v primerjavi z neutrjenim pri vseh preskušancih. Pri zidovih, utrjenih z apneno injekcijsko mešanico, so se tako tlačne trdnosti izboljšale za 65 %, medtem ko je zid, utrjen s kombinirano injekcijsko mešanico, izkazal 116 % povečanje tlačne trdnosti. Pri končnih vrednostih tlačnih trdnosti ni prihajalo do bistvenih razlik med posameznimi preskušanci. V vseh primerih je bil pri doseženi maksimalni tlačni trdnosti izmerjen skrček večji pri utrjenem kot pri neutrjenem zidu. Zanimivo je, da po utrditvi ni prišlo do bistvenega povečanja togosti zidov. Slednje je pomemben podatek predvsem v primeru, ko imamo opravka z delnim injektiranjem na samo določenih območjih (vogali, križanja zidov, območja ležišč in vezi) (Miltiadou-Fezans in sod., 2003).

2.6.1.5 Toumbakari

Avtorica je (Toumbakari in sod., 2005) pripravila dve vrsti preskušancev: apnenec in opeko (iz 19. st.), dobavljeno iz porušenega objekta v Belgiji. Debelina zunanjih slojev zidov, sezidanih iz opek, je znašala približno 9 cm, debelina osrednjega sloja pa približno 22 cm. V primeru kamnitih zidov je

debelina uporabljenih kamnitih gradnikov variirala z namenom ponazoritve zidu kamnov različne oblike in velikosti. V povprečju je debelina zunanjih slojev znašala 13 cm, osrednjega pa 14 cm. Dimenzije preskušancev (tako kamnitih kot opečnih) so znašale: dolžina $l=0,60$ m, višina $v=1,20$ m, debelina $d=0,40$ m. Za injektiranje so bile uporabljene tri vrste mešanic: 13b0 (kombinirana mešanica iz apna, pucolana in cementa), 13b10 (kombinirana mešanica iz apna, pucolana, kremenčeve moke in cementa) in Cb0 (cementno-apnena mešanica).

Preglednica 2.7: Rezultati preiskav troslojnih kamnitih in opečnih zidov pred in po injektiranju (Toumbakari in sod., 2005)

Table 2.7: Results of tests on three leaf stone and brick masonry walls before and after injection grouting (Toumbakari et al., 2005)

Oznaka zidu	Opis preiskav	Tlačna trdnost inj. meš.* f_{cg} (MPa)	Tlačna trdnost zidu f_{cw} (MPa)	Modul elastičnosti E_w (MPa)	Vertikalna def. pri doseženi tlačni trdnosti ε_1 (‰)
BC1	pred injektiranjem po injektiranju	- 7,3 (13b0)	- 5,04	2240 -	- 2,42
BC2	pred injektiranjem po injektiranju	- 9 (13b10)	2,41 3,15	1560 3338	3,12 2,54
BC3	pred injektiranjem po injektiranju	- 19,5 (Cb0)	2,09 2,91	1400 1932	1,85 1,55
BC4	pred injektiranjem po injektiranju	- 7,3 (13b0)	2,18 3,00	1040 988	2,34 2,94
BC5	pred injektiranjem po injektiranju	- 7,3 (13b0)	2,28 3,86	1170 1193	2,31 3,14
SC1	pred injektiranjem po injektiranju	- 9 (13b10)	2,02 3,25	1620 3645	1,42 3,55
SC2	pred injektiranjem po injektiranju	- 19,5 (Cb0)	2,07 3,36	1560 2137	1,65 2,33
SC3	pred injektiranjem po injektiranju	- 7,3 (13b0)	2,65 3,51	1190 1023	1,73 2,45
SC4	pred injektiranjem po injektiranju	- 7,3 (13b0)	2,71 3,29	1010 707	2,11 3,49

*vrednosti pri starosti 90 dni - starost v času preiskave

Avtorica ugotavlja, da je bistven pokazatelj učinkovitosti injektiranja strižna sprijemna trdnost med injicirano mešanico in posameznimi gradniki zidu. Preiskave so pokazale, da do porušitve vzorcev pride zaradi ločevanja zunanjih slojev zidu od notranjega. Utrditev zidu z injektiranjem izboljša mehanske lastnosti. Dosežene vrednosti tlačnih in nateznih trdnosti zidov so medsebojno dokaj podobne, ne glede na precej različne tlačne in natezne trdnosti uporabljenih injekcijskih mešanic. Mešanice z višjimi trdnostmi so omogočile povečanje modula elastičnosti utrjenega zidu, medtem ko v primeru mešanic z nižjimi trdnostmi do povišanja modula elastičnosti ni prišlo (Toumbakari in sod., 2005).

3 UTRJEVANJE ZIDOV S SISTEMATIČNIM INJEKTIRANJEM

3.1 Uporaba metode skozi zgodovino

Osnovni princip injektiranja so poznali že v rimskih časih. Po mnenju zgodovinarjev so stari Rimljani masivne zidove velikokrat pozidali na suho in jih naknadno zalili s tekočo malto. V novejšem obdobju je bilo injektiranje s cementom uvedeno že v prvi polovici 19. stoletja, in sicer pri temeljnih konstrukcijah in inženirskih objektih. Sprva je bilo injektiranje gravitacijsko - z izkoriščanjem težnosti mešanice, kasneje, proti koncu 19. stoletja, so začeli uporabljati naprave za injektiranje mešanice pod pritiskom. Pred 1. svetovno vojno so bili z injektiranjem cementne mešanice sanirani prvi kulturnozgodovinski spomeniki v Angliji (Tomaževič, 1989). V letu 1888 se je v Angliji in Nemčiji že začela industrijska proizvodnja prvih naprav, ki so omogočale sistematično injektiranje z večjimi pritiski (Van Rickstal, 2000).

Začetki sistematičnega injektiranja kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov na območju naše domovine segajo v leto 1974, ko so se s tem postopkom utrjevali v potresu poškodovani objekti na območju Kozjanskega, kasneje, po potresu leta 1976, pa je bila metoda uporabljena na več objektih na območju Posočja. S postopkom sistematičnega injektiranja je bilo utrjeno večje število sakralnih (cerkve, kapelice, samostani), spomeniško zaščitenih (gradovi in drugi objekti zgodovinskega pomena) in ostalih objektov na širšem območju Slovenije, ter v potresih leta 1998 in 2004 poškodovanih objektov v Posočju.

3.2 Tehnologija sistematičnega injektiranja

Pred začetkom injektiranja so potrebna ustrezna pripravljalna dela. V prvi fazi se, če je to potrebno, iz zidov odstrani poškodovane in odstopajoče omete. Sledi vrtanje poševnih vrtin v približnem rastru 50 cm, z zamikom med vrstami, do globine $\frac{2}{3}$ širine zidu (glej sliko 3.1 in 3.2). Pri tem je potrebno paziti posebej v primeru, ko stare omete ohranjamo, da se vrtine izvajajo v območju spojníc gradnikov zidu. V pripravljene vrtine se s hitrovezočo malto vgradi injekcijske nastavke - kovinske cevke. Da preprečimo iztekanje injekcijske mešanice iz površine zidu, pred pričetkom postopka zid, iz katerega smo odstranili omet, obdelamo z grobim cementnim obrizgom. Zid se preko vgrajenih nastavkov običajno predhodno omoči, s čimer želimo doseči navlaženje notranjosti zidu in izpiranje prašnih delcev ter nečistoče. Injekcijska mešanica se v zidove uvaja z gumijastimi dovodnimi cevmi, ki jih preko navoja pritrdimo na kovinske cevke, in sicer pod pritiskom $p=2-3$ bar. Injektiranje poteka od spodaj navzgor, pri čemer se, ko na sosednjem nastavku pride do iztekanja mešanice, slednjega

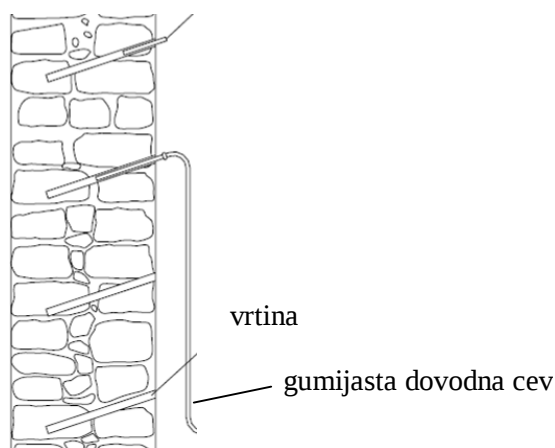
zamaši. Izvajalci količino vtisnjene mešanice običajno kontrolirajo s porabo suhega veziva na 1 m³ zidu. Izkušnje kažejo, da je ta 60-100 kg/m³ pri manj poroznih zidovih in 120-150 kg/m³ pri močno poroznih zidovih. Običajno se zidove do debeline 1 metra injektira enostransko, debelejše zidove pa obojestransko.



Slika 3.1: a) Naprava za sistematično injektiranje, b) aplikacija postopka na cerkvi Sv. Antona v Kobaridu

Fig. 3.1: a) The apparatus for grout injection, b) application of the procedure on the church of St. Anton in Kobarid

injekcijski nastavki



Slika 3.2: Izvedba vrtin in namestitve injekcijskih nastavkov v zidu (Identification of Strengthening Strategies, 2006)

Fig 3.2: Setting up of the holes and injection pipes in the wall (Identification of Strengthening Strategies, 2006)

3.3 Uporabnost metode in ostale tehnike utrjevanja kamnitih zidov

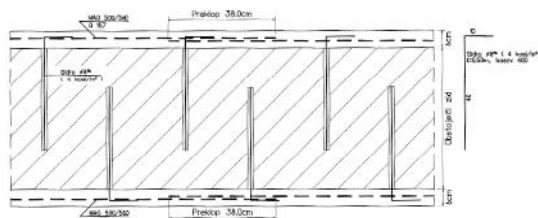
Veliko starejših objektov na podeželju in objektov v starih mestnih jedrih je grajenih iz kamna oziroma iz mešanice kamna in opeke, v katerih je znaten prispevek votlih prostorov, posamezni gradniki pa so v sredini takšnega zidu z malto oblitli slabše kot na zunanjih delih. Sistematično injektiranje se je izkazalo tako z vidika izboljšanja mehanskih karakteristik zidov kot tudi zaradi bistvene prednosti metode, ki omogoča, da zunanost utrjenega zidu ostane nespremenjena.

Metoda na drugi strani ni učinkovita pri utrjevanju zidov, kjer je prispevek votlin v zidu manjši od 4 % (Penazzi in sod., 2001) ali pa je v notranjosti zidu zgolj drobir ali zemlja brez votlin (Corradi in sod., 2006). Za utrjevanje kamnitih zidov z določenim prispevkom votlin obstajajo še drugi postopki, ki jih opisujemo v nadaljevanju in se pogosto uporabljajo v kombinaciji s sistematičnim injektiranjem.

3.3.1 Oblaganje zidov z armiranobetonskimi ometi

Zid je mogoče utrditi z oblaganjem z armiranobetonskimi ometi, ki se praviloma izvajajo obojestransko. Pri tem postopku v prvi fazi iz zidu odstranimo omet in očistimo spojnice. Na zidu se nato izvede cementni obrizg in vgradi jeklena sidra za povezavo obeh slojev ometa, ki ga armiramo z mrežno armaturo. Cementni omet je mogoče nanašati strojno s torkretiranjem ali ročno. Oblaganje zidov z armiranobetonskimi ometi se v običajno uporablja pri utrditvah opečnih zidov, pri križanjih in vogalih zidov, kjer ni izvedenih zidnih zvez, v izjemnih primerih (močno poškodovani zidovi) pa tudi pri kamnitih zidovih v kombinaciji s sistematičnim injektiranjem. Pri kamnitih zidovih, kjer imamo navadno opravka s kamni različnih oblik in velikosti, je problematično povezovanje obeh slojev armiranobetonskega ometa, možnost razslojevanja takšnega zidu pri potresni obtežbi in nenazadnje sam način izvedbe, ki spremeni zunanost zidu.

Penazzi (Penazzi in sod., 2001) poroča o napakah, opaženih pri utrjevanju zidov z armiranobetonskim ometom. Avtor kot pogosto evidentirane napake izpostavi pomanjkljivo povezovanje armiranobetonskega ometa na stikih medsebojno pravokotnih zidov in med posameznimi etažami, prekratke razdalje prekrivanja posameznih mrež, neobstoječa ali na prevelikih razmakih vgrajena prečna sidra, pretanke zaščitne sloje nad armaturo in nesimetrično utrditev zidov v tlorisu objekta, ki je zaradi neenakomernih togosti posameznih zidov lahko vzrok torzijskih poškodb pri potresnih obremenitvah.

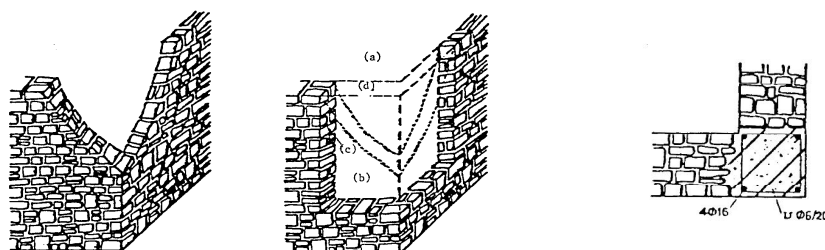


Slika 3.3: Primer utrditve zidu z armiranobetonskim ometom (Bergant in sod., 1998)

Fig 3.3: Example of strengthening of the wall with reinforced concrete coat (Bergant et al., 1998)

3.3.2 Prezidavanje zidov

Pri neutrjenih objektih lahko ob močnejših potresnih sunkih pride do izbočitve, razslojevanja in večjih razpok. Pogosto se hujše poškodbe pojavijo v območju vogalov zidov. V takšnih primerih se odločamo za ponovno pozidavo ali prezidavo poškodovanega dela zidu. V prvi fazi se izvede podpiranje stropne in strešne konstrukcije, po potrebi pa tudi bočno podpiranje zidov na območju, na katerem bo potekala prezidava. Sledi odstranjevanje materiala s poškodovanega območja, čiščenje in priprava kontaktnih površin ter ponovna pozidava. V območju vogalov je pri prezidavanju mogoča tudi vgradnja vertikalnih armiranobetonskih vezi, vendar je slednje zaradi načina gradnje kamnitih zidov manj običajen poseg. Prezidava se izvaja z upoštevanjem zidarskih zvez in se na stikih z eventualno izvedenimi armiranobetonskimi vezmi zaključuje »na zob«.

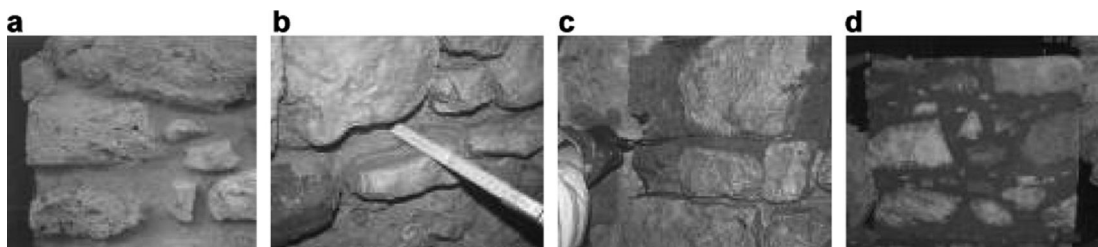


Slika 3.4: Prezidava poškodovanega zidnega vogala in izvedba vertikalne armiranobetonske vezi (Bergant in sod., 1998)

Fig 3.4: Reconstruction of damaged wall corner and construction of vertical reinforced concrete tie (Bergant et al., 1998)

3.3.3 Prefugiranje zidov

Prefugiranje zidov se običajno uporablja pri opečnih zidovih. Postopek poteka tako, da se iz spojníc izpraska malta slabe kakovosti do 1/3 globine zidu najprej na eni strani zidu, spojnice se nato zapolni z malto ustrezne kakovosti, nato pa postopek ponovi še na drugi strani zidu. Nekateri italijanski avtorji predlagajo uvedbo postopka tudi pri kamnitih zidovih. Gre za tako imenovano globoko prefugiranje (globine ca. 7 cm), ki se izvaja obojestransko. Cilj je medsebojno povezati posamezne kamne zunanjih plasti in z utrditvijo doseči povečanje strižne nosilnosti zidu. Rezultati preiskav na zidovih, sezidanih in preskušanih v laboratoriju, kažejo, da globoko prefugiranje kot samostojna metoda lahko poveča strižno togost zidu, medtem ko je občutno povečanje strižne nosilnosti mogoče doseči le v kombinaciji s sistematičnim injektiranjem (Corradi in sod., 2006).

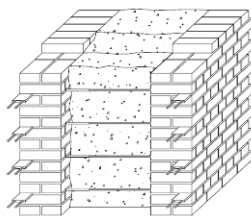


Slika 3.5: a), b) Očiščene in poglobljene fuge, c) nanos prvega sloja malte, d) končno stanje (Corradi in sod., 2006)

Fig 3.5: a), b) Cleaned and deepend fugues, c) first layer of mortar, d) final situation (Corradi in sod., 2006)

3.3.4 Prefugiranje zidov z armiranjem fug

Metoda prefugiranja zidov z armiranjem fug je v primeru kamnitih zidov uporabna takrat, ko imamo opravka s pravilno zidanimi kamnitimi zidovi s horizontalnimi fugami. Pri tej tehniki se zunanja plast fuge (globina 6 do 8 cm) odstrani, nato pa se v utor namesti ena ali dve palici manjšega premera (iz nerjavečega jekla ali polimernih steklenih vlaken). V primeru večslojnih zidov je priporočljiva namestitev povezav v prečni smeri, ki izboljšajo učinek horizontalnih utrditev in omogočijo pritrditev zunanjih slojev zidu (Oliveira in sod., 2006).

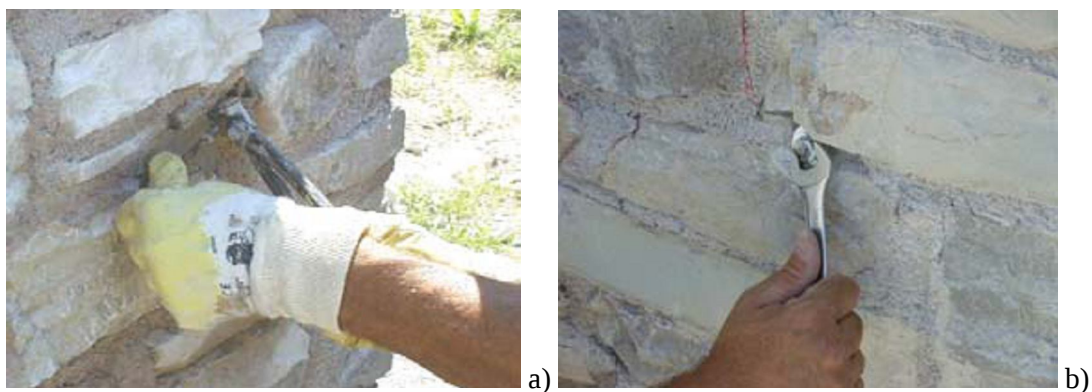


Slika 3.6: Prefugiranje z armiranjem fug v primeru zunanjih slojev iz polne opeke (Binda, 2006)

Fig. 3.6: Repointing with reinforcing of fugues in case of external leaves made of brick (Binda, 2006)

3.3.5 Vgradnja prečnih sider

Namen vgrajevanja prečnih sider v prerezu zidu je izboljšanje povezave med dvema zunanjsima slojema in zmanjšanje možnosti deformacij zidu v prečni smeri (Valluzzi, 2004). V pripravljene vrtine v horizontalni smeri vstavimo sidra iz jekla, nerjavečega jekla ali iz polimerov, ojačanih z vlakni, in jih v vrtini utrdimo z injektiranjem. Valluzzi je testne preskušance utrjevala s po 4 kom sider/m² zidu, pri čemer je uporabila jekleno rebrasto armaturo in jekleno gladko armaturo z vrezanimi navoji na koncih, v obeh primerih z natezno trdnostjo $f_{tk}=600$ MPa. Konci sider iz rebraste armature so bili po vgradnji v vrtine in zapolnitvi z malto zakrivljeni v fuge zidu, sidra iz gladke armature pa pritrjena na zid z maticami in podložkami. Preiskave, ki jih je opravila Valluzzi, kažejo, da pri zidovih, utrjenih z vgrajevanjem prečnih sider, ni bistvenega povečanja tlačnih trdnosti in togosti v primerjavi z neutrjenimi zidovi. Avtorica ugotavlja, da je zaradi strukture kamnitega zidu s šibkim jedrom nujna sočasna utrditev zidu s sistematičnim injektiranjem.

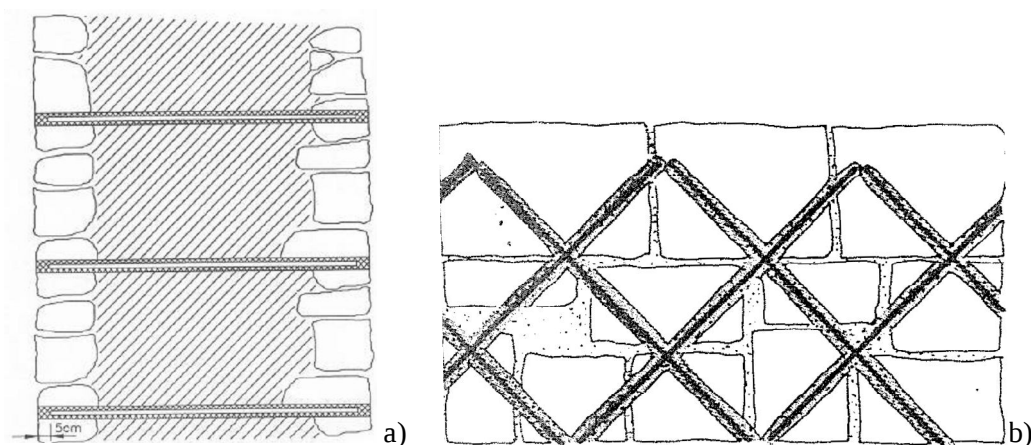


*Slika 3.7: a) Pritrjevanje prečnih sider s krivljenjem v primeru rebraste armature,
b) z vijačenjem v primeru gladke armature z vrezanim navojem (Valuzzi, 2004)*

*Fig. 3.7: a) Fixing of transversal anchors with bending in case of reinforced steel bars,
b) with screwing in case of threaded bars (Valuzzi, 2004)*

3.3.6 Vgradnja zainjektiranih sider

Z vgradnjo zainjektiranih sider je mogoče povečati kohezivnost (povezanost) posameznih zidnih slojev. Eksperimenti so pokazali, da je za jeklena sidra iz rebraste armature s premerom $d_a=8-16$ mm, ki jih v opečni zid vgradimo s cementno malto, potrebna sidrna dolžina $l_s=90+9\cdot d$ (v mm). V primeru utrjevanja kamitih zidov je potrebna sidrna dolžina $l_s=120+9\cdot d$ (v mm). Navedene sidrne dolžine omogočajo plastifikacijo sider pri natezni obremenitvi ($f_{yk}=400$ MPa). Za ostale vrste sider in veziv, s pomočjo katerih jih vgrajujemo, se sidrna sila določi eksperimentalno, eventualno s »pull out« testom na terenu. Zaradi koncentriranih obremenitev je na zgornjem delu zidu potrebna vgradnja dodatnih vertikalnih in poševnih sider, da se prepreči razslojevanje zidu. Pri utrditvi s postopkom »šivanja« zidu se kot osnovni element uporabi jeklena palica dolžine $l_a=2-3$ m, ki se v predhodno izvrtane vrtnice vgradi s cementno ali polimerno injekcijsko mešanico, in poveže zunanje sloje zidu preko vmesnega jedra. Injekcijska mešanica se vgrajuje pod nizkim pritiskom in omogoči povezavo med sidri in gradniki zidu (Van Gemert in sod., 1999).



Slika 3.8: a) Zainjektirana sidra v večslojnem kamnitem zidu, b) »šivanje zidu« (Van Gemert in sod., 1999)

Fig. 3.8: a) Grouted anchors in multiple leaf stone masonry wall, b) »sewing of the wall« (Van Gemert et al., 1999)

4 VZROKI ZA NAPAKE PRI SISTEMATIČNEM INJEKTIRANJU IN POŠKODBE ZAKLJUČNIH SLOJEV

Utrjevanje zidov s sistematičnim injektiranjem je zahteven postopek, ki od projektanta in od izvajalca ter nadzornika zahteva ustrezno usposobljenost in poznavanje problematike. Slednje še posebej velja za spomeniško zaščitene objekte, pri katerih so kriteriji in zahteve višje kot pri običajnih objektih. Pred odločitvijo o načinu utrjevanja zidov je ključnega pomena poznavanje načina zidave in uporabljenih materialov v zidu, ki ga nameravamo utrditi. Obstaja vrsta nedestruktivnih (NDT), delno destruktivnih (DDT) in destruktivnih preiskav (DT), s kombinacijo katerih lahko dovolj natančno ocenimo strukturo obravnavanega zidu, vrsto uporabljenih materialov v zidu in splošno stanje zidov, ter v skladu z rezultati, načrtujemo nadaljnje posege.

Binda (Binda, 2006) navaja bistvene probleme, s katerimi se srečujemo pri sistematičnem injektiranju:

- nepoznavanje velikosti in razporeditve votlin v zidu;
- problematično penetriranje injekcijske mešanice v tanke razpoke širine 2 do 3 mm,
- prisotnost majhnih in velikih votlin v zidu, kar otežuje izbiro primerne zrnavosti mešanice (injektiranje velikih votlin z mešanico s fino zrnavostjo lahko vodi do segregacije);
- problematično penetriranje injekcijske mešanice v primeru, ko je v zidu prisotnen mulj, prašnati delci ali glina;
- potreba po zagotovitvi zadosti nizkega pritiska injektiranja, da se izognemo zračnim mehurčkom v razpokah in majhnih votlinah ali poškodbam zidu.

4.1 Nepoznavanje strukture (morfologije) zidov

4.1.1 Posledice nepoznavanja strukture zidu

Posledica nepoznavanja strukture zidu je lahko izbira neustrezne oziroma neučinkovite metode utrditve. Sistematično injektiranje je učinkovito le v primeru, ko nam uspe zapolniti posamezne votline v zidu in na ta način medsebojno povezati posamezne sloje in gradnike zidu.

Sistematično injektiranje ni ustrezen poseg pri zidovih z majhnim prispevkom votlin (manj od 4 %, Penazzi in sod. 2001), oziroma pri zidovih, kjer je celotno jedro zapolnjeno z drobirjem, zemljo in vezivom brez votlin. Pri takšnih, neinjektibilnih zidovih, je potrebno pristopiti k primernejšim metodam utrditve.

4.2 Nekompatibilnost vgrajenih materialov z obstoječimi v zidu

4.2.1 Kemijska nekompatibilnost

Kemijski vzroki za degradacijo oziroma propadanje so največkrat povezani z reakcijami med sulfati in ostalimi sestavinami v zidu. Fizikalni vzroki so največkrat posledica prisotnosti vode v zidu, zaradi česar lahko prihaja do izhlapevanja, kapilarnega dviga, zmrzovanja itd.. Voda ima pomembno vlogo tudi pri kemijskih vzrokih degradacije, in sicer z dveh vidikov:

- voda je v tekočem ali plinastem (izhlapevanje) agregatnem stanju aktivno udeležena pri vseh kemijskih reakcijah, ki bi lahko povzročile degradacijo;
- voda v tekočem agregatnem stanju ima pomembno vlogo transporta ene komponente k drugi in tako zagotovi fizikalni kontakt dveh komponent, brez česar sicer ne bi prišlo do kemijske reakcije. Tako lahko na primer zaradi kapilarnega dviga pride do transporta vodotopnih soli po zidu, pri čemer lahko pri potencialnem stiku z ometom pride do škodljivih kemijskih reakcij med solmi in posameznimi sestavinami ometa.

Prisotnost vlage v zidu je nujen, čeprav ne zadosten pogoj za začetek degradacije, ne zgolj zaradi fizikalnih vzrokov, ampak tudi zaradi kemijskih interakcij. Na zidovih, na katerih je dostop vodi preprečen in so ohranjeni v suhem stanju, ne prihaja do propadanja zaradi kemijskih vzrokov, tudi če bi reakcije med potencialno nevarnimi sestavinami v zidu ob prisotnosti vlage lahko povzročile tvorbo škodljivih produktov (Collepari, 1990).

4.2.1.1 Sulfatna reakcija

Glavni kemijski reakciji, ki povzročata degradacijo, kot posledica interakcije med originalno uporabljenimi materiali, sta dve. Obe pogojuje prisotnost sulfatov in vlage. Produkta, ki lahko nastaneta pri teh reakcijah, sta etringit in tumasit. Etringit se pojavi v obliki nabrekanja materiala, tumasit pa v obliki gobaste snovi. Velikokrat se pojavita oba produkta, čeprav je nastanek etringita pogostejši. Značilnost tvorbe obeh produktov je, da pri nižjih temperaturah (od 0 do 10 °C) nastajata hitreje kot v toplejših razmerah.

Pomembno je poudariti, da nastanek etringita sam po sebi ni nevaren, saj ne povzroča nabrekanja, če ni prisotno apno. Mehta (Mehta, 1973) je dokazal, da nastali etringit zaradi prisotnosti apna kristalizira v kratka vlakna (nekaj μm), ki absorbirajo vodo in povzročajo nabrekanje. Če apno ni prisotno, vlakna etringita ne absorbirajo vode in ne povzročajo nabrekanja. Strukturni formuli obeh produktov sta si dokaj podobni:

etringit: $\{Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\} \cdot [(SO_4)_3 \cdot 2H_2O]$

tumasit: $\{Ca_6[Si(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\} \cdot (SO_4)_2 \cdot (CO_3)_2$

Kar se tiče zidov objektov, pri katerih smo prepričani, da niso prisotna veziva na osnovi portlandskega cementa, je pogoj za nastanek etringita in/ali tumasita hkratna prisotnost:

- kalcijevega sulfata,
- vode,
- apneno-poculanskih ali hidravličnih apnenih malt ali mešanic.

Hidravlične apnene malte so vir kalcijevih aluminatov in hidratiziranih kalcijevih silikatov. Celo pri običajni apneni malti (na primer za omete) lahko pride do tvorbe etringita in/ali tumasita, če ta pride v stik z mavcem (na primer za vezivo med opeko ali kamni), saj se na stiku dveh malt zaradi reakcije med apnom in poculani tvori kalcijev aluminat in hidratiziran kalcijev silikat (Collepardi, 1990).

4.2.1.2 Alkalno-silikatna reakcija

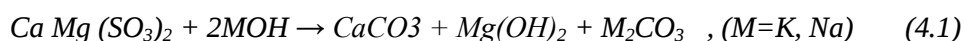
Alkalno-silikatna reakcija, do katere lahko pride med alkalijami in reaktivnim silikatnim agregatom, je sicer znana iz tehnologije betona, vendar lahko do nje teoretično pride tudi pri sistematičnem injektiranju kamnitih zidov. Alkalna reakcija v betonu je kemična reakcija med alkalijami iz cementa in zrni reaktivnega kamenega agregata. Mladenovičeva (Mladenovič in sod., 2000 b) poroča o poškodbah armiranobetonskega stebra, ki so se pojavile po utrditvi votlikavega jedra z injektiranjem s cementno mešanico z 10 % vsebnostjo opalske breče, prav zaradi nabrekajočih produktov alkalno-silikatne reakcije.

Pogoj za alkalno-silikatno reakcijo je vitalni prispevek okolja v obliki vlage in temperaturnih nihanj. Alkalijske sestavine portlandskega cementa, lahko pa v betonsko konstrukcijo prodrejo kasneje iz okolja. Reaktivne minerale in kamnine razvrščamo glede na njihovo topnost in hitrost reakcije v alkalijah v dve skupini: tiste, ki z alkalijami reagirajo močno in hitro (opal, kristobalit, tridimit, vulkansko steklo, mikro- in kriptokristalni kremen ter makrokristalni kremen z deformirano kristalno mrežo), in tiste, ki z alkalijami reagirajo počasi oziroma pride do reakcije šele čez nekaj časa (kamnine, ki imajo v sestavi kremen z deformirano kristalno mrežo, kot so kvarciti, gnajsi, filiti, argiliti in peščenjaki). Reakcijski produkt je ekspanzivni hidrofilni gel. Povečanje prostornine gela in s tem prostornine betona spremlja pojav notranjih napetosti, ki lahko dosežejo vrednosti do 7 MPa. Reakcija se navzven manifestira v pojavu karakterističnih razpok v betonu in pogosto tudi sekundarnih izločkov. Alkalno-silikatna reakcija je za beton le redko uničujoča, nevarna je predvsem zato, ker razpokanost betona posredno omogoča dostop in delovanje drugih škodljivih dejavnikov in s tem

njegovo pospešeno propadanje. Ključni varnostni ukrep za preprečevanje alkalno-silikatne reakcije je, poleg opredelitve in presoje atmosferske obremenjenosti bodoče konstrukcije v zunanjem okolju, uporaba agregatov s petrografskimi komponentami, ki ne bodo reagirali z alkalijami v takšnem obsegu, da bi to povzročilo nastanek poškodb v betonu (Mladenovič in sod., 2000 a).

4.2.1.3 Alkalno-karbonatna reakcija

Akalno-karbonatna reakcija je sicer tako kot alkalno-silikatna reakcija znana iz tehnologije betona, vendar je njen nastanek enako kot to velja za alkalno-silikatno reakcijo, teoretično mogoč tudi pri sistematičnem injektiranju kamnitih zidov. Alkalno-karbonatna reakcija poteka v otrdelem betonu med zrni karbonatnih agregatov in alkalijami, ki večinoma izhajajo iz cementa. Posledica je nastanek novih mineralov, ekspanzija betona in pojav razpok. Posledica reakcije je zmanjšanje trdnosti betona, modula elastičnosti in drugih mehanskih lastnosti. Reakcija poteka po enačbi:



Pri tem nastaja brucit $[Mg(OH)_2]$, ki je karakterističen za to reakcijo. Reakcija se imenuje dedolomitizacija in je povezana s povečanjem volumna betona. Od kamnin so lahko alkalno karbonatno aktivni dolomiti, apneni dolomiti in dolomitizirani apnenci. Poleg mineraloške sestave so pogoji za reakcijo tudi značilna mikrostruktura, delež kalcita in dolomita v količinah med 40 in 60 % in delež več kot 5 % mineralov glin. Na reakcijo poleg agregata vplivajo količina alkalij v cementu, vlaga, temperatura in velikost zrn agregata. Delež alkalij v cementu je tisto, kar določa stopnjo in hitrost ekspanzije v betonu. Pri uporabi potencialno reaktivnih agregatov velja priporočilo, naj alkalije (kot Na_2O ekvivalent) ne presežejo 0,6 % ut., nekateri raziskovalci menijo, da alkalij ne sme biti več kot 0,4 % ut. Pogoj za reakcijo je vlaga, saj alkalije lahko reagirajo le v vodni raztopini. Reakcija je hitrejša in ekspanzija betona večja pri višjih temperaturah. (Zatler-Zupančič, 1994).

4.2.1.4 Eflorescenca soli

Soli lahko imajo vrsto različnih izvorov: onesnažen zrak, zemljina, morje, nestrokovna nega objektov, interakcija dveh materialov, lahko nastanejo tudi kot produkt žganja opeke. Nekateri materiali lahko vsebujejo sol že v osnovi: portland cement običajno vsebuje alkalne sulfate, nepravilno pečena opeka pa natrijeve sulfate. Ti lahko že kmalu po izgradnji povzročijo pojav eflorescence soli. Topni sulfati lahko povzročijo tudi nabrekanje in propadanje malte in ometa. Pri eflorescenci gre za prašnat depozit soli, ki se tvori na površini opek, kamnov ali malt. Ponavadi je bele barve, lahko pa najdemo tudi cvetenje rumene, zelene ali rjave barve. Za pojav eflorescence morajo biti izpolnjeni trije pogoji:

prisotnost soli (najpogostejše karbonati in sulfati), vode in izhlapevanja. Vлага nosi raztopljene soli proti površju zidu, kjer prihaja do izhlapevanja in kristalizacije soli (Vindišar, 2004).

Vлага v povezavi z vodotopnimi solmi je tisto, česar si pri stenskih poslikavah najmanj želimo. Raztapljanje, transport in rekristalizacija vodotopnih soli močno načenja omete v globini in barvno plast na površini. To pomeni, da so vse vrste vlaženja kot povzročitelj učinkovanja vodotopnih soli skoraj enako nevarne. Kondenzna vлага je tako najbolj prikrita oblika, medtem ko je kapilarna vлага morda najbolj nevarna oblika, ki jo najpogostejše srečujemo v vlogi razkrojevalca in transporterja vodotopnih soli (Bogovčič, 1991).

V primeru sistematično zainjektiranega zidu so votline in razpoke v zidovih, ki so predstavljale oviro kapilarnemu transportu vode oziroma vlage, po injektiranju zapolnjene s kapilarno aktivnim cementnim kamnom. V zidu nastane nov kapilarni sistem, po katerem voda, ki zaradi različnih vzrokov (padavine, kondenzacija zračne vlage, talna voda, poškodbe cevi) vstopa v zidove, potuje skupaj z raztopljenimi solmi. Ko voda izhlapeva na površini zidov, se soli odlagajo pod slabo sprijetimi in poroznimi ometi. Ometi odstopajo, na površini se pojavijo kristalizirane soli, ki se zaradi higroskopičnosti dodatno navlažujejo iz zraka. Zaradi poškodb, do katerih lahko pride iz tega vzroka, je pri načrtovanju prenove starih stavb potrebno sočasno s problemi nosilnosti in stabilnosti reševati tudi probleme, ki jih povzroča vлага (Tomaževič in Apih, 1993).

Zaradi omejevanja oziroma preprečevanja pojava eflorescence soli pri utrjevanju objektov z injekcijskimi mešanici zahtevamo, da ne vsebujejo vodotopnih soli (alkalij) oziroma jih vsebujejo zgolj v minimalnih količinah, to je $<0.1\%$ ut. (angl. oznaka LA-low alcali).

4.2.1.5 Degradacija, povzročena z restavriranjem in utrjevanjem objektov

V splošnem ločimo dve vrsti materialov za restavriranje zidov, in sicer materiale, podobne originalno uporabljenim, in nove materiale. Tendencia med restavratorji je, da je potrebno pri restavriranju zgodovinskih objektov uporabljati podobne in celo identične materiale, kot so originalni, saj naj bi bilo to zagotovilo za uspešen poseg. Slednje ni priporočljivo v vseh primerih. Do propadanja zgodovinskih objektov je prihajalo tudi po restavriranju. Zaradi interakcije med originalnimi materiali in materiali, ki so uporabljeni pri restavriranju in utrjevanju objektov, se pogosto dogaja, da se po sanaciji in/ali utrditvi na objektu pojavijo večje poškodbe kot pred posegom.

Med novimi, danes dostopnimi materiali za restavriranje, se od originalnih precej razlikujejo predvsem hidravlično apno, cement in polimerne smole. Tudi veziva, prisotna v originalnem zidovju, kot so

apno, mavec, in apnenopoculanska veziva se lahko uporabljajo pri restavriranju. Hidratacijski produkti apnenopoculanskih veziv in hidravličnega apna ali portland cementa vsebujejo hidratizirane kalcijeve silikate in aluminat, ki lahko negativno reagirajo s sulfati v zidu. Apno in mavec imata to slabost, da jih lahko voda iz zunanjih površin zlahka spere, hkrati lahko negativno reagirata z obstoječimi sestavinami v zidovih.

V primerih ko pri restavratorskih delih uporabljamo hidravlično malto na osnovi cementa, hidravlično apno ali apno in poculane, je mogoč nastanek hidratiziranih kalcijevih aluminatov in hidratiziranih kalcijevih silikatov. Če so torej v zidu prisotni kalcijevi sulfati in vlaga, je lahko posledica nastanek etringita in/ali tumasita.

Če je za utrditev zidov s postopkom sistematičnega injektiranja uporabljen cement ali ostala hidravlična veziva, lahko ekstenzivna tvorba etringita in/ali tumasita poslabša tudi statično stabilnost zidu. Etringit lahko nastane tudi pri uporabi tradicionalnih na zraku strjujočih se veziv (apna in mavca), če so v zidovih za to ugodni pogoji. Etringit lahko na primer nastane, če je bil pri restavriranju uporabljen mavec, zidovi, ki se obnavljajo, pa že vsebujejo poculane in mavec kot vezivo. Etringit lahko nastane tudi, če uporabljamo mavec pri obnovi zidov, ki vsebujejo hidratizirane kalcijeve aluminat v maltah iz hidravličnega apna ali apna in poculanov.

Iz katerega koli vzroka nastaneta etringit in tumasit, so bistvene razlike pri nastanku obeh naslednje:

- nastanek etringita povzroči nabrekanje malte, vendar je material tudi po nastanku razpok še vedno trden in odporen; nastanka tumasita ne spremljajo večja nabrekanja, vendar postane malta kot posledica reakcije nepovezana, gobasta tvorba, še posebej v prisotnosti vode;
- etringit nastaja hitreje kot tumasit, zato največkrat pride najprej do nastanka etringita, kasneje pa še do nastanka tumasita; tumasit lahko nastane v nekaj desetih dneh ali celo po nekaj letih v odvisnosti od temperature, vlage itd.;
- čeprav so nizke temperature ugodne za nastanek obeh produktov, je v hladnih pogojih tvorba tumasita še posebej pospešena: optimalni pogoji so 90 % relativna vlažnost in temperatura med 0 in 5 °C.

V primeru uporabe cementne mešanice za utrditev zidov s postopkom sistematičnega injektiranja lahko nabrekajoči produkti zaradi tvorbe etringita povzročijo skoraj takojšnje poškodbe - razpoke zidov. Obseg in jakost poškodb je odvisna od količine nastalega etringita in kakovosti zidov. Nasprotno se v primeru tvorbe tumasita po utrditvi zidu nastale poškodbe stopnjujejo počasi, pri čemer lahko nazadnje pride do večjih poškodb. Opečni zidovi lahko za razliko od kamnitih, vsebujejo

zadostne količine sulfatov, da lahko tudi brez prisotnosti mavca kot veziva ali kapilarnega dviga vode s sulfati, pride do nastanka etringita in tumasita (Collepari, 1990).

4.2.2 Mehansko-fizikalna nekompatibilnost

Pomembne mehanske lastnosti injekcijske mešanice so tlačna, natezna in upogibna natezna trdnost, duktilnost, krčenje in adhezija s posameznimi gradniki zidu. Stari zidani objekti so sposobni prenesti diferenčno posedanje prav zaradi (do določene meje) duktilnega obnašanja. Z injektiranjem s cementnimi injekcijskimi mešanicami sicer dosežemo izboljšanje določenih mehanskih lastnosti zidu (tlačne in natezne trdnosti), vendar pa lahko takšna utrditev zmanjša sposobnost zidu za kompenziranje obremenitev. Čeprav se tako utrjenemu zidu izboljšajo mehanske lastnosti in je sposoben prenesti večje obremenitve kot pred posegom, je mogoče, da na primer diferenčni posedki temeljev povzročijo hitrejši nastanek poškodb, kot bi ga, če bi za utrditev uporabili bolj duktilno vezivo, s katerim bi se tlačna in natezna trdnost zidu povečali za manjši faktor, vendar bi dobili bolj duktilen zid (Van Gemert in sod., 1999).



Slika 4.1: Primer duktilnega obnašanja zidu: zgornji del zidu je posedek podpornega stebra arkade prenesel brez večjih razpok (Van Rickstal, 2000)

Fig. 4.1: Example of ductile behaviour of the wall: no larger cracks have formed in the upper section of the wall because of the settlement of supporting pillar of the arcade (Van Rickstal, 2000)

Apnene injekcijske mešanice so (v večini primerov) najbolj kompatibilne z originalno uporabljenimi materiali v zidu, ko gre za stare kulturnozgodovinske zidane objekte. Stoletja se je gašeno in hidratizirano apno uporabljalo pri gradnji objektov. Uporaba apnenih injekcijskih mešanic bi morala biti s tega vidika dobro sprejeta v praksi. Slaba stran utrjevanja objektov z apnenimi injekcijskimi mešanicami je, da je proces karbonatizacije debelih plasti apnenega veziva v zidu zelo počasen, zaradi omejene difuzije CO₂ čez že karbonatizirane plasti (Van Gemert in sod., 1999).

Strogo gledano cement kot vezivo v primeru starih kulturnozgodovinskih zidanih objektov ni povsem kompatibilen z originalno uporabljenimi vezivi. Zaradi tega umetnostni zgodovinarji in arhitekti oporekajo uporabi cementnih injekcijskih mešanic pri utrjevanju takšnih objektov. Argument, da zid na način utrdimo z materialom, ki je nekompatibilen z originalno uporabljenim vezivom, je v primeru uporabe cementa manj podkrepjen, kot na primer pri uporabi polimerov. Cement je, tako kot apno, mineralno vezivo. Fizikalne lastnosti cementa, na primer transport vlage, koeficient temperaturnega raztezka, toplotne prevodnosti itd., so precej bližje originalno uporabljenim materialom kot v primeru polimernih injekcijskih mešanic. Primeren material v smislu kompatibilnosti z originalnim predstavljajo kombinirane injekcijske mešanice - kompozicija apna, poculanov in cementa, vendar tudi v primeru slednjih preiskave kažejo, da je za doseganje minimalnih potrebnih vrednosti upogibnih nateznih trdnosti potrebna določena količina cementa - minimalno 30 % utežno (Van Gemert in sod., 1999).

4.3 Nepoznavanje vlažnosti zidov

Prekomerna vlažnost zidu je problem, ki ga je potrebno odpraviti še preden pristopimo k utrditvi zidu s sistematičnim injektiranjem, saj lahko pomeni aplikacija postopka brez odpravljanja vzrokov in posledic vlage, pospešitev napredovanja poškodb in destruktiven vpliv na zaključne sloje zidu. Zaradi tega je nujno, da v sklopu ostalih preiskav, ki jih izvajamo pred utrjevanjem zidu, ugotovimo vzroke, zaradi katerih prihaja do navlaževanja zidu, in pristopimo k ustreznim postopkom za odpravo vzrokov in posledic navlaževanja.

4.3.1 Vzroki vlage v zidovih

Predvsem pri starejših objektih so prekomerno navlaževanje in posledične poškodbe odvisno od več vzrokov. Vzroke navlaževanja zidov lahko strnemo v naslednje točke (Apih, 1986):

- kontakt z zemljino in manjkajoča, poškodovana, na nepravem mestu vgrajena ali nepravilno zaključena horizontalna in vertikalna hidroizolacija zidu;
- učinek meteorne vode; zatekanje dežja zaradi nepravilno izvedenih detajlov streh, oken, balkonov, teras, žlebov, poškodovani peskolovi, drenaže;
- kondenzacija vode na površini zaradi toplotnih mostov, v zidu prisotnih soli in gradbene vlage;
- druge poškodbe, npr. vodovodnih ali kanalizacijskih cevi.

4.3.2 Posledice prekomerne vlažnosti

Posledice prekomernega navlaževanja zidov se glede na količino vlage stopnjujejo od poškodb opleska in ometa do poškodb in propadanja posameznih gradnikov zidu, kar lahko vodi do konstrukcijskih poškodb zidu. Do slednjega lahko pride predvsem pri starejših, slabše grajenih objektih brez ustreznih vertikalnih in horizontalnih hidroizolacijskih barier, ki bi preprečevale kapilarni dvig vlage v zidu. Stalna vlaga in vodotopne soli, ki se s kapilarnim dvigom transportirajo in odlagajo v notranjosti ali na površini zidu, lahko na zidovih, kjer so osnovni gradniki slabše žgana opeka, peščenjaki in malta slabe kakovosti, zaradi zmrzovanja in kristalizacijskih pritiskov soli povzročijo močne poškodbe, ki vplivajo na zmanjšanje nosilnosti zidu. Zaradi vode, ki z raztopljenimi solmi potuje po kapilarah do površine ometa, prihaja ob izhlapevanju do eflorescence soli na površini ometa, čemur se pri objektih, kjer so zaključni sloji okrašeni s poslikavami ali freskami, želimo izogniti.

4.4 Napake med izvedbo

4.4.1 Neustrezna priprava mešanice

Pogosta napaka, ki se pojavlja pri izvedbi sistematičnega injektiranja, je neustrezna priprava injekcijske mešanice. Izvajalci v želji doseči čim boljše zapolnitev votlin in razpok v zidu pogosto povišujejo delež vode, ki ga predpisuje proizvajalec. S povečanjem deleža vode se sicer izboljša pretočnost mešanice, vendar lahko v tem primeru pride do segregacije in povečanega izločanja vode, poslabšajo pa se tudi mehanske lastnosti takšne mešanice, predvsem adhezija s kamni in malto ter natezna trdnost, ki sta bistvenega pomena za uspešno utrditev zidu.

V sklopu izvedbe preliminarних preiskav smo pri pripravi mešanic tudi sami naleteli na težave pri pripravi injekcijskih mešanic:

- pri nekaterih industrijsko pripravljenih mešanicah je bilo za dosego deklarirane pretočnosti potrebno občutno povišati delež vode glede na vrednost, navedeno v navodilih za pripravo;
- predpisana vodovezivna razmerja oziroma potreba po vodi pri različnih dobavah (šaržah) mešanic enake vrste, kljub navedbam proizvajalcev ne zagotavljajo enakih pretočnosti, kar je problematično predvsem v primeru cementnih injekcijskih mešanic, ko proizvajalci pri proizvodnji cementa uporabljajo različne vrste mavca, zaradi česar prihaja do omenjenih razlik.

Pri pripravi injekcijske mešanice je potrebno paziti tudi, da čas mešanja ustreza navodilom v tehničnih listih. Izvajalci injekcijske mešanice pogosto ne mešajo dovolj časa oziroma z mešanjem prekinejo na podlagi subjektivne presoje o ustreznosti časa mešanja, ne da bi pri tem upoštevali navodila proizvajalca ali opravili kontrolne preiskave pretočnosti. Prekratek mešalni čas pomeni odstopanje od predvidenih lastnosti mešanice in vodi do slabših rezultatov injektiranja.

4.4.2 Prekinitve delovnega procesa

Bistvenega pomena za kakovostno utrditev zidu s postopkom sistematičnega injektiranja je, da injektiranje poteka tekoče in brez prekinitve delovnega procesa. Zaradi strjevanja injekcijske mešanice postopoma prihaja do zniževanja obdelavnosti in zmanjšanja pretočnosti, kar v primeru prekinitve delovnega procesa ali nepravočasne vgraditve mešanice pomeni pomanjkljivo in nekovostno izvedbo del. Pogosta napaka pri izvedbi injektiranja je, da izvajalec porabi zamešano injekcijsko mešanico, prekine delovni proces in nato pripravi novo šaržo, ki jo prične vgrajevati po preteku mešanja. V izogib takšnim prekinitvam je potrebno zagotoviti zadostno količino materiala za neprekinjen potek del, mešanico pa ves čas injektiranja mešati (to je možno zagotoviti z uporabo dveh ali več posod za mešanje).

4.4.3 Neustrezna priprava zidu

4.4.3.1 Razporeditev in gostota vrtin

V sklopu priprave zidu je pomembna pravilna izvedba, gostota in razporeditev vrtin, ki je odvisna od vrste in kakovosti zidu, ki ga utrjujemo. Napake, ki jih moramo preprečiti, so nezadosten naklon in globina vrtin, nepravilna razporeditev in nezadostna gostota vrtin. Nezadostna gostota izvedenih vrtin je problematična predvsem pri bolj kompaktnih in homogenih zidovih ali delih zidov, pri katerih v tem primeru ne pride do kakovostne zapolnitve vseh votlin v zidu z injekcijsko mešanico.

4.4.3.2 Omočenje zidu

Predhodno omočenje zidu preko že vgrajenih vrtin v splošnem sicer izboljša učinkovitost injektiranja, vendar takšna predpriprava zidu ni priporočljiva v vseh primerih. Razlogov za to je več (Baronio in sod., 1992):

- možnost poškodb na dekorativnih ometih;
- v primeru da vezivo v obstoječem zidu še ni popolnoma hidratizirano, lahko omočenje povzroči hidratacijo in posledično povečanje prostornine in oddajanje toplote;
- če je v zidu določen prispevek glinenih delov, lahko zaradi omočenja pride do povečanja njihove prostornine, hkrati pa jih zaradi adsorpcije vode ni mogoče sprati iz zidu;
- če se v kamnitih gradnikih ali vezivu nahaja mavec v obliki CaSO_4 in $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, pride zaradi omočenja do povečanja prostornine;
- če se v zidu nahajajo vodotopne soli lahko zaradi omočenja pride do raztapljanja in kristalizacije soli na območju pod ometom.

Pri omočenju je potrebno paziti, da se v zid ne vnese prevelika količina vode. To je lahko problematično predvsem takrat, ko je v zidu, ki ga utrjujemo znaten delež finih frakcij ali celo zemlje, saj lahko ob prevelikem vnosu vode pride do spiranja manjših, nevezanih delcev v spodnji del zidu. Slednje ima za posledico, da je v območju zidu, kjer so napetosti največje (tako zaradi vertikalnih kot tudi horizontalnih obremenitev), učinkovitost injektiranja najslabša.

Na drugi strani je v praksi, v primeru da se zid pred pričetkom injektiranja ni omočil, prihajalo do zmanjšanja pretočnosti injicirane mešanice in tvorbe kep. Posledica izgube vode v injekcijski mešanici, do katere lahko pride zaradi kapilarnega srka podlage (porozne malte, drobirja ali kamnov), je nezadostna zapolnitev votlin in razpok v zidu, poslabšanje mehanskih lastnosti injicirane mešanice in nezadostna sprijemnost mešanice z gradniku zidu.

V primerih ko je predhodno omočenje zidu pred injektiranjem lahko problematično, je tako potrebno izbrati mešanico s čim večjo vodozadržnostjo in pretočnostjo ter čim manjšim izločanjem vode, hkrati pa paziti, da se v zid zaradi potencialnega spiranja finih frakcij v spodnji del zidu in poškodb ometov, ne vnese prevelika količina vode.

4.4.4 Neustrezni pritiski

Pritisk pri uvajanju injekcijske mešanice je pomemben parameter z več vidikov. Višji pritisk injektiranja pomeni kakovostnejšo in hitrejšo penetracijo mešanice v votline in razpoke v zidu. Na drugi strani lahko zaradi prevelikih pritiskov pride do razmešanja injekcijske mešanice, hkrati pa je visok pritisk problematičen tudi z vidika potencialnih poškodb zidu. Če vemo, da so natezne trdnosti zidu v neutrjenem stanju zanemarljive, je uravnavanje pritiska, zaradi potencialnih lokalnih izpadanj ometa ali celo delov zunanjih slojev zidu, vitalnega pomena pri vgrajevanju injekcijske mešanice.

Dodaten problem, ki se lahko pojavi pri slabo grajenih, močno votlikavih troslojnih zidovih, je hidrostatski pritisk, ki je sorazmeren z višino injektirane mešanice v svežem, tekočem stanju. Nastali hidrostatski pritisk lahko v kombinaciji z injekcijskim pritiskom povzroči poškodbe zidu (Van Rickstal, 2000).

4.4.5 Nepravilen potek injektiranja

Z izvedbo sistematičnega injektiranja zmeraj pričnemo na nastavkih, vgrajenih na spodnjem delu zidu. S postopnim prestavljanjem injektirne cevi na višje ležeče nastavke in sprotim zapiranjem nastavkov, na katerih prihaja do iztekanja, se nato pomikamo proti zgornjemu delu zidu. Takšen potek injektiranja omogoča optimalno zapolnitev razpok in votlin v zidu in konsistentno napredovanje - dvigovanje nivoja mešanice v zidu od spodaj navzgor, dokler niso zapolnjene vse votline. Z injektiranjem nikoli ne začnemo na višjem delu zidu, saj bi v tem primeru strjujoča se mešanica zapirala votline in tako preprečila prodiranje v nižje predele zidu, ki ga utrjujemo.

4.4.6 Delno injektiranje

Poškodbe zidov objektov, ki so bili s sistematičnim injektiranjem utrjeni le delno in ponovno izpostavljeni potresni obtežbi kažejo, da injektiranje le posameznih delov zidov v objektu, kot na primer medokenskih slopov, križanj in vogalov zidov ali območij vgradnje protipotresnih jeklenih vezi, ni priporočljivo. S sistematičnim injektiranjem utrjen zid ima v primerjavi z neutrjenim večjo togost, kar posledično pomeni, da bo prevzel večjo potresno silo, zaradi česar v primeru delnega injektiranja pride do poškodb na stikih utrjenih in neutrjenih zidnih slopov. Najbolj korektna rešitev je zato injektiranje vseh zidov v posamezni etaži objekta.

5 IZVEDENE PREISKAVE IN ANALIZA REZULTATOV

5.1 Preliminarne laboratorijske preiskave

V sklopu preliminarnih preiskav smo analizirali devet industrijsko predzmešanih mešanic, dobavljivih na slovenskem tržišču. Ker proizvajalci ne navajajo točne komponentne sestave mešanic, smo upoštevali podatke in navodila iz tehničnih listov. Vsaka izmed analiziranih mešanic je dobila svojo oznako, in sicer gre pri mešanicah z oznakami A1, A2, A4 in A6 za apnene mešanice, C1 in C2 sta cementni mešanici, A3, A5 in A7 pa kombinirane cementno-apnene mešanice, pri čemer vsaka izmed navedenih vsebuje določene dodatke, nekatere pa verjetno tudi polnila.

Pri vrednotenju rezultatov preiskav so bili upoštevani kriteriji, na podlagi katerih smo mešanice razvrstili v kakovostne razrede: mešanice visoke kakovosti (razred A), mešanice srednje kakovosti (razred B) in mešanice nizke kakovosti (razred C).

Kriterije in omejitve smo, kjer je bilo to mogoče, povzeli iz dostopne literature, vendar za vse izvedene preiskave v literaturi ni podanih omejitev ali pa so podane zgolj zgornje meje. Z namenom klasifikacije posameznih injekcijskih mešanic smo zato v okviru delovne skupine, ki so jo sestavljali strokovnjaki iz inštitucij, ki se med drugimi ukvarjajo s problematiko sistematičnega injektiranja zidov (R. Žarnić in V. Bosiljkov - FGG, I. Nemec - ZVKD RC, B. Gerbec in M. Uranjek - GI ZRMK), z upoštevanjem podatkov iz literature in dolgoletnih izkušenj na področju obravnavane problematike, določili mejne vrednosti za posamezne kakovostne razrede.

Na podlagi postavljenih kriterijev in rezultatov prvega dela preliminarnih preiskav smo v končni fazi iz celotnega nabora devetih mešanic izbrali pet mešanic, s katerimi smo nadaljevali preiskave na cilindričnih preiskušancih in štiri mešanice, ki smo jih uporabili pri izvedbi »in situ« preiskav.

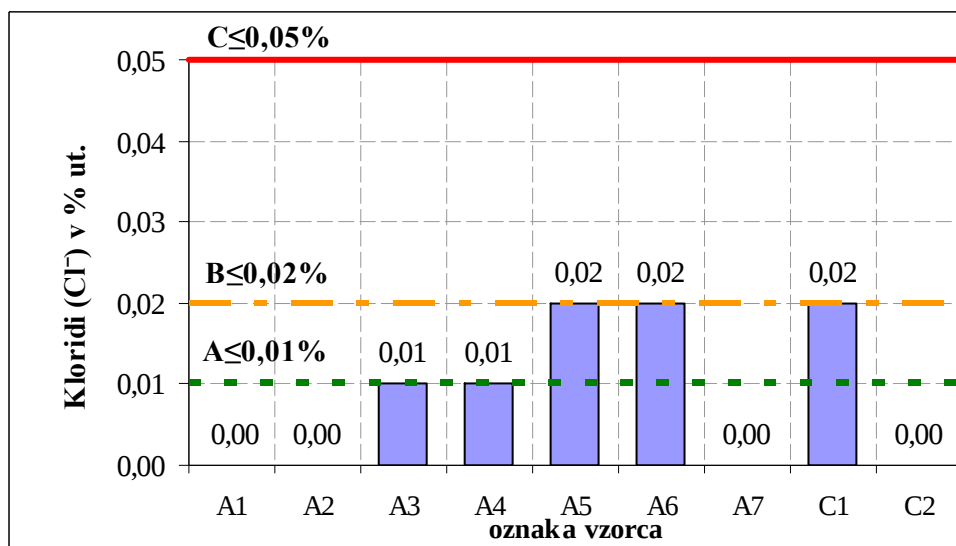
5.1.1 Suha injekcijska mešanica

V okviru preiskav suhe injekcijske mešanice so bile izvajane kemijske preiskave, pri čemer je bila analizirana vsebnost substanc, ki bi lahko škodljivo vplivale na zaključne sloje ali celo strukturo zidu. V tem sklopu je bila analizirana vsebnost vodotopnih kloridov, sulfatov in alkalij ter nitratov.

5.1.1.1 Vsebnost kloridov

Vsebnost kloridov v injekcijskih mešanicah je kritična predvsem v primerih, ko so v kamnite zidove, ki jih utrjujemo, že vgrajeni jekleni elementi, kot na primer protipotresne vezi za povezavo zidov ali natezne vezi obokov, saj lahko povečana vsebnost kloridov povzroči pospešeno korozijo vgrajenega jekla.

Vsebnost kloridov smo določali po standardu SIST EN 196-2:2005, mejne vrednosti pa v primeru kakovostnega razreda A postavili na 0,01 % ut., v primeru kakovostnega razreda B na 0,02 % ut. in v primeru kakovostnega razreda C na 0,05 % ut. Kot je razvidno iz slike 5.1 pri vzorcih A1, A2, A7 in C2 ni bilo evidentiranih kloridov, vzorca A3 in A4 pa sta dosegla vrednost 0,01 % ut., kar ustreza zahtevam kakovostnega razreda A. Najvišje vrednosti 0,02 % ut. smo evidentirali pri vzorcih A5, A6 in C1 (kakovostni razred B). Mejne vrednosti 0,05 % ut. ni presegel noben izmed analiziranih vzorcev.



Slika 5.1: Vsebnost kloridov (Cl⁻) v utežnih %

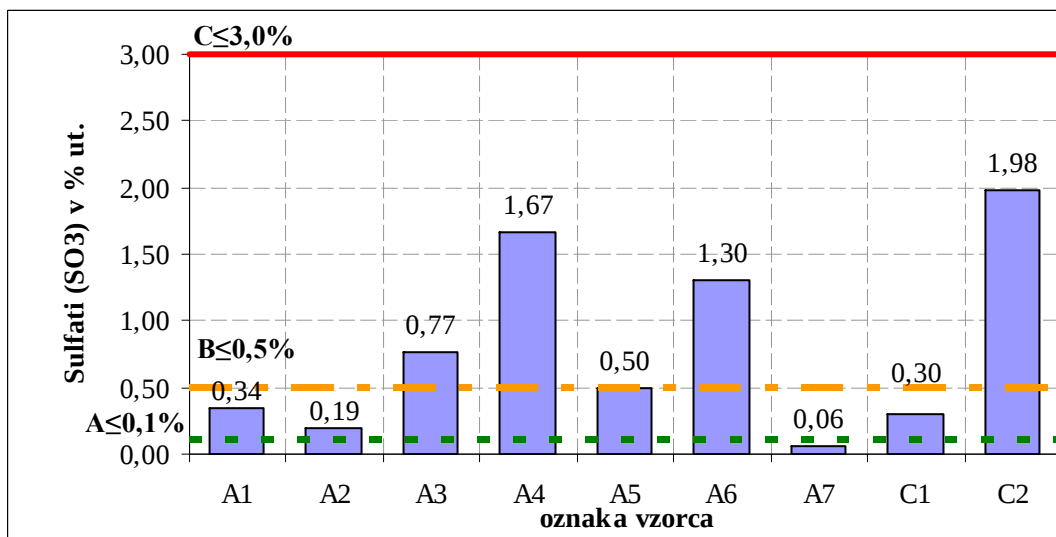
Fig. 5.1: Chlorides content (Cl⁻) in % by mass

Paillere (Paillere A. M. in sod., 1992) je pri analizi vsebnosti kloridov v devetih vzorcih veziv za injekcijske mešanice na cementni osnovi poročal o vrednostih med 0,01 in 0,02 % utežno, kar je v okvirih naših rezultatov. Standard EN447, ki sicer obravnava injekcijske mešanice, ki se uporabljajo pri prednapenjanju sider, omejuje vsebnost kloridov na maksimalno 0,10 % utežno.

5.1.1.2 Vsebnost sulfatov

Sulfati lahko v »ustreznih« razmerah (glej točko 4.2.1.1) zelo destruktivno vplivajo na strukturo zidu. Tako je iz tehnologije betona znan pojav sulfatne korozije, pri kateri prihaja do nabrekanja in pokanja betona kot posledice ekspandirajočih produktov.

Vsebnost sulfatov smo določali po standardu SIST EN 196-2:2005, pri čemer smo kot mejno za kakovostni razred A postavili vrednost 0,1 % ut., za kakovostni razred B 0,5 % ut. in za kakovostni razred C 3,0 % ut.. Rezultati kažejo, da mejnega (izločilnega) kriterija ne preseže noben izmed analiziranih vzorcev. Najmanjšo vsebnost sulfatov smo evidentirali pri vzorcu A7 (0,06 % - kakovostni razred A), vzorci A1, A2, A5 in C1 zadostijo kriteriju kakovostnega razreda B, ostali se uvrščajo v kakovostni razred C.



Slika 5.2: Vsebnost sulfatov (SO₃) v v utežnih %

Fig 5.2: Sulfate content (SO₃) in % by mass

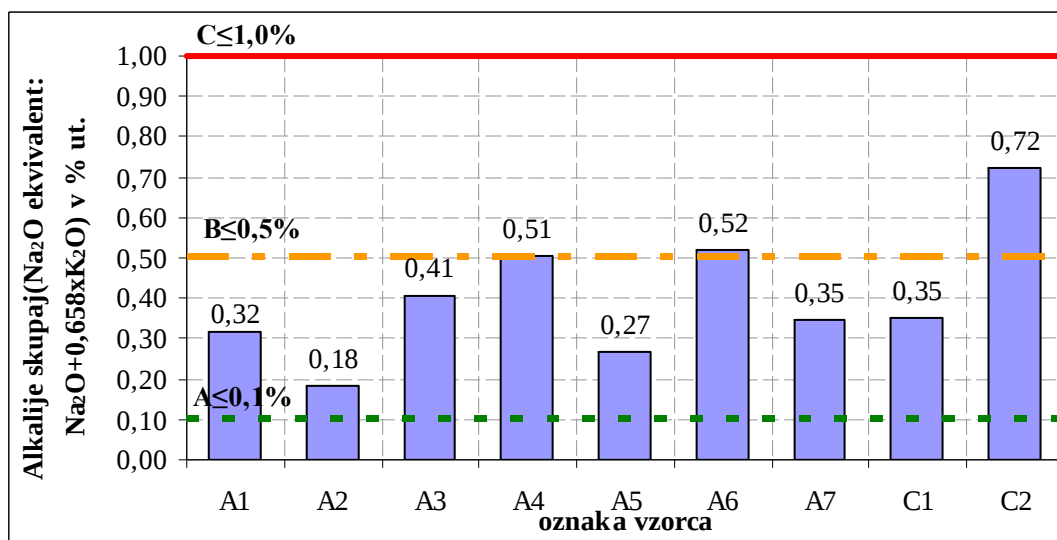
Kot primerjavo navajamo rezultate analize vsebnosti sulfatov devetih vzorcev cementnih injekcijskih mešanic, ki jo je opravil Paillere (Paillere in sod., 1992), ki so v razponu 2,65-3,55 % utežno. Analiza

vsebnosti sulfatov v hidravlično poculanskem vezivu za pripravo injekcijske mešanice (Baronio in sod., 1992), je pokazala, da znaša njihova vsebnost 3,46 % utežno.

5.1.1.3 Vsebnost alkalij

Vsebnost alkalij oziroma kakršnih koli vodotopnih soli v suhi injekcijski mešanici je problematična zaradi pojava eflorescence, do katere lahko pride v prisotnosti vode, ki deluje kot transportni medij in prenaša raztopljene soli proti površini zidu, kjer nato prihaja do izhlapevanja in kristalizacije soli. Delež alkalij je problematičen tudi v primeru, ko obstaja možnost, da bi lahko prišlo do poteka alkalno-silikatne ali alkalno-karbonatne reakcije.

Alkalije smo določali po standardu SIST EN 196-2:2005, in sicer so bile vrednosti Na_2O in K_2O analizirane posamično, nato pa prikazane skupno kot Na_2O ekvivalent ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$ v % ut.). Dopustne mejne vrednosti so bile postavljene za mešanice kakovostnega razreda A na 0,1 % ut., za mešanice kakovostnega razreda B na 0,5 % ut. in za mešanice kakovostnega razreda C na 1,0 % ut. Iz slike 5.3 je razvidno, da zahtevam kakovostnega razreda A ne zadosti nobena izmed analiziranih mešanic, večina se uvršča v kakovostni razred B, tri mešanice (A4, A6 in C2) pa v kakovostni razred C.



Slika 5.3: Vsebnost alkalij (Na_2O , K_2O) v utežnih %

Fig. 5.3: Alkali content (Na_2O , K_2O) in % by mass

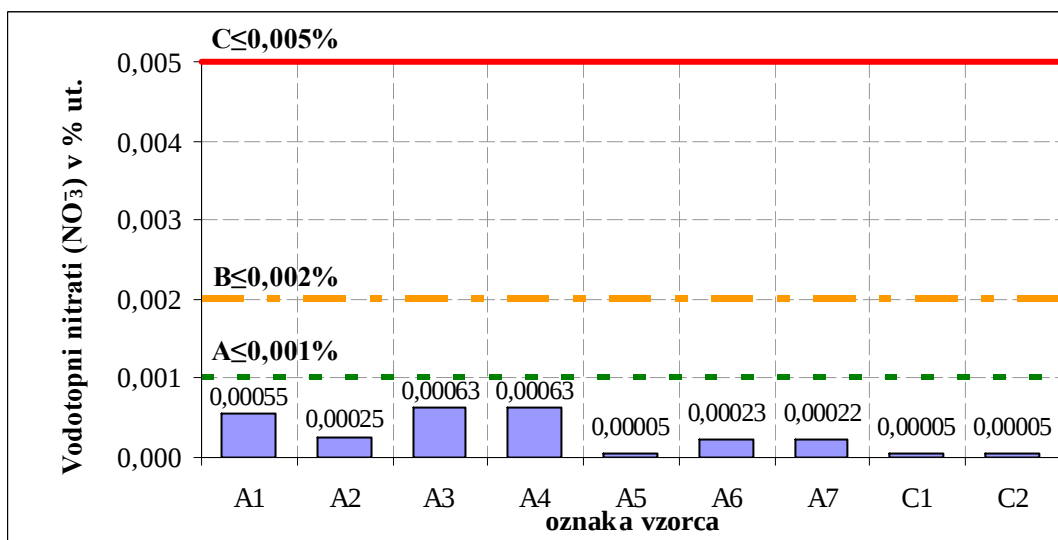
Van Rickstal (Van Rickstal, 2000) priporoča uporabo cementa z oznako LA (angl. low alcaly), z vsebnostjo alkalij pod 0,10 % utežno. Analiza vsebnosti alkalij v hidravlično poculanskem vezivu za

pripravo injekcijske mešanice, ki jo je opravil Baronio (Baronio in sod., 1992), je pokazala, da znaša vsebnost alkalij (Na_2O in K_2O skupaj) v analiziranem vzorcu 3,35 % utežno.

5.1.1.4 Vsebnost vodotopnih nitratov

Izvor nitratov so lahko greznice ali uporaba raznih gnojil v neposredni bližini objektov. Večje količine nitratov lahko v primeru prisotnosti vode, ki deluje kot transportni medij, povzročijo poškodbe ali celo odpadanje zaključnih slojev zidu.

Vodotopni nitrati so bili določeni po postopku ionske kromatografije s predhodnim izluževanjem, centrifugiranjem in filtriranjem posameznega vzorca. Mejne vrednosti vsebnosti vodotopnih nitratov smo postavili na 0,001 % ut. za kakovostni razred A, 0,002 % ut. za kakovostni razred B in 0,005 % ut. za kakovostni razred C. Rezultati preiskave, prikazani na sliki 5.4, kažejo nizke vrednosti v posameznih vzorcih, vsi analizirani vzorci namreč ustrezajo zahtevam kakovostnega razreda A.



Slika 5.4: Vsebnost vodotopnih nitratov (NaNO_3 , KNO_3) v posameznem vzorcu v utežnih %

Fig 5.4: Water soluble nitrates content (NaNO_3 , KNO_3) in % by mass

5.1.2 Sveža injekcijska mešanica

Vse mešanice so bile pripravljene skladno z navodili proizvajalcev, pri čemer je bilo upoštevano ustrezno vodovezivno razmerje in čas mešanja posamezne mešanice. V primerih ko z upoštevanjem vodovezivnega razmerja, navedenega v tehničnih listih, ni bilo mogoče doseči minimalno zahtevane pretočnosti (mešanice A1, A5 in A6), smo delež dodane vode temu ustrezno povečali. Upoštevana razmerja ter pripadajoči čas mešanja so podani v preglednici 5.1.

Preglednica 5.1: Priprava sveže injekcijske mešanice

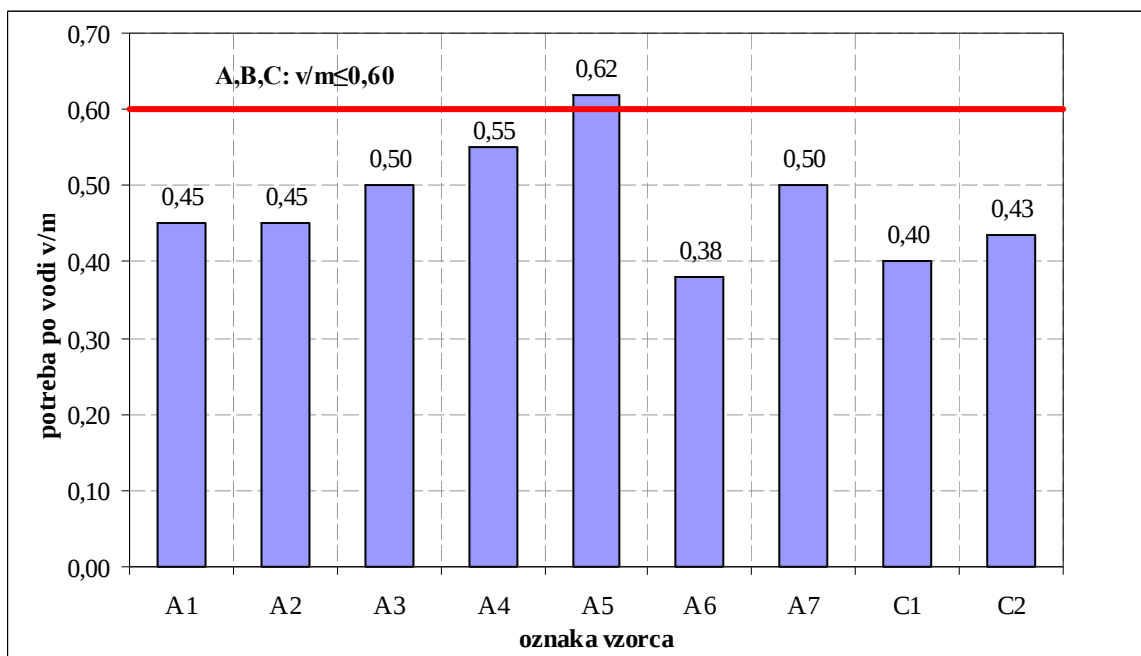
Table 5.1: Preparation of fresh injection grout

Oznaka mešanice	Priprava injekcijske mešanice			
	Količina suhe zmesi (g)	Količina vode (g)	Potreba po vodi v/m	Čas mešanja (min)
A1	8000	3600	0,45	5
A2	8000	3600	0,45	5
A3	8000	4000	0,50	5
A4	8000	4400	0,55	5
A5	8000	4950	0,62	10
A6	8000	3050	0,38	5
A7	8000	4000	0,50	5
C1	10000	4000	0,40	10
C2	8000	3480	0,43	3

5.1.2.1 Potreba po vodi

V splošnem zaradi omejevanja količine vode, ki jo s postopkom sistematičnega injektiranja vnesemo v konstrukcijo, kot tudi zaradi vpliva na mehanske lastnosti mešanic, stremimo k čim nižjim deležem dodane vode, vendar mora biti obenem delež dodane vode zadosti velik, da dosežemo ustrezno pretočnost in injektabilnost mešanice.

Običajno se pri vezivih, tudi pri injekcijskih mešanicah, uporablja izraz vodovezivno razmerje (v/v), ki pomeni razmerje med deležem dodane vode in vezivom. Ker gre v našem primeru za različne vrste mešanic, ki poleg veziva najverjetneje vsebujejo tudi polnila in dodatke, poleg tega pa gre v nekaterih primerih za kombinacijo različnih vrst veziv (hidravlična, nehidravlična), je v v tem primeru pravilnejši izraz potreba po vodi (v/m), ki pomeni delež zamesne vode, ki jo mešanica potrebuje za doseganje deklariranih lastnosti.



Slika 5.5: Potreba po vodi (v/m) upoštevana pri pripravi mešanic

Fig. 5.5: Water-binder ratio used for preparation of injection grouts

Kot kriterij postavimo mejo za potrebo po vodi na maksimalno vrednost $v/m=0,60$ za vse kakovostne razrede mešanic (A, B in C). Kriteriju ob upoštevanju 10 % tolerance zadostijo vse mešanice. M. R. Valluzzi (Valluzzi in sod., 2003) navaja, da se minimalno potrebno pretočnost (za različne vrste mešanic) običajno doseže z vodovezivnimi razmerji med 0,40 do 0,50. V izogib neugodnemu učinku na mehanske lastnosti strjene mešanice omenjena avtorica maksimalno vrednost vodovezivnega razmerja prav tako postavi na $v/v=0,60$. Standard EN-447, ki obravnava injekcijske mešanice za prednapeta sidra na osnovi portlandskega cementa, kot maksimalno vrednost vodovezivnega razmerja navaja $v/v=0,44$.

5.1.2.2 Prostorninska masa sveže mešanice

Prostorninsko maso sveže injekcijske mešanice smo določevali po standardu EN 1015-6. Pri tem je bila uporabljena kovinska cilindrična posoda z notranjim premerom $d=125$ mm s prostornino 1 l. Prostorninsko maso sveže mešanice smo izračunali po enačbi (5.1):

$$\rho_m = (m_2 - m_1) / V_v \quad (5.1)$$

kjer je:

ρ_m – prostorninska masa sveže mešanice (kg/m^3)

m_1 – masa prazne posode (g)

m_2 – masa posode skupaj z mešanico (g)

V_v – prostornina posode (l)



Slika 5.6: a) Tehtanje prazne posode, b) tehtanje posode napolnjene s sveže pripravljeno mešanico

Fig. 5.6: a) Weighing of empty vessel, b) weighing of the vessel filled with freshly prepared injection grout

Rezultati meritev so prikazani v preglednici 5.2 Po pričakovanju so najvišje vrednosti prostorninske mase sveže injekcijske mešanice v primeru cementnih mešanic, najnižje pa v primeru apnenih mešanic.

Preglednica 5.2: Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice

Table 5.2: Bulk density of freshly prepared injection grout

Oznaka mešanice	Prostorninska masa sveže injekcijske mešanice ρ (kg/m^3)
A1	1599
A2	1778
A3	1673
A4	1563
A5	1659
A6	1821
A7	1712
C1	1895
C2	1856

5.1.2.3 Obdelavnost

Pri pripravi injekcijskih mešanic smo vrednotili tudi obdelavnost posameznih mešanic. Obdelavnost mešanice je za izkušenega izvajalca pokazatelj kakovosti materiala in je povezana z mehansko-fizikalnimi lastnostmi mešanice, kot so pretočnost, hitrost strjevanja in injektibilnost mešanice.

Mešanice A1, A2, A3 in A4, so se izkazale kot dobro obdelavne. Mešanici A6 in C1 sta zelo dobro obdelavni. Kot slabše obdelavni mešanici sta se izkazali A5 in C2, pri čemer je pri A5 poleg hitrega strjevanja prihajalo tudi do tvorbe grudic. Najslabše obdelavna izmed vseh je bila mešanica A7, ki se je hitro strjevala, tvorile so se grudice, največje med vsemi pa je bilo tudi odstopanje med obema meritvama pretočnosti.

5.1.2.4 Pretočnost

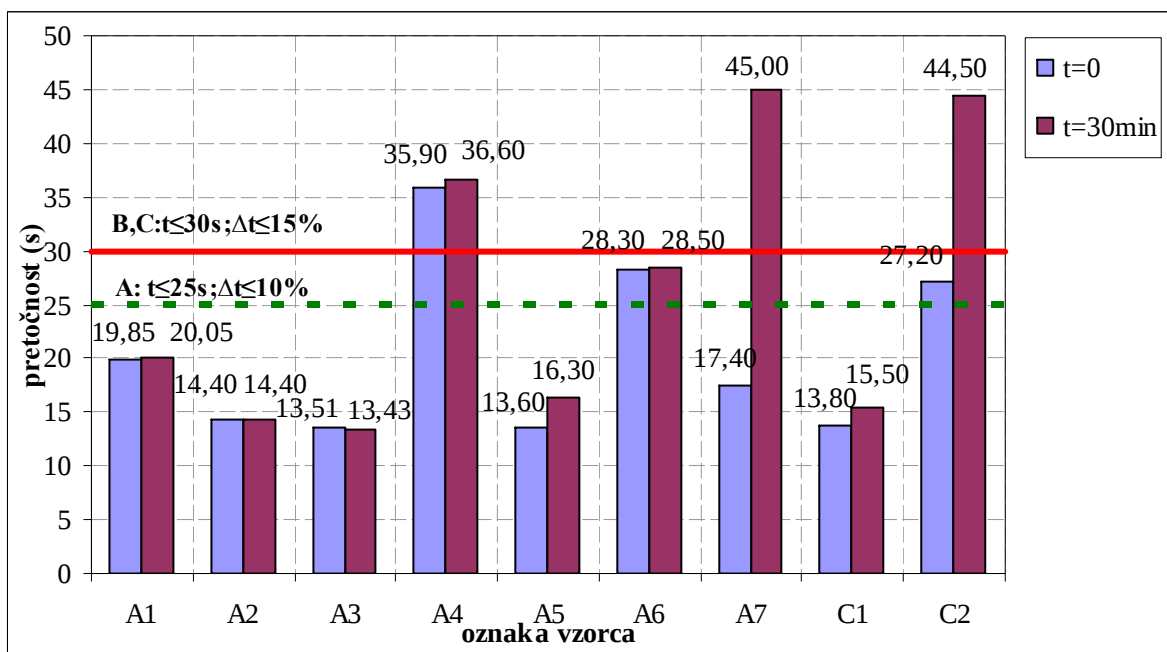
Pretočnost injekcijske mešanice je ključnega pomena za uspešno utrditev zidu s postopkom sistematičnega injektiranja. Ustrezna pretočnost pomeni, da bomo lahko tudi pri eventualno nižjih delovnih pritiskih dosegli kakovostno zapolnitev votlin in razpok v zidu.

Meritve pretočnosti smo izvajali po metodi lijaka, opisani v standardu SIST EN 445. Pri preiskavi se meri čas, ki je potreben, da 1,0 l mešanice steče skozi odprtino na spodnjem delu lijaka. Prostornina lijaka znaša $1,7 \text{ l} \pm 10 \%$. Pred pričetkom preizkusa se ostenje lijaka navlaži, nakar se mešanica v lijak vlija skozi sito z velikostjo okenca 1,5 mm. Ko je lijak napolnjen, se odpre odprtina na spodnjem delu in meri čas, ki je potreben, da 1,0 l mešanice preteče skozi odprtino. Opravljeni so bili trije preizkusi: prvi takoj, ko je bila mešanica pripravljena, druga dva pa 30 min po zamešanju.



Slika 5.7: Lijak za merjenje pretočnosti

Fig. 5.7: Cone for measurement of fluidity



Slika 5.8: Izmerjene vrednosti pretočnosti takoj po zamešanju in po preteku 30 min.

Fig. 5.8: Measured values of fluidity immediately after preparation and after 30 min.

Pri meritvah pretočnosti smo upoštevali dva kriterija. Za mešanice kakovostnega razreda A je zahtevan čas pretočnosti $t \leq 25$ s takoj po zamešanju in po preteku 30 min., hkrati pa med obema meritvama ne sme priti do razlike, večje od 10 % ($\Delta t \leq 10$ %). Za mešanice kakovostnega razreda B in C je zahtevan čas pretočnosti $t \leq 30$ s, razlika med obema meritvama pa ne sme presežati 15 %.

Zahtevam razreda A so zadostile mešanice A1, A2 in A3, mešanici A6 in C1 sta se uvrstili v razred B, nobenemu izmed kriterijev pa niso zadostile mešanice A4, A5, A7 in C2. Pri mešanicah A7 in C2 je bila evidentna velika razlika med pretočnostjo, izmerjeno takoj in po preteku 30 min., kar kaže na hitro strjevanje in slabo obdelavnost omenjenih mešanic.

Podoben kriterij, namreč omejitev pretočnosti na maksimalno 25-30 s navaja tudi M. R. Valluzzi (Valluzzi in sod., 2003), pri meritvah z Marshevim lijakom, ki ima enake dimenzije kot lijak, opisan v EN 445. Standard EN 447 vrednost pretočnosti takoj po zamešanju in po preteku 30 min. omejuje na ≤ 25 s.

5.1.2.5 Izločanje vode

Izločanje vode kaže na ločevanje vode in veziva, povečano izločanje vode vodi do segregacije delcev veziva in eventualno dodanih polnil v injekcijski mešanici. Slednje v praksi pomeni, da zgornji del injektiranega prostora v zidu ne bo ustrezno konsolidiran (Van Gemert in sod., 1999).

Meritve izločanja vode smo izvajali skladno s standardom SIST EN-445. Bistvo preizkusa je meritev količine vode, ki ostane na površini mešanice po preteku 3 ur. Za meritve je bil uporabljen prozoren valj prostornine 100 ml s premerom 25 mm in višino 250 mm in merilno skalo v ml. Valj je potrebno postaviti na površino, na kateri ni možnosti vibracij, mešanico pa pripraviti iz iste šarže kot pri meritvah pretočnosti. V valj vlijemo 95-100 ml mešanice in vzorec ustrezno zaščitimo pred izhlapevanjem. Izločanje vode izračunamo po enačbi 5.2:

$$(v_I/v) \times 100\% \quad (5.2)$$

Kjer je:

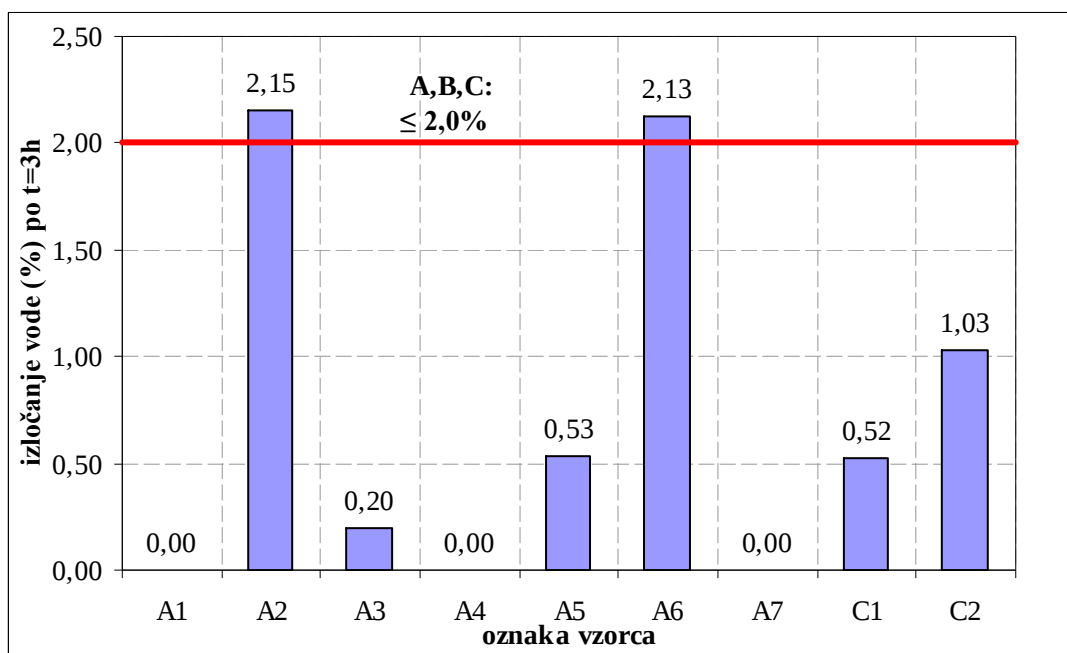
v - količina mešanice

v_I - količina vode nad mešanico po preteku 3 ur



Slika 5.9: Valji premera $d=25$ mm in višine $v=250$ mm za meritve izločanja vode

Fig. 5.9: Cylinders of diameter $d=25$ mm and height $v=250$ mm for bleeding test



Slika 5.10: Izločanje vode v % po 3 urah

Fig. 5.10: Bleeding in % after 3 hours

Kot kriterij za izločanje vode upoštevamo za vse kakovostne razrede vrednost ≤ 2 %, po preteku 3 ur. Mejno vrednost 2 % sta minimalno presegli dve mešanici, in sicer A2 z 2,15 % in A6 z 2,13 %, vendar sta obe vrednosti v okviru dopustne tolerance (10 %). Ostale izmerjene vrednosti izločanja vode so minimalne (A3, A5, C1, C2) ali celo nične (A1, A4, A7), tako da postavljeni zahtevi ustrezajo vse analizirane mešanice.

Enak kriterij je določen v točki 5.3 standarda EN 447, navaja pa ga tudi Paillere (Paillere in sod., 1992). Kalagri (Kalagri in sod., 2007) kot maksimalno dopustno izločanje vode navaja vrednost 5 %. V navedenem članku avtor analizira sedem injekcijskih mešanic z oznakami G1-G7, pri čemer G1 predstavlja kombinirano mešanico (kombinacija belega cementa, apna in poculana), G2-G7 pa mešanice na osnovi hidravličnega apna. Izmerjene vrednosti izločanja vode znašajo 2 % za G1-G2, 1 % za G3-G6 in <1 % za G7.

5.1.2.6 Vodozadržnost

Vodozadržnost injekcijske mešanice je pomembna lastnost, saj lahko povečana izguba vode, stimulirana s kapilarnim srkom porozne podlage (porozne malte, drobirja ali kamnov), vodi do poslabšanja mehanskih lastnosti injekcijske mešanice in posledično nezadostne sprijemnosti z posameznimi gradniki zidu, ki ga utrjujemo. Meritve vodozadržnosti oziroma relativne izgube vode posamezne injekcijske mešanice so bile izvedene po standardu PSIST prEN 1015-8:2001. Za preiskavo vodozadržnosti je potrebno pripraviti vsaj 1,5 l mešanice, pri čemer preiskavo izvajamo na dveh vzorcih. V prvi fazi se stehta kalup (m_1) in filtrski papir (m_2), oboje v suhem stanju. S preiskavo se prične 15 s po končanem mešanju injekcijske mešanice. Kalup se zapolni s sveže pripravljeno mešanico in ponovno stehta (m_3), nato se ga prekrije z gazo, obrne in obteži z utežjo ter pusti stati 5 min. $\pm$ 10 s (slika 5.11). Po preteku 5 min. se kalup ponovno obrne, filtrski papir pa ponovno stehta (m_4). V primeru da masa vode, ki jo vsrka filtrski papir (W_3) preseže 10 g, je potrebno preiskavo ponoviti z večjim številom filtrov (n). Vodozadržnost (WRV) mešanice določimo na podlagi enačb od 5.3 do 5.7.

$$\text{vsebnost vode v mešanici:} \quad W_2 = m_5 \cdot W_1 \quad (5.3)$$

$$\text{masa mešanice:} \quad m_5 = m_3 - m_1 \quad (5.4)$$

$$\text{masa absorbirane vode:} \quad W_3 = m_4 - m_2 \quad (5.5)$$

$$\text{relativna izguba vode:} \quad W_4 = W_3 / W_2 \cdot 100\% \quad (5.6)$$

$$\text{vodozadržnost:} \quad WRV = 100 - W_4\% \quad (5.7)$$

kjer je:

m_1 – masa kalupa v suhem stanju (g)

m_2 – masa filtrskega papirja v suhem stanju (g)

m_3 – masa kalupa skupaj z mešanico (g)

m_4 – masa z vodo prepojenega filtrskega papirja (g)

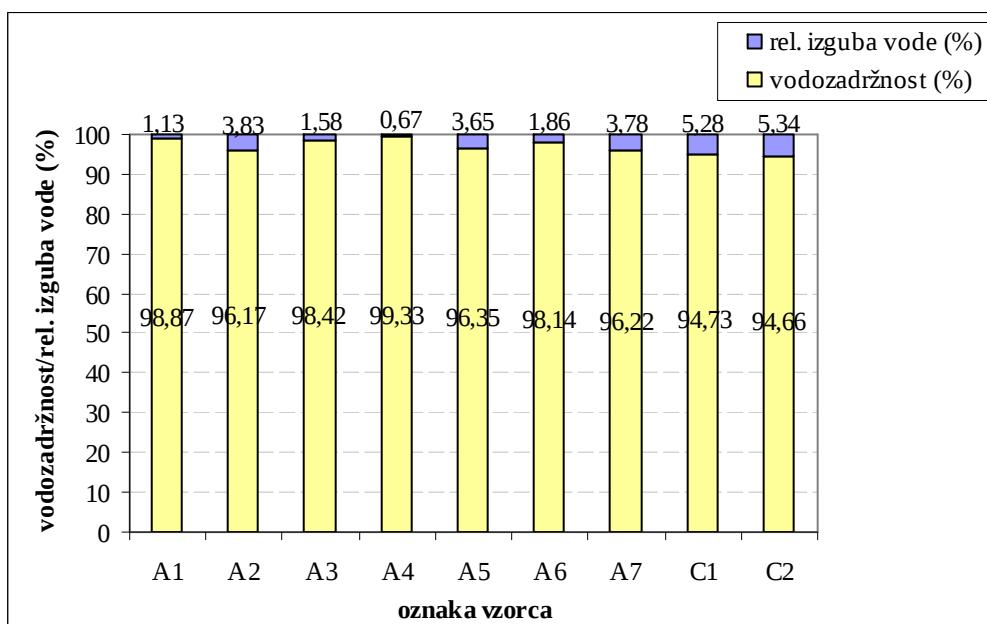
m_5 – masa mešanice brez kalupa (g)

W_1 – delež vode (razmerje v/m)



Slika 5.11: Določanje vodozadržnosti

Fig. 5.11: Determination of water retentivity



Slika 5.12: Vodozadržnost in relativna izgube vode v %

Fig. 5.12: Water retentivity and relative loss of water in %

V splošnem vse izmed analiziranih mešanic izkazujejo visoko stopnjo vodozadržnosti, saj se vrednosti gibljejo med 94,66 in 99,33 %. Iz slike 5.12 pa je kljub temu vidna tendenca višjih vrednosti vodozadržnosti v primeru apnenih injekcijskih mešanic (A1, A2, A4, A6) in zmanjševanja vodozadržnosti v primeru kombiniranih cementno-apnenih (A3, A5, A7) in cementnih mešanic (C1, C2). Iz rezultatov je mogoče sklepati, da imajo mešanice z višjo stopnjo vodozadržnosti, večjo specifično površino, saj ta pomeni višjo stopnjo adsorpcije vode na posamezne delce mešanice.

5.1.3 Strjena injekcijska mešanica

5.1.3.1 Sprememba prostornine

Sprememba prostornine je pomemben pokazatelj obnašanja mešanice v času strjevanja in mora biti v izogib zmanjšanja sprijemnosti s podlago in nastanka razpok čim manjša. Tako prekomerno zmanjšanje prostornine (zmanjšanje povezave - adhezije s kamnito osnovo), kot tudi prekomerno povečanje prostornine (razrivanje posameznih gradnikov zidu) lahko neugodno vpliva na mehanske karakteristike utrjenega zidu.

Meritve spremembe prostornine smo izvajali na treh valjih za vsako mešanico, pri čemer je bila meritev na vsakem valju izvedena v šestih točkah v skladu s standardom SIST EN-445. Rezultati meritev so podani kot procentualna sprememba prostornine mešanice na začetku, ko je mešanica pripravljena, in v izbranem časovnem intervalu. Pri preiskavi so bile uporabljene tri kovinske konzerve višine 120 mm in premera 100 mm. Konzerve so bile do druge meritve ($t=24$ ur) pokrite s pokrovi za preprečevanje izhlapevanja, kot to predvideva standard, nato smo jih predstavili v komoro s kontrolirano atmosfero (temperatura 20 ± 2 °C, vlažnost >65 %), jih odkrili in nadaljnje meritve opravljali v komori. Sprememba prostornine je bila izmerjena po preteku 24 ur, kot to predvideva standard, in v šestih časovnih obdobjih do starosti preskušancev 180 dni (slika 5.13). Rezultati meritev so podani z natančnostjo 0,1 %, in sicer kot povprečje meritev na treh konzervah po enačbi 5.8:

$$\Delta V = [(h_1 - h_2)/h] \times 100\% \quad (5.8)$$

kjer je:

ΔV - sprememba volumna (%)

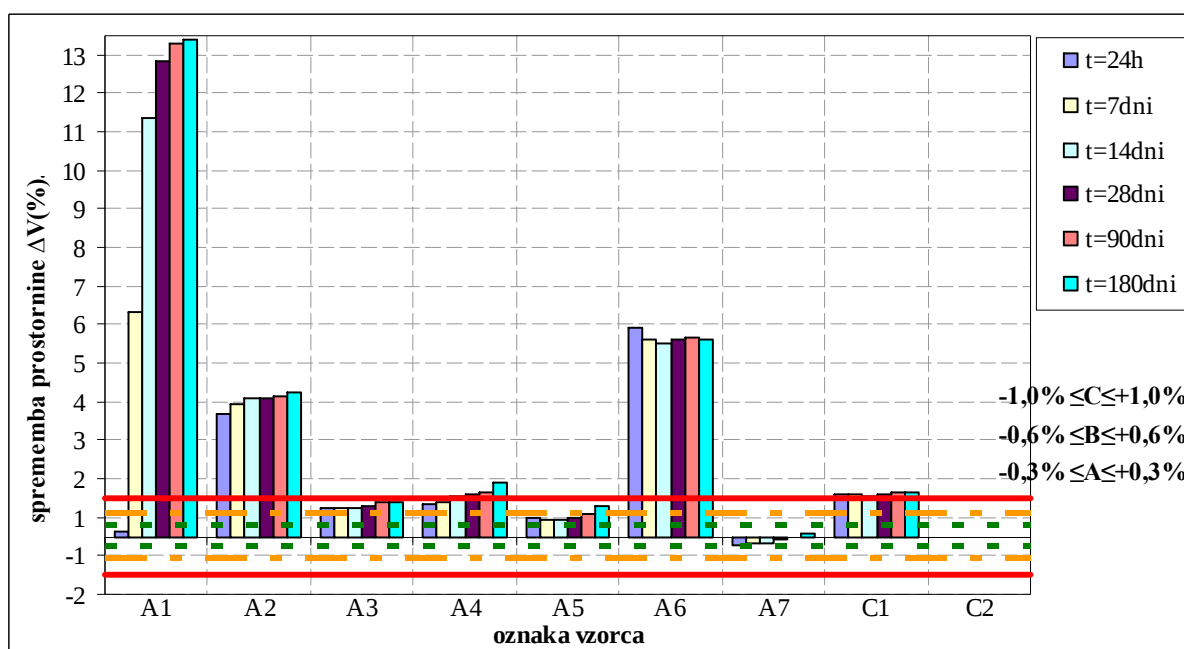
h_1 - začetna globina mešanice (mm)

h_2 - globina mešanice v izbranem časovnem intervalu (mm)



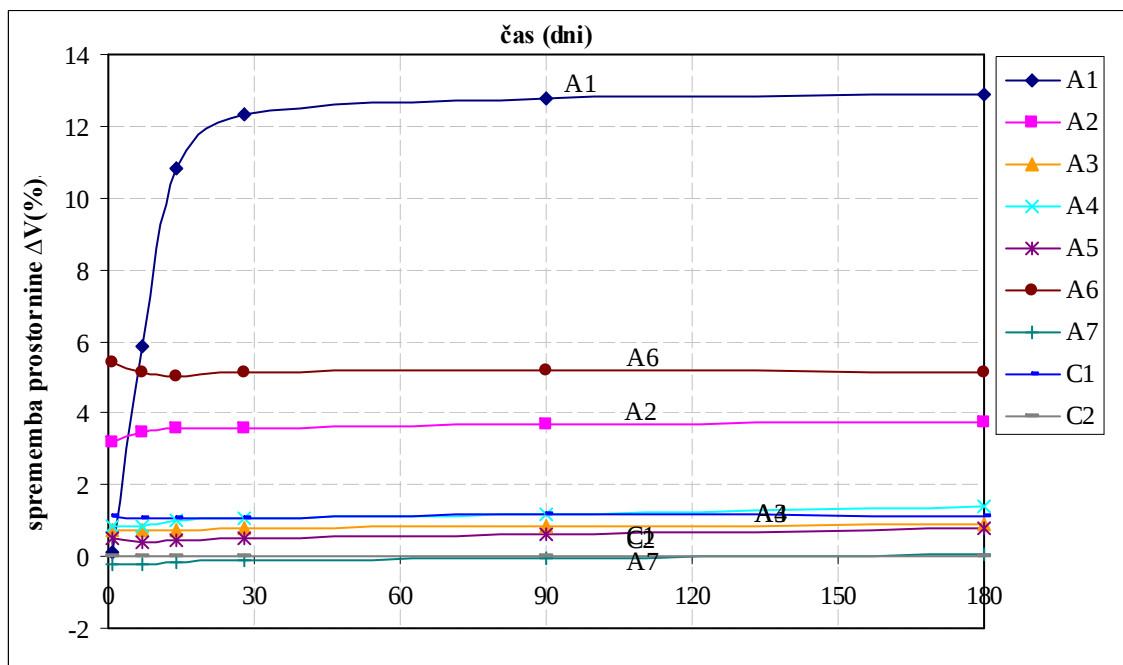
Slika 5.13: Merjenje spremembe prostornine na valjih

Fig. 5.13: Measurements of volume change on cylinders



Slika 5.14: Sprememba prostornine (ΔV) v % s prikazom kriterijev, izmerjena v šestih obdobjih

Fig. 5.14: Volume change (ΔV) in % with criterion, measured in six time periods



Slika 5.15: Prikaz spreminjanja prostornine (ΔV) v % s časom

Fig. 5.15: Volume change (ΔV) in % in different time periods

Standard EN447, ki obravnava injekcijske mešanice za prednapeta sidra sicer dovoljuje spremembo prostornine v intervalu od $\Delta V = +1$ % do $\Delta V = -5$ %. V našem primeru smo dopustno spremembo prostornine omejili z maksimalno oziroma minimalno vrednostjo $\Delta V = \pm 1,0$ % za mešanice kakovostnega razreda C, $\Delta V = \pm 0,6$ % za razred B in $\Delta V = \pm 0,3$ % za razred A. Standard EN-445, v skladu s katerim smo izvajali meritve spremembe prostornine, predvideva zgolj meritev po 24 urah.

Izmerjene vrednosti kažejo (Slika 5.14 in Slika 5.15), da pride do povečanja prostornine samo pri mešanicah A7 in C2, ostale mešanice kažejo tendenco zmanjševanja prostornine. Sprememba prostornine je tako glede na spremembe med posameznimi časovnimi intervali kot tudi glede na končno izmerjeno vrednost najbolj izrazita pri mešanici A1, kjer doseže vrednost do $\Delta V = 12$ %, mejne vrednosti pa so presežene tudi pri mešanicah A2 ($\Delta V = 3,5$ %) in A6 ($\Delta V = 5$ %).

5.1.3.2 Prostorninska masa strjene mešanice

Prostorninsko maso strjene injekcijske mešanice smo določevali v treh časovnih obdobjih pri starosti preskušancev 28, 90 in 180 dni po standardu SIST EN 1015-10:2001/A1:2007. Pri določevanju prostorninske mase smo vsak preskušanec premerili in stekali. Pri tem se nismo dosledno držali določil standarda, ki zahteva sušenje preskušancev do konstantne mase pri temperaturi 105 ± 5 °C, ker

nas je zanimala sprememba prostorninske mase, izvednotene v različnih časovnih obdobjih. Prostorninsko maso strjene mešanice smo izračunali po enačbi 5.9:

$$\rho = m / V \quad (5.9)$$

Kje je:

ρ – prostorninska masa preskušanca (kg/m^3)

m – masa preskušanca (kg)

V – prostornina preskušanca (m^3)

Preglednica 5.3: Prostorninska masa strjene mešanice, izvednotena v treh časovnih obdobjih

Table 5.3: Bulk density of hardened injection grout in three time periods

Oznaka vzorca	Prostorninska masa strjenih preskušancev (ρ), izvednotena v treh časovnih obdobjih		
	t=28 dni	t=90 dni	t=180 dni
	ρ (kg/m^3)	ρ (kg/m^3)	ρ (kg/m^3)
A1	1647*	1373	1377
A2	1305	1400**	1431
A3	1408	1467**	1450
A4	1430	1356	1342
A5	1385	1361	1365
A6	1679	1620	1597
A7	1479	1518**	1527
C1	1817	1815	1806
C2	1699	1683	1687

Pri vzorcu A1, ki smo ga označili z (*), je prišlo do višjih vrednosti po 28d neh, kot pri sveži injekcijski mešanici. Razlog za to je, da so bile izmed devetih narejenih prizem pri starosti 28 dni stehtane in preskušene tri prizme, ki so bile najbolj homogene. Za razliko od ostalih vzorcev, pri katerih je prišlo do segregacije polnila in formacije apnene plasti v zgornjem in cementne v spodnjem delu, je bila pri preskušanih vzorcih porazdelitev apna in polnila v prerezu dokaj homogena, prispevek polnila pa večji kot pri ostalih vzorcih, kar se posledično kaže v višji prostorninski masi.

Pri vzorcih A2 , A3, A7 z oznako (**) je prišlo do višjih vrednosti prostorninske mase v obdobju 90 dni kot pri 28 dneh. Slednje je pripisati sicer homogeni, vendar porozni strukturi z dokaj visoko vsebnostjo apna, zaradi česar so pri teh vzorcih visoke tudi vrednosti kapilarnega srka. Na prizmah, ki so bile negovane v vlažni komori, je najverjetneje iz istega razloga prihajalo do absorbcije vlage in s tem višjih vrednosti prostorninske mase.

5.1.3.3 Upogibna natezna trdnost

Upogibna natezna trdnost strjene injekcijske mešanice je bolj kot njena tlačna trdnost parameter, ki med ostalimi (sprijemna trdnost in cepilna natezna trdnost) kaže na sposobnost mešanice, da zagotovi ustrezno povezanost posameznih slojev zidu.

Upogibno natezno trdnost smo določali po EN 1015-11 na prizmah 40/40/160 mm s tritočkovnim upogibnim preskusom. Hitrost naraščanja pomika naprave za preskušanje je znašala 0,05 mm/s, zasnova preizkusa je prikazana na spodnji sliki 5.17. Upogibno natezno trdnost izračunamo po enačbi 5.10:

$$f_t = (1,5 \cdot F \cdot l) / (b \cdot d^2) \quad (5.10)$$

kjer je:

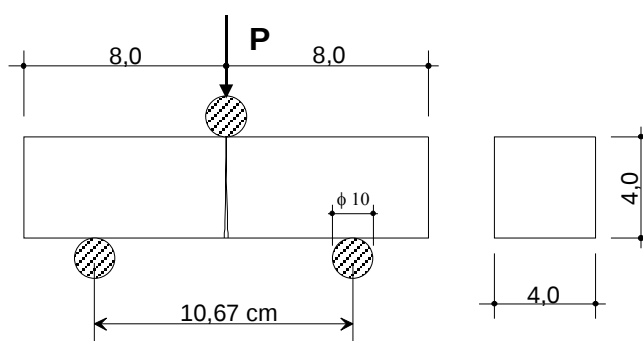
f_t – upogibna natezna trdnost preskušanca (MPa)

F – maksimalna dosežena sila (kN)

l – razmik med podporama (cm)

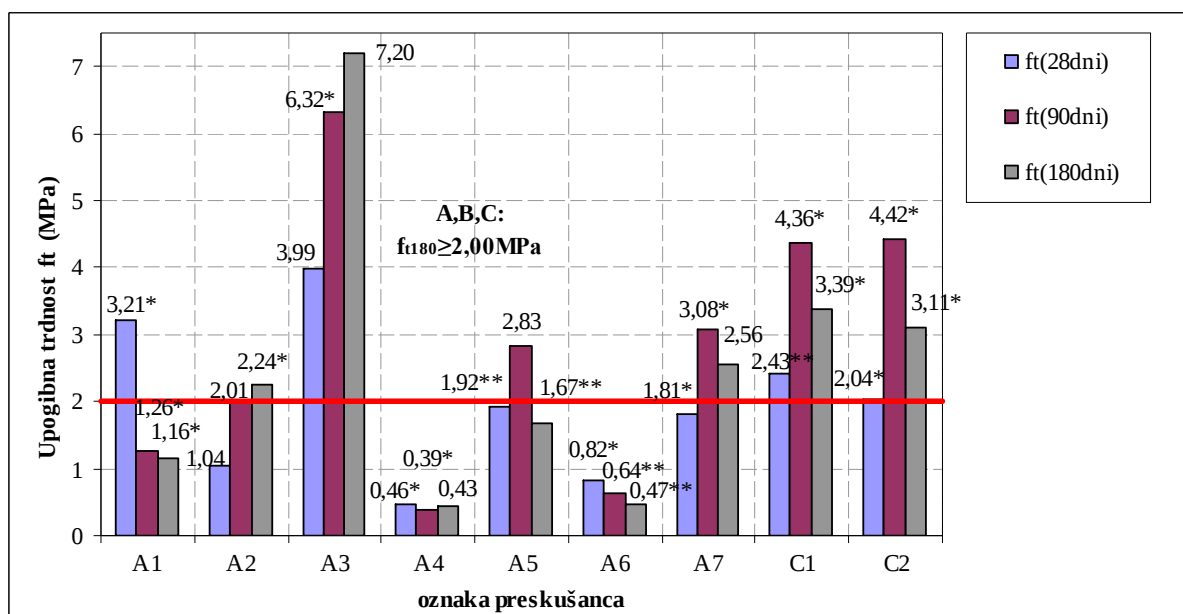
b – širina preskušanca (cm)

d – višina preskušanca (cm)



Slika 5.16: Zasnova preizkusa upogibne natezne trdnosti

Fig. 5.16: Scheme of flexural strength test



Slika 5.17: Upogibne trdnosti preskušancev, iz vrednotene v treh časovnih obdobjih

Fig. 5.17: Flexural strength of specimens in three time periods

Kriterij za minimalno upogibno trdnost v starosti 180 dni smo povzeli po Miltiadoujevi (Miltiadou., 2007), ki je postavila zahtevano vrednost upogibne trdnosti na $f_t \geq 2$ MPa. Kriterij je bil upoštevan za vse kategorije objektov (A, B in C). Daleč pod postavljenim kriterijem so iz vrednotene vrednosti vzorcev A4 in A6. Slednje je značilno za kombinirane mešanice, pri katerih je delež cementa v kompoziciji manjši od 30 % utežno (Van Gemert in sod., 1999). Ostali preskušanci, razen A7 so zadostili zahtevam kriterija.

Pri večini meritev upogibne natezne trdnosti je bil raztros rezultatov precej velik. Standard EN 1015-11 v takih primerih predvideva izločitev vzorcev, pri katerih so srednje vrednosti presežene za več kot 10 %, oziroma ponovitev preiskav, če je po izločitvi preostalo število preskušancev manjše od tri. Ker zaradi časovnih in materialnih omejitev nismo imeli možnosti ponovitve preiskav, se v teh primerih nismo dosledno držali standarda, temveč smo kot merodajno upoštevali vrednost aritmetične sredine vseh opravljenih preizkusov. Pri vseh serijah smo izračunali standardni odklon in rezultate, pri katerih je prišlo do večjih odstopanj označili: *serija, pri kateri je prišlo do več kot 10 % odstopanja posameznega rezultata od povprečja in **serija, pri kateri je prišlo do več kot 10 % odstopanja posameznega rezultata od povprečja, sočasno pa je koeficient variacije presegel 30 %. Standardna deviacija pri preiskavah upogibne natezne trdnosti pri 28 dni starih preskušancih je znašala med 0,07 in 0,84 MPa, koeficient variacije pa med 6,36 in 43,61 %. Pri 90 dni starih preskušancih so se vrednosti standardne deviacije gibale med 0,07 in 0,60 MPa, vrednosti koeficienta variacije pa med

3,48 in 32,43 %. Standardna deviacija pri 180 dni starih preskušancih je znašala med 0,15 in 0,58 MPa, koeficient variacije pa med 6,68 in 32,91 %. Ne glede na velik raztros in nehomogenost rezultatov je iz slike 5.17 mogoče razbrati določene trende. Pri vseh apnenih mešanicah, razen A2, in sicer A1, A4 in A6, je evidenten padec upogibnih nateznih trdnosti v obdobju od 28 do 90 dni. Pri večini mešanic (izjema so A2, A3 in A4) so se upogibne natezne trdnosti zmanjševale tudi v obdobju od 90 do 180 dni. Kot najbolj stabilni glede meritev upogibnih nateznih trdnosti sta se izkazali mešanici A2 in A3, pri katerih je razviden trend postopnega naraščanja upogibnih nateznih trdnosti v posamrnih časovnih obdobjih.

Padec upogibnih nateznih trdnosti v obdobju od 60 do 180 dni je pri kombiniranih mešanicah z manj kot 10 % cementa evidentirala tudi Toumbakarijeva (Toumbakari, 2002). Pri njih je prišlo po 180 dneh do praktično ničelnih vrednosti upogibnih trdnosti. Pri preiskavah mešanic s 30 % deležem cementa je analizirala naraščanje upogibnih nateznih trdnosti do 90. dne, nato pa manjši padec pri 180. dnevu preiskave. Avtorica razlog za takšno obnašanje pripiše mikrorazpokam v strukturi materiala. Z dodatnimi raziskavami je pokazala, da je glavni razlog za nastanek mikrorazpok kombiniranih cementno-apnenih mešanic razlika med zunanjo površino vzorca, ki je že karbonatizirala in ostalimi deli, največkrat v notranjosti vzorca, kjer je hidratacija še potekala. Hidratacija in poculanske reakcije, ki povzročajo krčenje, vsiljujejo natezne napetosti, katerih posledica so mikrorazpoke na stičiščih karbonatiziranega (inertnega) in nekarbonatiziranega dela vzorca. Toumbakarijeva ugotavlja, da so vzorci oziroma mešanice, ki vsebujejo vsaj 30 % cementa, bolj odporne na tvorbo mikrorazpok in posledično zmanjševanje upogibnih trdnosti, kot tiste, pri katerih delež cementa znaša le 10 %. Zaključuje, da je zato minimalno potrebni delež cementa v kompoziciji 30 %.

Tudi ostali avtorji so pri preiskavih vzorcev injekcijskih mešanic opazili podoben pojav. Tako je Kalagri (Kalagri in sod., 2007) pri meritvah upogibnih nateznih trdnosti vzorcev apnenih injekcijskih mešanic starih 28, 90 in 180 dni evidentiral padec vrednosti v posameznih časovnih obdobjih. Slednje je pripisal intenzivnemu procesu karbonatizacije v obdobju med 90. in 180. dnem, kar je vodilo do formacije mikrorazpok in posledičnega zmanjšanja upogibnih nateznih trdnosti. Avtor poudarja, da tako intenzivnega procesa karbonatizacije zaradi omejenega dostopa CO₂ iz zraka ni pričakovati v notranjosti utrjenega zidu.

5.1.3.4 Tlačna trdnost

S sistematičnim injektiranjem se poleg nosilnosti zidu, v primerih ko so mehanske lastnosti injekcijske mešanice boljše kot mehanske lastnosti obstoječega veziva v zidu, poveča tudi togost zidu. Če želimo

ohraniti - vsaj do neke mere - duktilno obnašanje zidu, ki ga utrjujemo, se morajo tlačne trdnosti injekcijske mešanice gibati v okvirih tlačnih trdnosti obstoječega veziva v zidu.

Enoosno tlačno preiskavo smo izvajali po standardu EN 1015-11, in sicer na preostalih polovičkah prizem, na katerih smo določili upogibno trdnost. Polovičke imajo izmere približno 40/40/80 mm. Preskušance smo obremenjevali preko jeklenih ploščic dimenzij 40/40/12 mm. Zasnova preizkusa tlačne trdnosti je prikazana na sliki 5.19. Tlačno trdnost preskušanca smo izračunali po enačbi 5.11.

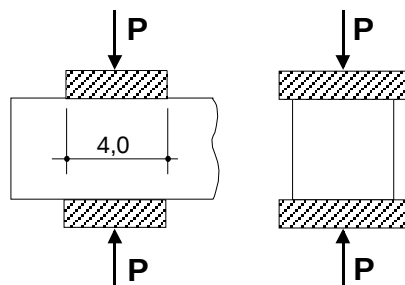
$$f_c = F / a^2 \quad (5.11)$$

kjer je:

f_c – tlačna trdnost preskušanca (MPa)

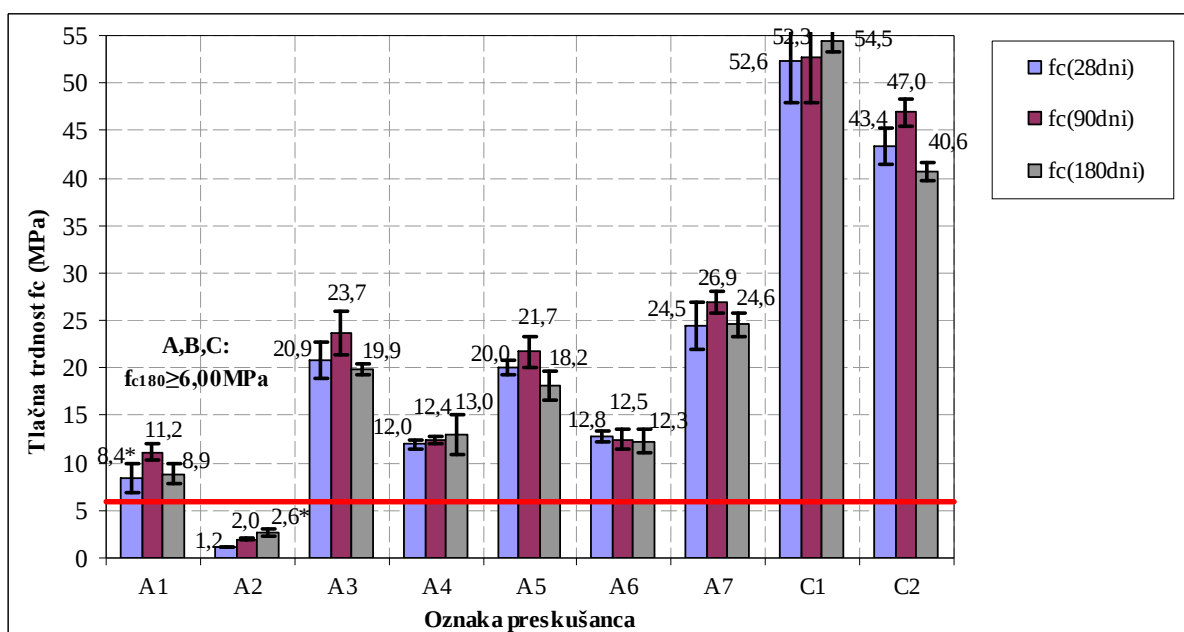
F – maksimalna dosežena sila (kN)

a – širina preskušanca (cm)



Slika 5.18: Zasnova preizkusa tlačne trdnosti

Fig. 5.18: Scheme of compressive strength test



Slika 5.19: Tlačna trdnost preskušancev iz vrednotena v treh časovnih obdobjih

Fig. 5.19: Compressive strength of specimens in three time periods

Ne glede na zahteve po ohranitvi duktilnosti zidu, ki v praksi zahteva preiskave mehanskih lastnosti osnovnega veziva, na podlagi katerih je nato mogoče določiti primerljive mehanske lastnosti injekcijske mešanice, smo, da bi dobili medsebojno primerjavo analiziranih mešanic, kriterij tlačne trdnosti injekcijske mešanice povzeli po Miltiadoujevi (Miltiadou., 2007), ki ga je ocenila v razponu 6-10 MPa. Zahtevo $f_c \geq 6$ MPa smo za vse kakovostne razrede (A, B in C), upoštevali tudi v našem primeru. Kriterij so presegli vsi preskušanci, razen A2, kjer smo izmerili dokaj majhne vrednosti ($f_c=1,15-1,96$ MPa). Poleg cementnih (C1 in C2) so kriterij znatno presegli preskušanci A3, A5 in A7, kar je lahko pokazatelj večje vsebnosti cementa v kompoziciji.

Pri meritvah tlačnih trdnosti je bil raztros rezultatov precej manjši, kot pri meritvah upogibnih trdnosti, do več kot 10 % odstopanja posameznega rezultata od povprečja je prišlo samo pri vzorcu A1, ki smo ga istosmiselno kot pri prikazu upogibnih trdnosti označili z *. Standardna deviacija je v preiskavah tlačnih trdnosti preskušancev pri starosti 28 dni znašala med 0,02 do 2,68 MPa, koeficient variacije pa med 1,51 in 12,19 %. Pri 90 dni starih preskušancih so se vrednosti standardne deviacije gibale med 0,05 in 2,94 MPa, vrednosti koeficienta variacije pa med 1,93 in 6,07 %. Standardna deviacija pri preskušancih, starih 180 dni, je znašala med 0,22 in 1,32 MPa, koeficient variacije pa med 1,37 in 10,19 %.

Pri vseh analiziranih mešanicah, razen pri A6, tlačne trdnosti v obdobju od 28 do 90 dni naraščajo. Nasprotno pride pri večini mešanic v obdobju od 90 do 180 dni do padca vrednosti tlačnih trdnosti. Izjema so mešanice A2, A4 in C1, ki edine izkazujejo postopen prirastek izmerjenih tlačnih trdnosti v različnih časovnih obdobjih.

Tako kot pri upogibnih nateznih trdnostih so avtorji tudi pri meritvah tlačnih trdnosti (Kalagri in sod., 2007) pri apnenih injekcijskih mešanicah in Toumbakari pri kombiniranih cementno-apnenih injekcijskih mešanicah (Toumbakari, 2002) opazili pojav zmanjševanja izmerjenih vrednosti predvsem v obdobju med 90 in 180 dni starosti vzorcev.

5.1.3.5 Cepilna natezna trdnost

Cepilna natezna trdnost je poleg sprijemne trdnosti pomemben pokazatelj sposobnosti injekcijske mešanice, da zagotovi kakovostno medsebojno povezavo posameznih gradnikov in slojev zidu. Preiskavo cepilne natezne trdnosti smo izvajali po standardu SIST EN 12390-6 na 90 dni starih preskušancih, vrednosti pa izračunali po enačbi 5.12:

$$f_{ct} = (2 \cdot F) / (\pi \cdot l \cdot d) \quad (5.12)$$

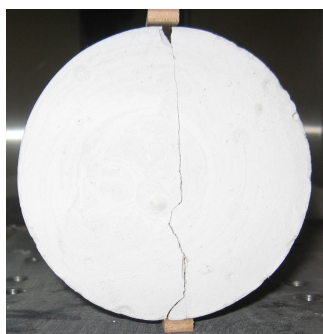
kjer je:

f_{ct} – cepilna natezna trdnost preskušanca (MPa)

F – maksimalna sila (kN)

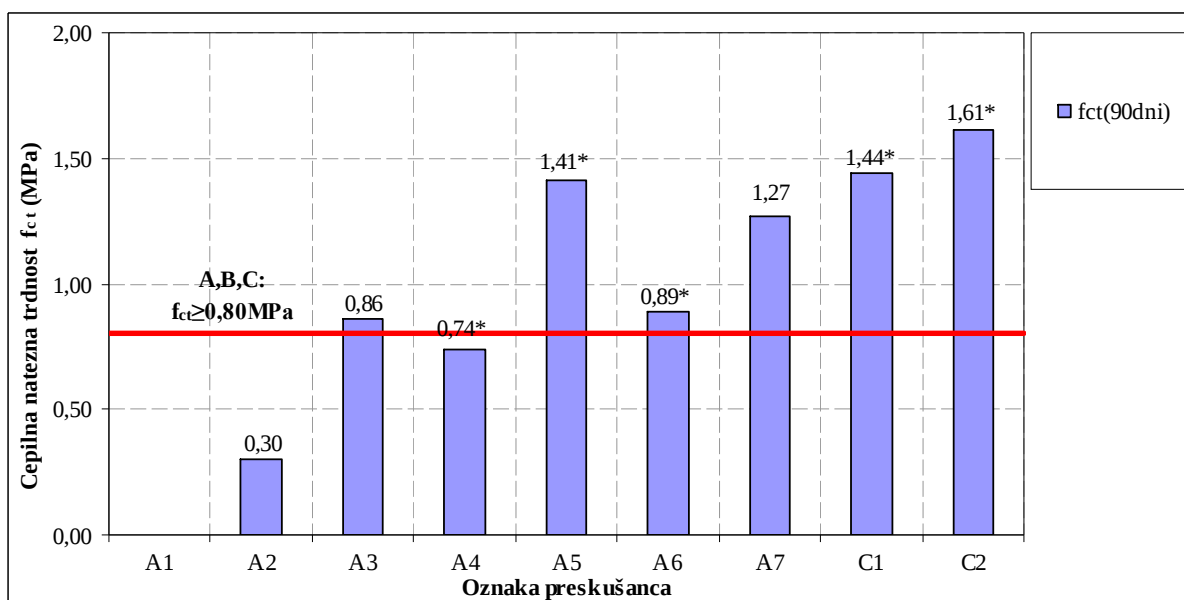
l – dolžina preskušanca (cm)

d – premer preskušanca (cm)



Slika 5.20: Preskušanelec po preiskavi cepilne natezne trdnosti

Fig. 5.20: Specimen after tensile splitting test



Slika 5.21: Cepilna natezna trdnost preskušancev, izvrednotena po 90 dneh

Fig. 5.21: Tensile splitting strength of specimens after 90 days

Rezultati na sliki 5.21 označeni z zvezdico, istosmiselno kot pri preiskavah tlačnih in upogibnih trdnosti, pomenijo, da je prišlo do več kot 10 % odstopanja posameznega rezultata od povprečja. Standardna deviacija rezultatov cepilnih nateznih trdnosti znaša med 0,01 in 0,32 MPa, medtem ko se koeficient variacije giblje med 3,55 in 25,78 %. Ugotovitve raziskovalcev na področju utrjevanja večslojnih kamnitih zidov z injektiranjem kažejo, da je natezna trdnost poleg sprijemne trdnosti s posameznimi gradniki zidu bistvena lastnost injekcijske strjene injekcijske mešanice. Pri preizkusu cepilne natezne trdnosti gre v bistvu za indirektni natezni preizkus. Za vse kakovostne razrede (A, B in C) smo upoštevali kriterij $f_{ct} \geq 0,80$ MPa, ki mu ne zadostita samo mešanici A1 in A2.

Po pričakovanju sta najvišje vrednosti dosegli cementni injekcijski mešanici C1 in C2, in sicer $f_{ct}=1,44$ in $f_{ct}=1,61$ MPa. Med kombiniranimi cemetno-apnenimi injekcijskimi mešanicami prednjačita A5 z $f_{ct}=1,41$ MPa in A7 z $f_{ct}=1,24$ MPa. Najboljši rezultat med apnenimi dosega A6, in sicer $f_{ct}=0,89$ MPa. Najnižjo iz vrednoteno vrednost cepilne natezne trdnosti izkazuje mešanica A2 z $f_{ct}=0,30$ MPa, medtem ko pri mešanici A1 zaradi lokalnih odkruškov in razpok, potekajočih po celotnem prerezu vzorca, preiskav nismo mogli opraviti.

5.1.3.6 Meritve sprijemne trdnosti - »pull off« test

Dobra sprijemnost s podlago je bistvenega pomena za kakovostno povezavo vgrajene injekcijske mešanice s kamnom, drobirjem in obstoječim vezivom v zidu, ki ga utrjujemo. Sprijemna trdnost med injicirano mešanico in posameznimi gradniki zidu, ki ga utrjujemo, je med ostalim odvisna tudi od stanja površin v notranjosti zidu. Tako gladke ali prašnate površine zmanjšujejo adhezijo med injicirano mešanico in gradniki zidu.

Sprijemno trdnost posamezne mešanice na podlago smo preskušali po standardu SIST EN 1015-12:2001 na 90 dni starih preskušancih. Meritve smo izvajali na dveh različnih substratih kamnitih podlog iz apnenca in peščenjaka, ki se pogosto uporabljata za gradnjo kamnitih objektov na področju Slovenije. Površina kamnitih plošč dimenzij 30/30/3 cm je bila po razrezu obdelana s peskanjem s suhim sejanim kremenčevim peskom granulacije 0,10-0,35 mm, pred vgradnjo mešanice pa razprašena in očiščena. Posamezne mešanice so bile na kamnita substrata apnenec in peščenjak vlite v debelini $d=10$ mm. Da bi omejili krčenje zaradi velike površine v primerjavi z debelino sloja nanešene mešanice, zaradi katerega bi lahko prišlo do odstopanja in posledično nerealnih rezultatov, smo, preden se je mešanica strdila, na vsakem preskušancu z jeklenim prstanom izdelali 5 krožnih utorov premera $d=5$ cm za potrebe kasnejših preiskav.

Preskušance smo negovali v komori pri temperaturi 20 ± 2 °C in relativni vlažnosti 65 ± 5 % in po preteku 90 dni izvedli preiskus sprijemne trdnosti (»pull off« test), pri čemer smo upoštevali enačbo 5.13:

$$f_u = F_u / A \quad (5.13)$$

kjer je:

f_u – sprijemna trdnost (N/mm² oz. MPa)

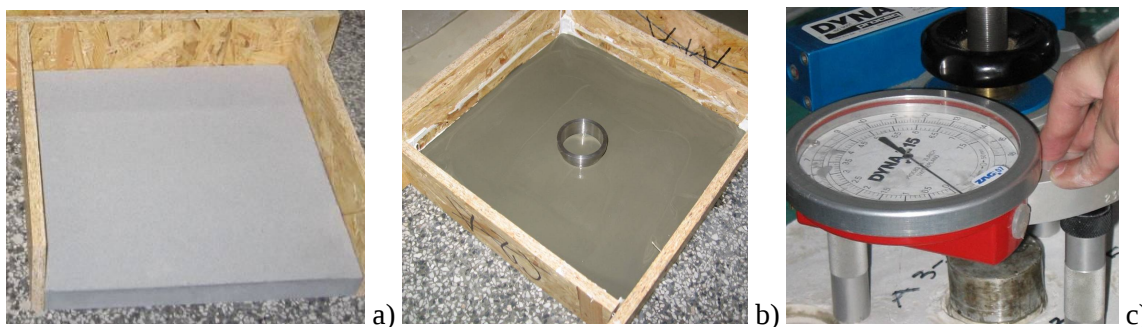
F_u – sila pri porušitvi (N)

A – testna površina (mm²)

Pri preiskavi so možni trije različni načini porušitev:

- adhezijska porušitev na stiku mešanice in substrata (dejanska sprijemna trdnost je enaka izmerjeni vrednosti)
- kohezijska porušitev v mešanici (dejanska sprijemna trdnost je večja od izmerjene vrednosti)
- kohezijska porušitev v substratu (dejanska sprijemna trdnost je večja od izmerjene vrednosti)

Pri vseh mešanicah je prišlo ne glede na vrsto substrata do adhezijske porušitve na stiku mešanice in substrata, v nobenem primeru ni bila sprijemna trdnost med mešanico in kamnom višja od natezne trdnosti mešanice (v tem primeru bi prišlo do kohezijske porušitve v mešanici).



Slika 5.22: a) Opaženje kamnite podlage-substrat, b) izvedba krožnih utorov v delno strjeni mešanici, c) izvedba »pull off« testa

Fig. 5.22: a) Panelling of substrate, b) execution of circular grooves in partly hardened injection grout, c) execution of »pull off« test

Preglednica 5.4: Sprijemna trdnost f_u na dveh substratih: apnencu in peščenjaku

Table 5.4: Adhesive strength f_u on two substrates: limestone and sandstone

Oznaka vzorca	Sprijemna trdnost f_u (MPa)	
	apnenec	peščenjak
f_{uA1}	0,10	0,09
stdev	0,00	0,07
c.o.v. (%)	0 %	72 %
f_{uA2}	0,08	0,09
stdev	0,02	0,03
c.o.v. (%)	29 %	29 %
f_{uA3}	0,10	0,22
stdev	0,04	0,06
c.o.v. (%)	35 %	26 %
f_{uA4}	*	*
stdev	/	/
c.o.v. (%)	/	/
f_{uA5}	0,25	0,18
stdev	0,07	0,04
c.o.v. (%)	28 %	20 %
f_{uA6}	*	*
stdev	/	/
c.o.v. (%)	/	/
f_{uA7}	*	0,22
stdev	/	0,16
c.o.v. (%)	/	72 %
f_{uC1}	0,14	0,19
stdev	0,02	0,02
c.o.v. (%)	16 %	50 %
f_{uC2}	0,19	0,21
stdev	0,07	0,16
c.o.v. (%)	35 %	74 %

*c.o.v. – koeficient variacije

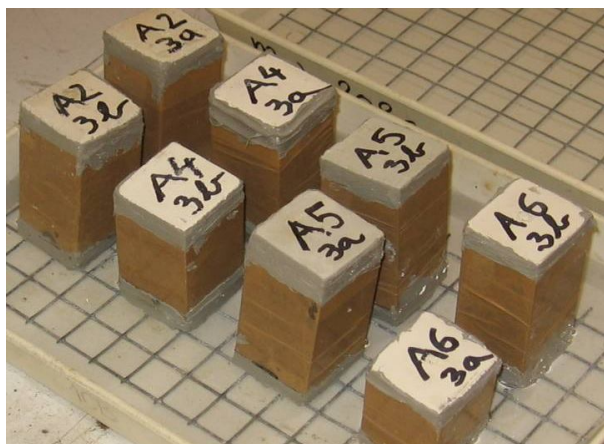
V preglednici 5.4 so prikazane izmerjene vrednosti sprijemne trdnosti na dveh različnih podlagah in vrednosti standardnega odklona, ki kažejo na to, da je bil raztros rezultatov precej velik. Pri tem z * označena polja pomenijo, da so bile vrednosti premajhne, da bi jih bilo mogoče iz vrednotiti z uporabljenim preskuševalno napravo. Pri obeh substratih je bila hrapavost enaka, razlika med peščenjakom in apnencem je bila predvsem v poroznosti, kar je pokazala tudi preiskava kapilarnega dviga (točka 5.1.5). Za vse kakovostne razrede (A, B in C) in vrste podlage smo upoštevali kriterij $f_u \geq 0,10$ MPa, ki ga niso dosegle mešanice A2, A4, A6 in A7.

Večja poroznost peščenjaka je tisti fizikalni parameter, zaradi katerega so bile izmerjene sprijemne trdnosti pri vseh mešanicah razen pri mešanici A5 višje v primerih, ko je bil kot substrat uporabljen peščenjak.

5.1.3.7 Koeficient kapilarnega vpijanja vode

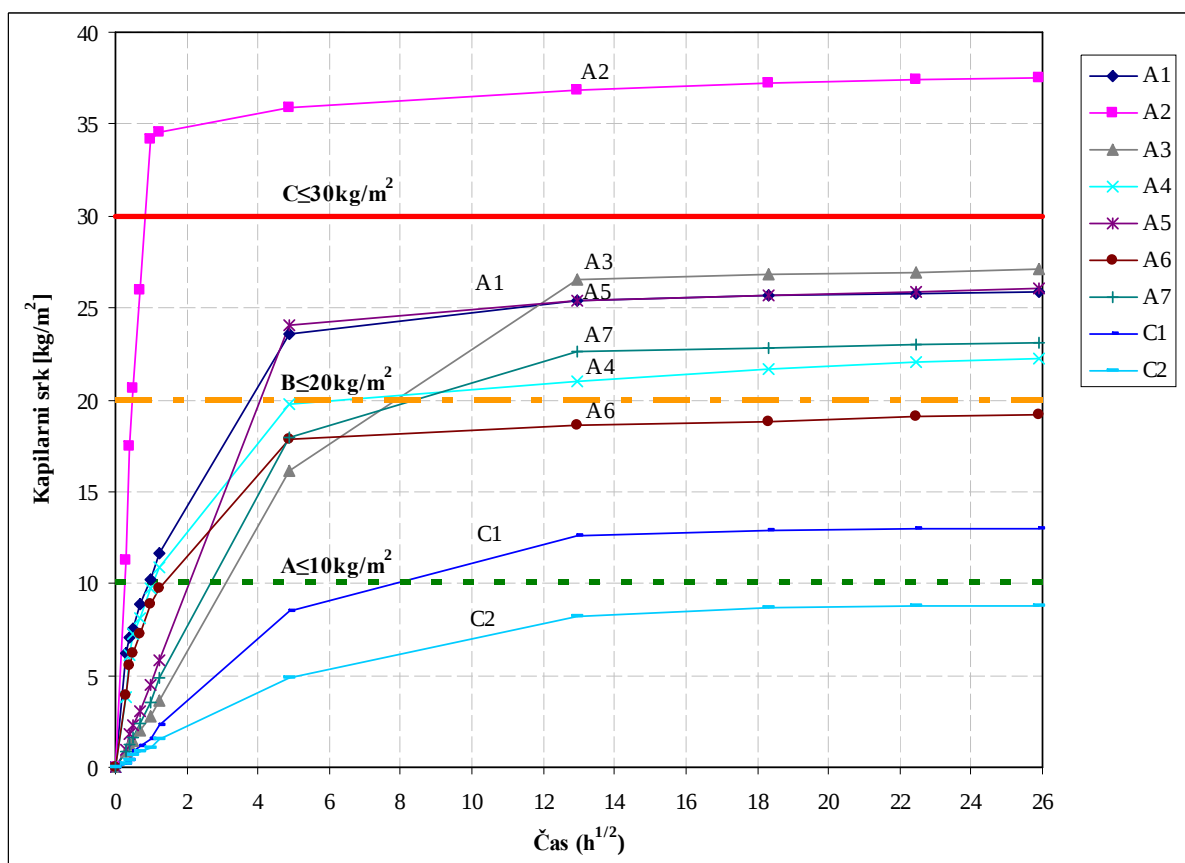
Pri injekcijskih mešanicah stremimo k temu, da bi kapilarni dvig oziroma transport vode in posledično škodljivih snovi v zidu preprečili. Pri vrednotenju vrednosti kapilarnega vpijanja nas je sicer bolj kot hitrost zasičenja posameznega vzorca zanimala končna količina vsrkane vode.

Koeficient kapilarnega vpijanja vode smo določali po (modificiranem) standardu SIST EN 1015-18:2004. Za določitev koeficienta kapilarnega vpijanja vode sta bila za vsako izmed analiziranih injekcijskih mešanic uporabljena dva preskušanca, in sicer polovici prizem 4/4/16 cm, preostali po opravljenem preizkusu upogibne natezne trdnosti. Preskušanci so bili do starosti 28 dni negovani v komori s kontrolirano atmosfero (temperatura 20 ± 2 °C, vlažnost >65 %), nato pa so bile po preizkusu upogibne natezne trdnosti stranske ploskve preskušancev oblepljene z lepilnim trakom in silikonskim kitom z namenom preprečitve izhlapevanja vode na straneh, medtem ko so sta zgornja in spodnja ploskev ostali neoblepljeni. Preskušanci so bili s prelomljeno ploskvijo spodaj (slika 5.24), postavljeni v posodo z 1 cm vode. Količina vsrkane vode je bila določena na podlagi razlike med težo preskušancev, ki so bili stehtani v različnih časovnih intervalih, in sicer 0 min. (suh vzorec), 5 min., 10 min., 15 min., 30 min., 60 min., 90 min., 1 dan, 7 dni, 14 dni, 21 dni in 28 dni.



Slika 5.23: Preiskava kapilarnega vpijanja vode

Fig. 5.23: Water absorbtion test of specimens



Slika 5.24: Rezultati meritev kapilarnega srka prizem v različnih časovnih obdobjih

Fig. 5.24: Results of water absorption due to capillary action in different time periods

Omejitve maksimalnih vrednosti kapilarnega srka smo postavili na 10 kg/m^2 za kakovostni razred A, 20 kg/m^2 za kakovostni razred B in 30 kg/m^2 za kakovostni razred C. V razred A se tako uvrščajo vzorci C2, v razred B vzorci A6, A7 in C1, v razred C pa A3, A4 in A5. Maksimalna dopustna vrednost kapilarnega srka 30 kg/m^2 je bila presežena samo pri vzorcih A2.

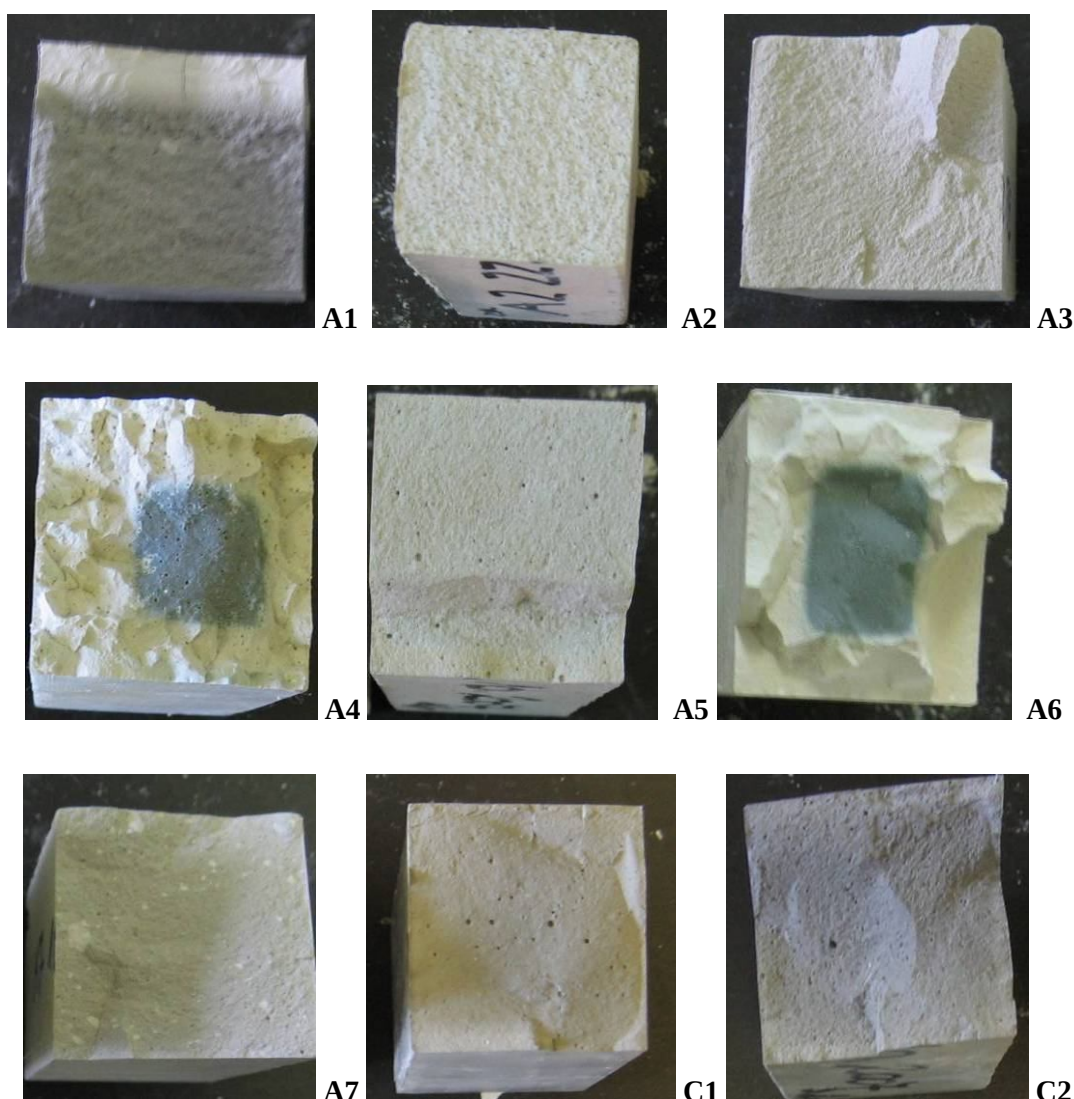
Rezultati kažejo, da pri večini vzorcev (razen pri C1 in C2) pride po preteku 24 ur do ca. 90 % zasičenosti vzorca z vodo. Pri praktično vseh vzorcih pri 21 dnevu preiskave ni več prihajalo do sprememb, oziroma se je srk vode ustavil (97,3 do 99,5 % končne vrednosti teže vzorca), medtem ko so bile v začetnih fazah preiskave jasno vidne razlike med posameznimi vzorci. Tako sta po prvih 5 minut preiskave cementni mešanici (C1, C2) in kombinirane cementno-apnene mešanice (A3, A5, A7) absorbirale zgolj med 1,5 in 3,8 % končne vrednosti, apnene mešanice (A1, A2, A4, A6) pa že od 17,0 do 30,1 %. Po 90 min preiskave so vrednosti pri cementnih mešanicah dosegle 16,8-17,9 %, pri kombiniranih cementno-apnenih 13,4-22,4 %, pri apnenih pa 44,8-92,0 %.

Daleč največjo količino vode so vsrkali vzorci A2, in sicer je po končani preiskavi količina vsrkane vode na pripadajočo površino znašala $\Delta W/A=37,53 \text{ kg/m}^2$. Pri ostalih apnenih (A1, A4 in A6) in cementno-apnenih mešanicah (A3, A5 in A7) je končna vrednost kapilarnega srka znašala med 19,16 in $27,13 \text{ kg/m}^2$, najmanj vode sta vsrkali cementni mešanici, in sicer C1 $12,97 \text{ kg/m}^2$, C2 pa le $8,83 \text{ kg/m}^2$.

Kapilarno vpojnost vode pri strjeni injekcijski mešanici je sicer mogoče uspešno zmanjšati s hidrofobnimi dodatki. Kot sta ugotavljala Tomaževič in Apihova (Tomaževič., Apih, 1993) se v primeru ko hidrofoben dodatek predstavlja 10 % mešanice sestavljene iz 45 % cementa in 45 % kremenčevega peska (v masnem razmerju) količina vode, ki jo vzorci vpijejo na m^2 površine v 24 urah zmanjša za več kot 70 %. Hidrofobni dodatki so manj učinkoviti, če kremenčev pesek zamenjamo z apnenčevim, v tem primeru se pri enakih pogojih vodovpojnost zmanjša za 30 %.

5.1.3.8 Materialna homogenost in kompaktnost vzorcev

V sklopu preiskav strjene injekcijske mešanice smo vizualno ocenjevali tudi homogenost materiala in kompaktnost posameznih vzorcev. Opis posameznih vzorcev je podan v nadaljevanju, na sliki 5.25 pa je prikazan tudi prerez posameznega vzorca - prizme po preizkusu upogibne natezne trdnosti pri starosti 28dni.



Slika 5.25: Prerez vzorcev po preiskavi upogibne natezne trdnosti

Fig. 5.25: Cross section of specimens after flexural strength test

Vzorci A1 so bili izrazito nehomogeni, saj smo pri večini vzorcev evidentirali segregacijo v spodnjem delu prereza, medtem ko so se na strjenem apnu v zgornjem delu preskušancev pojavile razpoke v celotnem apnenem sloju, pri čemer je pri nekaterih prizmatičnih preskušancih to pomenilo razpokanost do polovice celotnega prereza. Razpoke valjastih preskušancev so segale globoko v prerez valja, na površini pa je prišlo do odstopanja v posameznih plasteh.

Ker je šlo v primeru mešanice A1 za apneno in ne kombinirano cementno-apneno mešanico, lahko sklepamo, da gre v segregiranem delu za polnilo, dodano apnenemu vezivu. Ker mešanica A1 pri prvem zamešanju ob upoštevanju predpisane potrebe po vodi ni dosegla pretočnosti, deklarirane v tehničnem listu, smo, da bi dosegli deklarirano pretočnost, delež dodane vode povečali. Pretočnost se

je tako sicer izboljšala, vendar pa je prišlo do omenjene nehomogenosti vzorcev. Zaradi možnosti neustreznosti materiala v dobavljeni šarži, smo mešanico A1 ponovno testirali, tokrat z drugo šaržo. Ponovno smo naleteli na iste težave kot prvič: deklarirane pretočnosti z predpisanim deležem dodane vode ni bilo mogoče doseči. Možno je sicer, da bi ob upoštevanju predpisanega deleža potrebne vode za pripravo mešanice A1 dobili homogene vzorce, vendar pa, vsaj pri uporabljenih dveh različnih šaržah materiala, ni bilo mogoče doseči minimalno zahtevanih pretočnosti.

Vzorci A2 in A3 so homogeni in kompaktni, brez razpok.

Vzorci A4 so dokaj homogeni s posameznimi zračni prostori, površina je tako pri prizmah kot valjih precej razpokana, prelom je nazobčan. Fenolftaleinski test kaže, da proces karbonatizacije po 90 dneh še poteka (karbonatiziran zunanji del prizme 5-8 mm, v jedru proces še ni zaključen).

Pri vzorcih A5 gre za homogen prerez s posameznimi zračnimi prostori, lokalno so na površini prisotne lasaste razpoke.

Vzorci A6 so homogeni, prelom po preiskavi je nazobčan. Fenolftaleinski test kaže, da proces karbonatizacije še poteka.

Vzorci A7 so materialno dokaj homogeni, v prerezu vidni posamezni nepovezani apneni delci velikosti 0,5-2 mm, posamezni zračni prostori.

Pri vzorcih C1 in C2 gre za homogen prerez s posameznimi zračnimi prostori, pri C1 so na površini lokalno prisotne lasaste razpoke.

5.1.4 Ocena mešanic in izbira ustreznih za nadaljnje preiskave

Vse izmed skupno devet analiziranih mešanic smo glede na rezultate in kriterije, določene v treh sklopih preliminarne preiskave, uvrstili v pripadajoči kakovostni razred. Uvrstitev v posamezen razred ali neizpolnjevanje kriterijev je prikazano v preglednici 5.5. Ker smo vsaki preiskavi pripisali enako utež, je prišlo v primeru, da mešanica ni izpolnjevala enega izmed kriterijev do izpada, ki je v preglednici 5.5 označen z **X**.

Preglednica 5.5: Izvedene preiskave in določitev kakovostnega razreda mešanice (A, B, C) glede na kriterije posameznih preiskav

Table 5.5: Performed tests and determining of quality class of injection grout (A, B, C) regarding the criteria of separate tests

KEMIJSKE PREISKAVE SUHE INJEKCIJSKE MEŠANICE								
Oznaka vzorca	Kloridi (Cl)	Sulfati (SO ₃)	Alkalije (Na ₂ O, K ₂ O)	Nitrati (NO ₃)	Kakovostni razred			
A1	A	B	B	A	B			
A2	A	B	B	A	B			
A3	A	C	B	A	C			
A4	A	C	B	A	C			
A5	B	B	B	A	B			
A6	B	C	B	A	C			
A7	A	A	B	A	B			
C1	B	B	B	A	B			
C2	A	C	C	A	C			
PREISKAVE IN OBNAŠANJE SVEŽE PRIPRAVLJENE INJEKCIJSKE MEŠANICE								
Oznaka vzorca	Pretočnost	Izločanje vode	Potreba po vodi	Obdelavnost	Kakovostni razred			
A1	A	A	A	A	A			
A2	A	A	A	A	A			
A3	A	A	A	A	A			
A4	X	A	A	A	X			
A5	C	A	A	C	C			
A6	B	A	A	A	B			
A7	X	A	A	X	X			
C1	B	A	A	A	B			
C2	X	A	A	C	X			
PREISKAVE IN OBNAŠANJE STRJENE INJEKCIJSKE MEŠANICE								
Oznaka vzorca	Sprememba prostornine	Upogibna trdnost	Tlačna trdnost	Cepilna nat. trdnost	»pull off« test	Kap. srk	Homogenost razpokanost	K. razred
A1	X	A	A	X	A	X	X	X
A2	X	A	X	X	X	X	A	X
A3	C	A	A	A	A	C	A	C
A4	C	X	A	A	X	C	C	X
A5	B	A	A	A	A	C	A	C
A6	X	X	A	A	X	B	C	X
A7	A	X	A	A	X	B	B	X
C1	C	A	A	A	A	B	B	C
C2	A	A	A	A	A	A	A	A

Mešanica A1 se po kriterijih kemijskih preiskav uvršča v razred B, po kriterijih preiskav sveže mešanice v razred A, vendar zaradi slabih rezultatov preiskav strjene mešanice ne izpolnjuje kriterijev minimalne zahtevane homogenosti. Preskušanci (prizme in valji), so bili tako pri prvi kot tudi drugi pripravi izrazito nehomogeni. Vidna je bila nepovezanost veziva - apna in najverjetneje polnila, pri čemer je bila razvidna segregacija polnila v spodnji polovici prereza. Razpoke zgornjega, apnenega

dela so pri večini prizem segale skoraj do sredine prereza, pri valjih so se na vseh vzorcih pojavljale globoke razpoke in luščenje zgornjih plasti v debelini nekaj mm. Največja med izmerjenimi je bila vrednost spremembe prostornine, ki presega $\Delta V=12\%$.

Mešanico A2 rezultati kemijskih preiskav uvrščajo v razred B, rezultati preiskav sveže mešanice v razred A. Zahtevani kriteriji niso bili izpolnjeni pri meritvah spremembe prostornine (do $\Delta V=3,66\%$), tlačnih trdnosti, mešanica pa je izkazovala najvišje vrednosti kapilarnega srka (do $37,5\text{ kg/m}^2$). Pri mešanici A2 smo izvrednotili najslabši rezultat cepilne natezne trdnosti in sicer $f_{ct}=0,30\text{ MPa}$.

Z mešanico A3 smo dosegli zelo dobre rezultate pri preiskavah suhe in sveže pripravljene mešanice (dobra obdelavnost in posledično najboljši rezultati pri meritvi pretočnosti). Rezultati preiskav strjene mešanice jo uvrščajo v kakovostni razred C.

Pri mešanici A4 je poleg neustreznosti kriterijem preiskav sveže mešanice (pretočnost) in strjene mešanice (upogibna trdnost) problematičen tudi dolg čas strjevanja - karbonatizacije, kar kažejo rezultati fenolftaleinskega testa.

Mešanica A5 se glede na kemijske preiskave uvršča v razred B, glede na preiskave strjene mešanice v razred C, zahtevanim kriterijem pa ne zadosti pri meritvah pretočnosti v sklopu preiskav sveže pripravljene mešanice.

Mešanico A6 rezultati kemijskih preiskav uvrščajo v razred C, rezultati preiskav sveže mešanice pa v razred B, vendar kriteriji niso izpolnjeni pri meritvi spremembe prostornine ($\Delta V=5,19\%$) in pri preiskavah upogibne trdnosti.

Mešanica A7 na podlagi rezultatov kemijskih preiskav dosega zahteve razreda B, kriterijev pa ne izpolnjuje zaradi slabih rezultatov preiskav sveže in strjene mešanice. Najvišje med vsemi izmerjenimi vrednostmi je odstopanje pri meritvi pretočnosti takoj po zamešanju ($t=0$) in po preteku pol ure ($t=30\text{ min}$), ki znaša $27,6\text{ s}$. Mešanica se izredno hitro strjuje in ima slabo obdelavnost, kar pomeni težavno vgrajevanje in posledično nezadostno zapolnjenje razpok in votlin v zidu pri dejanski izvedbi.

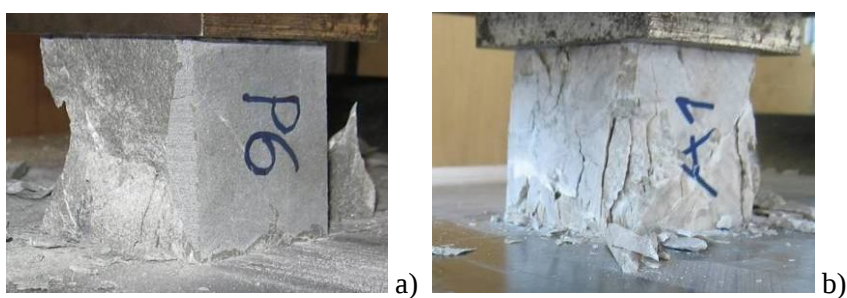
Mešanica C1 dosega pri večini preiskav dobre rezultate v primerjavi z ostalimi. V sklopu kemijskih preiskav in preiskav sveže mešanice se uvršča v kakovostni razred B, končno uvrstitev v kakovostni razred C narekujejo rezultati preiskav strjene mešanice.

Mešanica C2 dosega dobre rezultate pri preiskavah strjene mešanice (kakovostni razred A), povprečne pri kemijskih preiskavah (kakovostni razred C), vendar pa ne zadosti zahtevam pri preiskavah sveže mešanice zaradi slabih rezultatov pretočnosti, saj znaša odstopanje med obema meritvama pretočnosti 17,3 s.

Ker bi se glede na kriterije v nadaljnje preiskave uvrstili le mešanici A3 in C1, pa še ti dve zgolj v kakovostni razred C, smo se odločili, da četrti sklop preliminarnih preiskav na cilindričnih preskušancih, kljub neizpolnjevanju kriterijev, nadaljujemo tudi z mešanicami A4, A5 in C2.

5.1.5 Preiskave kamna

Pri gradnji kamnitih zidanih objektov sta na ruralnih območjih največkrat zastopana apnenec in peščenjak. Prav zaradi tega smo, z namenom ovrednotenja mehansko-fizikalnih lastnosti omenjenih vrst kamnin, iz struge reke Soče dobavili večje kose apnenca in peščenjaka, ki so bili razrezani na kocke dolžine, širine in višine ca. 70 mm. Povprečna izvrednotena tlačna trdnost suhih vzorcev apnenca je znašala $f_{cA}=120$ MPa, vodozasičenih vzorcev pa $f_{cA}=125$ MPa. Pri vzorcih peščenjaka je znašala povprečna tlačna trdnost suhih vzorcev $f_{cP}=209$ MPa, vodozasičenih vzorcev pa $f_{cP}=185$ MPa. Po raziskavah, opravljenih v sosednji Italiji, je povprečna tlačna trdnost apnenca okoli 80 MPa, peščenjaka pa okoli 100 MPa (Onsiteformasonry, Bosiljkov in sod., 2004), kar pomeni, da gre v našem primeru za precej visoke vrednosti tlačnih trdnosti. Slednje velja predvsem v primeru peščenjaka, sploh če upoštevamo, da naj bi bil za gradnjo primerni peščenjaki že od tlačne trdnosti $f_{cP}=100$ MPa naprej (Žarnić, 1999).



Slika 5.26: a) Tlačne preiskave kamnitih vzorcev peščenjaka, b) tlačne preiskave kamnitih vzorcev apnenca

Fig. 5.26: a) Compression tests on sandstone specimens, b) compression tests on limestone specimens

Preglednica 5.6: Rezultati preiskav kamnitih vzorcev iz apnenca in peščenjaka

Table 5.6: Results of tests performed on limestone and sandstone specimens

Oznaka vzorca	Tlačna trdnost vzorca apnenca f_{ca} (MPa) in peščenjaka f_{cp} (MPa)	Prostorninska masa vodozasičenih vzorcev ρ_v (kg/m ³) in suhih vzorcev ρ_s (kg/m ³)
A1	115 (V)	2680 (V)
A2	125 (V)	2691 (V)
A3	136 (V)	2683 (V)
povp.	125	2685
stdev	11	6
c.o.v. (%)	8 %	0 %
A4	121 (S)	2697 (S)
A5	95 (S)	2685 (S)
A6	144 (S)	2681 (S)
povp.	120	2688
stdev	25	8
c.o.v. (%)	20 %	0 %
P1	187 (V)	2645 (V)
P2	168(V)	2652 (V)
P3	201(V)	2649 (V)
povp.	185	2649
stdev	17	4
c.o.v. (%)	9 %	0 %
P4	220 (S)	2649 (S)
P5	200 (S)	2656 (S)
P6	206 (S)	2643 (S)
povp.	209	2649
stdev	10	7
c.o.v. (%)	5 %	0 %

V - preizkus tlačne trdnosti in izvednotenje prostorninske mase v vodozasičenem stanju

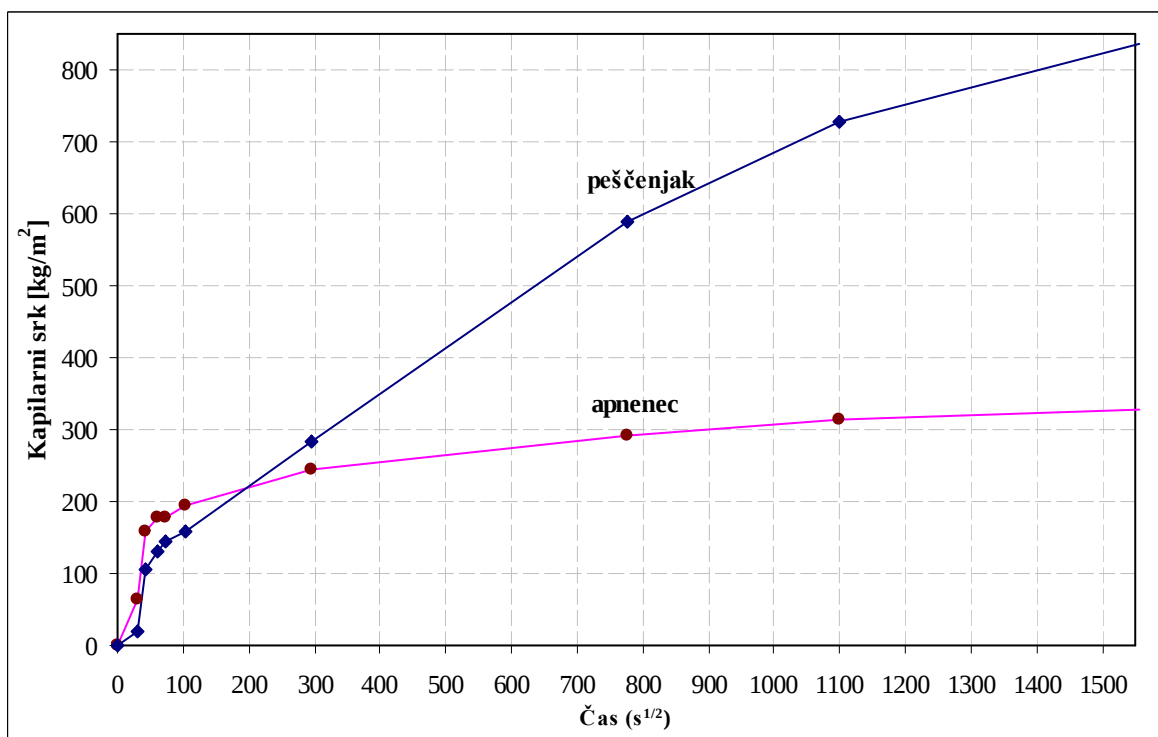
S - preizkus tlačne trdnosti in izvednotenje prostorninske mase v suhem stanju

Izvednotene tlačne trdnosti apnenca so v primerjavi s peščenjakom sicer manjše, vendar še zmeraj precej nad tistimi v dostopni strokovni literaturi. Iz rezultatov tlačnih trdnosti suhih in vodozasičenih vzorcev v primeru apnenca ni mogoče razbrati bistvenih razlik med suhim in vodozasičenim stanjem. Slednje je najverjetneje posledica nizke vodovpojnosti vzorcev, ob višjih vrednostih vodovpojnosti bi praviloma prišlo do očitnejših razlik pri tlačnih trdnostih. V primeru peščenjaka so tlačne trdnosti vodozasičenih vzorcev v primerjavi s suhimi vzorci nižje za približno 10%. Na kamitih vzorcih (apnenec z oznakami A1-A6 in peščenjak z oznakami P1-P6), je bil po standardu SIST EN 772-11 v različnih časovnih intervalih (0, 15 min., 30 min., 60 min., 90 min., 180 min., 8 h, 24 h, 7 dni, 14 dni in 28 dni) izvednoten koeficient absorpcije vode vsled kapilarnega dviga in prostorninska masa vzorcev v suhem in vodozasičenem stanju.



Slika 5.27: Določevanje vodovpojnosti vzorcev vsled kapilarnega dviga

Fig. 5.27: Determination of water absorption of specimens due to capillary action



Slika 5.28: Rezultati meritev kapilarnega dviga kamnitih vzorcev v različnih časovnih obdobjih

Fig. 5.28: Results of water absorption due to capillary action in different time periods

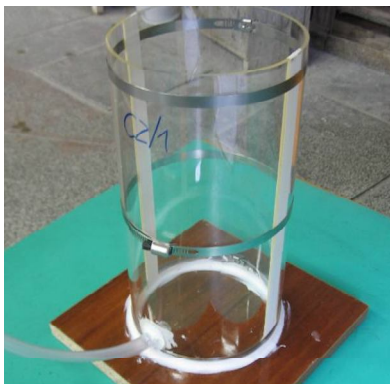
Pri preiskavi kapilarnega dviga so se kot bolj vodovpojni izkazali vzorci peščenjaka, čeprav so v začetni fazi preiskave višje vrednosti vodovpojnosti izkazovali vzorci apnenca. Tako je po prvih 3 urah preiskave ($103,92 s^{1/2}$ na sliki 5.28), kapilarni srk apnenca znašal $193,51 \text{ g/m}^2$, peščenjaka pa $157,05 \text{ g/m}^2$. Kasneje, po približno 11,5 urah ($203,47 s^{1/2}$ na sliki 5.28), se je situacija obrnila, vodovpojnost peščenjaka je še vedno strmo naraščala, medtem ko so se izmerjene vrednosti kapilarnega srka pri apnencu stabilizirale. Končne vrednosti kapilarnega srka po 28 dneh preiskave ($1555,38 s^{1/2}$ na sliki 5.28) so v primeru peščenjaka tako znašale $834,85 \text{ g/m}^2$, v primeru apnenca pa $328,69 \text{ g/m}^2$.

5.1.6 Preiskave cilindričnih preskušancev

S preiskavami cilindričnih preskušancev so bile upoštevane bistvene značilnosti jedra troslojnega kamnitega zidu, kot so: vrsta in način obdelave kamnov, zastopanost posameznih frakcij in prispevek votlin. Vseh karakteristik dejanskega stanja v območju jedra zidu, kot so na primer določen delež običajno blatne apnene malte, zemlje, lesenih delov ali ostalega odpadnega materiala, ki se pojavlja pri nekaterih vrstah kamnitih zidov, nismo upoštevali, zato je preizkus potrebno razumeti kot približek dejanskega stanja. Namen takšne poenostavitve je bil pripraviti večje število medsebojno čim bolj podobnih vzorcev, s čimer smo želeli ustvariti enake pogoje pri vgradnji za vse vrste obravnavanih injekcijskih mešanic. Pri izvedbi injektiranja smo merili pretočnost injicirane mešanice in čas injektiranja ter iz vrednotili prispevek votlin v posameznem cilindru. Ko so bili vzorci stari 90 dni, smo jih preizkusili na tlačno in natezno cepilno trdnost, spremljali potek vertikalnih in horizontalnih specifičnih deformacij pri naraščanju sile in vrednotili načine porušitev ter uspešnost zapolnitve posameznih vzorcev. Za injektiranje cilindričnih preskušancev smo uporabili mešanice, ki so zadostile kriterijem prvih treh sklopov preliminarne preiskav, in sicer A3, A5, C1 in C2. Ker gre za dve cementni (C1, C2) in dve kombinirani cementno-apneni mešanici (A3, A5), smo, da bi lahko podrobneje ocenili obnašanje in uspešnost utrjevanja jedra zidu z apnenimi mešanicami, šest preskušancev zainjektirali tudi z apneno mešanico A4.

5.1.6.1 Priprava preskušancev

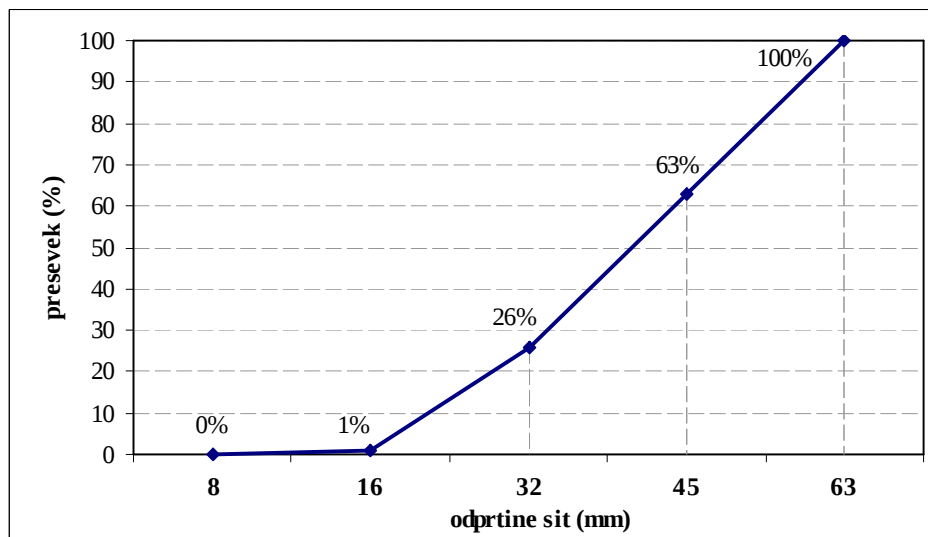
Pri pripravi preskušancev so bili uporabljeni leseni perforirani podstavki, na katere so bili s trajno elastičnim kitom pritrjeni valjasti kalupi iz pleksi stekla. Zaradi lažjega razopaženja, so bili kalupi sestavljeni iz dveh polovic, na stiku zalepljeni z vodoodpornim lepilnim trakom in dodatno utrjeni z nerjavečimi spojkami (slika 5.29).



Slika 5.29: Kalup pripravljen za vgradnjo kamna

Fig. 5.29: Mould prepared for building in of stones

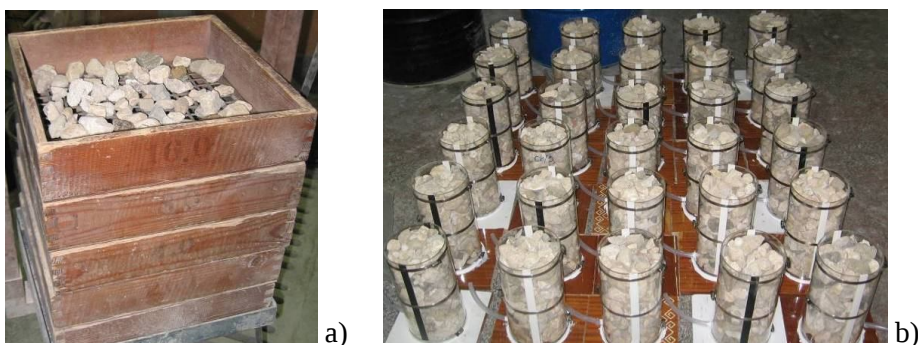
Kamen - apnenec in peščenjak za pripravo preskušancev je bil dobavljen iz porušenega kamnitega objekta, nato pa presejan skozi sita in razdeljen na štiri frakcije: 45/63, 32/45, 16/32 in 8/16 mm. Delež posamezne frakcije v preskušancu je znašal 37 % ut. za frakciji 45/63 in 32/45 mm, 25 % ut. za frakcijo 16/32 mm in 1 % ut. za frakcijo 8/16 mm. Sejalna krivulja je prikazana na sliki 5.30. Postopek priprave je bil enoten za vse preskušance, in sicer smo do 1/3 višine kalup postopno napolnili s frakcijami 45/63, 16/32 in 32/45, nazadnje pa še s frakcijo 8/16, nakar smo postopek ponovili, dokler ni bil zapolnjen celoten kalup. Da so bili posamezni preskušanci medsebojno dobro primerljivi, kažejo rezultati prispevka votlin (preglednica 5.7), ki se gibljejo v razponu od 31,4 do 32,5 % celotne prostornine cilindra.



Slika 5.30: Sejalna krivulja - zastopanost frakcij pri pripravi cilindričnih preskušancev

Fig. 5.30: Sieve chart- distribution of aggregate size for cylindrical specimens

Višina cilindrov po razkalupljenju je znašala $v=30\text{cm}$, premer pa $d=15\text{cm}$, s čimer je bil slednji v okvirih povprečne širine jedra dejanskega tro slojnega kamnitega zidu, hkrati pa so dimezije preiskovanca ustrezale standardiziranim za preskušanje tlačne in cepilne natezne trdnosti.



Slika 5.31: Priprava cilindričnih preskušancev: a) sejanje kamna , b) preskušanci pripravljeni za injektiranje

Fig. 5.31: Preparation of cylindrical specimens: a) sieving of aggregate b) specimens prepared for injection grouting

Injektiranje je preko injekcijskih nastavkov premera $d=10\text{ mm}$ potekalo od spodaj navzgor s pritiskom $p=0,5\text{ bar}$. Kot je razvidno iz preglednice 5.7, je bil čas injektiranja oziroma zapolnitve cilindrov v večini primerov pogojen z vrednostjo pretočnosti injekcijske mešanice. Najboljši rezultati so bili doseženi pri injektiranju z mešanicama A3 in A5, kjer so povprečne vrednosti časa injektiranja znašale 39,7 in 46,5 s, pri pretočnostih 14,8 in 13,2 s. Zanimivi so rezultati injektiranja z mešanico A4, pri kateri je bil čas injektiranja (109,8 s) ne glede na slabe rezultate pretočnosti (45,0 s) dokaj dober. Iz slednjega je mogoče sklepati, da je mogoče ustrezno injektabilnost ob določenih pogojih (dolga čas strjevanja, fina zrnastost) doseči tudi pri slabši pretočnosti. Najslabši rezultati so bili doseženi pri injektiranju s cementnima mešanicama C1 in C2, kjer je prišlo do težav z zagotavljanjem ustrezne pretočnosti, ki so že bile pojasnjene v točki 4.4.1. Pri pripravi injekcijskih mešanic so bila upoštevana enaka vodovozivna razmerja, kot v prvem sklopu preliminarne preiskav, in sicer 0,40 za mešanico C1 in 0,435 za mešanico C2. Kljub temu je znašala pretočnost v primeru mešanice C1 33,5 s, v primeru mešanice C2 pa 50,0 s, medtem ko smo v prvem sklopu preiskav izmerili za mešanico C1 vrednost 13,8 s, za mešanico C2 pa 27,2 s. Slednje je, kot rečeno, predvsem pri cementnih injekcijskih mešanicah pogost problem, ki se pojavlja pri uporabi različnih šarž cementa.



Slika 5.32: Injektiranje preskušanca A3/3

Fig. 5.32: Grout injection of specimen A3/3

Preglednica 5.7: Primerjava povprečnih vrednosti prispevka votlin, količine vtisnjene mešanice, mešalnega razmerja in pretočnosti mešanice ter časa injektiranja cilindričnih preskušancev

Table 5.7: Comparison of average values of presence of cavities, quantity of injection grout, water binder ratio, fluidity of injection grout and time of injection grouting of cylindrical specimens

Oznaka cilindra/mešanice	Votlikavost (% V)	Količina vtisnjene mešanice (l)	Potreba po vodi (v/m)	Pretočnost meš. v času t=0 (s)	Čas injektiranja (s)
A3/1-6	32,2	1,71	0,50	14,8	39,7
A4/1-6	32,1	1,70	0,55	45,0	109,8
A5/1-6	31,4	1,66	0,62	13,2	46,5
C1/1-6	32,5	1,72	0,40	33,5	188,2
C2/1-6	31,9	1,69	0,43	50,0	214,8

5.1.6.2 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost je bila za vsako mešanico iz vrednotena na treh vzorcih. Razkalupljeni cilindri dimenzij $v=30$ cm in $d=15$ cm so se preskušali pri starosti 90 dni, pri čemer je bil uporabljen standard SIST EN 12390-3. Zgornjo površino preskušancev je bilo zaradi neravnin potrebno izravnati s cemetno malto, s čimer je bil omogočen enakomeren vnos sile v preskušanec. Hitrost naraščanja obremenjevanja je znašala 0,05 mm/s. Tlačno trdnost cilindrov smo iz vrednotili po enačbi 5.14:

$$f_{cc}=F/A_c \quad (5.14)$$

kjer je:

f_{cc} – tlačna trdnost cilindra (MPa)

F - maksimalna sila (N)

A_c – prerez cilindra (mm²)



Slika 5.33: Preskušanec C2/1 pred začetkom preiskave tlačne trdnosti

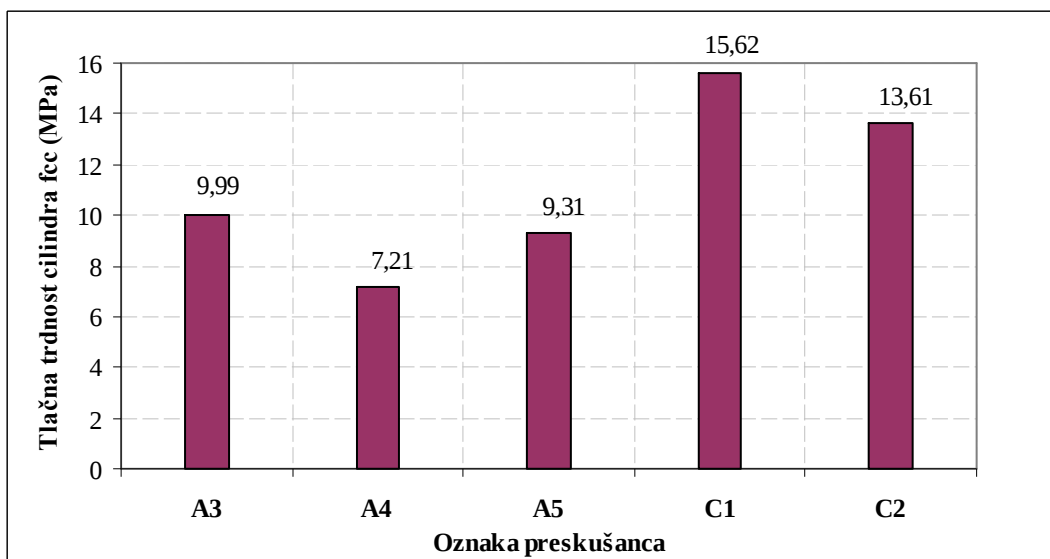
Fig. 5.33: Specimen C2/1 before the compression strength test

Praktično pri vseh preskušancih je v začetku obremenjevanja prišlo do formacije vertikalnih razpok, pri čemer je bil potek nastanka razpok dokaj enakomeren. V nadaljnjih fazah obremenjevanja je prišlo do lokalnih odkruškov, širjenja razpok in vidnega izbočanja osrednjega dela preskušanca, pri čemer je bila na tej stopnji dosežena maksimalna sila, preskus pa prekinjen.



Slika 5.34: Preskušanec C2/1 po končani preiskavi tlačne trdnosti

Fig. 5.34: Specimen C2/1 after the compression strength test



Slika 5.35: Tlačne trdnosti cilindrov (f_{cc})

Fig. 5.35: Compression strength of cylindrical specimens (f_{cc})

Najvišje vrednosti tlačnih trdnosti smo po pričakovanju dobili pri cilindrih, zainjektiranih s cementnima injekcijskima mešanicama, kjer je C1 z $f_{cc}=15,62$ MPa v rahli prednosti pred C2 s tlačno trdnostjo $f_{cc}=13,61$ MPa. Zelo blizu sta rezultata kombiniranih cementno-apnenih mešanic, pri čemer smo pri A3 dosegli $f_{cc}=9,99$ MPa, pri A5 pa $f_{cc}=9,31$ MPa. Najmanjšo vrednost tlačne trdnosti cilindra smo dobili pri preskušancu A4, in sicer $f_{cc}=7,21$ MPa. Vrednosti standardne deviacije se gibljejo med 0,15 MPa (A4) in 3,83 MPa (C2), koeficienti variacije pa med 2,05 % (A4) in 28,13 % (C2). Razlog za velik raztros vrednosti v primeru preskušancev C2, je, da je pri enem izmed preskušancev v osrednjem delu zaradi nateganja kamna na kamen prišlo do precej večje vrednosti tlačne trdnosti ($f_{cc}=17,99$ MPa), v primerjavi z ostalima dvema preskušancema ($f_{cc}=10,88$ in $f_{cc}=11,97$ MPa).

Preiskave cilindričnih preskušancev, ki ponazarjajo s sistematičnim injektiranjem utrjeno jedro kamnitega zidu, so izvajali tudi ostali avtorji. Kalagri (Kalagri in sod., 2007) je pripravil preskušance iz kamnov velikosti 2 do 5 cm medsebojno povezane z apneno pucolansko malto. Višina preskušancev je znašala $v=50$ cm, premer pa $d=25$ cm. Prispevek votlin v posameznem preskušancu je znašal približno 40 %. Avtor je preskušance injektiral s sedmimi različnimi injekcijskimi mešanicami, pri čemer je bila ena kombinirana cementno-apnena (G1), ostale pa apnene (G2 do G7). Izvrednotene vrednosti tlačnih trdnosti pri starosti preskušancev 180 dni so v primerjavi z našimi rezultati dokaj majhne, saj se gibljejo od $f_{cc}=2,01$ MPa v primeru injektiranja z mešanico G7 in $f_{cc}=3,26$ MPa pri injektiranju z mešanico G3.

Podobne preiskave je izvajala tudi Valluzzijeva (Valluzzi in sod., 2004). Preskušance je pripravila tako, da je iz jedra v laboratoriju grajenih troslojnih kamnitih zidov odvzela kamenje in drobir in z njim napolnila kalupe višine $v=30$ cm in premera $d=15$ cm. Vzorci so bili zainjektirani s tremi različnimi injekcijskimi mešanici (apneno, kombinirano in cementno), nato pa pri starosti 28 dni, preskušeni na tlačno trdnost. Za preskušance, injektirane s kombinirano injekcijsko mešanico, avtorica ni podala rezultatov, medtem ko so pri preskušancih, injektiranih z apneno injekcijsko mešanico, tlačne trdnosti znašale od $f_{cc}=0,81$ MPa do $f_{cc}=2,07$ MPa, pri preskušancih, injektiranih z cementno injekcijsko mešanico, pa sta bili iz vrednotenih vrednosti $f_{cc}=9,50$ MPa in $f_{cc}=13,40$ MPa.

5.1.6.3 Cepilna natezna trdnost

Ker pri povečanih obremenitvah večslojnih kamnitih zidov zaradi nepovezanosti posameznih slojev zidu velikokrat pride do razrivanja ali celo izpadanja delov zunanjih slojev, je v tej luči cepilna natezna trdnost utrjenega jedra mehanska lastnost, s katero lahko bolje kot s tlačno trdnostjo cilindra, ocenimo odpornost utrjenega zidu napram takšnim vrstam poškodb.

Cepilno natezno trdnost smo določali na treh vzorcih za vsako izmed obravnavanih mešanic, preostalih po preizkusu tlačne trdnosti. Pri preizkusu so bila upoštevana določila standarda SIST EN 12390-6. Hitrost naraščanja obremenitve je znašala 0,05 mm/s. Cepilno natezno trdnost posameznega cilindra smo izračunali po enačbi 5.14:

$$f_{ct} = (2 \cdot F) / (\pi \cdot L \cdot d) \quad (5.15)$$

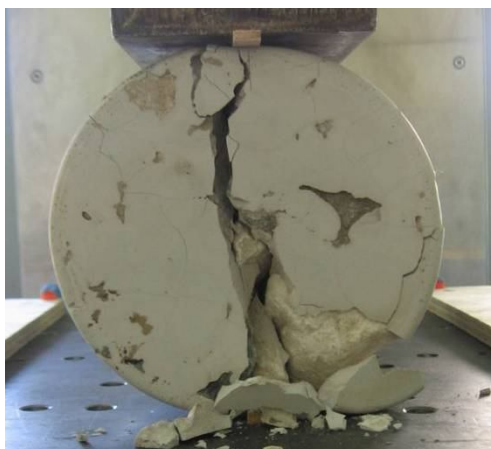
kjer je:

f_{ct} – cepilna natezna trdnost preskušanca (MPa)

F – maksimalna sila (kN)

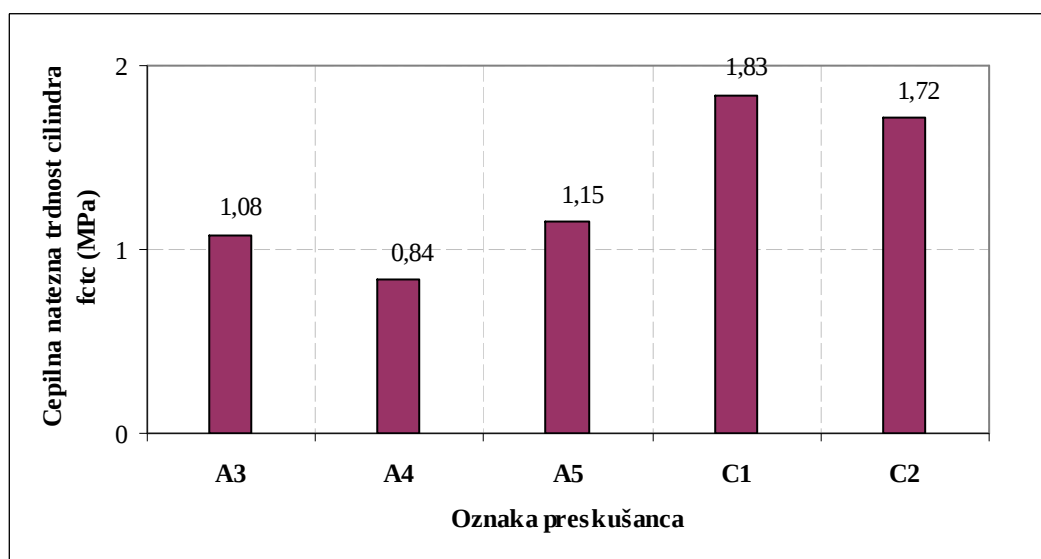
L – dolžina preskušanca (cm)

d – premer preskušanca (cm)



Slika 5.36: Cilinder po preiskavi cepilne natezne trdnosti

Fig. 5.36: Cylinder after tensile splitting test



Slika 5.37: Cepilna natezna trdnost cilindrov (f_{ctc})

Fig. 5.37: Tensile splitting strength of cylinders (f_{ctc})

Tako kot pri preiskavi tlačnih trdnosti cilindrov tudi tukaj najvišje vrednosti izkazujejo cilindrični preskušanci, zainjektirani s cementnima injekcijskima mešanicama C1 in C2. V primeru C1 znaša cepilna natezna trdnost $f_{ctc}=1,83$ MPa, v primeru C2 pa $f_{ctc}=1,72$ MPa. Vrednosti cepilnih nateznih trdnosti kombiniranih cementno-apnenih mešanic A3 in A5 znašajo $f_{ctc}=1,08$ MPa in $f_{ctc}=1,15$ MPa, medtem ko so najnižje vrednosti iz vrednotene pri preskušancih zainjektiranih z apneno mešanico A4, in sicer $f_{ctc}=0,84$ MPa. Najmanjše vrednosti standardne deviacije dobimo pri preskušancih A3 in A4 (0,12 MPa), največje pa v primeru preskušancev C1 (0,24 MPa). Koeficient variacije je najmanjši pri preskušancih A5 (5,36 %), največji pa pri preskušancih A4 (14,80 %).

Preiskave cepilnih nateznih trdnosti cilindričnih preskušancev so izvajali tudi drugi avtorji. Tako je Binda (Binda in sod., 2003) cilindrične preskušance pripravila z odvzemom materiala iz jedra zidu obstoječega objekta. Premer preskušancev je znašal 12 cm, medtem ko je višina variirala med $v=14$ in $v=23$ cm. Avtorica je preskušance injektirala s štirimi različnimi injekcijskimi mešanicami, za pripravo katerih je uporabila hidravlično vezivo. Izvrednotene cepilne natezne trdnosti preskušancev so znašale med $f_{ctc}=0,10$ MPa in $f_{ctc}=0,42$ MPa.

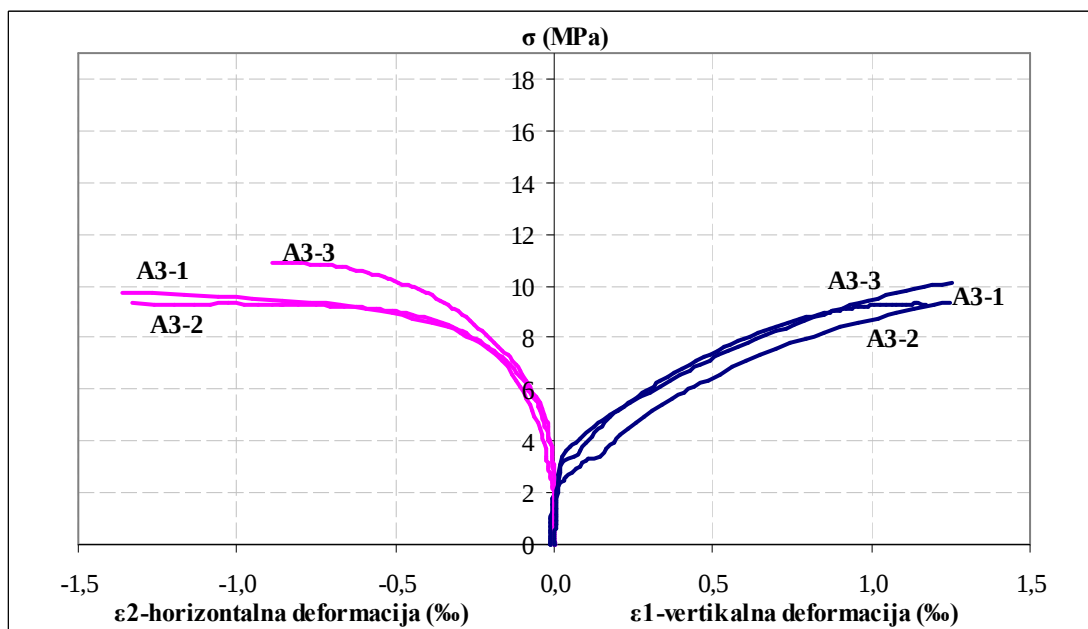
5.1.6.4 Diagrami napetost - specifična deformacija

Z namenom izvrednotenja vertikalnih specifičnih deformacij (skrčkov) in horizontalnih specifičnih deformacij (raztezkov), so bili pri preizkusu tlačnih trdnosti na vsakega izmed cilindričnih preskušancev nalepljeni po štirje merilni trakovi (angl. »Strain gauges«). S po dvema merilnima trakovima, nalepljenima v vertikalni, in dvema v horizontalni smeri, so bile spremljane deformacije v celotnem intervalu naraščanja sile do porušitve. Iz diagramov razmerja med napetostmi in specifičnimi deformacijami, prikazanimi na slikah od 5.38 do 5.42, smo poleg izvrednotenja tlačnih trdnosti, izračunali sekantni modul elastičnosti $E_{30-60\%}$ po enačbi (5.16), strižni modul $G_{30-60\%}$ po enačbi (5.17) in Poissonovo število $\nu_{30-60\%}$ (razmerje med horizontalno in vertikalno deformacijo) po enačbi (5.18). Za izvrednotenje iskanih količin je bilo potrebno abscisno os pomakniti višje, saj so se pri vzorcih C1 in C2 spremembe specifičnih deformacij začele pri napetosti okoli $\sigma_c=1$ MPa, pri vzorcih A3, A4 in A5, pa šele pri napetosti $\sigma_c=2-3$ MPa (slike od 5.38 do 5.42). Pri tem smo modul elastičnosti, strižni modul in Poissonovo izračunali v območju med 30 in 60 % dosežene tlačne trdnosti preskušanca oziroma v območju, kjer je bilo mogoče predpostaviti linearno obnašanje. V spodnjih enačbah pomeni ε_1 povprečno vertikalno deformacijo preskušanca, ε_2 povprečno horizontalno deformacijo, f_{cc} pa tlačno trdnost cilindra.

$$E_{30-60\%} = \frac{f_{cc60\%} - f_{cc30\%}}{\varepsilon_1(f_{cc60\%}) - \varepsilon_1(f_{cc30\%})} \quad (5.16)$$

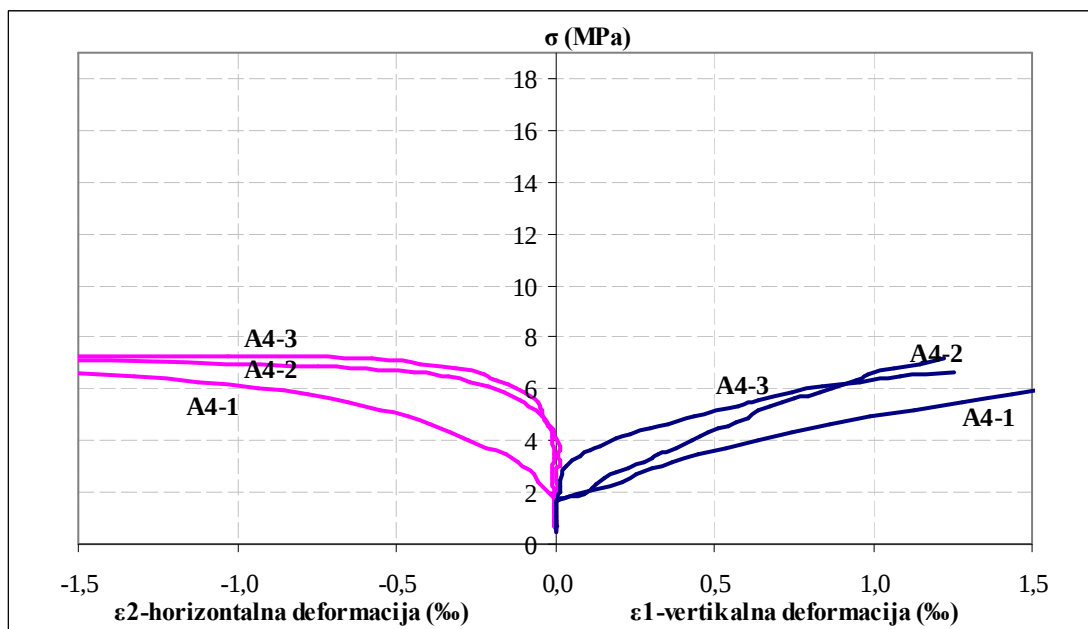
$$\nu_{30-60\%} = \frac{\varepsilon_2(f_{cc60\%}) - \varepsilon_2(f_{cc30\%})}{\varepsilon_1(f_{cc60\%}) - \varepsilon_1(f_{cc30\%})} = \frac{\Delta\varepsilon_{2(30-60\%)}}{\Delta\varepsilon_{1(30-60\%)}} \quad (5.17)$$

$$G_{30-60\%} = \frac{E_{30-60\%}}{2(1 + \nu_{30-60\%})} \quad (5.18)$$



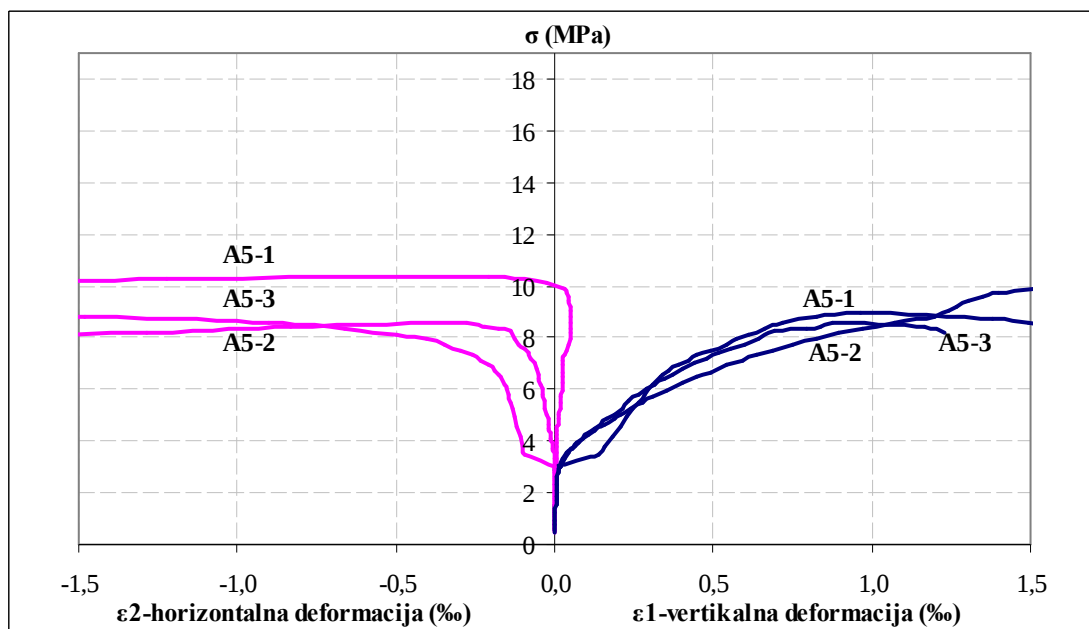
Slika 5.38: Diagram napetost - specifična deformacija za preskušance A3-1, A3-2 in A3-3

Fig. 5.38: Stress-strain diagram for specimens A3-1, A3-2 and A3-3



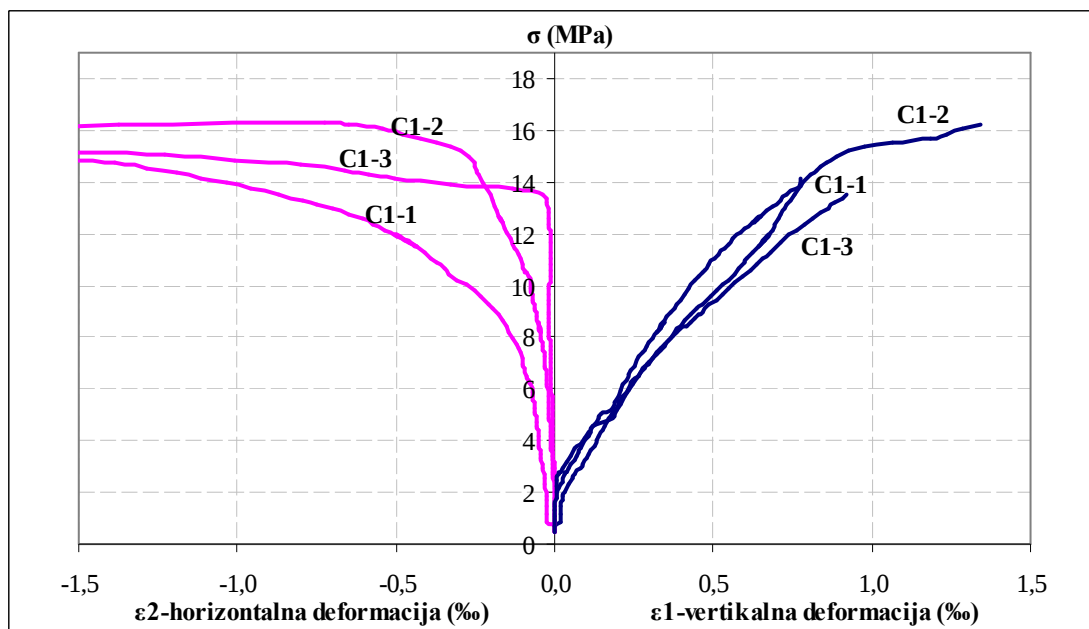
Slika 5.39: Diagram napetost - specifična deformacija za preskušance A4-1, A4-2 in A4-3

Fig. 5.39: Stress-strain diagram for specimens A4-1, A4-2 and A4-3



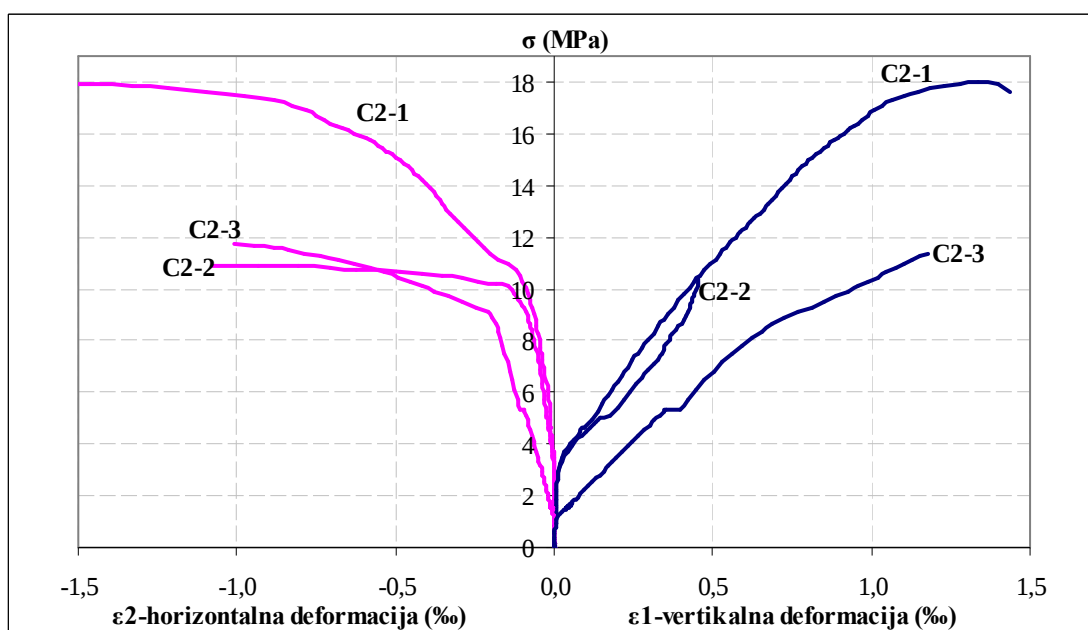
Slika 5.40: Diagram napetost- specifična deformacija za preskušance A5-1, A5-2 in A5-3

Fig. 5.40: Stress-strain diagram for specimens A5-1, A5-2 and A5-3



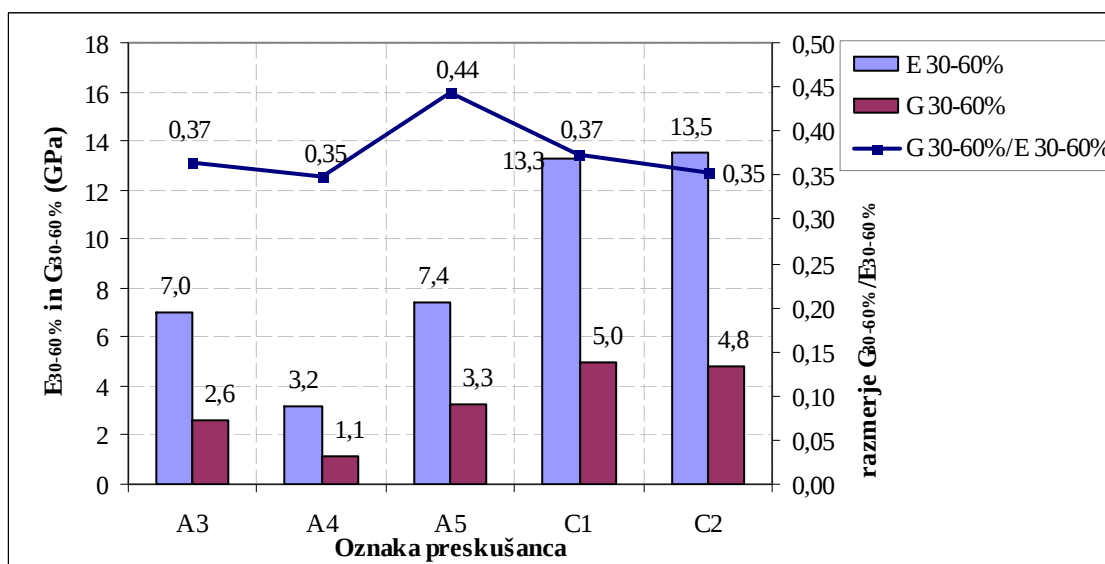
Slika 5.41: Diagram napetost- specifična deformacija za preskušance C1-1, C1-2 in C1-3

Fig. 5.41: Stress-strain diagram for specimens C1-1, C1-2 and C1-3



Slika 5.42: Diagram napetost - specifična deformacija za preskušance C2-1, C2-2 in C2-3

Fig. 5.42: Stress-strain diagram for specimens C2-1, C2-2 and C2-3



Slika 5.43: Primerjava povprečnih vrednosti modula elastičnosti $E_{30-60\%}$ in strižnega modula $G_{30-60\%}$ ter njunega medsebojnega razmerja

Fig. 5.43: Comparison of average values of modulus of elasticity $E_{30-60\%}$, shear modulus $G_{30-60\%}$ and ratio between both

Na sliki 5.43 so prikazane vrednosti modula elastičnosti $E_{30-60\%}$ in strižnega modula $G_{30-60\%}$ ter njunega medsebojnega razmerja. Iz slike je razvidno, da so si vrednosti strižnih modulov in modulov elastičnosti glede na sestavo uporabljene mešanice precej blizu. Tako znašata povprečna modula elastičnosti v primeru cementnih injekcijskih mešanic (C1 in C2) 13,3 in 13,5 GPa, strižna modula pa 5,0 in 4,8 GPa. V primeru kombiniranih cementno-apnenih (A3 in A5) sta izvedena modula elastičnosti 7,0 in 7,4 GPa, strižna modula pa 2,6 in 3,3 GPa. V skladu s pričakovanji so bile najmanjše vrednosti dosežene pri cilindrih injektiranih z apneno mešanico A4, pri katerih povprečna vrednost modula elastičnosti znaša 3,2 GPa, strižnega modula pa 1,1 GPa.

5.1.6.5 Primerjava in vrednotenje rezultatov posameznih preiskav

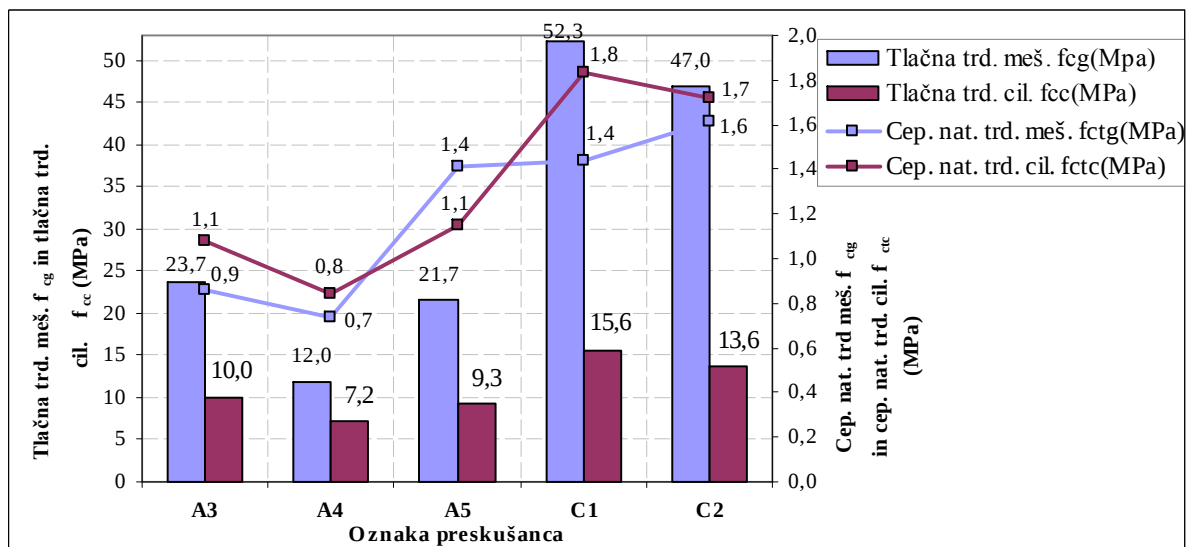
V nadaljevanju podajamo primerjavo vrednosti posameznih mehanskih lastnosti injekcijskih mešanic z lastnostmi injektiranih cilindrov. Primerjava je zanimiva zaradi prikaza vpliva mehanskih lastnosti mešanic na togostne karakteristike cilindrov, kot tudi zaradi določanja razmerja med tlačnimi in cepilnimi nateznimi trdnostmi mešanic in cilindrov.

Preglednica 5.8: Primerjava vrednosti, izrednotenih pri preizkusu tlačnih in cepilnih nateznih trdnosti za mešanice (prizme in valje) in cilindre, pri preskušancih starih 90 dni

Table 5.8: Comparison of compressive and tensile splitting strength tests results for injection grouts (prisms and cylinders) and cylinders on 90 days old specimens

Oznaka vzorca	*Tlačna trd. meš. f_{cg} (MPa)	Tlačna trd. cil. f_{cc} (MPa)	E_{30-60} %	Cep. nat. trd. meš. f_{ctg} (MPa)	Cep. nat. trd. cil. f_{ctc} (MPa)	G_{30-60} %	v_{30-60} % (-)
A3-1	22,13	9,74	7,89	0,91	1,22	3,14	0,26
A3-2	24,23	9,33	7,35	0,83	0,99	2,49	0,48
A3-3	23,13	10,91	5,89	0,84	1,03	2,09	0,41
povprečje	23,16	9,99	7,04	0,86	1,08	2,57	0,38
stdev	1,05	0,82	1,03	0,04	0,12	0,53	0,11
c.o.v. (%)	5 %	8 %	15%	5 %	11 %	21 %	29 %
A4-1	12,61	7,04	2,77	0,90	0,95	0,89	0,56
A4-2	12,00	7,30	2,96	0,53	0,87	1,08	0,37
A4-3	12,40	7,28	3,79	0,79	0,70	1,35	0,41
povprečje	12,34	7,21	3,17	0,74	0,84	1,11	0,45
stdev	0,31	0,14	0,54	0,19	0,13	0,23	0,10
c.o.v. (%)	3 %	2 %	17 %	26 %	15 %	21 %	22 %
A5-1	21,97	10,37	4,19	1,67	1,21	1,99	0,05
A5-2	21,02	8,97	11,19	1,15	1,15	3,61	0,55
A5-3	20,81	8,61	6,85	1,41	1,09	2,97	0,15
povprečje	21,27	9,32	7,41	1,41	1,15	2,86	0,25
stdev	0,62	0,93	3,53	0,26	0,06	0,82	0,26
c.o.v. (%)	3 %	10 %	48 %	18 %	5 %	29 %	106 %
C1-1	53,13	15,42	12,80	1,57	2,09	3,49	3,49
C1-2	48,36	16,32	16,47	1,52	1,61	6,43	6,43
C1-3	54,35	15,13	10,57	1,24	1,80	5,18	5,18
povprečje	51,95	15,62	13,28	1,44	1,83	5,03	5,03
stdev	3,17	0,62	2,98	0,18	0,24	1,48	1,48
c.o.v. (%)	6 %	4 %	22 %	12 %	13 %	29 %	29 %
C2-1	46,27	17,99	14,07	1,96	1,52	3,88	3,88
C2-2	46,07	10,88	16,38	1,35	1,69	6,54	6,54
C2-3	47,72	11,97	10,18	1,51	1,94	3,96	3,96
povprečje	46,69	13,61	13,54	1,61	1,72	4,79	4,79
stdev	0,90	3,83	3,13	0,32	0,21	1,51	1,51
c.o.v. (%)	2 %	28 %	23 %	20 %	12 %	32 %	32 %

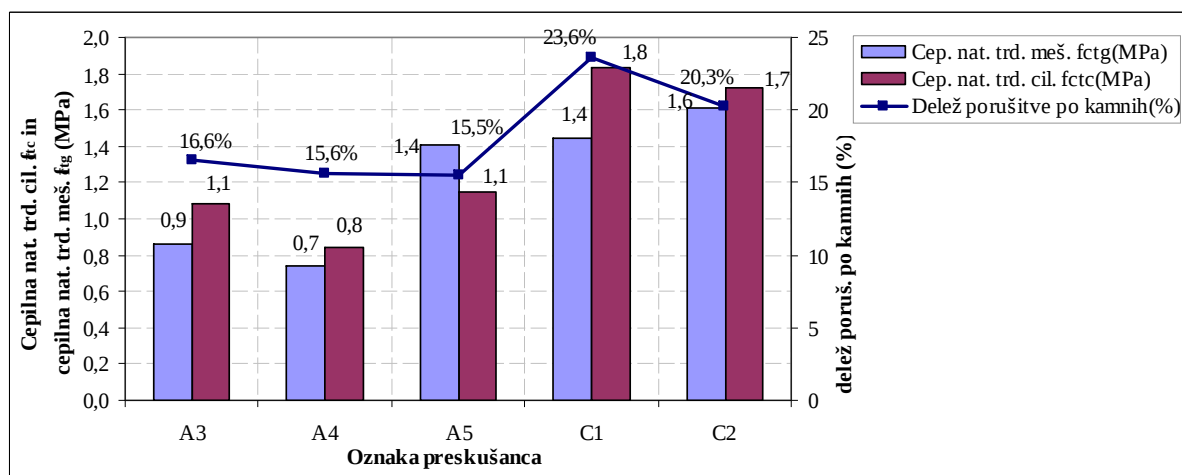
*Pri tlačnih trdnostih mešanic je bila standardna deviacija in koeficient variacije izračunan na štirih vzorcih, skladno z izračuni v točki 5.1.3.4., za primerjavo s cilindri pa smo v zgornji tabeli podali vrednosti za tri vzorce.



Slika 5.44: Primerjava tlačnih trdnosti mešanic f_{cg} in cilindrov f_{cc} , s cepilnimi nateznimi trdnostmi mešanic f_{ctg} in cilindrov f_{ctc}

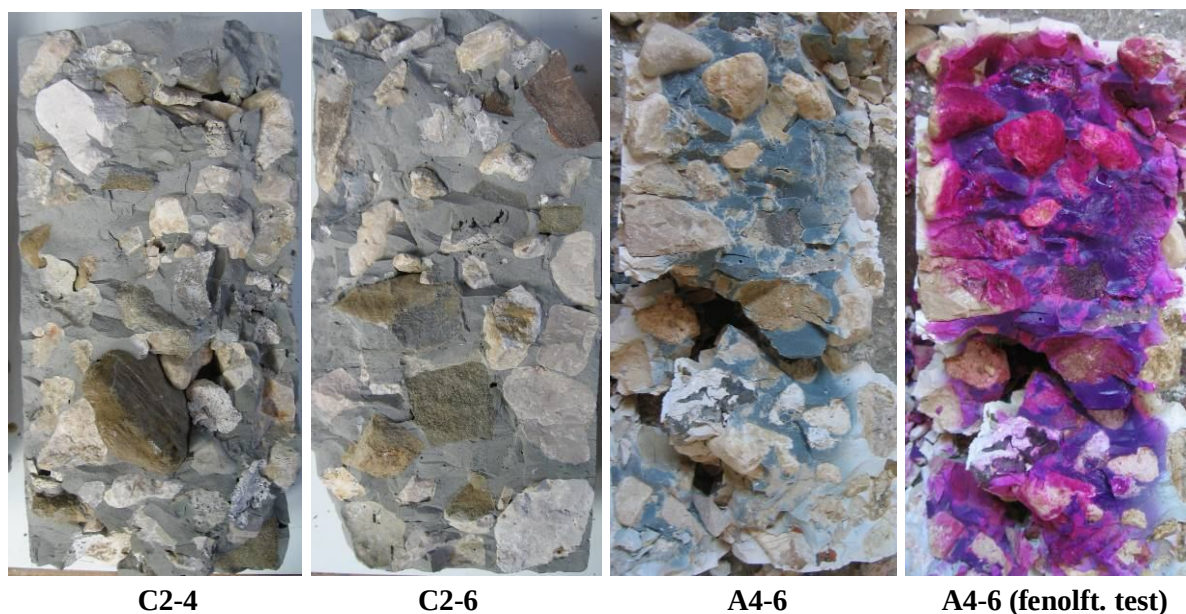
Fig. 5.44: Comparison of compressive strengths of grouts f_{cg} and cylinders f_{cc} , with tensile splitting strengths of grouts f_{ctg} and cylinders f_{ctc}

Iz slike 5.44 je mogoče razbrati, da so cepilne natezne trdnosti cilindrov pri vseh preskušancih razen pri A5, od 6 do 28 % večje od cepilnih nateznih trdnosti mešanic, s katerimi smo cilindre zainjektirali. Maksimalni 28 % prirast povprečne cepilne natezne trdnosti cilindrov z oznako C1 v primerjavi spovprečno cepilno natezno trdnostjo strjene mešanice C1 pojasnjuje delež porušitve po kamnih, prikazan na sliki 5.45, ki je pri omenjeni seriji preskušancev znašal 23,6 % glede na celoten prerez.



Slika 5.45: Primerjava deleža porušitve po kamnu s cepilnimi nateznimi trdnostmi mešanic f_{ctg} in cilindrov f_{ctc}

Fig. 5.45: Comparison of fracture area by stone with tensile splitting strengths of grouts f_{ctg} and cylinders f_{ctc}

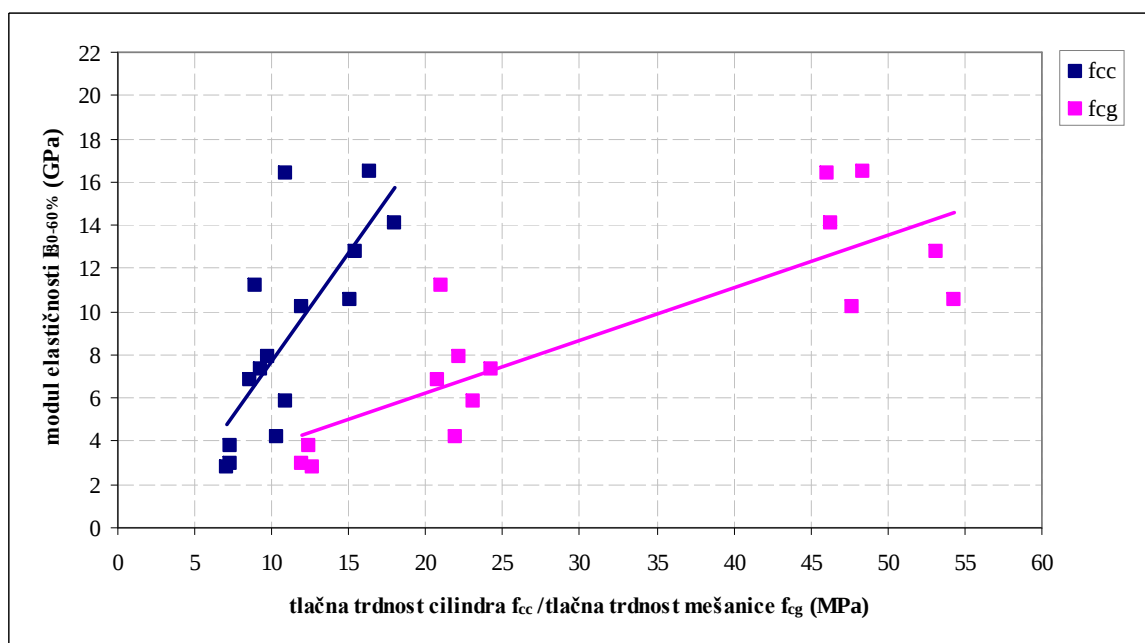


Slika 5.46: Ocena prerezov cilindrov po cepilni preiskavi

Fig. 5.46: Evaluation of cross sections of cylinders after tensile splitting test

Prerez vsakega izmed cilindrov, preskušanih na cepilno natezno trdnost, je bil po preiskavi detajlno pregledan. Pri tem smo ugotavljali uspešnost injektiranja oziroma prisotnost votlin, vrsto in kakovost kamnov, delež porušitve po kamnitem gradivu, stopnjo karbonatizacije ter stopnjo delaminacije vzorca.

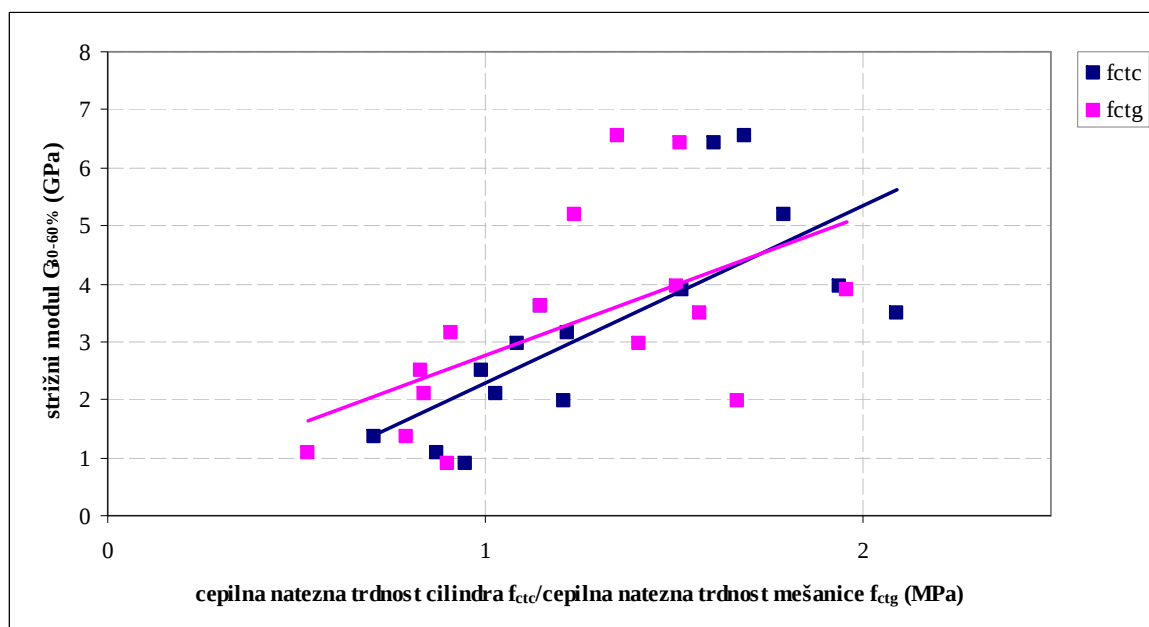
Nekaj bistvenih značilnosti, ki so bile predmet pregleda in vrednotenja, prikazuje slika 5.46. Na prerezu preskušanca C2-4 so vidne votline v desnem osrednjem in zgornjem delu, ki so nastale zaradi slabe pretočnosti mešanice in posledično nezadostne zapolnitve prostora med kamni. Na preskušancu C2-6 je dobro vidna porušitev po kamnih v spodnjem delu. Na apnenem preskušancu A4-6 je prišlo med preiskavo do najbolj obsežnih poškodb, in sicer do večkratnega preloma v spodnjem delu preskušanca. Slednje je razvidno iz slike 5.46 iz katere je sicer mogoče sklepati, da so v spodnjem delu prereza prisotne votline, vendar gre v resnici za porušene dele preskušanca, ki smo jih zaradi primerjave z ostalimi preskušanci ponovno »sestavili«. S fenolftaleinskim testom je bila na preskušancu A4-6 evidentirana dokaj nizka stopnja karbonatizacije, ki je na zunanjih plasteh dosegla zgolj globino 5 mm.



Slika 5.47: Primerjava modul. elastičnosti $E_{30-60\%}$ s tlačno trd. cilindra f_{cc} in tlačno trd.meš. f_{cg}

Fig. 5.47: Comparison of mod. of el. $E_{30-60\%}$ with compr. str. of cylinder f_{cc} and compr. str. of grout f_{cg}

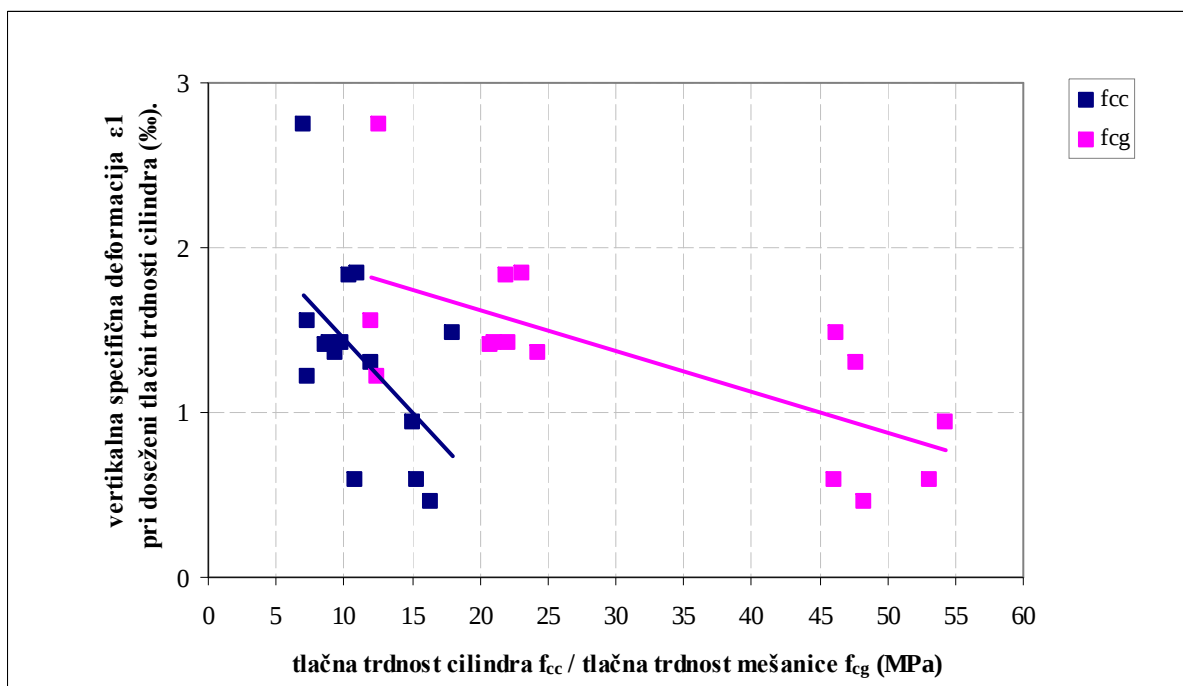
Iz prikaza vpliva tlačne trdnosti mešanice in tlačnih trdnosti cilindrov na modul elastičnosti na sliki 5.47, je razvidno, da dobimo z mešanicami višjih tlačnih trdnosti bolj toge cilindrične preskušance.



Slika 5.48: Primerjava str. mod. $G_{30-60\%}$ s cep. nat. trd. cilindra f_{ctc} in cep. nat. trd. meš. f_{ctg}

Fig. 5.48: Comparison of shear mod. $G_{30-60\%}$ with tensile splitting strength of cylinder f_{ctc} tensile splitting strength of grout f_{ctg}

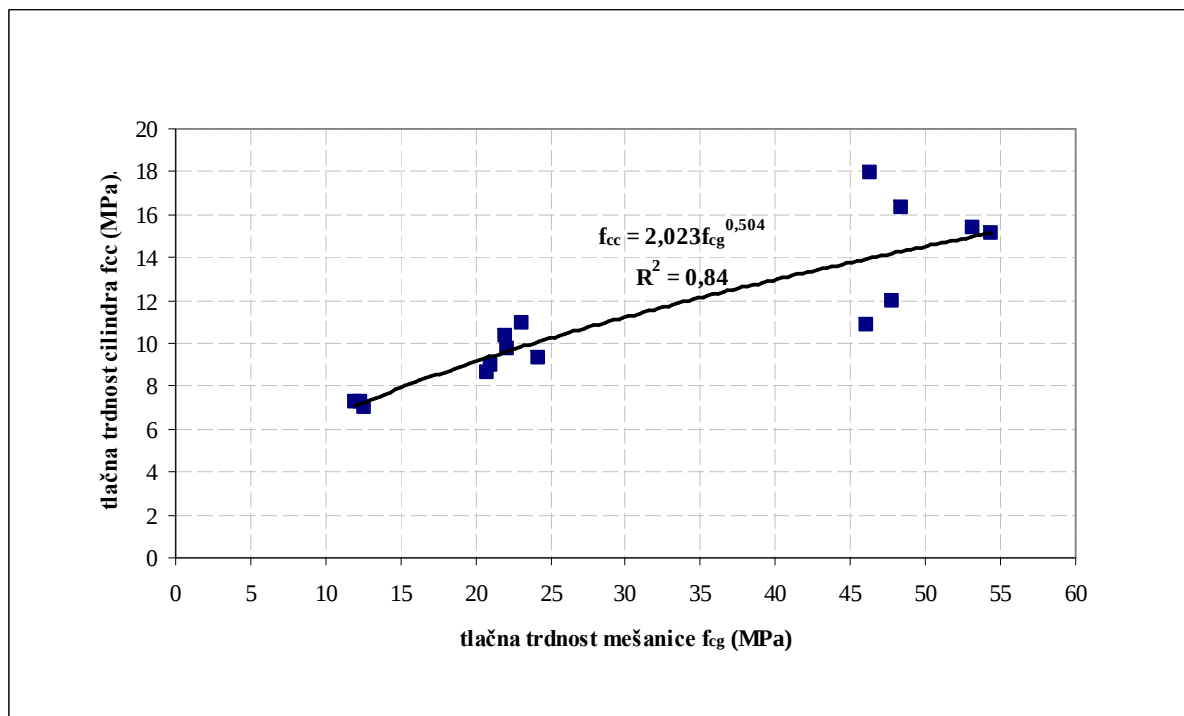
Slika 5.48 prikazuje odvisnost strižnega modula cilindrov od cepilne natezne trdnosti cilindrov in mešanic samih. Ne glede na dokaj velik raztros rezultatov je tudi iz zgornje primerjave razvidno, da višje cepilne natezne trdnosti mešanic pomenijo višje vrednosti strižnih modulov cilindričnih preskušancev.



Slika 5.49: Razmerje med vertikalno specifično deformacijo ε_1 pri doseženi tlačni trdnosti in tlačno trdnostjo cilindra f_{cc} ter tlačno trdnostjo mešanice f_{cg}

Fig. 5.49: Ratio between vertical strain ε_1 at compressive strength, compressive strength of cylinder f_{cc} , and compressive strength of grout f_{cg}

Slika 5.49 prikaže porušitev cilindra v tlaku, z ozirom na tlačno trdnost injekcijske mešanice f_{cg} oziroma tlačno trdnost cilindričnega preskušanca f_{cc} . Razvidno je, da pri nižjih tlačnih trdnostih pri porušitvi pride do večje vrednosti vertikalne specifične deformacije ε_1 , medtem ko je vertikalna deformacija pri porušitvi pri večjih tlačnih trdnostih manjša.



Slika 5.50: Prikaz odvisnosti tlačne trdnosti cilindra f_{cc} od tlačne trdnosti mešanice f_{cg}

Fig. 5.50: Dependence between compressive strength of cylinder f_{cc} and compressive strength of grout f_{cg}

Slika 5.50 prikazuje odvisnost tlačne trdnosti cilindra f_{cc} od tlačne trdnosti mešanice f_{cg} , s katero smo cilinder zainjektirali. Izvrednotena aproksimacijska funkcija (enačba 5.19), kaže dokaj dobro ujemanje z eksperimentalno določenimi vrednostmi ($R^2=0,84$).

$$f_{cc}=2,023 \cdot f_{cg}^{0,504} \quad , R^2=0,84 \quad (5.19)$$

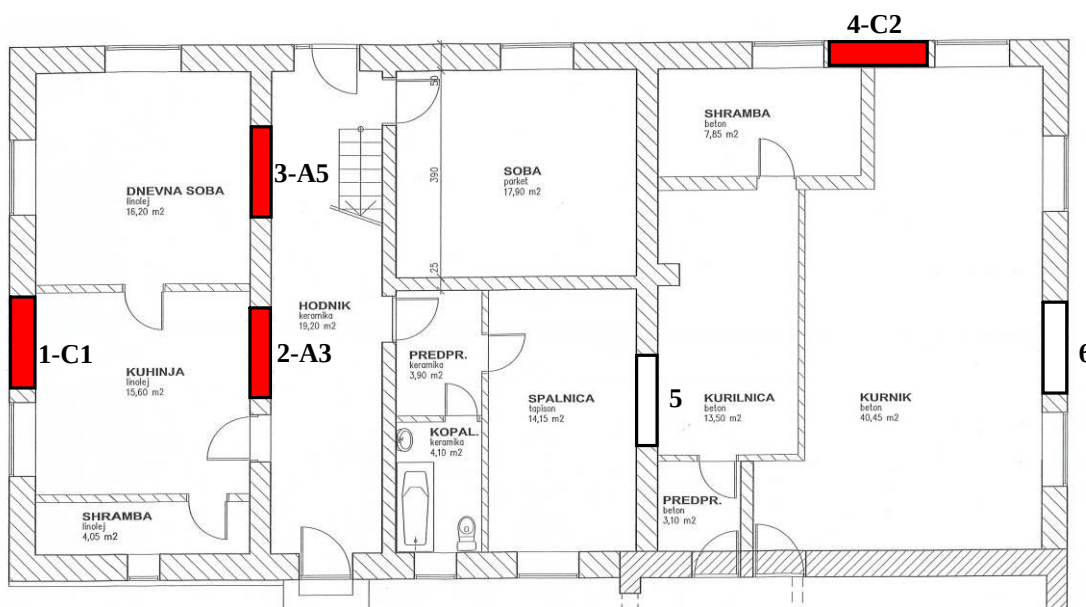
Podobne aproksimacije so iz svojih eksperimentov izvrednotili tudi nekateri drugi avtorji (Kalagri in sod. 2007, Valluzi in sod. 2004), vendar medsebojne primerjave izvrednotenih formul z našimi rezultati zaradi različnega načina priprave cilindrov nismo izvajali. Kljub temu da pri gradnji cilindrov nismo upoštevali vseh karakteristik, kot je na primer povezava kamnov z običajno blatno apneno malto menimo, da predstavlja izvrednotena formula v primerih, kjer se je pri gradnji prostor med obema zunanjsima slojema zidu »polnil« z ostanki delno obdelanega kamna različnih velikosti brez medsebojne povezave z vezivom, dokaj dober približek tlačne trdnosti jedra zidu po izvedeni utrditvi s sistematičnim injektiranjem.

5.2 »In situ« preiskave zidov in izvedba injektiranja

»In situ« preiskave zidov konkretnega objekta pomenijo kontinuirano nadaljevanje raziskovalnega projekta in so predstavljale dober »testni poligon« za primerjavo obnašanja izbranih injekcijskih mešanic v kontroliranem laboratorijskem okolju z obnašanjem v terenskih razmerah.

Na osnovi kriterijev in meril podanih v točki 5.1.4 smo za potrebe »in situ« preiskav izmed devetih analiziranih injekcijskih mešanic izbrali štiri. To sta obe cementni mešanici (C1 in C2) in dve kombinirani apnenno-cementni (A3 in A5). Po izvedenih delno destruktivnih preiskavah so bile na objektu določene pozicije zidov-slopov (slika 5.51) namenjenih nadaljnjim preiskavam. Zidovi s številkami 1 do 4 so bili sistematično zainjektirani vsak s pripadajočo injekcijsko mešanico in bodo po preteku 180dni preiskušeni za ugotavljanje strižne nosilnosti. Zid 5 bo uporabljen pri nadaljnjem ugotavljanju možnosti uporabe georadarskih in termografskih metod preiskovanja, medtem ko je zid 4 namenjen preiskavam strižne nosilnosti v obstoječem stanju.

Sočasno so bile v sklopu »in situ« preiskav izvajane tudi georadarske in termografske meritve ter meritve vlažnosti opisane v nadaljevanju. V nadaljevanju podajamo kratek pregled in opis metod preiskav zidov in izvedbe sistematičnega injektiranja.



Slika 5.51: Pozicije analiziranih zidov-slopov v sklopu »in situ« preiskav

Fig. 5.51: Positions of analysed walls in case of »in situ« tests

5.2.1 Nedestruktivne preiskave (NDT)

V sklopu »in situ« preiskav je bila uspešnost zapolnitve votlin v zidovih s postopkom sistematičnega injektiranja kontrolirana z georadarskimi in termografskimi meritvami, hkrati pa se je po izvedenem injektiranju merila tudi razporeditev in stopnja navlaženosti v zidovih. Primerjava rezultatov posameznih meritev je lahko dober pokazatelj uspešnosti postopka injektiranja in obnašanja zidov v smislu toplotne prevodnosti in vsebnosti vlage po izvedenem injektiranju.

5.2.1.1 Georadarske meritve

Georadarske meritve so se v preteklosti že izkazale kot ustrezna metoda za ugotavljanje uspešnosti utrjevanja kamnitih zidov s sistematičnim injektiranjem. Dobre rezultate je dosegel Živanović, ki je z georadarskimi meritvami preverjal kakovost injektiranja votlikavih kamnitih zidov preko 100 objektov v sklopu popotresne obnove Posočja in več objektov kulturne dediščine v ostalih delih Slovenije (Živanović, 2003 in 2004).

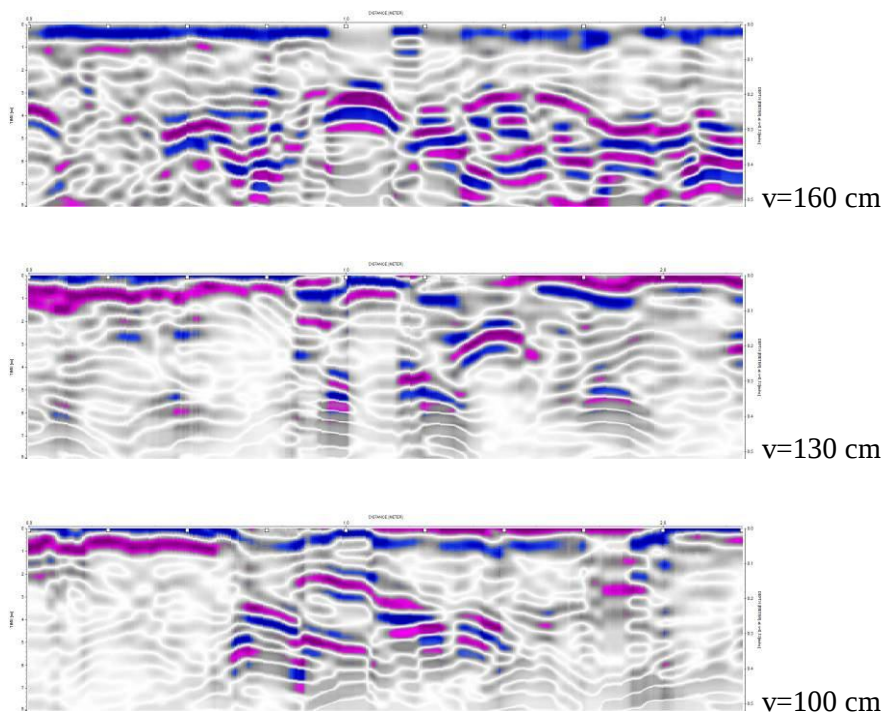
Georadarske meritve so bile izvedene z notranje strani objekta, pri čemer je bil uporabljen georadarski sistem SIR-2, ki ga sestavljajo centralna merilna enota, oddajno-sprejemna antena in pripomočki (kablji, vir). Meritve so bile izvedene z 900 MHz oddajno-sprejemno anteno visoke natančnosti, pri kateri znaša optimalni globinski doseg od 0,5 do 1,0 m.

Meritve z razporeditvijo georadarskih profilov v rastru 30 cm po višini zidu smo izvajali pred injektiranjem (slika 5.52 in 5.53), izvedle pa se bodo tudi pred in po preiskavi strižne nosilnosti injektiranih zidov. Primerjava rezultatov georadarskih meritev v omenjenih obdobjih bo poleg kontrole kakovosti in uspešnosti zapolnitve votlin v zidu omogočila tudi preverbo poškodovanosti v območju celotnega prereza zidu po izvedeni strižni preiskavi.



Slika 5.52: Izvedba georadarskih meritev

Fig. 5.52: GPR measurements



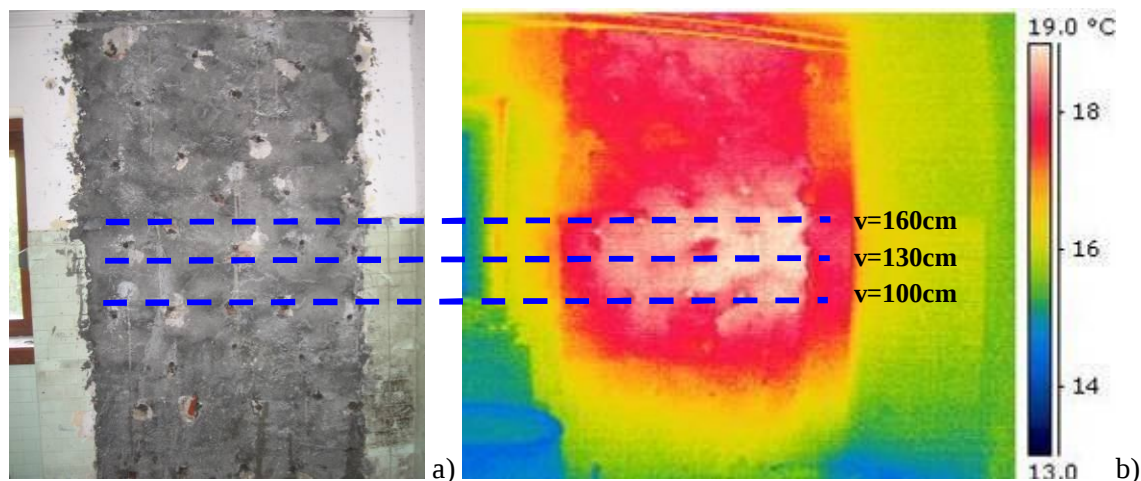
Slika 5.53: Georadarski profili zidnega slopa 1-C, izmerjeni pred injektiranjem na višinah 100, 130 in 160 cm

Fig. 5.53: GPR profiles of the wall 1-C1 measured before injection grouting on height 100, 130 and 160 cm

Na vseh georadarskih profilih, ki so bili izvedeni na zidnem slopu 1-C1 in so na sliki 5.53 prikazani na višinah 100, 130 in 160 cm, je na zgornjem delu (horizontalni pasovi modre in vijolične barve) jasno vidna elektromagnetna meja. Do močnega odboja pride zaradi ostre elektromagnetne meje pri prehodu elektromagnetnega valovanja iz zraka v steno. Iz ostalih anomalij (lise modre in vijolične barve), ki se pojavljajo predvsem v osrednjem delu georadarskih posnetkov, je mogoče sklepati na prisotnost votlin v kamnitem zidu.

5.2.1.2 Termografske meritve

Čeprav se termografske meritve običajno uporabljajo za odkrivanje napak v ovojju zgradbe, kot so na primer toplotni mostovi, slabo vgrajena okna ali pomanjkljivosti pri inštalacijah, smo metodo v tem primeru uporabili pri spremljanju in kontroli uspešnosti sistematičnega injektiranja. S termografskimi meritvami (slika 5.54 b), je bila omogočena indentifikacija območij zidu s povišano površinsko temperaturo, ki je nastala kot posledica generirane toplote pri hidrataciji cementne injekcijske mešanice. Pri tem je potrebno poudariti, da termografija ne omogoča kvantitativnega spremljanja postopka injektiranja, je pa v kombinaciji z ostalimi metodami in spremljanjem količine vtisnjene mešanice, uporabna za hitre preglede. Iz termografskega posnetka je tako razvidna povečana temperatura v osrednjem delu injektiranega zidu, iz česar je mogoče sklepati, da so v tem delu zidu prisotne večje votline ali pa so te bližje površini kot na ostalih delih zidu.



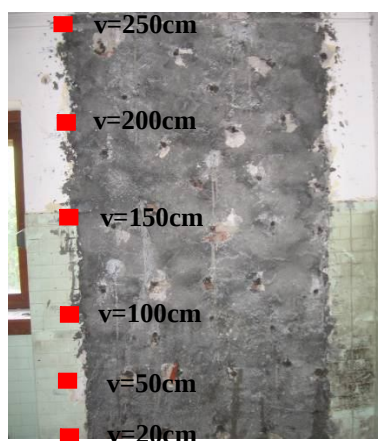
Slika 5.54: a) Digitalni in b) termografski posnetek zidnega slopa 1-C1 z notranje strani, 28 ur po injektiranju, z označenimi georadarskimi profili na višinah 160, 130 in 100 cm

Fig. 5.54: a) Digital and b) thermographical shot of wall 1-C1 from inside, 28 hours after injection grouting with GPR profiles marked on heights 160, 130 and 100 cm

Za pomoč pri tolmačenju termografskega posnetka na sliki 5.54 b) služi georadarski posnetek istega zidnega slopa na sliki 5.53. Na georadarskem posnetku so razvidne večje anomalije v osrednjem desnem delu zidu, iz česar lahko sklepamo, da gre za votline. Slednje potrjuje tudi termografski posnetek, pri katerem so, prav tako v osrednjem desnem delu zidnega slopa, vidne povišane površinske temperature, ki nakazujejo večjo količino vtisnjene injekcijske mešanice.

5.2.1.3 Meritve vlage

Razporeditev in stopnjo navlaženosti v zidovih po izvedenem sistematičnem injektiranju smo spremljali z meritvami vlage v različnih časovnih intervalih, pri tem pa smo uporabili dve metodi. Pri prvi metodi smo v zid vrtali vrtine globine 15-20 cm in vlago v odvzetem gradivu določali v laboratoriju s sušenjem vzorcev in ugotavljanjem razlike v masi med odvzetimi in posušenimi vzorci (gravimetrično določanje vlage v skladu s standardom SIST EN 1097-5:2000). Pri tej metodi vzorce materiala dobimo z vrtanjem vrtin s svedrom, nato pa jih neprodušno shranimo, da preprečimo spremembo vsebnosti vlage vzorca med transportom. Vlažen vzorec nato stehamo, zatem pa ga sušimo na temperaturi 105 ± 5 °C do konstantne mase. Da bi dobili večje število merodajnih podatkov, smo vlago vzporedno z gravimetričnimi meritvami merili tudi z elektronskim vlagomerom GANN 2000, s sprejemno oddajno anteno v krogli, ki jo prislanjamo k površini zidu na željenih mestih. Instrument prikazuje kapacitivne spremembe električnega polja, zazna pa vsebnost vlage v globini 1,5 do 3,0 cm. Z elektronskim vlagomerom izmerjene vrednosti so orientacijske in podane za primerjavo z gravimetrično iz vrednotenimi vrednostmi. V navodilih instrumenta so podane štiri vrste zidov glede na njihovo specifično težo. V našem primeru ($\gamma \geq 1800$ kg/m³) je merodajna sledeča razdelitev glede na izmerjene vrednosti: 20-40 (zelo suho), 50-70 (suho), 70-90 (delno suho), 90-120 (vlažno), 120-140 (zelo vlažno) in >140 (mokro).



Slika 5.55: Mesta meritve vlage na zidnem slopu 1-C1

Fig. 5.55: Measuring positions for moisture determination in wall 1-C1

*Preglednica 5.9: Meritve vlage v odvzetih vzorcih pred ter 10, 28 in 90 dni po injektiranju**Table 5.9: Measurements of moisture in samples taken before and 10, 28 and 90 days after injection grouting*

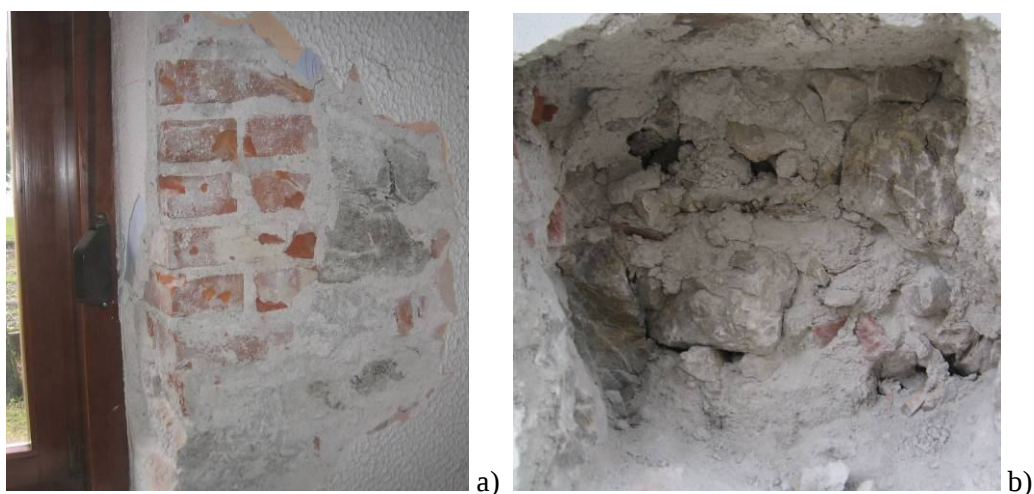
Mesto odvzema vzorca	Višina (cm)	Vlaga pred injektiranjem		Vlaga 10 dni po injektiranju		Vlaga 28 dni po injektiranju		Vlaga 90 dni po injektiranju	
		grav. (%ut.)	meritve in situ«	grav. (%ut.)	meritve »in situ«	grav. (%ut.)	meritve »in situ«	grav. (%ut.)	meritve »in situ«
1-C1	20	3,3	138	3,3	122	5,7	108	6,3	105
1-C1	50	1,6	95	2,5	110	2,7	104	1,8	92
1-C1	100	0,4	60	3,0	109	4,1	133	2,4	74
1-C1	150	0,2	55	2,8	122	1,0	137	1,7	85
1-C1	200	0,3	46	2,0	110	2,5	137	2,5	72
1-C1	250	0,4	35	3,1	108	3,0	142	2,1	89
2-A3	20	0,4	45	1,2	112	1,0	115	0,6	112
2-A3	50	0,3	55	1,4	108	1,4	104	1,0	87
2-A3	100	0,4	52	2,5	115	2,3	124	1,7	64
2-A3	150	0,2	47	2,7	105	0,7	130	0,8	61
2-A3	200	0,2	64	2,2	115	0,8	121	3,3	87
2-A3	250	0,4	55	3,5	120	2,1	122	1,6	74
3-A5	20	0,5	122	7,1	140	2,3	139	7,4	97
3-A5	50	0,3	50	2,2	139	3,0	135	3,9	79
3-A5	100	0,4	55	2,5	122	2,4	106	1,2	90
3-A5	150	0,2	56	2,8	112	3,4	105	1,8	89
3-A5	200	0,4	49	2,0	129	2,4	118	3,1	90
3-A5	250	0,4	70	1,2	115	2,0	128	1,1	68
4-C2	20	1,2	109	3,6	120	4,1	127	2,6	125
4-C2	50	0,7	93	1,4	106	2,1	127	2,3	127
4-C2	100	0,5	75	4,8	123	6,7	132	2,9	103
4-C2	150	0,3	75	3,2	88	2,7	106	3,4	78
4-C2	200	0,3	59	2,3	94	2,3	115	1,5	78
4-C2	250	0,4	72	5,4	98	5,1	105	0,8	90

Pred injektiranjem izmerjene vrednosti se na višini $v=20$ cm gibljejo v razponu od 109 do 138, kar pomeni vlažen do zelo vlažen zid v spodnji coni. Slednje je pripisati neobstoječi horizontalni hidroizolaciji, zaradi česar prihaja do neoviranega navlaževanja zidu preko temeljnih tal. Že na višini $v=50$ cm so izmerjene vrednosti bistveno manjše in sicer od 50 do 55 (suh zid) za zidna slopa 2 in 3 in od 93 do 95 (vlažen zid) za zidova 1 in 3. Meritve na višini več kot $v=50$ cm kažejo, da so bili zidovi pred injektiranjem suhi. Iz vrednosti meritev, izvedenih 10 dni po injektiranju zidov, je razvidno, da so zidovi na celotnem območju meritev vlažni do zelo vlažni z izmerjenimi vrednostmi v razponu od 88

do 140. Meritve, izvedene čez 28 dni, kažejo podobno sliko, saj se izmerjene vrednosti gibljejo v razponu od 104 do 137. Bistvene razlike je opaziti šele 90 dni po izvedbi injektiranja. Vrednosti v spodnji coni zidu (do $v=100$ cm) so sicer tudi pri teh meritvah dokaj visoke (vlažen do zelo vlažen zid), najverjetneje zaradi že omenjenega navlaževanja zidu preko temeljnih tal. Vrednosti v višjih območjih zidu (nad $v=100$ cm), pa so v primerjavi s predhodnimi meritvami občutno nižje, in sicer od 61 do 90 (suh do delno suh zid).

5.2.2 Delno destruktivne preiskave (DDT)

Pred odločitvijo o ustreznosti objekta za izvajanje preiskav strižne nosilnosti zidov in določitvijo zidnih slopov, namenjenih utrditvi z injektiranjem, je bilo poleg pregleda objekta in dostopne projektne dokumentacije potrebno izvesti delno destruktivne preiskave. Izvedene so bile globinske preiskave, pri katerih smo do sredine širine zidu izvedli več sond približnih dimezij 30 x 30 cm (slika 5.56 b), s katerimi smo ugotavljali način gradnje, vrste uporabljenih materialov in prisotnost votlin v jedru zidu. Ugotovljeno je bilo, da so zidovi kamniti, grajeni dvoslojno brez izrazitega vmesnega jedra. Kamnite gradnike je večinoma predstavljal apnenec, delno peščenjak, evidentirani so bili tudi posamezni kosi opeke. Kot vezivo je uporabljena apnena malta dobre kakovosti, pripravljena s pranim agregatom frakcije 2/4 in 4/8 mm, tlačno trdnost malte ocenjujemo na $f_{cv}=2$ MPa. S površinskim sondiranjem - odbijanjem ometa do strukture zidu so bila identificirana mesta obzidave s polno opeko navadnega formata, kar je bilo v dodatno pomoč pri pozicioniranju zidnih slopov.



Slika 5.56: a) Površinsko sondiranje b) globinsko sondiranje zidov

Fig. 5.56: a) Surface sounding b) depth sounding of the wall

5.2.3 Izvedba sistematičnega injektiranja

Sistematično injektiranje je bilo izvedeno na zidnih slopih 1-C1, 2-A3, 3-A5 in 4-C2, katerih pozicija je prikazana na sliki 5.51. Pri tem smo, da bi za posamezne vrste injekcijskih mešanic zagotovili primerljive pogoje vgradnje in staranja, s cementnima injekcijskima mešanicama C1 in C2, zainjektirali označene dele zunanjih (obodnih) zidov objekta, s kombiniranimi cementno-apnenima mešanicama A3 in A5 pa označeno območje notranjega (vmesnega) zidu objekta.

Iz vseh zidnih slopov so bili pred začetkom injektiranja odstranjeni ometi, v nadaljevanju pa z notranje strani zidov izvrtane poševne vrtine pod kotom 15° v približnem rastru 30 cm. Vrtine so bile izvedene z zamikom med vrstami do globine $2/3$ debeline zidu, v vsako izmed njih pa z namenom omočenja zidu vlito približno 1,5 l vode. V izvrtane vrtine so bili vgrajeni injekcijski nastavki, površina zidov pa obdelana z grobim cementnim obrizgom. Injektiranje je potekalo od spodaj navzgor pod pritiskom $p=3$ bar, s sprotnim zapiranjem injekcijskih nastavkov ob iztekanju mešanice.

Ker smo že pri injektiranju cilindričnih preskušancev, kljub upoštevanju predpisanih vodovezivnih razmerij oziroma potrebe po vodi, naleteli na težave pri doseganju ustrezne pretočnosti, smo pred injektiranjem objekta »in situ« izvedli dodatne laboratorijske preiskave pretočnosti. Ponovno smo ugotovili, da v primeru cementnih injekcijskih mešanic C1 in C2, s predpisanim vodovezivnim razmerjem ni mogoče doseči ustrezne pretočnosti. Vodovezivna razmerja za mešanici C1 in C2 so bila tako ustrezno povišana, vrednosti pa upoštevane pri pripravi mešanic na objektu. V preglednici 5.10 podajamo količine, ki smo jih merili pri spremljavi injektiranja.

Preglednica 5.10: Vrednosti meritev izvedenih pri spremljavi injektiranja

Table 5.10: Values measured before and between injection grouting

Oznaka zidu/meš.	Potreba po vodi v/m	Pretočnost v $t=0$ (s)	Čas meš. (min.)	Čas injekt. (min.)	Pritisk (bar)	Poraba mešanice (l)	Poraba mešanice (kg/m^3)	Temp. zun./not. ($^\circ\text{C}$)
1-C1	0,425 (0,40*)	15,1 (42,3*)	10	65	3	390	168	14/17
2-A3	0,50	13,0	5	70	3	228	134	18/15
3-A5	0,619	15,9	10	60	3	272	146	19/16
4-C2	0,45 (0,435*)	17,2 (29,9*)	3	55	3	301	162	18/15

*vrednosti pred povišanjem v/m razmerja

Potreba po vodi (v/m) in pretočnosti pred povečanjem deleža dodane vode, so v preglednici 5.10 označene z *. Že minimalno povečanje deleža dodane vode (iz $v/m=0,40$ na $v/m=0,425$), je v primeru mešanice C1 pomenilo veliko razliko v pretočnosti (pred povečanjem 15,1 s, po povečanju 42,3 s). Vsako izmed mešanic smo pred začetkom injektiranja mešali toliko časa, kot so to zahtevala navodila in sicer 3 minute v primeru mešanice C2, 5 minut v primeru mešanice A3, ter 10 minut v primeru mešanic C1 in A5. Injektiranje smo pri vseh mešanicah izvajali pod pritiskom $p=3\text{bar}$, pri čemer smo za vsak posamezen zidni slop spremljali porabo injekcijske mešanice. Večjo porabo smo izmerili pri injektiranju obodnih zidnih slopov 1-C1 in 4-C2, kjer je za slop 1-C1 poraba mešanice znašala 390 l oziroma 168 kg/m^3 , za slop 4-C2 pa 301 l oziroma 162 kg/m^3 . Nekoliko manjša je bila poraba pri injektiranju notranjih zidnih slopov 2-A3 in 3-A5 in sicer 228 l oziroma 134 kg/m^3 za slop 2-A3 in 272 l oziroma 146 kg/m^3 za slop 3-A5. Če upoštevamo iskustveno merilo porabe suhe mešanice $120\text{--}150\text{ kg/m}^3$, gre v vseh primerih za močno porozne zidove.

Ne glede na to, da je injektiranje izvajala izkušena ekipa, smo pri izvedbi opazili pomanjkljivosti z odpravo katerih bi bilo mogoče kakovost izvedenih del izboljšati. Da bi se izognili vnosu zračnih mehurčkov, izvajalci v času injektiranja pogosto prekinejo proces mešanja. Slednje je v našem primeru imelo za posledico slabšo obdelavnost, pretočnost in težavno izvedbo injektiranja predvsem v primeru mešanic C2 in A5. Ko smo pri pripravi naslednjih šarž ponovno uvedli konstantno mešanje injekcijske mešanice tudi v času izvedbe injektiranja, do omenjenih težav ni več prihajalo.

6 NAVODILA ZA ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTNE IZVEDBE INJEKTIRANJA

Za zagotovitev kakovostne izvedbe injektiranja so ključnega pomena predhodne preiskave, tako za ugotavljanje vrste in sestave zidu predvidenega za utrditev s sistematičnim injektiranjem, kot tudi poznavanje sestave (kompozicije) in mehansko-fizikalnih lastnosti injekcijske mešanice. Pri preiskavah zidu želimo ugotoviti, kakšna je struktura zidov in ali so ti sploh injektibilni, zanima nas, kakšne vrste kamna in veziva so bile uporabljene pri gradnji ter kakovost in sestava zaključnega sloja (ometa) zidu predvsem v primeru, da ga je potrebno ohraniti nepoškodovanega. Pri preiskavah injekcijske mešanice je poudarek na ugotavljanju mehansko-fizikalnih in kemijskih lastnosti suhe in sveže pripravljene ter strjene mešanice.

6.1 Poznavanje materialnih lastnosti in strukture zidov

6.1.1 Predhodne preiskave strukture - injektibilnosti zidov

Metode, s katerimi je mogoče ugotavljati strukturo in injektibilnost zidov, so bile že opisane v predhodnih poglavjih. Za merodajen rezultat in poznavanje strukture zidu je potrebna medsebojna primerjava večjega števila uporabljenih metod. Kot najbolj primerna se izkaže kombinacija delno destruktivnih preiskav z georadarskimi ali ultrazvočnimi meritvami. Delno destruktivne preiskave zidu izvajamo lokalno z odpiranjem površinskih sond z odstranitvijo ometa, izvedbo globinskih sond do približno polovice širine zidu in vrtanjem vrtin (jeder) premera $d=100$ mm po celotnem prerezu zidu, medtem ko se georadarske in ultrazvočne meritve izvajajo na večjem območju zidu.

6.1.2 Predhodne preiskave osnovnih gradnikov zidu-kamnov, malte in ometov

Poznavanje kemijsko-mineraloške sestave in fizikalno-mehanskih lastnosti osnovnih gradnikov zidu, je s stališča kompatibilnosti med obstoječimi materiali in materiali, s katerimi nameravamo zid utrditi, ključnega pomena.

V prvi fazi po odvzemu vzorcev malte in ometa iz zidu želimo ugotoviti, kakšna vrsta agregata in veziva je bila uporabljena za pripravo malte. Pri tem uporabljamo kombinacijo vizualnega pregleda in optičnega mikroskopiranja, uporabimo lahko tudi rentgensko difrakcijsko analizo. V nadaljevanju lahko izvedemo tudi kemijsko analizo, s katero lahko kvalitativno določamo količino veziva, agregata in vodotopnih soli.

V sklopu določevanja fizikalno-mehanskih lastnosti gradnikov zidu nas zanimajo prostorninska masa, poroznost, sposobnost absorpcije vode, odpornost na zmrzovanje in odtaljevanje, koeficient temperaturnega raztezka ter tlačna, upogibna in sprjemna trdnost.

Zaradi možnosti nastanka alkalno-silikatne reakcije, do katere lahko pride med alkalijami, prisotnimi v injekcijski mešanici, in reaktivnim silikatnim agregatom, je potrebno analizirati alkalno reaktivnost kamnov, drobirja in agregata uporabljenega pri gradnji zidu, ki ga nameravamo utrditi. Pri tem uporabimo mineraloško-petrografsko analizo kamenega agregata, ki nam poda kvalitativno in kvantitativno zastopnost potencialno reaktivnih mineralov in kamnin. V primeru, da z mineraloško petrografsko analizo ugotovimo prisotnost reaktivnih komponent, je naslednja stopnja kemična metoda za oceno alkalne občutljivosti agregatov.

Za ugotavljanje potencialne nevarnosti alkalno-karbonatne reakcije prav tako uporabimo mineraloško petrografsko analizo, ki nam pokaže sestavo kamnine, količinski in strukturni odnos dolomita in apnenca ter količino glinenih primesi.

6.2 Lastnosti injekcijskih mešanic, pomembne za kakovostno izvedbo

Namen utrditve kamnitega ali mešanega kamnito-opečnega zidu z določenim prispevkom votlin s sistematičnim injektiranjem je, da dosežemo zlepljenje posameznih gradnikov zidu v čim bolj homogeno celoto in s tem izboljšamo mehanske lastnosti zidu. Bistvene lastnosti suhe, sveže pripravljene in strjene injekcijske mešanice, ki nam to omogočijo, podajamo v nadaljevanju.

6.2.1 Suha injekcijska mešanica

Pri suhi injekcijski mešanici so za kakovostno izvedbo pomembne naslednje lastnosti:

- **zrnavost:** posamezna zrna injekcijske mešanice morajo biti za kakovostno zapolnjenje razpok in votlin v zidu čim manjša.
- **specifična površina:** finost mletja delcev mešanice, ki jo vrednotimo s specifično površino (razvita površina zrn v 1 g praškastega materiala), je pomembna za uspešnost zapolnitve manjših razpok in mora biti v ta namen čim večja. Dobri rezultati pri injektiranju manjših razpok s cementnimi injekcijskimi mešanicami so bili doseženi s specifično površino $>3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Paillere in sod., 1992)
- **vsebnost škodljivih substanc:** delež substanc, ki bi lahko škodljivo vplivale na poslikave: vodotopne soli, kloridi, sulfati in nitrati, mora biti čim manjši. Za vsako izmed navedenih substanc smo glede na kakovostni razred mešanice določili mejne vrednosti oziroma kriterije, katerih ne smejo presegati. Kriteriji za vodotopne soli tako znašajo: $\leq 1,0 \%$ za razred C, $\leq 0,5 \%$ za razred B in $\leq 0,1 \%$ za razred A. Omejitveni kriteriji za vrednosti kloridov so: $\leq 0,05 \%$ za razred C, $\leq 0,02 \%$ za razred B in $\leq 0,01 \%$ za razred A. Kriteriji za omejitev vsebnosti sulfatov so: $\leq 3,0 \%$ za razred C, $\leq 0,5 \%$ za razred B in $\leq 0,1 \%$ za razred A. V primeru nitratov so omejitve naslednje: $\leq 0,005 \%$ za razred C, $\leq 0,002 \%$ za razred B in $\leq 0,001 \%$ za razred A.

6.2.2 Sveže pripravljena injekcijska mešanica

Bistvene lastnosti sveže pripravljene injekcijske mešanice so:

- **pretočnost mešanice:** pretočnost mora biti zadostna, da, upoštevajoč nizek delovni pritisk, dosežemo čim boljšo zapolnitev votlin in razpok v zidu. Kriterij za mešanico kakovostnega razreda A velja $t \leq 25 \text{ s}$ in $\Delta t \leq 10 \%$, kar pomeni, da mora biti čas pretoka mešanice skozi standardiziran lijak (EN 445) takoj po zamešanju in po preteku 30 min manjši ali enak 25 s, hkrati pa med obema meritvama ne sme priti do več kot 10 % razlike. Za mešanice kakovostnih razredov B in C velja $t \leq 30 \text{ s}$ in $\Delta t \leq 15 \%$, pogoj je pretočnost pri obeh meritvah manjša od 30 s, hkrati pa med obema meritvama ne sme biti več kot 15 % razlike.

- **stabilnost mešanice:** med postopkom injektiranja in v času vezanja ne sme priti do razmešanja ali segregacije mešanice.
- **čas vezanja:** mešanica mora doseči ustrezne mehanske karakteristike v sprejemljivih časovnih okvirih, delno strjevanje ali strjevanje skozi dolgo časovno obdobje ni sprejemljivo. Na drugi strani mora biti čas vezanja zadosti dolg, da je omogočeno nemoteno vgrajevanje injekcijske mešanice.
- **vodozadržnost/izločanje vode:** vrednosti vodozadržnosti morajo biti zaradi potencialnega kapilarnega transporta vode k eventualno poslikanim zaključnim slojem zidu čim višje, hkrati pa je visoka vodozadržnost pomembna zaradi poslabšanja mehanskih lastnosti mešanice, do katerih pride ob povečani izgubi vode. Kriterij izločanja vode za mešanice kakovostnih razredov A, B in C je $\leq 2,0 \%$ izločene vode po preteku treh ur.

6.2.3 Strjena injekcijska mešanica

Za kakovostno izvedbo injektiranja mora strjena injekcijska mešanica izkazovati naslednje lastnosti:

- **dobra sprijemnost s podlago in primerno visoka natezna trdnost:** slednja je ključnega pomena za kakovostno medsebojno povezavo posameznih gradnikov zidu. Spodnja meja sprijemne trdnosti znaša $f_u=0,10$ MPa, spodnja meja cepilne natezne trdnosti, pri kateri gre za indirektni preizkus natezne trdnosti, pa $f_{ct}=0,80$ MPa, pri čemer navedeni omejitvi veljata za kakovostne razrede A, B in C.
- **minimalna sprememba prostornine:** da ne pride do zmanjšanja sprijemnosti s podlago in nastanka razpok zaradi spremembe prostornine, morajo biti te vrednosti čim manjše. Pri mešanicah kakovostnega razreda C smo dopustno spremembo prostornine omejili na $-1,0 \% \leq C \leq +1,0 \%$, za kakovostni razred B na $-0,6 \% \leq B \leq +0,6 \%$ in za kakovostni razred A na $-0,3 \% \leq A \leq +0,3 \%$.
- **kompatibilnost z osnovnimi gradniki zidu:** vgrajena mešanica mora biti kompatibilna z materiali v zidu v kemijskem in mehansko-fizikalnem smislu. Če želimo ohraniti duktilno obnašanje zidu in sposobnost prevzemanja deformacij, morajo biti mehanske lastnosti strjene mešanice v okvirih mehanskih lastnosti obstoječega veziva v zidu.
- **stabilnost oziroma trajnost strjene mešanice:** zaradi vplivov, kot sta sprememba temperature ali vlage, ne sme prihajati do spreminjanja mehanskih lastnosti ali spremembe prostornine vgrajene mešanice.

- **preprečevanje kapilarnega dviga:** kapilarni dvig oziroma transport vode in posredno prenos škodljivih substanc v zidu lahko zmanjšamo oziroma preprečimo z vodoodbojnimi (hidrofobnimi) dodatki. Dopustne vrednosti kapilarnega dviga znašajo 30kg/m^3 za mešanice kakovostnega razreda C, 20kg/m^3 za mešanice kakovostnega razreda B in 10kg/m^3 za mešanice kakovostnega razreda A.

6.3 Omejitev vlažnosti zidov

Omejitev vlažnosti oziroma preprečevanje dostopa vodi in kapilarnega dviga v zidu je bistvenega pomena ter je predvsem pri utrjevanju objektov kulturne dediščine, kjer želimo varovati zaključne sloje zidov, obvezen poseg. Na ta način bomo v zidovju ne le preprečili poškodbe zaradi prekomerne vlažnosti, temveč tudi škodljive vplive, do katerih bi lahko prišlo posredno zaradi potencialne kemijske nekompatibilnosti vgrajenih in obstoječih materialov v zidu.

Voda deluje kot transporten medij in omogoča prenos škodljivih snovi po zidu, hkrati pa aktivno sodeluje pri kemijskih reakcijah, ki povzročajo degradacijo. V ustrezno vzdrževanih zidovih, ki so bili ohranjeni v suhem stanju, ni prihajalo do kemijske degradacije, četudi bi zaradi potencialno »nevarnih« komponent v zidu ob prisotnosti vlage lahko prišlo do nastanka škodljivih produktov (Collepari, 1990).

Pred izbiro ustreznih sanacijskih postopkov, s katerimi želimo omejiti vlažnost zidov, je potreben detajlen strokoven pregled objekta, po potrebi pa tudi izvedba ustreznih preiskav. V sklopu pregleda nas zanimajo načrti in dejansko stanje objekta (globina in zasnova temeljev, zasnova in sestava nosilnih zidov, stanje ostrešja, fasad in teras), okolica objekta (višina podtalnice, možnosti dotoka površinskih voda) ter vrsta nastalih poškodb. V sklopu preiskav lahko preskušamo vodotesnost obstoječih komunalnih vodov v objektu, z odvzemom vzorcev gradiva ter sušenjem v laboratoriju pa ugotavljamo porazdelitev vlage po globini in višini zidov, kar je eden izmed pokazateljev območij vstopa vlage v objekt. Namen pregleda in preiskav objekta je ugotavljanje vseh vzrokov navlaževanja in izbira ustreznih sanacijskih postopkov za odpravo posledic navlaževanja.

6.3.1 Omejitev dostopa vodi

6.3.1.1 Izvedba drenaže in odvodnjavanja ob objektu

Pri praktično vseh objektih prihaja do navlaževanja temeljnih zidov preko vertikalnega stika zidu z navlaženim okoliškim terenom. Da bi tak prehod vlage v temeljne zidove preprečili, izdelamo ob objektih vkopane drenaže v kombinaciji z vertikalno hidroizolacijo zidov. Drenaže se izvajajo ob vseh zunanjih zidovih objektov in ob zidovih atrijev.

Hkrati z izvedbo drenaže je potrebno poskrbeti tudi za izdelavo peskolovov in njihovo povezavo z vertikalami strešnih žlebov ter odvodnavanje v obstoječo kanalizacijsko omrežje ali ponikovalnico. Ustrezno odvajanje površinskih voda dosežemo z izdelavo vodo nepropustnega tlaka ob objektu z ustreznim prečnim naklonom stran od objekta.

6.3.1.2 Izvedba hidrofobnih (vodoodbojnih) sanacijskih ometov

Zaradi vlage propadle omete (običajno je to v kletnih prostorih), se odstrani, očisti malto med spojnici in nadomesti z novimi - hidrofobnimi sanacijskimi ometi. Hidrofobnosti mora imeti tako osnovni obrizg kot groba in fina malta za ometavanje. Hidrofobnosti so izdelani iz cementa in apna kot veziva ter različnih polnil (pesek, lahek agregat) in dodatkov, ki povečajo vsebnost zračnih por in zagotavljajo površinsko vodoodbojnost kapilar (Apih, 1991). Hidrofobnosti omogočajo sušenje vlažnih zidov, saj so praviloma paroprepustni, hkrati pa preprečujejo dostop vlage.

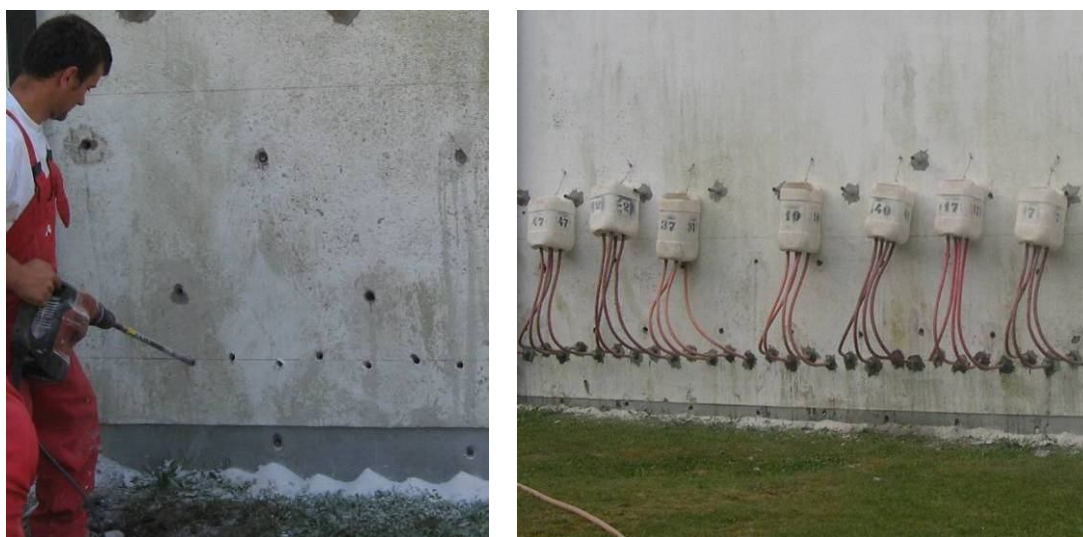
6.3.2 Preprečitev kapilarnega dviga

6.3.2.1 Izvedba hidroizolacijske bariere

Hidroizolacijsko bariero v zidu je načeloma mogoče izvesti mehansko z vgrajevanjem horizontalne izolacije, pri čemer zid prerežemo in v izdelano režo vgradimo vodonepropustno plast iz bitumenskega traku ali nerjaveče pločevine. Ob ustrezni izvedbi dosežemo učinkovito prekinitev kapilarnega sistema, vendar je postopek problematičen z več vidikov: velika možnost poškodb instalacij v zidu, težka obdelava vogalov, nevarnost posegov v zidu med izvedbo postopka in zmanjšanje potresne odpornosti zidu.

Primernejši je kemijski postopek izvedbe hidroizolacijske bariere oziroma penetracija zveznega sloja zidu po celotni širini in dolžini z raztopino silikonatov. Raztopino se v zidove uvaja enostransko preko

sistema vrtin do globine vsaj $\frac{2}{3}$ debeline zidov. Postopek se uporablja predvsem pri opečnih in mešanih kamnito-opečnih zidovih. Bistvo postopka je, da se površina kapilar v gradivu zida prevleče s slojem hidrofobnih molekul, pri čemer ostanejo kapilare prazne (Apih, 1986). Ker je v votlih zidovih težko zagotoviti zvezen hidrofobni sloj, se postopek običajno uporablja v kombinaciji s hidrofobnim sistematičnim injektiranjem.



Slika 6.1: Izvedba hidroizolacijske bariere (F. Vugrinec)

Fig. 6.1: Execution of hydro isolation barrier (F. Vugrinec)

6.3.2.2 Izvedba hidrofobnega sistematičnega injektiranja

Pri utrditvi zidov, ki so v stiku z okoliškim terenom in približno 1m nad koto terena, izvedemo sistematično injektiranje s hidrofobno injekcijsko mešanico, ki ima v strjenem stanju zaradi hidrofobnih dodatkov občutno reducirano vodovpojnost, s čimer bistveno zmanjšamo kapilarni dvig vode v zidu, do katerega bi lahko sicer prišlo zaradi srkanja vode iz podlage.

6.4 Izvajalski ukrepi

6.4.1 Priprava zidu in izvedba injektiranja

6.4.1.1 Izdelava testnega polja injektiranja

Pri utrjevanju zidov, za katere smo na podlagi prehodnih preiskav ugotovili, da so neakovostno grajeni, z medsebojno slabo povezanimi sloji in znatnim deležem votlin, je potrebna izvedba enega ali več testnih polj. Testna polja nam skupaj z informacijami, pridobljenimi z delno destruktivnimi in nedestruktivnimi metodami preiskovanja zidov, omogočajo določitev ustreznih pritiskov injektiranja, določitev ustrezne globine in rastra vrtin, določitev potrebne količine vode za omočenje zidu ter ugotavljanje časa, potrebnega za strjevanje injekcijske mešanice v zidu.

6.4.1.2 Določitev ustreznih pritiskov injektiranja

Pritiski pri injektiranju kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov se gibljejo v razponu $p=1,0-4,0$ bar. Velikost apliciranega pritiska je odvisna od injektabilnosti injekcijske mešanice, injektabilnosti zidu (deleža in povezanosti votlin v zidu) in kakovosti veziva ter povezanosti posameznih gradnikov zidu.

6.4.1.3 Določitev globine, naklona in razporeditve vrtin

V strokovni literaturi je glede globine vrtanja zaslediti vrednosti med $1/2$ širine zidu (Tomažević, 1992) in $2/3$ širine zidu (Van Rickstal, 2000), vendar je dejansko potrebno globino vrtanja zaradi velikega števila različnih vrst zidov, načinov gradnje in debeline posameznih slojev mogoče določiti le na podlagi predhodnih preiskav. Vrtine običajno vrtamo pod kotom 15° . Način razporeditve in gostota vrtin je odvisna od strukture zidu, ki ga utrjujemo. Običajna gostota vrtin znaša 4 kom/m^2 , pri čemer jih izvajamo na medsebojni razdalji $0,5 \text{ m}$. Pri zidovih z manjšim deležem oziroma medsebojno slabo povezanimi votlinami se raster vrtin ustrezno zgosti, v vsakem primeru pa se vrtine izvaja z zamikom, v »cik-cak« vzorcu.

6.4.1.4 Omočenje zidu

Običajna količina vode, ki jo pri omočenju oziroma spiranju preko vgrajenih injekcijskih nastavkov vnesemo v zid, znaša $1,50 \text{ l/nastavek}$. V primeru prisotnosti nečistoč, prahu in močno porozne površine gradnikov zidu, ki lahko vodi do visokih vrednosti kapilarnega srka, je potrebno, v skladu z

ugotovitvami pri izvedbi testnega polja, vneseno količino vode povečati. Omočenja ne izvajamo pri zidovih objektov, kjer se na podlagi predhodno izvedenih preiskav zaradi obstoječih materialov in substanc v zidu pričakuje, da bi spiranje lahko povzročilo dodatne poškodbe strukture zidu ali zaključnih slojev. V takih primerih se injektiranje izvaja z injekcijskimi mešanici s čim večjo vodozadržnostjo in pretočnostjo ter minimalnim izločanjem vode.

6.4.1.5 Postopno napredovanje injektiranja

Pri sistematičnem injektiranju nekakovostno grajenih zidov z velikim deležem votlin so še posebej v primeru visokih zidov, brez vmesnih medetažnih konstrukcij (dvorane ali stolpi) potrebni dodatni ukrepi. Zaradi velikega deleža votlin oziroma večjih lokalno prisotnih kavern v zidu lahko zaradi sočasnega delovanja hidrostaticnega pritiska sveže mešanice s pritiskom injektiranja pride do poškodb zidu. V takih primerih je potrebno injektiranje izvajati postopno, največ do višine 1 m in nadaljevati po strditvi mešanice.

6.4.2 Varovanje zaključnih slojev

Pri utrjevanju zidov objektov kulturne dediščine se, kadar imamo opravka z zidovi, katerih zaključni sloji so obdelani s poslikavami oziroma freskami, pojavi problem varovanja le-teh pred eventualnimi poškodbami. V smislu izvajalskih ukrepov za preprečevanje poškodb, do katerih bi lahko prišlo pri utrjevanju takšnega zidu s sistematičnim injektiranjem, je možna izvedba podpornega opaža ali snemanje freske in ponovna namestitvev.

6.4.2.1 Izvedba podpornega opaža

Da bi obvarovali omet zidu, ki ga utrjujemo, ga je mogoče pred začetkom injektiranja z izvedbo opaža (običajno lesenega) podpreti in s tem preprečiti odpadanje ometa zaradi pritiskov, nastalih kot posledica injektiranja. Pri tem je potrebno med opažem in zidom namestiti material (npr. penasto gumo), ki ne bo povzročal odrgnin in poškodb na poslikavah, hkrati pa bo zagotovil ustrezno podprtost na celotnem območju, ki ga želimo obvarovati pred poškodbami. V primeru da so na poslikavi oziroma ometu zidu, ki ga želimo obvarovati, prisotne razpoke, skozi katere bi lahko prišlo do iztekanja injekcijske mešanice med postopkom sistematičnega injektiranja, jih je potrebno pred izvedbo opaža ustrezno sanirati. To običajno storimo z vgradnjo injekcijskih nastavkov ali pakerjev na primerni medsebojni razdalji, tesnenjem razpok med njimi in končno izvedbo linijskega injektiranja razpok.

6.4.2.2 Snemanje freske in ponovna namestitvev

Kot varovalni ukrep je možna začasna odstranitev freske (snemanje) in ponovna namestitvev po končanem injektiranju. Pri postopku snemanja je potrebno, če je barvna plast freske v slabem stanju, fresko utrditi s primernimi sredstvi in odstraniti tujke (pajčevina, žebliji ...). Nadalje se površino zidu oziroma lice freske utrdi s postopkom »armiranja« tako, da se jo prelepi s tremi plastmi gaze. Po odločitvi o velikosti in načinu podpiranja površine, ki jo želimo začasno odstraniti, se na primernem mestu v omet zareže kanal. Ta omogoča dostop do poslikave s tako imenovanimi »kopji« (dolga kovinska palica s suličastim nastavkom), s katerimi pristopimo k snemanju (ločevanje poslikave in ometa od strukture zidu). Odstranjeno poslikavo se z licem položi na vnaprej pripravljeno podlago, hrbet poslikave pa zaradi lažjega transporta stanjša. Po transportu se s hrbta poslikave dodatno odstrani odvečni omet, in sicer do barvne plasti, oziroma debeline $d=2-5$ mm. Naslednja faza je »armiranje« hrbta poslikave z apnenim kazeinatom in gazo v treh plasteh. Po tem se poslikavo obrne in z lica odstrani pred transportom nanešeno gazo in lepilo, nato pa sledi kitanje in retuša. Po končani utrditvi strukture zidu in izvedeni retuši poslikave, se jo lahko ponovno namesti na zid, pri čemer se jo dodatno pritrdi s posebnimi vijaki.

6.5 Kontrola kakovosti

6.5.1.1 Kontrola ustreznosti priprave zidu

Pred pričetkom injektiranja je potrebna kontrola priprave zidu, v sklopu katere se preverja: ustreznost vzorca razporeditve in gostote izvedenih vrtin, globina in prehodnost vrtin, kakovost izvedenih novih ometov v primeru, ko so bili stari odstranjeni.

6.5.1.2 Kontrola injekcijske mešanice

V sedANJI praksi se pri utrjevanju kamnitih zidov lastnosti injekcijske mešanice običajno niso kontrolirale. Za doseg ustreznosti kakovosti injektiranja in v izogib poškodbam zaključnih slojev predlagamo sledeč minimalen obseg kontrole kakovosti injekcijske mešanice: preverjanje vsebnosti škodljivih substanc (kloridov, alkalij, sulfatov) v suhi mešanici, kontrola deleža dodane vode suhi mešanici, časa in načina mešanja, izločanja vode in pretočnosti sveže pripravljene injekcijske mešanice, kontrola spremembe prostornine ter kontrola tlačnih in upogibnih nateznih trdnosti strjene injekcijske mešanice.

6.5.1.3 Kontrola injektiranja med in po izvedbi

Med izvedbo injektiranja se običajno kontrolira poraba suhe mešanice na prostorninsko enoto (kg mešanice/m³ zidu), priporočljiva pa je tudi spremljava sveže porabljene mešanice (l mešanice/m³ zidu), kar daje ob primerjavi z izvedbo predhodnih preiskav (na primer georadarskih meritev) dobro orientacijo glede zapolnitve votlin v zidu. V primeru injektiranja s cementnimi injekcijskimi mešanicami je zaradi sproščanja hidratacijske toplote priporočljiv kontrolni pregled s termokamero, ki nam omogoči prikaz temperature površine injektiranega zidu, iz katerega je, v kombinaciji z ostalimi nedestruktivnimi metodami, mogoče oceniti uspešnost injektiranja. V sklopu kontrole kakovosti že izvedenih del je priporočljiva izvedba georadarskih meritev in izvedba delno destruktivnih preiskav, kot sta globinsko sondiranje in vrtnje jeder.

7 ZAKLJUČKI

7.1 Rezultati preiskav in ugotovitve

V sklopu naloge izvedene preiskave so zajemale preliminarne in »in situ« preiskave, pri čemer so bile preliminarne preiskave zaradi preglednosti razdeljene na štiri sklope. Pri preliminarnih preiskavah so bile preiskovane lastnosti suhe, sveže pripravljene in strjene injekcijske mešanice, v tem okviru pa so bile izvedene tudi preiskave cilindričnih preskušancev. Drugi del preiskav je pomenil praktično aplikacijo uporabe izbranih injekcijskih mešanic pri utrditvi zidov kamnitega objekta »in situ«.

7.1.1 Preliminarne preiskave

Ocena posameznih mešanic po izvedenih prvih treh sklopih preliminarnih preiskav, podana v preglednici 5.5, nazorno pokaže lastnosti in obnašanje apnenih (A1, A2, A4, A6), kombiniranih cementno-apnenih (A3, A5, A7) in cementnih (C1, C2) injekcijskih mešanic, pri preiskavah suhe, sveže pripravljene in strjene injekcijske mešanice.

Izkaže se, da so pri prvem sklopu preliminarnih preiskav, to je pri kemijskih preiskavah suhe injekcijske mešanice, vsi analizirani vzorci zadostili minimalnim kriterijem. Do prvih izločitev je prišlo v drugem sklopu, pri preiskavah sveže pripravljene injekcijske mešanice. Težave pri zagotavljanju minimalno potrebne pretočnosti so se pokazale pri mešanicah A4, A7 in C2, vendar gre, kot je bilo ugotovljeno, pri slednji za pogost pojav, ki ga je mogoče korigirati že s poostreno kontrolo proizvodnje in dodanih sestavin, v tem primeru predvsem kakovosti in vrste dodanega mavca. Tretji sklop preliminarnih preiskav je izpostavil pomanjkljivosti apnenih injekcijskih mešanic, saj pri vseh pride do izločitve. Kot problematična se pri apnenih mešanicah izkaže predvsem prekomerna sprememba prostornine in slaba sprijemnost s podlago, pri čemer je zaradi drugačnih razmer v notranjosti zidu, ki ga utrjujemo, potrebna pazljiva interpretacija rezultatov. Sklepati je namreč mogoče, da bi bila sprememba prostornine apnene mešanice v zidu, zaradi omejitve dostopa zraka in posledično manjše stopnje izhlapevanja, manjša, kot je bila ugotovljena s preliminarnimi preiskavami. Tudi v primeru sprijemnosti s podlago je mogoče pri »in situ« aplikaciji pričakovati boljše rezultate, saj je zaradi zaprtosti prostora in posledično omejenega dostopa zraka krčenje strjujoče se mešanice v zidu temu primerno manjše kot na zraku. Tukaj je potrebno omeniti že znano pomanjkljivost počasnega strjevanja apnenih mešanic v zaprtih prostorih. V primeru da je kot vezivo za pripravo apnene mešanice uporabljeno gašeno ali hidratizirano apno, ki kot zračno vezivo za strjevanje oziroma

karbonatizacijo, potrebuje CO_2 iz zraka, je lahko karbonatizacija takšne mešanice v zidu občutno upočasnjena.

Če upoštevamo, da je v primeru mešanice C2 pretočnost parameter, ki ga je mogoče korigirati, se glede na postavljene kriterije in omejitve, kot primerne za praktično »in situ« aplikacijo sistematičnega injektiranja, izkažeta zgolj obe cementni mešanici (C1 in C2) in dve kombinirani cementno-apneni mešanici (A3 in A5). Pri tem se je potrebno zavedati, da ta ugotovitev ne pomeni, da so omenjene vrste mešanic a priori uporabne za injektiranje vseh vrst objektov. Pri projektiranju sestave injekcijske mešanice so namreč ravno tako kot izvedene preiskave suhe, sveže pripravljene in strjene injekcijske mešanice pomembne predhodne preiskave osnovnih gradnikov zidu, ki ga imamo namen utrditi in nam vzporedno z izvedenimi preiskavami injekcijske mešanice dajo odgovor o kemijski in mehansko-fizikalni kompatibilnosti obstoječih materialov in materialov, ki jih bomo s postopkom sistematičnega injektiranja vgradili v zid. Kombinirane cementno-apnene mešanice izkazujejo dodaten potencial pri zagotavljanju mehansko-fizikalne kompatibilnosti z obstoječim vezivom v zidu, saj nam spreminjanje ne samo vrste in količine dodatkov, ampak tudi razmerij deležev posamezne vrste veziva, omogoča korekcijo končnih vrednosti tlačnih, upogibnih in cepilnih nateznih trdnosti, s čimer se lahko približamo mehanskim lastnostim obstoječega veziva, kar je bistvenega pomena pri zagotavljanju ali ohranjanju določene stopnje duktilnosti zidu, ki ga utrjujemo.

S primerjavo vizualnega vrednotenja prerezov cilindričnih preskušancev po preiskavi, fizikalnih količin, spremljanih pred in med izvedbo injektiranja cilindrov, in rezultatov preiskav tlačne ter cepilne natezne trdnosti, je bilo mogoče strniti več ugotovitev. Tako kot že pri pripravi mešanic v drugem sklopu preliminarnih preiskav se je tudi tukaj izkazala problematika zagotavljanja ustreznih pretočnosti pri upoštevanju proizvajalčevega deklariranega vodovezivnega razmerja oziroma potrebe po vodi. Primerjava vrednosti cepilnih nateznih trdnosti mešanic f_{cg} in cepilnih nateznih trdnosti cilindrov f_{ctc} z deležem porušitve po kamnitem gradivu je nazorno pokazala, da so bile najvišje vrednosti cepilnih nateznih trdnosti cilindrov dosežene v primeru preskušancev C1, pri katerih je bil največji delež porušitve po kamnu, hkrati pa je bil v tem primeru evidentiran tudi najvišji prirastek cepilne natezne trdnosti cilindra v primerjavi s cepilno natezno trdnostjo mešanice, in sicer 28 %. Na visoke vrednosti cepilne natezne trdnosti cilindričnih preskušancev, zainjektiranih s cementnima mešanicama, je nedvomna vplivala tudi dokaj visoka vrednost sprijemne trdnosti, ki je v primeru mešanice C1 znašala $f_u=0,14$ MPa na apnencu in $f_u=0,19$ MPa na peščenjaku. V primeru C2 so bile sprijemne trdnosti s podlago še nekoliko višje, in sicer $f_u=0,19$ MPa na apnencu in $f_u=0,21$ MPa na peščenjaku.

Koristen podatek pri sistematičnem injektiranju troslojnega kamnitega ali mešanega kamnito-opečnega zidu je napoved stopnje povečanja mehanskih lastnosti jedra zidu, ki ga utrjujemo. Če poznamo mehanske lastnosti injekcijske mešanice, lahko s preiskavo cilindričnih preskušancev, ki ponazarjajo utrjeno jedro zidu, ocenimo mehanske lastnosti jedra po utrditvi, kar smo storili na osnovi dobljenih eksperimentalnih rezultatov. Vpliv tlačne trdnosti mešanice f_{cg} na tlačno trdnost cilindra f_{cc} prikazuje enačba 7.1:

$$f_{cc}=2,023 \cdot f_{cg}^{0,504}, R^2=0,84 \quad (7.1)$$

7.1.2 »In situ« preiskave

Za prakso je uporabna kombinacija rezultatov georadarskih in termografskih meritev. Čeprav v fazi izdelave naloge ni bila izvedena primerjava rezultatov georadarskih meritev pred in po injektiranju, iz katere bi bilo mogoče ugotavljati uspešnost injektiranja, je bilo iz korelacije georadarskih meritev pred injektiranjem in termografskih meritev po injektiranju mogoče sklepati na uspešnost zapolnitve votlin v zidu. Iz georadarskih profilov zidnega slopa 1-C1, so bile namreč jasno vidne anomalije - votline v zidu, na območju katerih so bile s termografskimi meritvami evidentirane povišane površinske temperature, nastale kot posledica sproščana hidratacijske toplote cementne injekcijske mešanice.

7.1.3 Napotki za nadaljnje delo

V sklopu varovanja in ohranjanja zaključnih slojev in poslikav zidov objektov kulturne dediščine je kot nadaljevanje raziskovalnega dela smiselna poglobljena študija tako kemijske kot tudi mehansko-fizikalne kompatibilnosti materialov, ki jih s postopkom sistematičnega injektiranja vnašamo v zid, z že obstoječimi materiali v zidu. Ker so poškodbe zaključnih zidnih slojev, ki so lahko posledica utrditve zidu s sistematičnim injektiranjem, odvisne od več dejavnikov, je neizogibno potrebno detajlno poznavanje vrste in lastnosti posameznih gradnikov zidu, sestave in mehansko-fizikalnih lastnosti injekcijskih mešanic, ki jih vgrajujemo, in tudi okoliščin ter vzrokov za nastanek poškodb. Pri tem bi bilo mogoče, po izvedenih preiskavah posameznih gradnikov zidu (kamna, opeke, veziva in zaključnih slojev), sestave in lastnosti injekcijskih mešanic ter ob poznavanju škodljivih ali celo destruktivnih mesebojnih reakcij posameznih materialov, določiti z vseh vidikov kompatibilne skupine obstoječih materialov v zidu in materialov, s katerimi želimo zid utrditi.

8 POVZETEK

Področje utrjevanja kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov s postopkom sistematičnega injektiranja v primeru običajnih, predvsem pa v primeru zidov objektov kulturne dediščine zaradi zahtevnosti in obsega problematike potrebuje tehnično regulativo, ki bi opredelila metodologijo dela, sestavo in lastnosti injekcijske mešanice za različne pogoje in vrste zidov ter kriterije za doseganje ustrezne kakovosti. Čeprav si gradbeni projektanti, izvajalci in nadzorniki pri delu do neke mere lahko pomagajo z internimi pravilniki in izkušnjami, so pogoste napake in nezadostna kakovost izvedenih del znak, da je tehnična regulativa tudi tukaj neizogibno potrebna. Glavni cilj dela in izvedenih preiskav je bil prispevati vzpostavitvi pravil in metodologije dela na področju utrjevanja kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov s postopkom sistematičnega injektiranja.

Prvi del preiskav izvedenih v sklopu dela predstavljajo preliminarne preiskave, ki so bile razdeljene na štiri sklope. Bistvo preliminarne laboratorijske preiskave je bilo podati mehanske, kemijske in fizikalne kriterije ter smernice za izbiro optimalne mešanice v posameznih primerih. V ta namen je bilo preiskanih devet injekcijskih mešanic dobavljenih na tržišču. Apnene mešanice so bile označene z oznakami A1, A2, A4 in A6, kombinirane cementno-apnene mešanice z A3, A5 in A7, cementne pa z oznakama C1 in C2. V prvem sklopu preliminarne preiskave je analizirana vsebnost potencialno škodljivih snovi v suhi injekcijski mešanici, drugi sklop obravnava sveže pripravljeno injekcijsko mešanico in predvsem lastnosti, ki so potrebne za kakovostno vgradnjo, tretji sklop predstavljajo preiskave strjene injekcijske mešanice. Pri vrednotenju rezultatov vsake izmed preiskav v prvih treh sklopih so definirani kriteriji, na podlagi katerih so bile mešanice razvrščene v kakovostne razrede A, B in C. V četrtem, zadnjem sklopu preliminarne preiskave, so bile izvedene preiskave cilindričnih preskušancev, s katerimi smo ponazorili utrjeno kamnito jedro zidu.

Drugi del preiskav predstavljajo »in situ« preiskave zidov konkretnega objekta. Pri tem so bile na osnovi postavljenih kriterijev in meril izmed devetih analiziranih injekcijskih mešanic, za injektiranje »in situ« izbrane štiri. V ožji izbor sta prišli obe cementni mešanici (C1 in C2) in dve kombinirani apnenno-cementni mešanici (A3 in A5). V sklopu »in situ« preiskav so bile izvajane tudi georadarske in termografske meritve ter meritve vlažnosti zidovja

V zadnjem delu naloge so podana navodila in preiskave, potrebne za ugotavljanje stanja in vrste kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov in navodila za zagotavljanje kakovostne izvedbe in kontrole del.

9 SUMMARY

The field of strengthening of stone and mixed stone-brick walls by means of grout injection in general, but especially in the case of strengthening of heritage buildings walls, because of the complexity and extent of the problem, needs a technical regulations that would define the methodology of work, the composition and properties of injection grouts for various conditions and types of walls, and the criteria for achieving adequate quality. Although the building designers, contractors and supervisors can to some extent help themselves with internal regulations and experience, frequent errors and inadequate quality of the work is a signal, that technical regulations are absolutely necessary in this field of work. The main objective of the work and the research was to contribute to the establishment of standards and methodology of work in the field of strengthening of stone and mixed stone-brick walls by means of grout injection.

The first part of the research is represented by preliminary research that consists of four segments. The essence of the preliminary laboratory tests is to present the mechanical, chemical and physical criteria and guidelines for selecting the optimal mixture in individual cases. Nine injection grouts were tested. Grouts that contain lime were marked with labels A1, A2, A4 and A6, combined cement-lime mixtures, with labels A3, A5 and A7, and finally cement grouts were marked with labels C1 and C2. In the first segment of preliminary research the content of potentially harmful substances in dry injection grout was analyzed. Second segment dealt with fresh injection grout and properties that are vital for quality of work. In third segment hardened injection grouts were analysed. In evaluating the results of each of the research in the first three segments criteria are defined on the basis of which grouts were classified as a grout of classes A, B and C. In the fourth segment of preliminary research cylindrical specimens that represent the strengthened internal core of the wall were analysed.

The second part of the research is practical, "in situ" application of selected injection grouts. In this part, chosen stone masonry walls were strengthened by means of grout injection technique.

On the basis of the criteria four grouts were selected for "in situ" application. Two cement grouts (C1 and C2) and the two combined lime-cement grouts (A3 and A5) were chosen. As part of the "in situ" research, GPR, termographical and humidity measurements of the walls were carried out. In the last part of the work, guidelines and research needed for assessment of condition and type of stone and mixed stone-brick walls and guidelines to ensure the quality and control of work were presented.

VIRI

UPORABLJENI VIRI

Apih V., 1991. *Kapilarna vlaga*. V: Zbornik strokovne delavnice Vlaga&Zgradbe. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: str. 23-32.

Apih V., Danielli D., 1987. *Hidrofobne malte in ometi, II. del*. Raziskovalna naloga. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: 35 str.

Apih V., Kos J., 1986. *Sanacija vlažnih zidov*. Raziskovalna naloga. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: 40 str.

Apih V., Makarovič M., Danielli D., 1986. *Hidrofobne injekcijske malte in ometi*. Raziskovalna naloga. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: 31 str.

Atkinson R.H., Schuller M.P., 1992. *Developement of injectable grouts for the repair of unreinforced masonry*. International Workshop CNR-GNDT. V: Effectiveness of injection techniques for retrofitting of stone and brick masonry walls in seismic areas. Milan, Politecnico di Milano, Department of Structural Engineering: str. 117-138.

Baronio G., Binda L., Modena C., 1992. V: *Criteria and methods for the optimal choice of grouts according to the characteristics of masonries*. International Workshop CNR-GNDT. Effectiveness of injection techniques for retrofitting of stone and brick masonry walls in seismic areas. Milan, Politecnico di Milano, Department of Structural Engineering: str. 139-157.

Beneška listina (angl. The Venice Charter), 1964. ICOMOS – International Council on Monuments and Sites: 4 str.

Bergant M., Baumgartner M., Kos J., 1998. *Tehnične informacije o pomembnejših posegih za rekonstrukcijo v potresu poškodovanih zidanih objektov (Teh. informacije DTP)*. Ljubljana, MOP, Državna tehnična pisarna Bovec-Kobarid: 17 str.

Bergant M., Dolinšek B., 2006. *Utrjevanje kamnitih in opečno-kamnitih zidov z injektiranjem*. Gradbenik, 2/2006: str. 35-38.

Binda L., 2007a. *Investigation and diagnosis of historic materials*. V: International Symposium: Studies on Historical Heritage, Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 295-304.

Binda L., 2006a. *The Difficult Choice of Materials Used for the Repair of Brick and Stone Masonry Walls*. V: 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures. Cairo, Egypt, April 24-27, 2006: 16 str.

Binda L., 2005. *The importance of investigation for the diagnosis of historic buildings: application at different scales (centres and single buildings)*. Structural analysis of Historical Constructions, 2005: p. 29-42.

Binda L., Anzani A., Saisi A., 2003b. *Preservation of the historic structures: investigation and diagnosis as essential steps for compatible choices*. ICPCM–A New Era of Building. Cairo, Egypt, February 18-20, 2003: 12 str.

Binda L., Baronio G., Tiraboschi C., Tedeschi C., 2003a. *Experimental research for the choice for the reconstruction of the Cathedral of Noto*. Construction and building Materials 17 (2003) p. 629-639.

Binda L., Baronio G., 1992. *Brick-masonry repair and strengthening by injection of grouts*. International Workshop CNR-GNDT. V: Effectiveness of injection techniques for retrofitting of stone and brick masonry walls in seismic areas. Milan, Politecnico di Milano, Department of Structural Engineering: str. 31-62.

Binda L., Cardani G., Cantini L., Tiraboschi C., 2007b. *On site and laboratory detection of the quality of masonry in historic buildings*. V: International Symposium: Studies on Historical Heritage. Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 667-674.

Binda L., Cardani G., Saisi A., Valluzzi M.R., 2006b. *Vulnerability analysis of the historical buildings in seismic area by a multilevel approach*. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing). Vol. 7, No. 4 (2006), p. 343-357.

Binda L., Modena C., Baronio G., Abbaneo S., 1997. *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. Construction and Building Materials, Vol.11, No. 3, 1997, p. 133-142.

Binda L., Pina-Henriques J., Anzani A., Fontana A., Lourenco P.B., 2006c. *A contribution for the understanding of load transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and Modelling*. Engineering Structures 28 (2006), p. 1132-1148.

Binda L., Saisi A., 2001. *Non destructive testing applied to historic buildings: The case of some Sicilian Churches*. <http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Historical%20constructions/page%2029-46%20Binda.pdf> (15.08.2008): 18 str.

Binda L., Bosiljkov V., da Porto F., Drdacky M., Galvarez Ruiz J.C., Gravina F., Falci, Hennen C., Johansson B., Modena C., Knupfer B., Maierhofer C., Marchisio M., M., Santiago J.R, Toledo E.L., Tomažević M., Valek J., Zajc A., Zanzi L., 2006. *On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings*. Brussels, European Commission, Directorate-General for Research: 138 str.

Binda L., Saisi A., *State of the Art of Research on Historic Structures in Italy*.
http://www.arcchip.cz/w11/w11_binda.pdf (15.08.2008): 51 str.

Bogovčič I., 1991. *Vlaga in njene posledice na stenskem slikarstvu*, V: Zbornik strokovne delavnice Vlaga&Zgradbe. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: str. 43-45.

Bosiljkov V., 1996, *Modeliranje mehanskih lastnosti zidov*. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 195 str.

Bosiljkov V., 2006. *Metode preskušanja zgodovinskih objektov*. Gradbenik 7-8/2006: str. 8-10.

Bosiljkov V., da Porto F., Valluzi M.R., Casarinni F., 2004a. *On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, Work Package 9: Structural Models, Experimental Tests on Irregular Masonry*. Brussels, European Commission, Directorate-General for Research: 37 str.

Bosiljkov V., da Porto F., Valluzi M.R., Casarinni F., 2004b. *On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, Work Package 11: Guidelines and Recommendations, Structural Modelling for the Assessment of the Load Bearing Capacity of the Masonry*. Brussels, European Commission, Directorate-General for Research: 71 str.

Collepari M., 1990. *Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings*. Materials and Structures, 1990, 23, p. 81-102.

Collepari M., 1999. *Thaumasite formation and deterioration in historic buildings*, Cement and Concrete Composites, Volume 21, Issue 2, April 1999, p. 147-154.

Corradi M., Tedeschi C., Binda L., Borri A., 2006. *Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry before and after reinforcement: Deep repointing*. Sprejeto v objavo 22. 11. 2006 pri Construction and Building Materials, članek dostopen na www.sciencedirect.com: 10 str.

da Porto F., Valluzi M.R., Modena C., 2003a. *Investigations for the knowledge of multi-leaf stone masonry walls*. V: First International Conference on Construction History, Madrid, Spain, 20-24 January, 2003: 9 str.

da Porto F., Valluzi M.R., Modena C., 2003b. *Performance assesment of diferent consolidation techniques for multi-leaf stone masonry walls*. V: ICPCM-A New Era of Building, Cairo, Egypt, Feb. 18-20, 2003. Cairo, ICPCM: str. 1-10.

EN 445: Grout for prestressing tendons-Test methods: 12 str.

EN 446: Grout for prestressing tendons-Grouting procedures: 8 str.

EN 447: Grout for prestressing tendons-Specification for common grout.: 5 str.

Gostič S., Dolinšek B., 2006. *Projektiranje rekonstrukcij*. Gradbenik, 6/2006: str. 33-37.

Identification of Strengthening Strategies. University of Minho, Portugal, Technical University of Catalonia, Spain, Central building research institute, India, University of Padua, <http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications> (5.9.2008): 105 str.

Jeffs P. A., 2001 *Core consolidation of Heritage Structure Masonry walls & foundations using grouting techniques-Canadian case studies*. V: 9th Canadian Masonry Symposium. Fredericton, New Brunswick: 12 str.

Kalagri A., Miltiadou A., Vintzileou E., 2007. *Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structure*. V: International Symposium: Studies on Historical Heritage, Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 371-378.

Krakovska listina (angl. The Charter of Krakow), 2000. Principles for conservation and restoration of Built Heritage, str. 1-5.

Mehta P. K., 1973 *Mechanism of expansion associated with ettringite formation*, Cem. Concr. Res. 1973, 3: p. 1-6

Mladenovič A., Vižintin N., Drnovšek S., 2000a. *Alkalno reaktivne petrografske komponente v agregatu za beton iz porečij Drave in Mure*. Materiali in tehnologije 34 (2000) 1-2: str. 103-105.

Mladenovič A., Šuput J., Capuder F., 2000b. *Re-occurring damage to hollow RC columns caused by ASR in the hardened grout mixture used in previous repair works*. V: 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Quebec: str. 879 - 887.

Miltiadou A., Kalagri A., Delinikolas N., 2007a. *Design of hydraulic grout and application methodology for stone masonry structures bearing mosaics and mural paintings: the case of the katholikon of Dafni Monastery*. V: International Symposium: Studies on Historical Heritage, Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 649-656.

Miltiadou A., Tassios T., 2007b. *Fluidity of hydraulic grouts for masonry-strengthening*. V: International Symposium: Studies on Historical Heritage, Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 339-346.

Miltiadou-Fezans A., Vintzileou E., Papadopoulou E., Kalagri A., 2006. *Mechanical Properties of Three-Leaf Stone Masonry after Grouting*. V: Structural analysis of Historical Constructions, 2006, p. 791-798.

Oliveira D.V., Lourenco P.B., Garbin E., Valluzzi M.R., Modena C., 2006. *Experimental Investigation on the Structural Behaviour and Strengthening of Three-Leaf Stone Masonry Walls*, Structural Analysis of Historical Constructions. New Delhi 2006: str. 817-826.

Paillere A.M., Miltiadou A., Guinez R., Serrano J.J., 1992. *Use of Silica Fume and Superplasticizers in Cement Grouts for Injection of Fine Cracks*. V: International Workshop CNR-GNDT. Effectiveness of injection techniques for retrofitting of stone and brick masonry walls in seismic areas. Milan, Politecnico di Milano, Department of Structural Engineering: str. 3-30.

Penazzi D., Valluzzi M.R., Saisi A., Binda L., Modena C., 2001. *Repair and strengthening of historic masonry buildings in seismic areas*. V: Int. Congr. »More than Two Thousand Years in the History of Architecture Safeguarding the Structure of our Architectural Heritage Betlehem. Palestine, 2 ,Sec. 5, 1-6.

PSIST prEN 1015-8:2001: Metode preskušanja zidarske malte-8.del: Določevanje zadrževanja vode sveže malte: 8 str.

SIST EN 445:2008: Injekcijska masa za prednapete kable-Preskusne metode: 15 str.

SIST EN 446: 2008: Injekcijska masa za prednapete kable-Postopki injektiranja: 17 str.

SIST EN 447: 2008: Injekcijska masa za prednapete kable-Osnovne zahteve: 13 str.

SIST EN 196-2: 2005: Metode preskušanja cementa -2.del: Kemijska analiza cementa: 50 str.

SIST EN 771-6: 2005, Specifikacija za zidake-6. del: Zidaki iz naravnega kamna: 29 str.

SIST EN 772-11: 2000, Metode preskušanja zidakov-Part 11: Ugotavljanje kapilarnega vpijanja vode betonskih zidakov ter zidakov iz umetnega in naravnega kamna in začetna stopnja vpijanja vode opečnih zidakov: 8 str.

SIST EN 1015-6: Metode preskušanja zidarskih malt-6.del: Ugotavljanje prostorninske mase sveže malte: 9 str.

SIST EN 1015-10: Metode preskušanja zidarske malte-6.del: Določevanje suhe prostorninske mase strjene malte: 7 str.

SIST EN 1015-11: 2001: Metode preskušanja zidarske malte-11.del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte: 12 str.

SIST EN 1015-12: 2001: Metode preskušanja zidarske malte-12.del: Določevanje sprijemne trdnosti strjenih ometov na podlage: 10 str.

SIST EN 1015-18: 2004: Metode preskušanja zidarske malte-18.del: Določevanje koeficienta kapilarnega vpijanja strjene malte: 8 str.

SIST EN 1097-5: 2000: Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov-5.del: Določevanje vode s sušenjem v prezračevanem sušilniku: 11 str.

SIST EN 1998-3: 2005, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3.del: Ocena in prenova stavb: 89 str.

SIST EN 12390-6: 2001, Cepilna natezna trdnost strjenega betona: 10 str.

SIST EN 14630: 2007, Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Ugotavljanje globine karbonatizacije v strjenem betonu z fenolftaleinsko metodo: 8 str.

SIST EN 12390-3:2002, Preskušanje strjenega betona-3.del: Tlačna trdnost preskušancev: 15 str.

Tomažević M., 1999. *Kriteriji in parametri za projektiranje starih kamnitih zidanih stavb na potresnih območjih*. Gradbeni vestnik, avg.,sep.,okt. 1999, let. 48, št. 8-9-10, str 186-197.

Tomažević M., Apih V., 1993. *Ojačevanje kamnitega zidovja z zidovju prijaznim injektiranjem*. Informacije ZRMK Ljubljana, 306 in 307, Letnik XXXIV, 1 – 2 in 3 - 4 - 5: 12 str.

Tomažević M., 2007. *Protipotresna utrditev in preprojektiranje: primer zidanih stavb III. del*. Predavanja pri predmetu “Sanacija gradbenih konstrukcij” na podiplomskem študiju konstrukcijske smeri FGG Ljubljana. Ljubljana, FGG Ljubljana: 82 str.

Tomažević M., Weiss P., Velechovsky T., Apih V., 1989. *Študija možnosti injektiranja kamnitih zidov*. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: 97 str.

Tomažević M., 1989. *Zidane zgradbe na potresnih območjih*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG: 91 str.

Tomažević M., Apih V., Weiss P., 1992. *Zidovju prijazno injektiranje kot možnost ojačevanja kamnitih zidanih hiš*. Radni sabor “Graditelji u obnovi Hrvatske”, Brioni 1992. Zagreb, Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, str. 279-284.

Toumbakari E.E., 2002. *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. Doctoral Dissertation. Leuven, Katholieke Univ. Leuven: 364 str.

Toumbakari E.E., Van Gemert D., Tassios T.P. & Vintzileu E., 2005. *Experimental investigation and analytical modeling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls*. Structural analysis of Historical Constructions, 2005: p. 707-717.

Valluzzi M.R., da Porto F., Modena C., 2004. *Behavior and modeling of strengthened three-leaf masonry walls*. Materials and Structures, Vol. 37, April 2004, p. 184-192.

Valluzzi M.R., da Porto F., Modena C., 2001. *Behavior of multi-leaf stone masonry walls strengthened by different intervention techniques*.

http://www.csarmento.uminho.pt/docs/ncr/historical_constructions/page%201023-1032%2089.pdf
(15.08.2008): str. 1023-1032.

Valluzzi M.R., da Porto F., Modena C., 2003. *Grout requirements for the injection of stone masonry walls*. V: ICPCM-A New Era of Building. Cairo, Egypt, Feb. 18-20, 2003: str. 1 – 10.

Van Gemert D., Ignoul S., Van Rickstal F., 1999a. *Structural Consolidation and Strengthening of Ancient Masonry: Grout Development and Case-Studies*. V: Consetvarion of Lucknow Heritage: Preservation Methodology and International Dimensions. New Delhi, Tech Books International: str. 55-85.

Van Gemert D., Van Rickstal F., Ignoul S., Toumbakari E.E., 1999b. *Structural Consolidation and Strengthening of Masonry: Historical overview and evolution*.

<http://www.kuleuven.be/bwk/materials/Publications/Proceedings> (15.08.2008): 15 str.

Van Rickstal F., 2000. *Grout injection of Masonry, scientific approach and modeling*. Doctoral Dissertation. Leuven, Katholieke Univ. Leuven: 195 str.

Van Rickstal F., Schueremans L., Beeldens A., Toumbakari E.E., Ignoul S., Brosens K., Van Balen K., Van Gemert D., 2002. *New Technologies for Safeguarding cultural Heritage-A State of the Art applied Research and Practice in Belgium*. <http://bwk.kuleuven.be/materials/Publications/Proceedings>
(15.08.2008): 20 str.

Vindišar G., 2004. *Primerjalna analiza eksperimentalnih metod za zaznavanje vlage v zidanih zgradbah*. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 173 str.

Vintzileou N.E., 2006a. *Grouting of three-leaf masonry: experimental results and prediction of mechanical properties*. <http://www.4emme.it> (15.08.2008): 20 str.

Vintzileou E., 2006b. *Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts Mechanical Properties of Masonry before and after grouting*. Structural analysis of Historical Constructions, 2006, p. 41-58.

Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A., Vrouva A., Anagnostopoulou S., 2006. *Mechanical Properties of Three-Leaf Stone Masonry*. Structural analysis of Historical Constructions, 2006, p. 783-790.

Vintzileou E., Tassios T.P., 1995. *Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts*. Journal of Structural Engineering-ASCE, 121(5), 1995, p. 848-856.

Zakon o varstvu kulturne dediščine, ZVKD-1, UL RS št.16/2008: str. 1121-1145.

Zatler-Zupančič B., Mladenović A., 1994. *Alkalna reakcija v betonu*. Informacije ZRMK Ljubljana 312, Letnik XXXV, 3 – 4 - 5: 5 str.

ZGO-1B, 2007. Zakon o spremembah in dopolnitvah zakona o graditvi objektov. UL RS, št. 126, 31.12.2007, str. 18714

Žarnić R., 1999. *Osnovne lastnosti Gradiv*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 319 str.

Živanović M., 2003. *Poročilo o nedestruktivnih georadarskih meritvah na saniranih objektih popotresne obnove Posočja*. Ljubljana, GI ZRMK Ljubljana, Center za geotehniko in prometnice: 43 str.

Živanović M., 2004. *Nedestruktivne georadarske meritve na objektih kulturne dediščine RS pred in po sanaciji objektov*. Ljubljana, GI ZRMK Ljubljana, Center za geotehniko in prometnice: 16 str.

OSTALI VIRI

Adami C.E., Vintzileou E., 2007a. *Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts*. Materials and Structures, DOI 10.1617/s11527-007-z: 13 str.

Adami C.E., Vintzileou E., 2007b. *The bond mechanism in stone or brick to grout interfaces*. V: International Symposium: Studies on Historical Heritage. Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 331-338.

Anzani A., Baila A., Penazzi D. & Binda L., 2005. *Vulnerability study in seismic areas: the role of on-site and archives investigation*. Structural analysis of Historical Constructions, 2005, p. 1051-1059.

Apih V., Makarovič M., 1985. *Preprečevanje dviga kapilarne vlage z ustvarjanjem vodoodbojnega sloja*, VI. del. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: 30 str.

Apih V., Makarovič M., Kos J., Levec J., 1987b. *Razvoj postopka za sanacijo vlažnih zidov zgradb v Benetkah-Palazzo Zorzi*. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: 39 str.

Bosiljkov V., 2000. *Eksperimentalne in računske raziskave vpliva modificiranih malt na mehanske lastnosti opečne zidovine*. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 314 str.

Brignola A., Podesta S., Lagomarsino S., 2006. *Experimental Results of Shear Strength and Stiffness of Existing Masonry Walls*. Structural analysis of Historical Constructions, 2006, p. 767-774.

Corinaldesi V., Moriconi G., Tittarelli F., 2003. *Thaumasite: evidence for incorrect intervention in masonry restoration*. Cement and Concrete Composites, Volume 25, Issue 8, December 2003: p. 1157-1160.

D'Ayala D., Kansal A., 2005. *An analysis of the seismic vulnerability of the architectural heritage in Bhuj, Gujarat, India*. Structural analysis of Historical Constructions, 2005, p. 1069-1078.

De Felice G., 2005. *Out of plane fragility of historic masonry walls*. Structural analysis of Historical Constructions, 2005: p. 1143-1148.

Drei A., Fontana A., 2006. *Numerical and Experimental Tests on Three-Leaves Stone Masonry Specimens*, Structural analysis of Historical Constructions, 2006: p. 991-998.

Gil N.P., 1996. *Grouting as a repair and strengthening technique*. Construction Repair. Volume 10, No. 3 May/June 1996: str. 24-26.

Gostič S., 2000. *Modeli armiranobetonskih okvirov z zidanimi polnili*. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 298 str.

Lebar J., 1991. *Fizikalne osnove kondenzne vlage*. V: : Zbornik strokovne delavnice Vlaga&Zgradbe. Ljubljana, ZRMK Ljubljana: str. 48-54.

Palieraki V., Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A., 2007. *The use of radar technique and boroscopy in investigating historic masonry: Application of the techniques in Byzantine monuments in Greece*. V: International Symposium: Studies on Historical Heritage. Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 403-410.

Schueremans L., 2003. *Evaluation of bearing capacity and design of consolidation and strengthening by means of injections*. K.U. Leuven, Department of Civil Engineering. Karlsruhe, MSR VI 15-18 September 2003.

Schuller M., Berra M., Atkinson R., Binda L., 1997. *Acoustic tomography for evaluation of unreinforced masonry*. Construction and building Materials, Vol. 11, No. 3, 1997, p. 199-204.

Sheppard P., Tomaževič M., 1986. *In situ ispitivanja zidova i seizmička otpornost zidanih zgrada u starim gradskim jezgrima*. V: XVIII kongres. Portorož, Jugoslovensko društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija: str. 205 – 215.

SIST EN 480-12:2005: Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso-Preskusne metode-12.del: Določevanje alkalij v kemijskih dodatkih: 9 str.

SIST EN 1542:2000: Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij-Preskusne metode-Merjenje odtržne trdnosti: 10 str.

SIST EN 1996-1-1, Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij – 1.del: Splošna pravila za armirano in nearmirano zidovje: 123 str.

SIST EN 1998-1:2005, Evrokod 8-Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1.del:Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe: 191 str.

Sofronie R.A., POPA G., NAPPI A., *Strenthening and Restoration of Eastern Churches*, <http://www.unesco.org/archi2000/pdf/sofronie.pdf> (15.08.2008): 7 str.

Tassios T.P., Miltiadou-Fezans A., Vintzileou E., 2007. *Evaluation, experimental methods and tests*, V: International Symposium: Studies on Historical Heritage, Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 459-468.

Tomažević M., Apih V., Lutman M., 1994. *Aseismic Strengthening of Historical Stone-Masonry Buildings by Building-Friendly Technologies*, TMS Journal, 1994: str. 41-55.

Tomažević M., 2007. *Preprojektiranje obstoječih objektov in izkušnje po potresu 2004*. Predavanje v okviru usposabljanja projektantov za projektiranje v okviru popotresne obnove. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, DTP Bovec-Kobarid: 20 str.

Tomažević M., Sheppard P., 1982. *The Strengthening of Stone-Masonry Buildings for Revitalization in Seismic Regions*. V: Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, September 1982. Athens-Greece: str. 275-282

Ugoryol M., 2007. *The conservation of the wall paintings of the house with ionic capitals in Hierapolis: determination and removal of the sulphate layer and consolidation*. V: International Symposium: Studies on Historical Heritage. Antalya, Turkey, September 17-21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, Research Center for Preservation of Historical Heritage: str. 641-648.

Van Rickstal F., Toumbakari E.E., Ignoul S., Van Gemert D., *Development of mineral grouts for consolidation injection*.

<http://bwk.kuleuven.be/materials/Publications/Proceedings%20of%20International%20Conferences/VR-IC002-MSR%20VI-seminar-%20ET%20SI%20DVG%202003.pdf> (15.08.2008): 10 str.

Žarnić R., Bosiljkov V., Bokan-Bosiljkov V., Dujič B., 2007. *Gradiiva-Vaje*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani FGG: 140 str.