

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Arrigler, A. 2013. Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorici Kržan, M., Bokan-Bosiljkov, V.): 164 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Arrigler, A. 2013. Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V., co-supervisors Kržan, M., Bokan-Bosiljkov, V.): 164 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

**ALJA ARRIGLER**

**ŠTUDIJ UTRDITVENIH UKREPOV ZA KAMNITE  
ZIDOVE**

Diplomska naloga št.: 3304/KS

**STUDIES OF RETROFITTING MEASURES FOR STONE  
MASONRY WALLS**

Graduation thesis No.: 3304/KS

**Mentor:**

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentorica:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov  
asist. Meta Kržan

**Član komisije:**

doc. dr. Primož Banovec

Ljubljana, 31. 05. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **IZJAVE**

Podpisana Alja Arrigler izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove«.

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

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

Ljubljana, 5.5.2013

Alja Arrigler

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.04:691.2:692.2(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Alja Arrigler</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov</b>
<b>Somentorica:</b>	<b>Meta Kržan, univ. dipl. inž. grad.,</b>
<b>Somentorica:</b>	<b>izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>164 str., 61 pregl., 115 sl., 55 graf., 39 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>kamniti zidovi, kulturna dediščina, injektiranje, utrditveni ukrepi, vrvica iz steklenih vlaken, preiskave injekcijskih mešanic, strižne preiskave</b>

### **Izvleček**

V diplomski nalogi smo strižno preizkušali in analizirali obnašanje dveh utrjenih troslojnih kamnitih zidov, na eni strani ometanih, pri čemer smo določali učinkovitost različnih utrditvenih ukrepov. Zidova sta že bila rahlo poškodovana od predhodnih strižnih preizkusov ter sta predstavljala zidove objektov kulturne dediščine, saj sta bila zgrajena in ometana z apneno malto. Želeli smo uporabiti utrditvene ukrepe, primerne za utrditev starih objektov. Zidova smo injektirali vzdolž obstoječih razpok z injekcijsko mešanico ter enega od njiju še dodatno utrdili z vrvicami iz steklenih vlaken, vgrajenih v refugirane naležne spojnice. Za določitev primerne injekcijske mešanice smo preizkušali štiri različne injekcijske mešanice, od katerih so bile tri na osnovi apna in ena apneno-cementna z 20% deležem apna. Ustrezno injekcijsko mešanico smo izbrali na podlagi štirih testov sveže in šestih testov strjene injekcijske mešanice. Slednje smo izvajali na prej pripravljenih preizkušancih v obliki valjev in prizem standardnih dimenzij. Po injektiranju smo enemu izmed zidov izpraznili spojnice do določene globine ter vanje s podaljšano cementno malto vgradili steklene vrvice s premerom 6 mm. Vrvice smo vgradili v vseh deset fug na neometani strani zidu. Strižne preiskave smo izvajali v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Zidova smo vertikalno obremenili ter ciklično obremenjevali v horizontalni smeri. Dobljene rezultate smo uporabili za določitev mejnih pomikov in sil. Po idealizaciji histereznih odzivov smo določili strižni nosilnosti, efektivni strižni togosti, faktorja duktilnosti in natezni trdnosti zidov. Rezultate obeh zidov smo primerjali med seboj ter z rezultati predhodnih preiskav neutrjenih zidov.

»Ta stran je namenoma prazna.«



## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT**

**UDC:** 624.04:691.2:692.2(043.2)  
**Author:** Alja Arrigler  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Vlatko Bosiljkov, PhD  
**Cosupervisor:** Assist. Meta Kržan, Assoc.  
**Cosupervisor:** Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, PhD  
**Title:** Studies of retrofitting measures for stone masonry walls  
**Document type:** Graduation thesis – University studies  
**Scope and tools:** 164 p., 61 tab., 115 fig., 55 graph., 39 eq.  
**Keywords:** stone masonry walls, cultural heritage, retrofitting, grouting, NSM, glass fiber cord, grout mixtures, shear tests

### **Abstract**

In the diploma thesis, shear tests were performed and the behaviour of two strengthened three-layer stone masonry walls, plastered on one side, was analysed. Appropriate retrofitting measures were determined. Plastered stone masonry walls, which were built with lime mortar represent the walls of cultural heritage buildings and were damaged in previous shear tests. Aim of this study was to determine appropriate measures for their retrofitting. Following previous shear tests, damaged walls were grouted along the main cracks and one of them additionally reinforced with glass fiber cord inserted in repointed horizontal joints. To determine an appropriate grout injection mixture, four different grout mixtures were tested; three lime-based and one lime-cement with 20% of lime. The appropriate grout injection mixture was chosen on the basis of the properties of fresh mixture gained through four different experimental tests and the results of six different tests on hardened injection mixture. The latter were performed on pre-prepared test specimens in the form of cylinders and prisms of standard dimensions. After grout injecting, the mortar was removed from horizontal joints till certain depth from one of the walls and glass cords of 6 mm diameter were installed by using a cement lime mortar. The cords were inserted along bed joints on the unplastered side of the wall. Shear tests were carried out in the laboratory of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering in Ljubljana. The walls have been vertically loaded and tested under cyclic horizontal loading. The obtained results have been used to determine maximum displacements and forces. On the basis of idealized hysteretic response loops, effective shear stiffnesses, ductility factors and tensile strengths of the walls were determined. The results of both walls were compared one to another and the effectiveness of strengthenint techniques were evaluated through the comparison with the results of previous tests on unreinforced walls.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju *izr. prof. dr. Vlatku Bosiljkovu* in somentorici *izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov* za njuno strokovno podporo. Posebna zahvala gre somentorici *asist. Meti Kržan* za usmerjanje, spodbujanje in svetovanje pri izdelavi diplomske naloge, ki je nastala v sklopu njenega doktorskega dela. Z njeno dobro voljo je ustvarila motivacijsko vzdušje in delo je bilo tako lažje in prijetnejše.

Zahvaljujem se *Franciju Čeponu* za pomoč pri laboratorijskem delu diplomske naloge in *asist. Petri Štukovnik* za njeno strokovno pomoč.

Posebna zahvala *Andreju* in *svoji družini*, še posebej *noni*, ki so ves čas študija verjeli vame in me podpirali. Hvala tudi študijskim prijateljem, s katerimi smo preživeli zanimiva študijska leta.

V veliko veselje mi je bilo delati na tako velikem in zanimivem projektu skupaj s somentorico, profesorji in strokovnimi sodelavci. Z laboratorijskim delom sem pridobila veliko novega praktičnega znanja, ki ga bom uporabila tudi v bodočem strokovnem delu. Seznanila sem se z delom v praksi in spoznala, da nobena naloga ni tako enostavna, kot se zdi na prvi pogled. V času preiskav smo velikokrat prišli do točke, ko nismo vedeli, kako in kaj naprej. S pomočjo pregleda literature in bogatih izkušenj sodelujočih na projektu smo premagali izzive in delo zaključili v skladu z načrti.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMATIKA DIPLOMSKE NALOGE</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>ZIDANE KONSTRUKCIJE</b> .....	<b>5</b>
3.1	Tipologija zidanih konstrukcij .....	5
3.2	Obnašanje med potresi in klasifikacija poškodb .....	6
3.3	Mehanizem porušitve zidu .....	8
3.4	O sanaciji in utrditvi zidanih stavb .....	9
3.4.1	Kriteriji za sanacijo in utrditev .....	10
3.4.2	Kulturna dediščina .....	11
3.5	Protipotresne utrditve zidanih konstrukcij .....	11
3.5.1	Tradicionalne metode utrditve zidanih konstrukcij .....	11
3.5.2	Novodobne metode utrditve zidanih konstrukcij .....	12
<b>4</b>	<b>KOMPOZITI</b> .....	<b>13</b>
4.1	Uvod v kompozite .....	13
4.2	Delitev kompozitov .....	14
4.2.1	Kompoziti utrjeni z vlakni .....	14
4.2.1.1	Steklena vlakna .....	14
4.2.1.2	Karbonska vlakna .....	15
4.2.1.3	Aramidna vlakna .....	16
4.2.1.4	Bazalna vlakna .....	17
4.2.1.5	Primerjava vlaken .....	18
4.2.2	Načini utrditve s FRP kompoziti .....	20
<b>5</b>	<b>UTRDTIVNI UKREP Z INJEKTIRANJEM</b> .....	<b>23</b>
5.1	Uvod v injektiranje .....	23
5.2	Tipični materiali za injektiranje .....	25
5.2.1	Cementne injekcijske mešanice .....	25
5.2.2	Apnene injekcijske mešanice .....	26
5.2.3	Lastnosti cementa in apna .....	29
<b>6</b>	<b>STANDARDNE PREISKAVE INJEKCIJSKIH MEŠANIC</b> .....	<b>31</b>
6.1	Opisi standardnih preiskav sveže injekcijske mešanice .....	31
6.1.1	Potreba po vodi .....	31
6.1.2	Prostorninska masa sveže mešanice .....	32
6.1.3	Pretočnost .....	32
6.1.4	Izločanje vode .....	34
6.1.5	Vodozadržnost .....	34
6.2	Opisi standardnih preiskav strjene injekcijske mešanice .....	35
6.2.1	Prostorninska masa strjene mešanice .....	38
6.2.2	Upogibna natezna trdnost prizem .....	38
6.2.3	Tlačna trdnost prizem .....	39
6.2.4	Cepilna natezna trdnost valjev .....	40

6.2.5	Tlačna trdnost valjev .....	41
6.2.6	Statični modul elastičnosti.....	41
6.2.7	Dinamični modul elastičnosti.....	42
<b>7</b>	<b>PREDHODNE PREISKAVE SVEŽIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC .....</b>	<b>45</b>
7.1	Laboratorijske preiskave injekcijske mešanice A.....	45
7.2	Laboratorijske preiskave injekcijske mešanice B.....	48
7.3	Laboratorijske preiskave injekcijske mešanice C .....	49
7.4	Povzetek.....	53
<b>8</b>	<b>REZULTATI PREISKAV IZBRANIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC .....</b>	<b>55</b>
8.1	Rezultati preiskav svežih injekcijskih mešanic.....	56
8.1.1	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice A.....	56
8.1.2	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice B.....	57
8.1.3	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice C.....	59
8.1.4	Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice D.....	64
8.1.5	Povzetek.....	65
8.2	Rezultati preiskav strjenih injekcijskih mešanic .....	67
8.2.1	Prostorninska masa strjene mešanice .....	67
8.2.2	Krčenje prizem.....	69
8.2.3	Upogibna natezna trdnost prizem .....	70
8.2.4	Tlačna trdnost prizem .....	73
8.2.5	Cepilna natezna trdnost valjev .....	75
8.2.6	Tlačna trdnost valjev .....	77
8.2.7	Statični modul elastičnosti.....	80
8.2.8	Dinamični modul elastičnosti prizem .....	82
8.2.9	Povzetek.....	83
<b>9</b>	<b>OPTIMIZACIJA UTRDITVE .....</b>	<b>85</b>
9.1	Splošna načela projektiranja po ACI .....	85
9.2	Izračun prispevka utrditve k strižni nosilnosti zidu .....	86
9.2.1	Določanje prispevka utrditve k strižni nosilnosti z bazaltnimi vlakni.....	89
9.2.2	Variiranje različnih parametrov pri vrvicah z bazaltnimi vlakni .....	91
9.2.2	Nov izbor vrvice .....	93
9.2.4	Variiranje različnih parametrov pri vrvicah s steklenimi vlakni .....	95
9.3	Povzetek.....	97
<b>10</b>	<b>PREGLED UTRJEVANJ IZ LITERATURE .....</b>	<b>99</b>
10.1	Gostič, Simonič, Bosiljkov .....	99
10.2	Konthesingha, Masia, Petersen, Page .....	100
10.3	Oliveira, Silva, Garbin, Lourenço.....	102
10.4	Valluzzi, Porto, Modena .....	104
10.5	Valluzzi, Tinazzi, Modena .....	104
10.6	Tumialan, Huang, Nanni, Silva.....	106
10.7	Tomažević, Gams, Berset.....	107

<b>11</b>	<b>UTRDITEV ZIDOV Z VRVICO .....</b>	<b>113</b>
11.1	Izbira malte v fugah .....	113
11.2	Postopek utrjevanja zidov .....	115
<b>12</b>	<b>STRIŽNO PREIZKUŠANJE ZIDOV.....</b>	<b>119</b>
12.1	Naprava za strižne preiskave in sistem preizkušanja .....	119
12.2	Potek strižnih preiskav .....	120
12.3	Poškodbe zidov .....	122
12.4	Rezultati .....	127
12.4.1	Histerezne zanke .....	127
12.4.2	Idealizacija ovojnice .....	132
12.4.3	Primerjava odziva neutrjenih zidov z odzivom utrjenih zidov .....	137
12.4.4	Primerjava pomikov induktivnih merilcev obeh zidov .....	140
12.5	Povzetek.....	144
<b>13</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>145</b>
<b>14</b>	<b>DIPLOMSKA NALOGA V SLIKAH .....</b>	<b>147</b>
	<b>VIRI .....</b>	<b>161</b>

»Ta stran je namenoma prazna.«



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava različnih lastnosti aramidnih, karbonskih in steklenih vlaken.....	19
Preglednica 2: Rezultati pretočnosti v odvisnosti od vodovezivnega volumskega razmerja in hiperplastifikatorja A.....	46
Preglednica 3: Rezultati pretočnosti v odvisnosti od vodovezivnega volumskega razmerja in superplastifikatorja.....	47
Preglednica 4: Rezultati pretočnosti v odvisnosti od vodovezivnega volumskega razmerja in hiperplastifikatorja B.....	47
Preglednica 5: Rezultati pretočnosti mešanice B.....	48
Preglednica 6: Sestava injekcijskih mešanic [27] v masnih deležih (%).....	49
Preglednica 7: Rezultati testov svežih injekcijskih mešanic.....	50
Preglednica 8: Rezultati testov injekcijskih mešanic v strjenem stanju pri starosti 28 dni.....	50
Preglednica 9: Količine sestavin injekcijske mešanice in rezultati pretočnosti (meritve 16.1.2013).....	51
Preglednica 10: Rezultati pretočnosti za injekcijsko mešanico C (meritve 17.1.2013).....	52
Preglednica 11: Rezultati izločanja vode za injekcijsko mešanico C.....	52
Preglednica 12: Rezultati deležev injekcijskih mešanic v valjih.....	56
Preglednica 13: Sestava injekcijske mešanice A.....	56
Preglednica 14: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode pri injekcijski mešanici A.....	56
Preglednica 15: Razmerje vode in suhe mešanice.....	57
Preglednica 16: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode pri injekcijski mešanici B.....	58
Preglednica 17: Vodovezivno razmerje in delež hiperplastifikatorja v injekcijski mešanici C.....	59
Preglednica 18: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode pri injekcijski mešanici C.....	60
Preglednica 19: Vodovezivno masno razmerje injekcijske mešanice in delež dodanega hiperplastifikatorja.....	61
Preglednica 20: Rezultati pretočnosti injekcijske mešanice C1 v odvisnosti od vodovezivnega masnega razmerja.....	61
Preglednica 21: Primerjava rezultatov injekcijskih mešanic C in C1.....	62
Preglednica 22: Primerjava sestave injekcijske mešanice C in injekcijske mešanice C2 z dodanim bentonitom.....	62
Preglednica 23: Primerjava rezultatov prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode injekcijskih mešanic C in C2.....	63
Preglednica 24: Primerjava rezultatov prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode injekcijskih mešanic C2 in C3.....	63
Preglednica 25: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode injekcijske mešanice D.....	65
Preglednica 26: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode vseh injekcijskih mešanic.....	65

Preglednica 27: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode vseh variant injekcijske mešanice C.....	67
Preglednica 28: Primerjava povprečnih prostorninskih mas in koeficientov variacij vseh injekcijskih mešanic .....	68
Preglednica 29: Primerjava dimenzij prizem po preteku 22 dni .....	70
Preglednica 30: Rezultati povprečnih upogibnih nateznih trdnosti in koeficientov variacije za različne injekcijske mešanice .....	71
Preglednica 31: Rezultati povprečnih tlačnih trdnosti za različne injekcijske mešanice .....	73
Preglednica 32: Povprečne vrednosti cepilne natezne trdnosti preizkušancev .....	75
Preglednica 33: Rezultati povprečne tlačne trdnosti valjev .....	78
Preglednica 34: Vrednosti sile, pri kateri smo določili statični elastični modul.....	81
Preglednica 35: Vrednosti povprečnega statičnega modula elastičnosti valjev.....	81
Preglednica 36: Rezultati povprečnih vrednosti dinamičnega elastičnega modula in standardni odklon.....	82
Preglednica 37: Redukcijski faktor izpostavljenosti za različne vrste vlaken in pogojev izpostavljenosti .....	86
Preglednica 38: Tehnični podatki vrvice z bazaltnimi vlakni.....	89
Preglednica 39: Prispevek $V_f$ k strižni nosilnosti s premerom vrvice z bazaltnimi vlakni 10 mm .....	89
Preglednica 40: Prispevek $V_f$ k strižni nosilnosti s premerom vrvice z bazaltnimi vlakni 6 mm .....	90
Preglednica 41: Variiranje premera vrvice z bazaltnimi vlakni .....	91
Preglednica 42: Variiranje medsebojne razdalje med vrvicami z bazaltnimi vlakni .....	92
Preglednica 43: Variiranje dolžine zidu pri izbranih bazaltnih vlaknih .....	93
Preglednica 44: Tehnični podatki vrvice s steklenimi vlakni .....	93
Preglednica 45: Prispevek $V_f$ k strižni nosilnosti s premerom vrvice s steklenimi vlakni 10 mm .....	94
Preglednica 46: Prispevek $V_f$ k strižni nosilnosti s premerom vrvice s steklenimi vlakni 6 mm .....	94
Preglednica 47: Variiranje medsebojne razdalje med vrvicami s steklenimi vlakni.....	96
Preglednica 48: Variiranje debeline zidu pri izbiri steklenih vlaken .....	96
Preglednica 49: Rezultati povprečne tlačne trdnosti in vertikalnih $e_{V,povpr}$ ter horizontalnih deformacij $e_{H,povpr}$ različno utrjenih zidov [46] .....	103
Preglednica 50: Načini utrditve zidov [49] .....	106
Preglednica 51: Rezultati razleza v odvisnosti od vodovezivnega razmerja malte.....	114
Preglednica 52: Masa, dimenzije in prostorninska masa 28 dni starih prizem iz podaljšane cementne malte .....	115
Preglednica 53: Povprečna upogibna natezna in tlačna trdnost prizem iz podaljšane cementne malte .....	115
Preglednica 54: Protokol obremenjevanja.....	121
Preglednica 55: Rezultati $H_{max}$ , $d_{prip}$ , $d_{max}$ , $H_{prip}$ , $H_{cr}^{str}$ , $d_{prip-cr}^{str}$ za oba zidova .....	129

Preglednica 56: Rezultati $H_{cr}$ , $H_u$ , $d_{cr}$ , $d_u$ , $d_e$ , $K_e$ , $\mu$ in $f_t$ za idealizirana diagrama po obeh kriterijih za Zid 1.....	134
Preglednica 57: Rezultati $H_{cr}$ , $H_u$ , $d_{cr}$ , $d_u$ , $d_e$ , $K_e$ , $\mu$ in $f_t$ za idealizirana diagrama po obeh kriterijih za Zid 2.....	136
Preglednica 58: Vrednosti $H_{cr}$ , $H_u$ , $d_{cr}$ , $d_u$ , $d_e$ , $K_e$ , $\mu$ in $f_t$ za idealizirana diagrama obeh zidov po kriteriju 2/3 maksimalne sile za pozitivno ovojnico.....	136
Preglednica 59: Vrednosti $H_{cr}$ , $H_u$ , $d_{cr}$ , $d_u$ , $d_e$ , $K_e$ , $\mu$ in $f_t$ za idealizirana diagrama obeh zidov po kriteriju prve strižne razpoke za pozitivno ovojnico.....	137
Preglednica 60: Primerjava $H_{max}$ , $d_{Hmax}$ , $H_{min}$ , $d_{Hmin}$ , $d_{max}$ , $H_{dmax}$ , $d_{min}$ , $H_{dmin}$ testov neutrnjenih zidov in rezultatov injektiranega nepovezanega zidu .....	139
Preglednica 61: Primerjava $H_{max}$ , $d_{Hmax}$ , $H_{min}$ , $d_{Hmin}$ , $d_{max}$ , $H_{dmax}$ , $d_{min}$ , $H_{dmin}$ testov neutrnjenih zidov in rezultatov injektiranega ter z vrvico utrjenega povezanega zidu.....	139

»Ta stran je namenoma prazna.«

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Območja natezne trdnosti za različne vrste vlaken .....	19
Grafikon 2: Graf $\sigma$ - $\epsilon$ za različne vrste vlaken (vir).....	20
Grafikon 3: Pretočnost v odvisnosti od % superplastifikatorja .....	47
Grafikon 4: Primerjava rezultatov prostorninskih mas strjenih injekcijskih mešanic .....	68
Grafikon 5: Povprečne upogibne natezne trdnosti preizkušancev .....	71
Grafikon 6: Upogibne natezne trdnosti preizkušancev iz injekcijskih mešanic A,B C ter D ...	72
Grafikon 7: Upogibne natezne trdnosti preizkušancev iz injekcijskih mešanic C1, C2 in C3.	72
Grafikon 8: Povprečne tlačne trdnosti preizkušancev.....	73
Grafikon 9: Tlačne trdnosti preizkušancev iz injekcijskih mešanic A, B in C .....	74
Grafikon 10: Tlačne trdnosti preizkušancev iz injekcijskih mešanic C1, C2 in C3.....	74
Grafikon 11: Povprečne vrednosti cepilne natezne trdnosti preizkušancev .....	76
Grafikon 12: Graf sila – pomik pri cepilni natezni trdnosti valjev iz injekcijske mešanice B...	76
Grafikon 13: Graf sila – pomik pri cepilni natezni trdnosti valjev iz injekcijske mešanice C...	77
Grafikon 14: Rezultati povprečne tlačne trdnosti valjev.....	79
Grafikon 15: Graf sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev iz injekcijske mešanice C .....	79
Grafikon 16: Graf $\sigma$ – $\epsilon$ vseh treh merilnih lističev pri valju iz injekcijske mešanice B .....	80
Grafikon 17: Graf $\sigma$ – $\epsilon$ vseh treh merilnih lističev pri valju iz injekcijske mešanice D .....	81
Grafikon 18: Povprečne vrednosti dinamičnega elastičnega modula za vse injekcijske mešanice .....	82
Grafikon 19: Prispevek utrditve $V_f$ v odvisnosti od premera utrditve .....	91
Grafikon 20: Prispevek utrditve $V_f$ pri vrvicah iz bazaltnih vlaken v odvisnosti od medsebojne razdalje utrditve .....	92
Grafikon 21: Prispevek utrditve $V_f$ pri vrvici iz bazaltnih vlaken v odvisnosti od dolžine zidu	93
Grafikon 22: Prispevek utrditve $V_f$ v odvisnosti od premera utrditve .....	95
Grafikon 23: Prispevek utrditve $V_f$ pri vrvicah iz steklenih in bazaltnih vlaken v odvisnosti od medsebojne razdalje utrditve .....	96
Grafikon 24: Prispevek utrditve $V_f$ pri vrvicah iz steklenih in bazaltnih vlaken v odvisnosti od dolžine zidu.....	96
Grafikon 25: Prikaz učinkovitosti metod utrjevanja [44] .....	100
Grafikon 26: Prikaz tlačnih napetosti v odvisnosti od vertikalnih deformacij [46].....	103
Grafikon 27: Razlez malte v odvisnosti od vodovezivnega razmerja .....	114
Grafikon 28: Protokol obremenjevanja .....	121
Grafikon 29: Histerezen odziv in ovojnici Zidu 1 .....	128
Grafikon 30: Histerezen odziv in ovojnici Zidu 2.....	128
Grafikon 31: Histerezne zanke Zidu 1 pri amplitudnih pomikih od 0,25 mm do 3 mm.....	130
Grafikon 32: Histerezne zanke Zidu 1 pri amplitudnih pomikih 25 mm in 27,5 mm.....	130
Grafikon 33: Površina histerezne zanke.....	130
Grafikon 34: Premice strižne togosti za Zid 1 .....	131
Grafikon 35: Upadanje togosti s povečevanjem pomikov pri Zidu 1 .....	131
Grafikon 36: Idealizirana diagrama po obeh kriterijih za pozitivno ovojnico za Zid 1 .....	133

---

Grafikon 37: Idealizirana diagrama po obeh kriterijih za negativno ovojnico za Zid 1 .....	134
Grafikon 38: Idealizirana diagrama po obeh kriterijih za pozitivno ovojnico za Zid 2.....	135
Grafikon 39: Idealizirana diagrama po obeh kriterijih za negativno ovojnico za Zid 2 .....	135
Grafikon 40: Primerjava pozitivnih idealiziranih diagramov obeh zidov po 1. kriteriju .....	136
Grafikon 41: Primerjava pozitivnih idealiziranih diagramov obeh zidov po 2. Kriteriju.....	137
Grafikon 42: Histerezne zanke nepovezanega zidu (Zid 1) .....	138
Grafikon 43: Histerezne zanke injektiranega in z vrvico utrjenega povezanega zidu (Zid 2) .....	138
Grafikon 44: Histerezne zanke neutrjenega, nepovezanega zidu (1. test).....	138
Grafikon 45: Histerezne zanke neutrjenega, nepovezanega zidu (2. test).....	138
Grafikon 46: Histerezne zanke neutrjenega, povezanega zidu (1. test).....	138
Grafikon 47: Histerezne zanke neutrjenega, povezanega zidu (2. test).....	138
Grafikon 48: Izven ravninski horizontalni pomiki desne strani Zidu 1 .....	140
Grafikon 49: Izven ravninski horizontalni pomiki desne strani Zidu 2.....	140
Grafikon 50: Horizontalni pomiki zgornjega in spodnjega sprednjega dela Zidu 1 .....	141
Grafikon 51: Horizontalni pomiki zgornjega in spodnjega sprednjega dela Zidu 2 .....	141
Grafikon 52: Izven ravninsko odpiranje Zidu 1 na različnih straneh.....	142
Grafikon 53: Izven ravninsko odpiranje Zidu 2 na različnih straneh.....	142
Grafikon 54: Primerjava vertikalnih pomikov v zgornji spojnici na obeh straneh Zidu 1 .....	143
Grafikon 55: Primerjava vertikalnih pomikov v zgornji spojnici na obeh straneh Zidu 2 .....	143

## KAZALO SLIK

Slika 1: Zidovje .....	1
Slika 2: Različne vrste materiala za gradnjo zidovja.....	5
Slika 3: Porušena zidana stavba .....	6
Slika 4: Upogibno strižna porušitev zidu [8].....	8
Slika 5: S kamnom zidana stavba, imenovana Tavčarjev dvor .....	11
Slika 6: Kompoziti v naravi: a) les b) tropski list c) mikrostruktura kosti .....	13
Slika 7: Steklена vlakna.....	15
Slika 8: Karbonska vlakna.....	16
Slika 9: Aramidna vlakna.....	17
Slika 10: Bazaltna vlakna.....	17
Slika 11: Primer NSM utrjevanja [19].....	21
Slika 12: Prerez troslojnega zidu.....	23
Slika 13: Vlaženje zidu in umeščanje cevk v zidove .....	24
Slika 14: Injektiranje zidu in iztekanje injekcijske mešanice iz druge cevke.....	24
Slika 15: Preizkušanci po linijskem injektiranju.....	25
Slika 16: Zid z apneno malto.....	26
Slika 17: Star način pridobivanja apna .....	27
Slika 18: Potek pridobivanja apna [24].....	27
Slika 19: Hidratizirano apno .....	28
Slika 20: Določanje prostorninske mase .....	32
Slika 21: Lijak za merjenje pretočnosti injekcijske mase: a) Dimenzije b) Dejanski izgled lijaka .....	33
Slika 22: Meritev pretočnosti injekcijske mešanice.....	33
Slika 23: Test vodozadržnosti.....	35
Slika 24: Pripravljanje valjev za preiskave.....	36
Slika 25: Uporabljeni zidaki .....	36
Slika 26: Drobljenje kamenja.....	37
Slika 27: Sejalna analiza .....	37
Slika 28: Napolnjeni valji .....	38
Slika 29: Shema tritočkovnega preizkusa za določitev upogibne natezne trdnosti .....	39
Slika 30: Preizkus tlačne trdnosti .....	40
Slika 31: Sistem preizkusa cepilne natezne trdnosti.....	40
Slika 32: Valj opremljen z merilnimi lističi .....	42
Slika 33: Meritev dinamičnega modula elastičnosti .....	43
Slika 34: Postopek priprave injekcijske mešanice A .....	46
Slika 35: Test pretočnosti injekcijske mešanice B.....	48
Slika 36: Priprava mešanice: a) Apneno testo b) Apneno testo z dodano vodo c) Mešanica z dodano apnenčevo moko in tufom d) Z dodanim hiperplastifikatorjem .....	51
Slika 37: Primerjava izločanja vode pri dveh različnih mešanicah .....	52
Slika 38: Injektiranje valjev.....	55

Slika 39: Sesedanje injekcijske mešanice .....	57
Slika 40: Določanje prostorninske mase injekcijski mešanici B .....	58
Slika 41:Primerjava valjev injektiranih z injekcijsko mešanico B takoj po injektiranju in po preteku 48 ur.....	58
Slika 42: Injektiranje valjev z injekcijsko mešanico C .....	59
Slika 43: Kristali soli, ki so se izločili iz injekcijske mešanice C.....	60
Slika 44: Izrazito krčenje prizem iz injekcijske mešanice C .....	60
Slika 45: Suhe sestavine injekcijskih mešanic C2 in C3 .....	63
Slika 46: Pripravljanje testa segregacije vode .....	64
Slika 47: Merjenje časa pretočnosti apneno-cementne injekcijske mešanice .....	65
Slika 48: Primerjava treh injekcijskih mešanic pri izločanju vode.....	66
Slika 49: Pripravljanje prizem .....	66
Slika 50: Izrazito krčenje injekcijske mešanice C.....	69
Slika 51: Primerjava krčenja injekcijskih mešanice C1 z apnenim testom in peskom, C2 z apnenim testom in bentonitom ter C3 z apnom v prahu .....	69
Slika 52: Določitev dimenzij s pomočjo kljunastega merila .....	70
Slika 53: Primer tipične in netipične porušitve prizme pri upogibnem preizkusu .....	71
Slika 54: Primer porušitve valja z injekcijsko mešanico C (preizkušane 14) ter injekcijsko mešanico B (preizkušane 27).....	75
Slika 55: Obnašanje valja pod tlakom iz injekcijske mešanice A.....	77
Slika 56: Obnašanje valja pod tlakom iz injekcijske mešanice B .....	78
Slika 57: Nominalna strižna nosilnost je enaka prispevku strižne nosilnosti zidu in utrditve..	85
Slika 58: Prikaz zidov z utrditvami: a) medsebojna razdalja utrditev 136 mm b) medsebojna razdalja utrditev 272 mm.....	92
Slika 59: Vrvica s steklenimi vlakni, ki smo jo vgradili v naše zidove .....	94
Slika 60: Diagonalna in kombinirana razporeditev karbonskih trakov [44] .....	99
Slika 61: Tri različne razporeditve trakov [45].....	101
Slika 62: Porušni mehanizmi pri različnih shemah utrjevanja zidov [45] .....	101
Slika 63: Prikaz prečno povezanega zidu z GFRP palicami [46] .....	102
Slika 64: Trakovi, razporejeni v obliki mreže in ortogonalno na obremenjeno diagonalno, ter porušitev zidkov [48] .....	105
Slika 65: Zidovi po preizkusu [49].....	107
Slika 66: Različni načini utrditev: a) vertikalno postavljena GFRP mreža, b) diagonalno postavljena GFRP mreža z dodatnimi vertikalnimi trakovi, c) diagonalni in vertikalni GFRP in CFRP trakovi, d) diagonalni in vertikalni CFRP trakovi/plošče [50].....	108
Slika 67: Porušitev neutrjenega zidu [50] .....	109
Slika 68: Porušitev zidu s tankim slojem ometa [50].....	109
Slika 69: Strižne razpoke in natezne razpoke v vertikalnih trakovih [50].....	110
Slika 70: Slika a) Odluščitev b) Izbočitev/uklon GFRP tkanine c) Porušitev stika med ometom in zidom pri utrditvi s CFRP trakovi [50] .....	111
Slika 71: Razlez malte vzorcev z različnimi vodovezivnimi razmerji .....	114
Slika 72: Izpraznjene fuge.....	115



Slika 73: Namakanje vrvic v epoksi in valjanje vrvic v kremenčevem pesku.....	116
Slika 74: Vrvic, nameščene v fugah .....	116
Slika 75: Povezovanje vseh treh slojev zidu z vrvico.....	117
Slika 76: Skica naprave za strižni preizkus [8].....	119
Slika 77: Več možnosti vpetja pri napravi: obrnjena konzola in vpet preizkušane z dopuščenimi horizontalnimi in vertikalnimi pomiki .....	120
Slika 78: Prikaz razporeditve induktivnih merilcev po zidu .....	121
Slika 79: Odstopanje ometa od Zidu 1 .....	122
Slika 80: Zid 1 pred in po strižni preiskavi .....	123
Slika 81: Poškodbe Zidu 1: izven ravninsko odpiranje zidu, izpraznjene spojnice, razpokani kamni.....	123
Slika 82: Zaznane razpoke Zidu 1 pri različnih pomikih.....	124
Slika 83: Razpoke na zadnjem delu Zidu1, z ometom in brez .....	124
Slika 84: Širjenje razpok na ometu Zidu 2 .....	125
Slika 85: Delna in dokončna porušitev ometa Zidu 2.....	125
Slika 86: Odpiranje Zidu 2 in izpraznitev zgornje spojnice.....	126
Slika 87: Zaznane razpoke Zidu 2 pri različnih pomikih.....	126
Slika 88: Razpoke na zadnjem delu Zidu 2, z ometom in brez .....	127
Slika 89: Pripravljanje kamnov .....	147
Slika 90: Pripravljanje valjastih preizkušancev .....	147
Slika 91: Pripravljanje injekcijske mešanice A .....	147
Slika 92: Pripravljanje injekcijske mešanice B .....	148
Slika 93: Pripravljanje injekcijske mešanice C.....	148
Slika 94: Preiskave svežih injekcijskih mešanic .....	148
Slika 95: Injektiranje valjev.....	149
Slika 96: Pripravljanje prizem .....	149
Slika 97: Valji v času sušenja .....	150
Slika 98: Prizme v času sušenja .....	150
Slika 99: Preiskave strjenih injekcijskih mešanic .....	151
Slika 100: Priprava transporta zidov po laboratoriju in sam transport .....	151
Slika 101: Priprava zidov za injektiranje .....	152
Slika 102: Injektiranje zidov.....	152
Slika 103: Injektiranje zidov za ometom .....	153
Slika 104: Izpraznitev in čiščenje spojnic .....	153
Slika 105: Spojnice pripravljene na vgraditev vrvic.....	154
Slika 106: Vrvic iz steklenih vlaken.....	154
Slika 107: Vgrajene vrvic .....	155
Slika 108: Naprava za strižne preizkuse .....	155
Slika 109: Zidovi opremljeni z induktivnimi merilci.....	156
Slika 110: Poškodovanost injektiranega zidu.....	156
Slika 111: Izpraznjene spojnice injektiranega zidu.....	157
Slika 112: Začetna in končna razpokanost ometa injektiranega in dodatno utrjenega zidu. ....	157

Slika 113: Porušitev ometa.....	158
Slika 114: Delno porušen omet .....	158
Slika 115: Poškodovanost injektiranega in dodatno utrjenega zidu.....	159

## 1 UVOD

Zidovje je poleg lesa najstarejši in najpomembnejši gradbeni material. Uspešno prenaša obremenitve in vplive okolja ter zagotavlja ljudem in njihovim dobrinam zaščito, v kolikor so konstrukcije ustrezno zasnovane in kakovostno zgrajene. Zato je še danes mnogo dobro ohranjenih starih zidanih stavb. Mnoge med njimi so bile zaradi svoje pomembnosti in vrednosti uvrščene med najdragocenejše spomenike arhitekturne kulturne dediščine.



Slika 1: Zidovje

(<http://img12.imageshack.us/img12/5706/zid500x334uc7.jpg>)

Stare zidane stavbe so potresno zelo ranljive. V zadnjih desetletjih je bilo veliko dela posvečenega spoznavanju vzrokov za nastanek poškodb in razvoju tehnologij za protipotresno utrditev in sanacijo obstoječih zidanih stavb. Razvile so se različne tehnične rešitve za izboljšanje pomanjkljivosti konstrukcij in materialov, ki so jih razvili s pomočjo rezultatov eksperimentalnih preiskav in analize obnašanja stavb. S temi rešitvami lahko starim stavbam večinoma zagotovimo podobno raven potresne odpornosti, kot se jo zahteva za nove zidane stavbe, projektirane po sodobnih standardih.

Utrjevanje stavbe pomeni, da s posebnimi tehničnimi ukrepi konstrukcijskemu sistemu povečamo nosilnost in duktilnost. Medtem ko sanacija stavbe predstavlja tiste posege v konstrukcijo stavbe, s katerimi konstrukcijo popravimo oz. v konstrukciji vzpostavimo stanje, v katerem je bila pred potresom [1].

Danes poznamo kar nekaj načinov utrjevanj stavb. Med tradicionalne utrditve objektov sodijo: delno refugiranje malte v fugah oz. spojnicah, povezava zidov z jeklenimi vezmi v višini stropov, izdelava armiranobetonskega ometa, injektiranje (linijsko, po celotnem volumnu) itd. Vedno bolj so v uporabi novodobne metode utrjevanj, ki vključujejo kompozitne

materiale z vlakni. Poznamo veliko vrst utrjevanj z vlakni, med katerimi prevladujejo steklena, karbonska in aramidna vlakna. Vlakna so lahko vgrajena v palice ali vrvce, ki se jih običajno vgrajuje horizontalno ali vertikalno bodisi v spojnice zidov bodisi v zareze v kamen oziroma opeko. Pogosto se uporabljajo tudi trakovi in različne tkanine, ki se lepijo na zid. Za namene utrjevanja stavb kulturne dediščine, kjer mora izgled konstrukcije ostati nespremenjen, je najbolj primerno injektiranje, refugiranje malte v spojnicah z ali brez istočasnega vgrajevanja palic oz. vrvic v spojnice. Slednje se v praksi ne uporablja pogosto, saj je postopek zelo zamuden, vendar je prednost tega postopka, da lahko oblikujemo armaturo glede na teksturo (lice) zidu. Zaželeno je, da postopek sanacije stanovalce oz. uporabnike prostorov stavb v čim manjši meri ovira njihovo bivanje.

## 2 PROBLEMATIKA DIPLOMSKE NALOGE

Glavni cilj moje diplomske naloge je bila utrditev troslojnih kamnitih zidov. Zidove, ki smo jih utrjevali v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani, so sezidali in preiskovali moji predhodniki. Določili so njihov odziv pri tlačnih in strižnih obremenitvah. S tlačnimi testi so določili tlačno trdnost zidov, ki je potrebna karakteristika za načrtovanje nadaljnjih strižnih preiskav. Preizkušanci so bili zgrajeni iz pol obdelanega kamna iz dolomita in apneno malto z dodatki tufa za hitrejšo vezanje. Nekateri od njih so bili povezani, drugi nepovezani. Povezani pomeni, da so imeli v vsaki drugi vrsti kamnite bloke, ki so potekali po celotni širini zidu skozi vse tri sloje. Namen predhodnih preiskav je bil torej ugotoviti, kako različna morfologija zidu (sestava zidu po prerezu) vpliva na nosilnost. Iz predhodnih preiskav smo ugotovili, da povezanost zidov omejuje razpoke med zunanjsima slojema in preprečuje njihovo odpiranje, medtem pa ne prispeva k višjim strižnim nosilnostim in k bolj duktilnemu obnašanju [2]. Zidovi so bili dimenzij  $100 \times 40 \times 150 \text{ cm}^3$  (dolžina  $\times$  širina  $\times$  višina) in so bili na spodnjem in zgornjem robu vpeti v armirano betonska nosilca dimenzij  $130 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$ , s pomočjo katerih so bili vpeti v preizkuševalne naprave. Služili so tudi za transport po laboratoriju in za raznos obtežbe. Pri predhodnih testih so se zidovi seveda poškodovali, nekateri celo porušili in moja naloga je bila utrditi te poškodovane zidove. Poznamo mnogo načinov utrditev zidov. Odločili smo se za utrjevanje z injektiranjem in kombinacijo injektiranja in vrvic z vlakni, ki smo jih vgrajevali v spojnice zidov.

Pred injektiranjem zidov smo morali izbrati ustrezno injekcijsko mešanico. Izbirali smo med tremi. Najbolj primerno smo določili s testi na sveži in strnjeni injekcijski mešanici. Skupno vsem trem injekcijskim mešanicom je bilo, da so bile vse na osnovi apna in ne cementa, kot je za injektiranje značilno. Teste strjene mešanice smo opravili na osemnajstih valjih in šestintridesetih prizmah. Na valjih smo opravili tlačni preizkus ter določili cepilne napetosti, medtem ko smo prizme preizkušali na upogib in tlak. Preizkuse sveže mešanice smo izvajali v skladu s standardom SIST EN-445, ki je sicer prvotno namenjen za injekcijske mase za prednapete kable. Naredili smo test pretočnosti mešanice, izločanja vode, vodozadržnosti ter izmerili prostorninsko maso sveže mešanice v skladu s standardom SIST EN 1015-6:1999. Glede na rezultate testov, ki niso bili najboljši, smo se odločili, da uporaba injekcijske mešanice na osnovi apna ni najbolj primerna. Zato smo se odločili za injekcijsko mešanico na osnovi cementa z 20 % deležem apna.

Omenjeno je, so bile tri injekcijske mešanice narejene na osnovi apna. Izbor apna kot vezivnega materiala je bil smiseln, saj je pri kamnitih zidovih kulturne dediščine v veliki meri uporabljena apnena malta. Tudi naši zidovi so bili zgrajeni z apneno malto, ki je vsebovala dodatek tuf. Sama apnena malta potrebuje veliko časa za vezavo, zato ji dodatki skrajšajo čas vezanja. V našem primeru bi za vezanje malte v zidovih potrebovali približno leto, z dodanim tufom le 2 meseca [3].

Utrjevanje je potekalo na dveh troslojnih zidovih. Oba zidova smo zapolnili z apneno-cementno injekcijsko mešanico, enega od njiju smo še dodatno utrdili z vrvicami s steklenimi vlakni premera 6 mm. Vrvice smo skupaj s podaljšano apneno-cementno malto, masnega razmerja apno:cement:pesek  $a:c:p=1:1:6$ , vgradili v predhodno odstranjene spojnice. Vrvice smo vgradili v vseh deset spojníc na razdalji 136 mm na eni strani zidu. Na drugi strani zidu je stal omet, ki se kljub predhodnim strižnim preiskavam, ki so jih opravili drugi diplomanti, ni porušil. Prav tako je tudi drugi zid na eni strani vseboval omet.

Naš cilj ni bil samo utrditev zidov, temveč iz strižnih preiskav pridobiti tudi različne rezultate, ki bi služili analizi učinkovitosti posameznih ukrepov ter primerjavi z drugimi eksperimentalnimi rezultati. Strižne preiskave so prav tako potekale v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani na napravi za preizkušanje strižne nosilnosti različnih preizkušancev. Zidova smo pred preiskavo opremili z induktivnimi merilci, ki so merili različne pomike. Z obdelavo rezultatov, ki smo jih dobili med samo preiskavo, smo določili strižno nosilnost, karakteristične mejne pomike oziroma zasuke, strižno togost, faktor duktilnosti in natezno trdnost zidu. Dobljene vrednosti obeh zidov smo primerjali z vrednostmi predhodnih preiskav neutrjenih zidov.

### 3 ZIDANE KONSTRUKCIJE

#### 3.1 Tipologija zidanih konstrukcij

Obstajajo številni tipi zidovja in konstrukcijski sistemi zidanih stavb. Pogojeni so z razpoložljivimi materiali, tehničnim znanjem, klimatskimi in funkcionalnimi zahtevami in tradicionalno gradbeno prakso. Zidane stavbe delimo tudi pri nas, v [1] je navedeno, da jih delimo glede na:

- materiale, ki so bili uporabljeni za gradnjo (kamen (Slika 2a), opeka (Slika 2b), adobe - zidaki iz nežgane gline (Slika 2c), bloki iz različnih materialov)
- sistem zidanja (navadno, povezano, armirano zidovje)
- kraj gradnje (podeželje, mesta)
- obdobje gradnje
- namen uporabe (stanovanjske, javne stavbe).



a) kamen



b) opeka



c) adobe



d) zidovje iz adobe opeke

Slika 2: Različne vrste materiala za gradnjo zidovja

(<http://www.diana.hr/slike/Nesortirani%20kamen.jpg>

<http://www.wienerberger.si/images/db/srref/1049070690739.jpg>

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/75/Milyanfan-adobe-bricks-8038.jpg>

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/51/Milyanfan-adobe-brick-house-8039.jpg>

### 3.2 Obnašanje med potresi in klasifikacija poškodb

Močni potresi po svetu poškodujejo veliko število zidanih stavb. Najhujše posledice potresov so vidne v nerazvitem svetu, kjer se zidane konstrukcije močno poškodujejo ali celo porušijo. Zato še danes velja, da zidovje ni najbolj primeren material za gradnjo na potresnih območjih. Najhujše posledice potresov doživijo tradicionalno zidane stavbe iz adobe blokov in kamna. Nekoliko boljše se obnašajo zgodovinske stavbe v evropskih mestnih in podeželskih jedrih. Avtorji članka [4] navajajo, da pri nas kar 30 % celotnih stanovanjskih stavb, grajenih med letoma 1920 in 1965, predstavljajo več etažne, nearmirane zidane konstrukcije.

Poleg starih zidanih stavb imamo tudi sodobne zidane stavbe, katerih razlogi za neustrezno obnašanje so največkrat nepravilna porazdelitev zidov v tlorisu, velike odprtine, opustitev nekaterih ukrepov, ki zagotavljajo ustrezno obnašanje med potresom, ter včasih tudi slaba kakovost materiala (opeke in malte).



Slika 3: Porušena zidana stavba

([http://www.delo.si/assets/media/picture/20120522/480x290\\_italijapotresGIUSEPPE%20CACACE%2002.jpg?rev=1](http://www.delo.si/assets/media/picture/20120522/480x290_italijapotresGIUSEPPE%20CACACE%2002.jpg?rev=1))

Tomažević v [1] navaja, da na potresno odpornost zidanih stavb, ne glede na vrsto zidovja, iz katerega so sezidane, bistveno vplivata dva faktorja. To sta zasnova konstrukcije in kvaliteta materialov in grajenja. To pomeni, da se stavbe, ki imajo enostavno tlorisno zasnovo in so zgrajene iz kvalitetnih materialov, med potresi skoraj ne poškodujejo. To seveda ne velja za stavbe, katere ne izpolnjujejo teh dveh pogojev ali samo enega od njiju. Namreč, neenakomerna oz. nesimetrična razporeditev sten in stebrov v tlorisu stavbe povzroči velik odmik masnega težišča od težišča togosti. Posledica tega je pojav torzije, ki na stavbo deluje zelo neugodno, saj povzroči preobremenitve njenih kritičnih elementov. Pod slabo zasnovo konstrukcije pa ne štejemo samo neenakomerne razporeditve konstrukcijskih elementov v



tlorisu, temveč tudi togost, ki se spreminja po višini konstrukcije. Torej stavbe, pri katerih se togost po višini hitro spremeni, se med potresom obnašajo zelo slabo.

Največ razpok na zidanih stavbah nastane ob vogalih in stikih zidov, ki so posledica neustrezne povezanosti zidov ter zidov in stropov, medtem, ko so tipične poševne razpoke v zidovju posledica premajhne strižne odpornosti. Zaradi omenjene nepovezanosti zidov pride tudi do izven ravninskih porušitev zidov.

Leta 1964 je izšel prvi potresni predpis (Pravilnik, 1964, [5]), kasneje, leta 1981 pa še izboljšana verzija (Pravilnik, 1981, [6]), s katerima so omejili gradnjo navadnih zidanih stavb. Uvedli so povezano zidovje, t.j. zidovje, povezano z vodoravnimi in navpičnimi armiranobetonskimi zidnimi vezmi, ter armirano zidovje, t.j. zidovje, utrjeno z jekleno armaturo. Poleg tega so glede na seizmičnost območja omejili tudi višino stavb v posameznem sistemu zidanja.

Poškodbe zidanih stavb, ki nastanejo med potresi, lahko razvrstimo na enoten način, kljub temu, da so stavbe grajene na različnih območjih in v različnih časovnih obdobjih, da obstajajo velike razlike v tipologiji zidanih konstrukcij ter v materialih, s katerimi so grajene. Poškodbe, ki so navedene v [1], delimo glede na obseg, velikost in pomembnost za stabilnost stavbe, na naslednji način:

- manjše razpoke na stikih stropov in zidov, razpoke na stikih zidov
- ločevanje zidov pri nepovezanem zidovju stavbe
- navpične razpoke v zidovih zaradi nihanja pravokotno na ravnino
- rušenje nepovezanih zidov zaradi nihanja pravokotno na ravnino
- poškodbe nosilnih zidov zaradi delovanja sil v ravnini zidu: razslojevanje in delni razpad, poševne razpoke
- porušitev dela stavbe, posameznega nadstropja ali celotne stavbe.

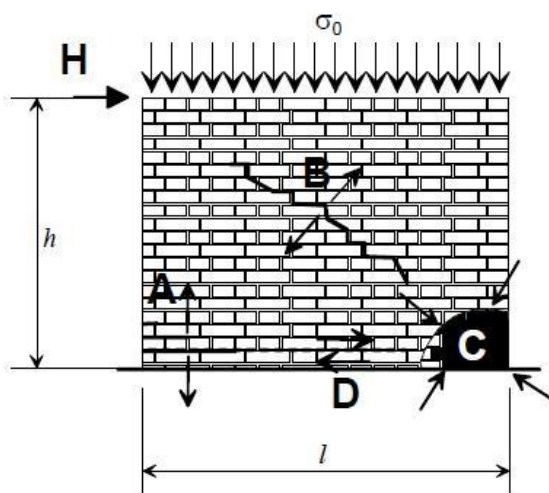
Povzamemo lahko, da so poškodbe in porušitve zidanih konstrukcij med potresi posledica predvsem:

- neustrezne zasnove konstrukcije
- neustrezne celovitosti delovanja konstrukcije med potresom
- premajhne odpornosti nosilnih zidov in celotne konstrukcije zaradi nizke kakovosti materialov ali neustreznih detajlov
- neustreznih temeljev oziroma nestabilnih temeljnih tal, ki ne morejo prevzeti med potresom nastalih obremenitev zgornje konstrukcije.

Zgornje ugotovitve moramo upoštevati pri izbiri ukrepov za izboljšanje potresne odpornosti obstoječih zidanih konstrukcij ter pri projektiranju novih zidanih konstrukcij.

### 3.3 Mehanizem porušitve zidu

Obtežba, ki deluje na zid, lahko deluje bodisi v ravnini zidu bodisi pravokotno na zid. Od tega je odvisno, kateri tipi mehanizmov porušitve se razvijejo. Različni mehanizmi so prikazani na Sliki 4. Kadar delujejo na zid vodoravne potresne sile v ravnini zidu, analize poškodb zidanih konstrukcij po potresih ter pri eksperimentih kažejo, da definirajo porušne mehanizme trije tipi oz. skupine mehanizmov, to so zdrsni, strižni ter upogibni. Mehanizem porušitve zidu je odvisen od mnogih dejavnikov. Nanj vpliva geometrija zidu, natančneje razmerje med višino in dolžino zidu, mehanske lastnosti materialov zidovja, pogoji vpetosti na podprtih robovih, razmerje med navpično in vodoravno obtežbo ter, kot že omenjeno, smer delovanja vodoravne obtežbe, t.j. ali obtežba deluje v ravnini zidu ali pravokotno nanj.



Slika 4: Upogibno strižna porušitev zidu [8]

Pri zdrsni oz. prestrigu (mehanizem D na Sliki 4), kjer nastane vodoravna ali stopničasta razpoka, element zdrsne nad enim od robov takoj, ko strižne napetosti dosežejo t.i. "strižno odpornost zidu". Do prestriga zidu na dva dela, pri čemer zgornji del zidu drsi po eni od naležnih reg ali stopničasto po več regah, pride predvsem pri zidovih, kjer so navpične obremenitve majhne in kjer je slaba tudi kakovost malte. Tako pride do zdrsa zidu pogosto v zgornjem delu stavbe, kjer so pospeški med potresom največji, navpične obremenitve pa najmanjše.

V primeru navpične obremenitve, ko sta navpična osna sila in tlačna napetost v vodoravnem prerezu zidu v običajnih mejah, se zid lahko poruši bodisi zaradi striga bodisi zaradi upogiba. Vendar pa pri zidanih konstrukcijah zaradi geometrijskih razmerjih zidov, mehanskih lastnosti zidovja in nivoja vertikalne obremenjenosti v objektih prevladuje strižni mehanizem porušitve (mehanizem B). Do take porušitve pride, ko glavne natezne napetosti, ki jih povzroči kombinacija navpičnih in vodoravnih sil, v osrednjem območju zidu presežejo natezno trdnost zidovja. Pri tem v zidu nastanejo poševne razpoke, ki potekajo »cik-cak« po naležnih in

navpičnih regah oz. po diagonali preko zidakov ali deloma po regah in deloma preko zidakov [7].

Upogibno strižno porušitev predstavljata mehanizem A in C. Pri mehanizmu A pride do upogibnih razpok, ki se lahko pojavijo v eni spojnici ali pa se širijo po višini preizkušanca. [8] V primeru, ko geometrija zidu dopušča visoko razmerje med upogibnim momentom in strigom in ko je natezna trdnost zidovja dovolj velika, pride do porušitve zaradi drobljenja zidakov na tlačnih robovih zidu (mehanizem C) [7].

### **3.4 O sanaciji in utrditvi zidanih stavb**

Danes vse več pozornosti namenjamo preverjanju odpornosti starih stavb in raziskovanju metod in tehnologij potresnih utrditev. Od same potresne odpornosti konstrukcije je odvisno, ali konstrukcijo po potresu samo popravimo ali tudi utrdimo. Konstrukcijo popravimo (saniramo) tako, da jo vrnemo v stanje pred potresom v primeru, če je njena potresna odpornost ustrezna in so nastale poškodbe posledica pričakovanega procesa disipacije energije. Medtem ko je konstrukcijo potrebno s posebnimi ukrepi utrditi, kadar njena potresna odpornost ni ustrezna. Skupaj z utrditvijo objekta je potrebno tudi sanirati vse poškodovane nekonstrukcijske in konstrukcijske elemente. Za analizo potresne odpornosti obstoječih objektov je potrebno upoštevati standard Evrokod 8-3, ki natančneje opisuje postopke obravnave obstoječih objektov [9].

Posebno obravnavo zahtevajo kulturnozgodovinski spomeniki in stare zidane stavbe v zgodovinskih mestnih in podeželskih jedrih. Razlog je, da stare zidane stavbe v mestnih naseljih niso bile nujno zasnovane tako, da bi bile odporne na potres. Mnoge tovrstne stavbe ne prenašajo nategov in strigov, zato so zelo ranljive. Medtem pa dobro prenašajo tlačne obremenitve, nastale zaradi gravitacijskih obtežb, saj so zgrajene iz materialov in sistemov, ki tlačne obremenitve dobro prenašajo. Marsikdaj so pri takšnih stavbah zaradi vplivov okolja in časa materiali razpadli, ker je bilo tudi vzdrževanje stavb pomanjkljivo. Zaradi tega je bilo pri zadnjih potresih v Evropi največ poškodovanih stavb in porušitev zaradi neustreznega obnašanja med tradicionalno sezidanimi zgodovinskimi stavbami.

Utrjevanje konstrukcij zgodovinskih stavb je del kompleksnega, multidisciplinarnega postopka varstva kulturne dediščine. Vedno, ko je potreben poseg v konstrukcijski sistem, je nujno upoštevati načela ohranitve in obnove kulturnih spomenikov. Le-ta včasih resno omejujejo uporabo mnogih tehničnih ukrepov. Navadno pa ne dopuščajo rekonstrukcije ali zamenjave elementov konstrukcije, ki so značilni za čas gradnje zgodovinske stavbe, z elementi, ki so izdelani iz sodobnih konstrukcijskih materialov.

Modernizacija, predvsem stavb v zgodovinskih mestnih jedrih, zahteva posege, ki ne bi bili dopustni, če bi se načela varstva kulturnozgodovinskih spomenikov dosledno upoštevala. Prebivalcem, ki živijo v teh stavbah, je potrebno zaradi zagotavljanja varnosti bivanja in

ugodnih bivalnih pogojev, zagotoviti enake ali vsaj podobne razmere kot pri novogradnji. Ukrepi, ki to zagotavljajo niso vedno v skladu z zahtevami varstva kulturne dediščine. Zato so posegi v konstrukcijo stavb vedno kompromis med načeli spomeniškega varstva, med inženirskimi zahtevami, razpoložljivimi tehnološkimi rešitvami ter ekonomskimi argumenti. Zahtev Evrokoda 8-3, ki zato marsikdaj, v primeru stavb kulturne dediščine, ne bomo mogli v celoti izpolniti [7].

### 3.4.1 Kriteriji za sanacijo in utrditev

Pri sanaciji in utrditvi po potresu poškodovanih gradbenih objektov oz. pri preventivnih ukrepih moramo upoštevati veliko število kriterijev. Osnovni kriterij je potresna odpornost obravnavane konstrukcije. Izračunamo jo z računskimi analizami s pomočjo podatkov, ki jih dobimo z različnimi preiskavami, bodisi na terenu bodisi v laboratoriju. Od potresne odpornosti pa je odvisen obseg in vrsta posega v konstrukcijo. Poleg ocene potresne odpornosti je potrebno določiti tudi celo vrsto splošnih kriterijev.

V primeru, ko utrjujemo konstrukcijske elemente za prevzem povečane statične obtežbe, ki jo povzroča težnost, utrdimo samo posamezni poškodovani ali šibek element oz. sklop konstrukcije. V primeru sanacije in utrditve gradbenih konstrukcij proti potresu utrditev posameznih elementov ni priporočljiva. S tem povzročimo veliko spremembo v porazdelitvi togosti, posledica česar je nepričakovana porazdelitev potresnih sil, lahko pa celo poslabšanje prejšnjega stanja. Iz teh razlogov je potrebno pri zidanih konstrukcijah elemente utrditi čim bolj enakomerno po vseh zidovih kritične etaže, čeprav po izračunih to ne bi bilo potrebno. Konstrukciji je potrebno najprej zagotoviti duktilnost in nosilnost. Pomembna je tudi uporabnost konstrukcije, ki jo je potrebno omejiti s prevelikimi deformacijami med potresom. Tako preprečimo hude poškodbe sekundarnih konstrukcijskih sistemov in opreme.

Glavni parametri, ki jih moramo upoštevati pri izbiri ustrezne metode utrjevanja, so tip konstrukcije ter vrsta in kakovost materialov. Izvedljivost in učinkovitost posegov, s katerimi nameravamo izboljšati potresno odpornost, je odvisna od vrste konstrukcije in njenega stanja. Preučiti moramo tudi nekaj splošnih kriterijev, kot so razpoložljivost tehnologije, usposobljenost delovne sile, trajanje del, problemi bivanja, pomembnost stavbe in seveda stroški posegov. Poleg tega moramo imeti vzpostavljen tudi učinkovit sistem kontrole kakovosti. V primeru stavb kulturne dediščine pa moramo upoštevati še principe, ki veljajo za ohranitev arhitekturne kulturne dediščine [7].

### 3.4.2 Kulturna dediščina

Kot že omenjeno predstavlja kulturna dediščina nenadomestljivo vrednoto. Skrb za njeno ohranjanje in varovanje v vseh okoliščinah je skrb vsakogar izmed nas.



Slika 5: S kamnom zidana stavba, imenovana Tavčarjev dvor  
(<http://www.obcina-recica.si/sites/default/files/tav%C4%8Dar.jpg>)

Več lastniške stanovanjske hiše, ki so ovrednotene kot kulturna dediščina ali razglašene za kulturni spomenik, so pogosto žrtve neustreznih predelav in preureditev zaradi zahtev posameznega lastnika. Pri neustreznih zamenjavah oken, zasteklitvah balkonov, izvedbah različnih instalacij in vodov v stopniščih, vežah in skupnih predprostorih ter pri drugih podobnih posegih so varovane lastnosti kulturne dediščine v veliki meri prizadete ali celo uničene. Poskus vzpostavitve prvotnega stanja je zaradi velikega števila lastnikov in različnih vrst posegov pogosto Sizifovo delo [10].

### 3.5 Protipotresne utrditve zidanih konstrukcij

V primerjavi z novogradnjo, kjer uporabimo nove materiale in preizkušene postopke, je potrebno pri sanaciji objekta najprej oceniti materialno-tehnično stanje zgradbe in se na podlagi te ocene odločiti, s katerimi postopki bomo sanirali stavbo [11]. Sanacije potresno neodpornih stavb se v praksi izvajajo že kar nekaj časa, kot relativno nova pa se počasi uveljavlja sanacija s t.i. FRP kompoziti.

#### 3.5.1 Tradicionalne metode utrditve zidanih konstrukcij

Še danes se uporablja mnogo tradicionalnih metod protipotresne utrditve. Katero metodo bomo izbrali za utrditev konstrukcije, je odvisno od več dejavnikov. Pomembno je, da metoda ustreza predpisom in je z njo zagotovljena varnost ljudi in lastnine. Pogosto moramo upoštevati dva interesa, na eni strani restavratorske in konservatorske zahteve po ohranitvi izgleda stavbe, kot tudi po ohranitvi prvotnega materiala. Na drugi strani pa moramo

upoštevati zahteve trga, t.j. uporabiti čim cenejšo metodo utrditve, ki vključuje stroške materiala, dela in opreme ter indirektno stroške, ki so težje izmerljivi. Sanacija, ki zahteva veliko časa, predstavlja motnjo za stanovalce, saj določene metode zahtevajo tako velike konstrukcijske posege, da jih je skoraj nemogoče izvesti nemoteno za uporabnike, druge pa pomenijo zmanjšanje ali spreminjanje tlorisa stavbe.

Tomažević v [1] navaja kar nekaj tradicionalnih metod utrditev objektov. Danes se še vedno uporabljajo:

- Zamenjava malte v fugah. Takšna utrditev predstavlja stanovalcem veliko motnjo, ker je zelo zamudna. Skoraj celotno delo je potrebno opraviti ročno, zato so visoki tudi stroški dela.
- Izdelava armiranobetonskega ometa nosilnih zidov. S to metodo moramo utrditi celotno konstrukcijo in povečati nosilnost vsem konstrukcijskim elementom vse do temeljev. Pri tem se izgled stavbe popolnoma spremeni, zato ta utrditev ni primerna za spomeniško zaščitene objekte.
- Dozidava in prezidava zidov. Pri kamnitih stavbah, kjer pride pogosto do izbočitve zidov in močnih poškodb na vogalih, je takšna utrditev primerna. Določene zidove popolnoma ali delno porušimo in nato zgradimo nove. Tovrstni posegi so lahko dokaj dragi in jih uporabimo le, kadar menimo, da so ekonomsko upravičeni.
- Zamenjava dotrajanih lesenih stropov z armiranobetonskimi ploščami ali izvedba utrditvenega armiranobetonskega estriha na obstoječih lesenih stropovih. Prvi ukrep se je sicer v zadnjih potresih izkazal za problematičnega.
- Povezovanje zidov z jeklenimi vezmi v višini stropov. S takšnimi vezmi nadomestimo togo medetažno konstrukcijo in zagotovimo, da konstrukcija med potresom deluje kot celota.
- Injektiranje. Pri tej metodi zapolnimo praznine v zidu, s tem utrdimo zid in povežemo sloje zidu med seboj.

### 3.5.2 Novodobne metode utrditve zidanih konstrukcij

Zaradi navedenih slabosti tradicionalnih načinov utrditve se raziskujejo možnosti utrditve z novodobnimi kompozitnimi materiali.

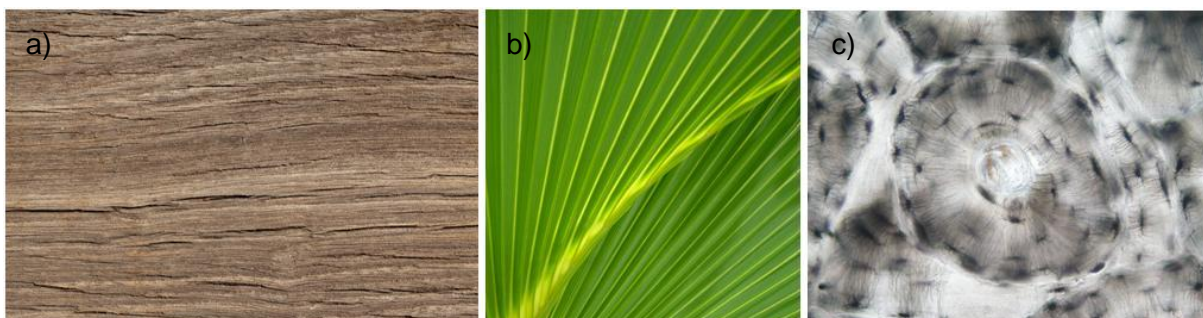
Zaradi odličnih specifičnih lastnosti, ki so neprimerljive s tradicionalnimi utrditvami z jeklom, so kompozitni materiali iz vlaken bistveno bolj učinkoviti za izvedbo sanacij in konstrukcijskih utrditev poškodovanih objektov [12]. Med novimi strategijami utrditev ponuja uporaba FRP (angl. "fiber reinforced polymer") utrditvenih tehnik številne prednosti, kot so visoko razmerje trdnosti glede na težo, odpornost proti koroziji in utrujanju (angl. "fatigue resistance"), enostavna uporaba in namestitvev ter majhne arhitektonske spremembe. Uporaba FRP lahko znatno poveča natezno trdnost zidov in globalno duktilnost konstrukcije [13].

## 4 KOMPOZITI

### 4.1 Uvod v kompozite

Kompoziti so sestavljeni materiali, ki delujejo enovito. Kompozitni material je torej vsak material, ki je sestavljen iz dveh ali več komponent. Z njimi lahko s kombinacijo večih materialov dosežemo želene lastnosti, saj so lastnosti celotnega kompozitnega materiala različne od lastnosti posamezne komponente.

Primere kompozitov lahko najdemo tudi v naravi. Eden najbolj pogostih naravnih kompozitov je les, ki je sestavljen iz različnih lesnih vlaken, ki se v različnih smereh različno obnašajo. Poleg lesa (Slika 6a) so naravni kompoziti npr. tudi tropski listi (Slika 6b), pri katerih je uporabljen koncept vlaknastih utrditev, ter kosti (Slika 6c), ki so sestavljene iz kratkih in upogljivih vlaken kolagena, ki so vgrajena v mineralno matrico, imenovano apatit.



Slika 6: Kompoziti v naravi: a) les b) tropski list c) mikrostruktura kosti  
(<http://www.publicdomainpictures.net/pictures/30000/velka/wood-texture.jpg>  
<http://ipad.iwalls.org/wp-content/uploads/2010/11/riv-leaf.jpg>  
<http://www.bmb.leeds.ac.uk/illingworth/bioc3800/bone.jpg>)

Posamezen kompozit ima lahko tudi več različnih utrditvenih materialov. Takšne kompozite imenujemo hibridi. Mednje sodi armiran beton, saj je beton že sam po sebi kompozit, ta pa ima dodano še armaturo oz. manjše delce.

Vsak kompozit vsebuje material, ki je zvezno razširjen in s tem tvori matrico kompozita. Ostali materiali so dodani kot utrditev matrice. Dodani materiali s svojo velikostjo in razporeditvijo v veliki meri določajo lastnosti kompozitnega materiala. Poleg oblike utrditev je za njihove lastnosti pomemben tudi delež posameznih materialov oz. faz in pa njihova medsebojna povezanost. Fazo, ki je kontinuirana, običajno imenujemo matrica, drugo fazo imenujemo razpršena faza [14].

## 4.2 Delitev kompozitov

Kompozite lahko klasificiramo po različnih kriterijih, najpomembnejši med njimi je predvsem oblika utrditev. Ločimo:

- Kompoziti, utrjeni z vlakni
- Kompoziti, utrjeni z delci, kjer imajo delci premer večji od 10  $\mu\text{m}$  in prostorninski delež nad 20%,
- disperzijsko utrjene kompozite, ki sodijo med kompozite, utrjene z delci. Delci imajo premer od 0,05  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$ , prostorninski delež disperzijskega materiala je od 1 do 15%. Delci preprečujejo premike dislokacij in prinesejo določen utrditveni efekt [15].
- laminarne kompozite, kjer gre za plastovite kompozite, v katerih so pogosto posamezne plasti kompoziti (matrice utrjene z razpršenimi delci ali z vlakni),
- sestavljene kompozite
- hibride.

### 4.2.1 Kompoziti utrjeni z vlakni

Pri utrditvah matrice z vlakni ima matrica vlogo veziva, ki vlakna povezuje, jih ščiti pred zunanjimi vplivi in deloma tudi pred mehanskimi poškodbami. Preko matrice se prenašajo obremenitve na vlakna, za kar je potrebna visoka strižna trdnost in odpornost povezave med vlakni in matrico. Sama vlakna so nosilci obremenitev, prispevajo k trdnosti in togosti kompozita, a je njihov učinek odvisen predvsem od kakovosti povezave z matrico. Poznamo več vrst vlaken, ki se uporabljajo za kompozite, med njimi so najbolj znana steklena, karbonska ter aramidna vlakna. Kompozitne materiale, ki so sestavljeni iz matrice in armaturnih vlaken, krajše imenujemo kar FRP (angl. "fibre-reinforced plastic/polymer") kompoziti.

Kompozitni material je lahko, ob ustrezni izbiri matrice, zelo odporen na procese korozije in vplive okolja. Dobra lastnost kompozitov je tudi sposobnost dušenja dinamičnih obremenitev in odpornost na utrujanje. Kompoziti z ogljikovimi vlakni, ki so ustrezno načrtovani in izdelani, so praktično neobčutljivi na utrujanje. Kompozite odlikuje tudi visoka žilavost in s tem povezana sposobnost absorpcije velikih količin energije. Vzdrževanje in popraviljanje konstrukcij, ki so narejene iz kompozitov, je razmeroma enostavno [15].

#### 4.2.1.1 Steklena vlakna

Steklena vlakna (Slika 7) se uporabljajo v številnih FRP proizvodih za gradnjo, od FRP utrditvenih palic, tkanin, do profilov različnih oblik. Steklo je amorfna anorganska zmes iz primarnih kovinskih oksidov, ki je izdelana v obliki vlaken različnih standardnih oblik ali tipov. Največji delež v zmesi ima silicijev oksid, ki ga je od 50 do 70% mase stekla.



Znanih je več vrst stekel. Borosilikatno steklo, zaradi svoje velike električne upornosti, imenovano kot E-steklo (električno steklo), se uporablja v veliki večini za FRP izdelke. A-steklo (okensko steklo) in C-steklo (korozijsko odporno) se uporabljata za posebne izdelke v gradnji. S-steklo se uporablja za izdelavo visoko zmogljivih vlaken, npr. za potrebe letalske industrije [16]. Na splošno označujemo stekla, ki so občutljiva na alkalno korozijo, z oznako A, z oznako E vlakna, ki so srednje alkalno odporna, ter stekla z visoko alkalno odpornostjo z oznako C [4].



Slika 7: Steklena vlakna

(<http://image.made-in-china.com/4f0j00BvraECiGRWzQ/Glassfiber.jpg>)

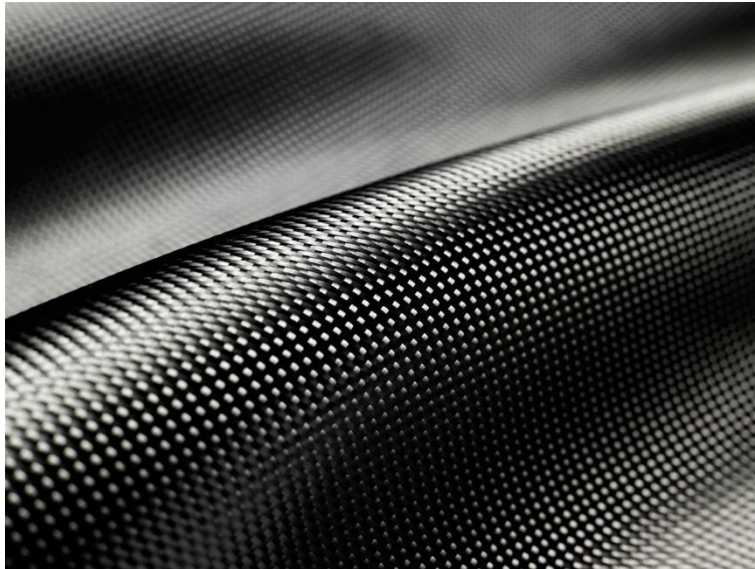
Premer steklenega vlakna variira od približno 3 do 24  $\mu\text{m}$ . Najbolj pogosto se uporablja vlakna premera 17  $\mu\text{m}$ . Stekлено vlakno ima značilno svetlo belo barvo in se ga običajno obravnava kot izotropen material. Proizvaja se pri temperaturi taljenja, t.j. približno 1400°C. Vlakna so deloma občutljiva na vlago, predvsem ob prisotnosti soli in povišane alkalnosti, zato morajo biti dobro zaščitena z matrico. Prav tako so občutljiva na lezenje in izgubo trdnosti pod stalnimi napetostmi. Steklena vlakna so odlični toplotni in električni izolator, zato se jih veliko uporablja pri konstrukcijah in električni industriji kot izolacijski material. Prav tako so od vseh visoko zmogljivih vlaken najcenejša.

Stekleno vlakno ima približno primerljive lastnosti z ostalimi vlakni, kot so polimerna in karbonska vlakna. Čeprav niso tako močna kot karbonska vlakna, so veliko cenejša in znatno manj krhka [16].

#### 4.2.1.2 Karbonska vlakna

Karbonsko vlakno je trd polkristalen organski material. Karbonska vlakna imajo premer približno 5 do 10  $\mu\text{m}$  in značilno ognjeno črno barvo. Zaradi dvodimenzionalne atomske strukture se štejejo, da so prečno izotropna, t.j. imajo različne lastnosti v vzdolžni in v prečni smeri.

Karbonska vlakna (Slika 8) se danes uporablja za gradnjo pri FRP utrditvenih ploščah in tkaninah, trakovih, FRP prednapetih kablji, ipd.



Slika 8: Karbonska vlakna

(<http://www.digitaltrends.com/wp-content/uploads/2012/12/BMW-and-Boeing-to-partner-up-on-carbon-fiber-research-including-recycling.jpg>)

Karbonska vlakna se proizvajajo pri visoki temperaturi, t.j. 1200 do 2400°C. So zelo trajna in se dobro obnašajo v vročih in vlažnih pogojih, tudi kadar so podvržena utrujanju. Imajo negativni ali zelo nizek koeficient toplotnega raztezka v svoji vzdolžni smeri, kar jim daje odlično dimenzionalno stabilnost. Po drugi strani so termalno in električno prevodna. Kadar so v kontaktu s kovinskimi materiali, moramo biti zelo pozorni, saj se zaradi različnih elektropotencialov med karbonskim vlaknom in večino kovinskih materialov lahko razvije galvanski člen. To lahko vodi do razgradnje polimerne matrice v FRP kompozitu, predvsem v prisotnosti kloridov, in do korozije kovinskega materiala [16].

#### 4.2.1.3 Aramidna vlakna

Aramidna vlakna (Slika 9) so se v osemdesetih letih uporabljala za proizvodnjo FRP prednapetih kablov prve generacije. Kljub temu še vedno nekaj proizvajalcev izdeluje aramidna vlakna za FRP utrditvene palice ali kable. Prvič so bila razvita in patentirana pod komercialnim imenom Kevlar.

Zaradi visoke cene, težke proizvodnje, visoke absorpcije vlage, nizke tališne temperature in razmeroma slabih tlačnih lastnosti, so postala manj priljubljena za FRP produkte, ki se uporabljajo za namene gradnje. Njihove prednosti so predvsem izjemno visoka žilavost in trdota, zato se uporabljajo za številne industrijske izdelke, kot so neprebojni jopiči, čelade, ipd. Imajo značilno rumeno barvo in so cenovno primerljivi s karbonskimi vlakni. Tako kot karbonska vlakna imajo tudi ta v vzdolžni smeri negativni koeficient toplotnega raztezka.

Izmed vseh visoko zmogljivih vlaken so najlažja, saj je njihova gostota okoli 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Vzdolžna natezna trdnost vlakna se giblje med 3400 do 4100 MPa, odvisno od vrste aramidnega vlakna, ter vzdolžni natezni modul od 70 do 125 GPa [16].



Slika 9: Aramidna vlakna

([http://img.alibaba.com/img/pb/724/575/240/1270435660983\\_hz\\_myalibaba\\_web14\\_4316.jpg](http://img.alibaba.com/img/pb/724/575/240/1270435660983_hz_myalibaba_web14_4316.jpg))

Odporna so proti toplotnim obremenitvam, propadanju zaradi kemičnih in toplotnih vplivov, manj pa so odporna proti UV žarkom. Aramidna vlakna so primerna za armiranje kompozitov, ki so izpostavljeni udarni obremenitvi. V primerjavi s steklenimi vlakni imajo višjo natezno togost in trdnost ter nižjo gostoto [4].

#### 4.2.1.4 Bazaltna vlakna

Bazaltna vlakna (Slika 10) so pri uporabi za FRP in kompozite za konstrukcijske elemente relativno nova. Imajo podobno kemijsko sestavo kot steklena vlakna, vendar imajo boljše trdnostne karakteristike. Za razliko od večino steklenih vlaken, so zelo odporna na baze, kisline in soli. Zato so zelo primerna za betonske, mostne in obalne konstrukcije.



Slika 10: Bazaltna vlakna

([http://www.technobasalt.com/i/products/439\\_241/GLY57W8x.jpg](http://www.technobasalt.com/i/products/439_241/GLY57W8x.jpg))

[http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/chopped-basalt-fiber-54523-2839963.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/chopped-basalt-fiber-54523-2839963.jpg))

V primerjavi s karbonskimi in aramidnimi vlakni so uporabne v širšem temperaturnem območju (-269°C do 650°C), imajo večjo odpornost na oksidacijo ter sevanje, višjo tlačno in strižno trdnost. Cene vlaken, ki so narejena iz bazalta, so višje od tistih, ki so narejena iz E-stekla, in nižje od aramidnih ali karbonskih vlaken.

Bazaltna vlakna izvirajo iz magmatske kamnine bazalt, ki je nastala s hitrim ohlajanjem lave na površini zemlje. Je najbolj pogosta kamnina v zemljini skorji. Izdelava bazaltnih in steklenih vlaken je podobna. Zdrobljena bazaltna kamnina je edina surovina, ki je potrebna za izdelavo vlakna. Vlakna se proizvajajo s taljenjem bazaltne kamnine pri 1500°C, kar je višja temperatura kot pri izdelavi steklenih vlaken.

Bazalt kot vlakno v FRP kompozitih ima veliko potenciala in je vse bolj zanimiv zaradi svoje visoke odpornosti proti obrabi in temperaturi. V primerjavi s FRPji, narejenimi iz steklenih, aramidnih in ogljikovih vlaken, je njegova uporaba na infrastrukturnem trgu zelo nizka [17].

#### **4.2.1.5 Primerjava vlaken**

Kljub temu, da je pomen vseh vlaken, ki se uporabljajo za utrjevanje enak, se v svojih lastnostih zelo razlikujejo. Nekatera imajo višjo tlačno oz. natezno trdnost, druga nižjo, razlikujejo se v odpornostih na utrujanje, požarnih odpornostih, ceni in drugih značilnostih.

Tipične značilnosti omenjenih vlaken: za steklena vlakna, predvsem z oznako E velja, da imajo dobro tlačno trdnost in togost, dobro natezno trdnost in odlične električne lastnosti pri relativno nizkih stroških. Karbonska vlakna imajo zelo visoko trdnost v tlaku in nategu, visoko togost in visoko odpornost proti koroziji, lezenju ter utrujanju, vendar slabo sposobnost prenašanja nenadnih obtežb, ki se odraža v obliki energije. Aramidna vlakna so ponašajo z visoko trdnostjo, dobro sposobnostjo prenašanja nenadnih obtežb, visoko odpornostjo proti obrabi in srednjo togostjo. Bazaltna vlakna imajo v primerjavi z E-steklenimi vlakni približno 15 % višjo natezno trdnost in modul, boljše kemijsko obstojnost, širše območje temperature delovanja, so bolj prijazna okolju in imajo možnost recikliranja. So tudi bolj ekonomična od S-stekla in karbona [18].

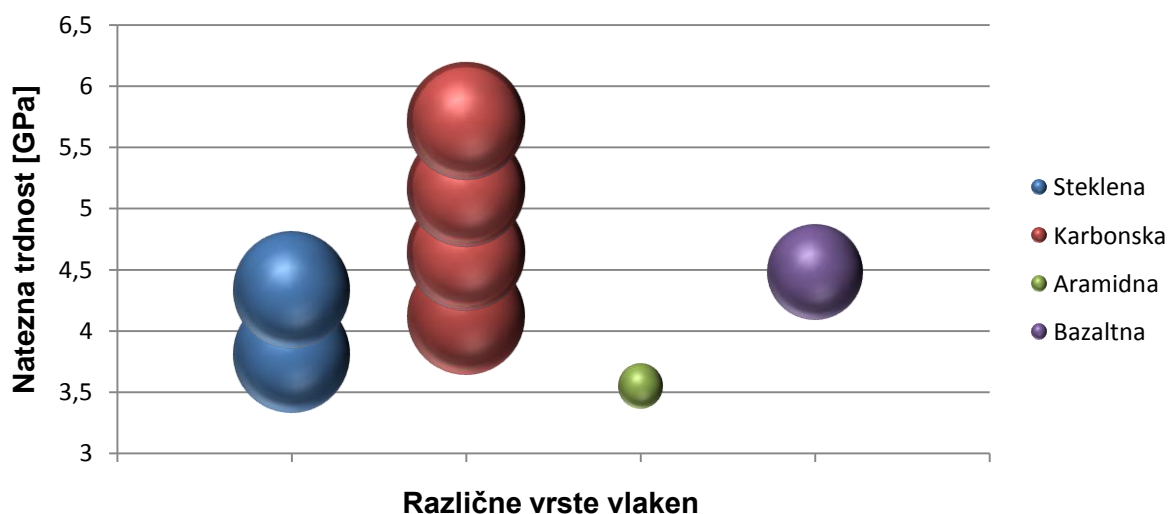
V Preglednici 1 so prikazane lastnosti najbolj pogosto uporabljenih vlaken pri utrjevanju: steklenih, karbonskih in aramidnih, kjer zelena barva pomeni odlično, rumena barva srednje dobro in rdeča barva slabo.

Preglednica 1: Primerjava različnih lastnosti aramidnih, karbonskih in steklenih vlaken

Lastnosti	Aramidna	Karbonska	Steklena
Visoka natezna trdnost	rumena	zelena	rumena
Visok natezni modul	rumena	zelena	rdeča
Visoka tlačna trdnost	rdeča	zelena	rumena
Visok tlačni modul	rumena	zelena	rdeča
Visoka upogibna trdnost	rdeča	zelena	rumena
Visok upogibni modul	rumena	zelena	rdeča
Visoka strižna trdnost v ravnini	rumena	zelena	zelena
Visoka odpornost na utrujanje	rumena	zelena	rdeča
Visoka požarna odpornost	zelena	rdeča	zelena
Visoka toplotna izolativnost	zelena	rdeča	rumena
Visoka električna izolativnost	rumena	rdeča	zelena
Nizka toplotna razteznost	zelena	zelena	zelena

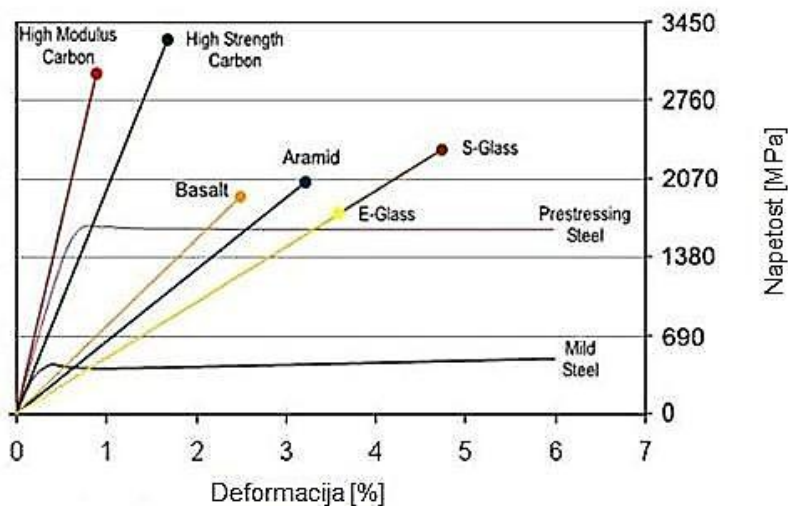
Od naštetih vlaken najbolj izstopajo karbonska vlakna, ki imajo največ odličnih lastnosti v primerjavi z drugima. Izstopajo predvsem pri nateznem in tlačnem modulu, tlačni ter upogibni trdnosti ter odpornosti na utrujanje.

Podrobno smo si ogledali natezno trdnost vlaken, ki variira od vlakna do vlakna. Tudi razponi natezne trdnosti za iste vrste vlaken se močno razlikujejo; ponovno izstopajo karbonska vlakna, ki imajo največje območje nateznih trdnosti, Kar je prikazano tudi na Grafikonu 1.



Grafikon 1: Območja natezne trdnosti za različne vrste vlaken

Kot že prej omenjeno, imajo karbonska vlakna najvišji elastični modul, kar je razvidno tudi iz Grafikona 2 saj izmed vseh vlaken dosežejo najmanjšo deformacijo pri najvišji napetosti. Sledijo jim bazaltna, aramidna in steklena vlakna. Za primerjavo je prikazana tudi odvisnost  $\sigma$ - $\epsilon$  mehkega jekla in jekla za prednapenjanje.



Grafikon 2: Graf  $\sigma$ - $\epsilon$  za različne vrste vlaken (vir)

[http://www.google.com/url?source=imglanding&ct=img&q=http://www.build-on-prince.com/images/frp-stress-strain-600.jpg&sa=X&ei=yVsGUZLiLoqs4ATf6YCgBg&ved=0CAwQ8wc4Nw&usg=AFQjCNHu5S2Ei\\_8BLiCLubmpSpMN0zpkXg](http://www.google.com/url?source=imglanding&ct=img&q=http://www.build-on-prince.com/images/frp-stress-strain-600.jpg&sa=X&ei=yVsGUZLiLoqs4ATf6YCgBg&ved=0CAwQ8wc4Nw&usg=AFQjCNHu5S2Ei_8BLiCLubmpSpMN0zpkXg)

## FRP kompoziti pri sanaciji in utrditvi

Najpomembnejša prednost sanacije s FRP materiali so nižji stroški v primerjavi s tradicionalnimi metodami utrditve. Dela je manj, zahtevne mehanizacije ne potrebujemo. V času sanacije je mogoča uporaba stavbe, v primerih, ko se sanacija izvaja samo na eni strani zidu, je lahko uporaba celo nemotena. S pravilno izbiro FRP materiala lahko dosežemo različne utrditve (požarno, alkalno, korozijsko,...). Običajni sistemi FRP utrditev nam ne spremenijo površine in oblike bivalnega prostora. Nezanemarljivo je, da se dinamične lastnosti konstrukcije skoraj ne spremenijo. Tovrstni utrditveni posegi le malo spremenijo togost, k masi celotne konstrukcije pa ne prinesejo veliko. Ker se dinamične lastnosti konstrukcije ne spremenijo, dodatni ukrepi zaradi utrditve zidov tako niso potrebni [4].

### 4.2.2 Načini utrditve s FRP kompoziti

Načinov utrditve s FRP kompoziti je več [4]. Lahko se odločimo za:

- trakove, ki jih lahko na več načinov nalepimo na zid
- lamele
- večje površine tkanin in
- armaturne palice, ki se jih vedno bolj uporablja.

V primeru utrditve zidov se lahko odločimo za enosmerne ali dvosmerne trakove, ki jih lahko nalepimo v vertikalni, horizontalni ali diagonalni smeri ali pa v kombinaciji horizontalnih in vertikalnih trakov. Predvsem pri sanacijah zidanih obokov uporabljamo večje površine tkanin, a s tem zmanjšujemo paroprepustnost saniranega elementa.

V svetu se izvaja veliko preiskav prav s področja načinov utrditve s FRP kompoziti. Preučujejo se različni materiali, različne količine utrditvene armature, išče se idealna razporeditev armature glede na pričakovano obremenitev, itd. Uveljavile so se predvsem utrditve s FRP kompoziti pri sanacijah mostov in betonskih konstrukcijskih elementov v stavbah, kjer primanjkljaj natezne ali strižne armature nadomestimo z dolepljanjem lamel na zunanjo stran elementa. V uporabi so predvsem kompozitne lamele, ki se jih zgolj nalepi na konstrukcijo.

Veliko boljši so se izkazali načini utrditve s tkanino, kjer nego izvajamo na gradbišču. V tem primeru je postopek nekoliko zahtevnejši kot v primeru uporabe prefabriciranih lamel. V vseh primerih je potrebno najprej poskrbeti za primerno pripravo površine. Morebitne neravnine moramo zgladiti, ostre robove zaobliti, iz opeke pa je potrebno odstraniti glazuro. Najprimernejša je uporaba peskanja ali brušenja, navadno pa se uporablja kombinacija obojega. Pred nanosom impregnacije oz. lepila je potrebno s površine odstraniti prah, ki se je nabral pri pripravi površine. Tehnologija nanosov lepila in traku mora biti usklajena z ustreznim negovanjem, saj s tem zagotovimo popolno obdanost vlaken z epoksidno matrico. Tako pripravljena površina zagotavlja boljšo sprijemnost med zidom in FRP materiali. Pri tkaninah, za razliko od lamel, do odlepljanja v območju konic napetosti ne prihaja, kar nam zagotavlja višjo duktilnost. Porušitev konstrukcijskega elementa v tem primeru ni krhka, saj se vlakna trgajo postopoma.

Vedno bolj se uporablja sistem NSM (angl. "Near surface mounted"), uporabili smo ga tudi sami. Gre za način utrjevanja v deloma odstranjenih spojnica ali vrezanih utorih v kamnu ali opeki, v katere se po temeljitem čiščenju vgradi palica oz. vrvica. Pri takem načinu utrjevanja se ohranja izgled konstrukcije oz. elementa in je tako primeren za stavbe kulturne dediščine. To je bil tudi glavni razlog za uporabo pri naših kamnitih zidovih.



Slika 11: Primer NSM utrjevanja [19]

»Ta stran je namenoma prazna.«

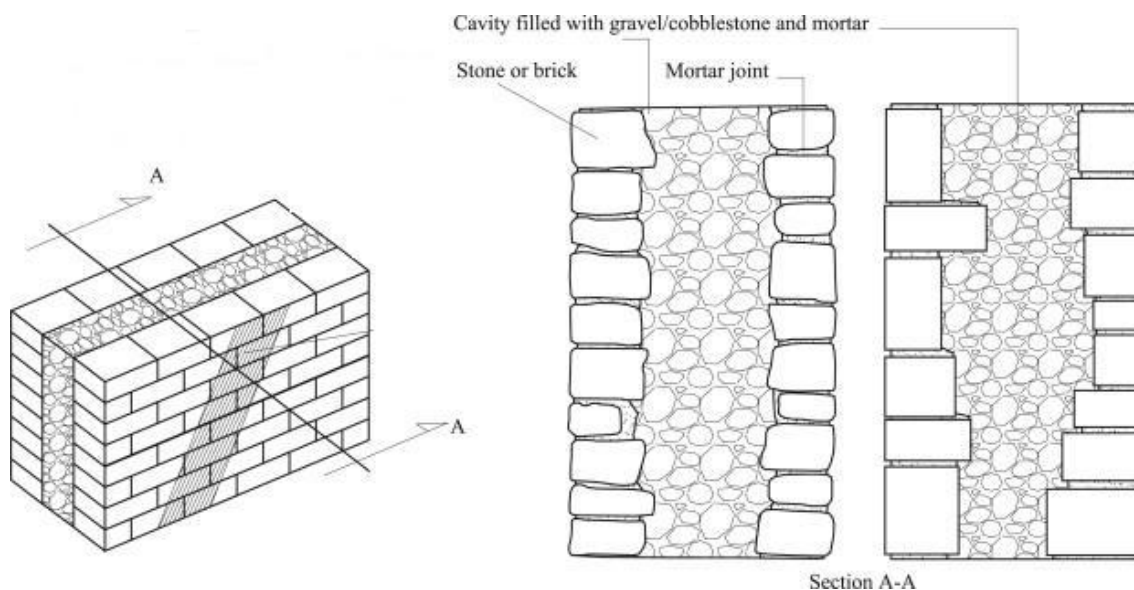


## 5 UTRDITVENI UKREP Z INJEKTIRANJEM

Kot enega izmed utrditvenih ukrepov smo si izbrali injektiranje. Ta ukrep smo uporabili pri obeh zidovih, ki sem si ju izbrala za nadaljnje preizkušanje na strig. Injektiranje je izvajala usposobljena ekipa delavcev z dolgoletnimi praktičnimi izkušnjami z injektiranjem.

### 5.1 Uvod v injektiranje

Mnogo starih zidanih stavb je sezidanih iz dveh zunanjih nosilnih slojev, ki sta sezidana z večjimi kosi nepravilno obdelanega kamna. Vmesni sloj je slabše zidan, saj je ponavadi nasut s kamenjem manjših dimenzij in odpadkov, dobljenih pri zidanju. Vse skupaj je povezano z malto, ki je lahko zmešana na osnovi različnih materialov kot sta apno, cement ipd. V notranjem sloju je lahko veliko votlin, katere s pomočjo injektiranja z injekcijsko mešanico zapolnimo in tako utrdimo zid ter povežemo zunanja sloja med seboj. Strjena injekcijska masa namreč poveže ločene dele zidovja z votlinami v kompaktno celoto.



Slika 12: Prerez troslojnega zidu

(<http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0020740310000056-gr1.jpg>)

Injektiranje se prične z vrtanjem lukenj v zid. V primeru, ko je zid zelo debel, je potrebno vrtanje z obeh strani. Avtorja Bergant in Dolinšek [11] navajata, da morajo biti luknje globoke do dve tretjini debeline zidu, Tomažević in Apih pa [20], da morajo biti globoke vsaj polovico debeline zidu. Vsi avtorji so si enotni glede razdalje med odprtini, t.j. 50 cm, le da Tomažević in Apih navajata razdaljo vse do enega metra, saj je le-ta odvisna od strukture zidu. V pripravljene odprtine se vstavijo plastične ali kovinske cevke, površino zidu pa običajno omečemo z grobim cementnim obrizgom, da injekcijska masa ne steče skozi razpoke. Pred pričetkom injektiranja je potrebno zid dobro navlažiti z vodo. Skozi pripravljene cevke se nato pod pritiskom do 2 bara injektira injekcijska masa.



Slika 13: Vlaženje zidu in umeščanje cevk v zidove

Z injektiranjem se vedno prične pri dnu zida, saj bi pri injektiranju od zgoraj navzdol injekcijska masa sproti zapirala kanale proti nižjim delom zidu. Pri pravilnem poteku injektiranja injekcijska masa praviloma izteka iz cevk, ki so višje od cevke, skozi katero vnašamo injekcijsko mešanico. Do tega pride, ko injekcijska masa zapolni vse razpoke in praznine, ki so nižje od položaja cevke v zidu. Druga možnost pa je, da injekcijska masa prodre skozi širino zidu in priteče skozi zid na drugi strani. Do obeh tipičnih primerov je prišlo tudi pri injektiranju naših zidov, kar je razvidno na Sliki 14.



Slika 14: Injektiranje zidu in iztekanje injekcijske mešanice iz druge cevke

Po končanem injektiranju se odstrani cevke. Iz izkušenj pri projektiranju prej omenjeni avtorji navajajo, da so zidovi lahko precej votli in lahko sprejmejo kar 60 do 80 kg mase na kubični meter [11] oz. 50 do 150 kg mase na kubični meter [20]. V našem primeru zidovi niso sprejeli takšne količine injekcijske mešanice, ker so bili v sredini kar dobro zapolnjeni s kamni in malto, pravimo, da so bili linijsko injektirani.

Postopek injektiranja je torej dokaj enostaven in poceni. Konstrukciji se z njim izboljšajo mehanske lastnosti. Prednost injektiranja je tudi v tem, da poseg v konstrukcijo po opravljenem postopku ni opazen. To je posebej pomembno za stavbe kulturne dediščine, kjer je potrebno upoštevati konservatorsko/restavratorske principe. Z injektiranjem se lahko v zidove vnese večjo količino vode, kar lahko predstavlja problem pri sanaciji zidov s freskami

in poslikavami ali drugimi oblogami. Negativni vplivi injektiranja dokazujejo, da se je potrebno injektiranja kamnitega zidovja zgodovinske vrednosti lotiti zelo skrbno [20].



Slika 15: Preizkušanci po linijskem injektiranju

## 5.2 Tipični materiali za injektiranje

Najbolj pogosto se za injekcijske mase uporabljata cement in apno. V praksi se največkrat uporablja cementna injekcijska mešanica, saj daje zaradi boljše lastnosti cementa tudi boljše končne rezultate. Pogosta je uporaba tudi apneno-cementnih mešanic z večjim deležem cementa.

### 5.2.1 Cementne injekcijske mešanice

Injektiranje zidov s cementno injekcijsko mešanico se je zaradi hitro naraščajočih trdnostnih karakteristik izkazalo za zelo učinkovito. Vendar ima vgrajevanje cementa v zidove starih stavb tudi negativne učinke. Zaradi svoje sestave predstavlja originalni strukturi tuj material, med njima lahko poteče kemijska reakcija z nastankom škodljivih produktov. Poleg tega, navajata Vintzileou in Tassios [21] tudi, da imajo mešanice iz cementa nizko sposobnost prodiranja v ozke razpoke in votline ter možnost pojava kristalizacije soli na površini ali blizu površine zidov ali na površini ali blizu površine ometov, če so zidovi ometani. Tomažević in Apih ta pojav razlagata kot posledico novonastalega kapilarnega sistema, ki nastane z zapolnjenjem praznin in votlin s kapilarno aktivnim cementnim kamnom. Po novem kapilarnem sistemu namreč potuje voda, ki vstopa v zid zaradi različnih gradbenih napak, skupaj z raztopljenimi solmi. Voda izhlapeva na površini zidov in pod poroznimi in slabo sprijetimi ometi se začnejo odlagati soli, ki vodijo do odstopanja ometa zaradi kristaliziranja soli, ki se še dodatno vlažijo iz zraka. Lahko pride do takšnih poškodb, da je lahko ogrožena tudi stabilnost objekta. Je pa vir soli tudi cementno vezivo samo.

Preprečevanje vlage v kamnitem zidovju lahko dosežemo z injektiranjem cementne mešanice z vodo odbojnimi dodatki, vendar pa ti dodatki močno zmanjšajo trdnost strjene injekcijske mase.

Na koncu bi želela poudariti, da so tovrstni ukrepi (uporaba cementne injekcijske mešanice ter dodatkov, ki preprečujejo omočenje strjene injekcijske mešanice z vodo) primerni le za utrditev zidanih stavb manjše zgodovinske vrednosti. Ko utrjujemo stavbe kulturne dediščine z visoko zgodovinsko in umetniško vrednostjo, je potrebno uporabiti materiale, ki so čim bolj kompatibilni z originalnimi materiali stavbe. To pa materiali samo s cementnim vezivom niso.

### 5.2.2 Apnene injekcijske mešanice

Injekcijske mešanice, ki temeljijo na apnu, so brez dvoma najbolj kompatibilne z originalnim materialom starih kamnitih zidov, kjer vezivo predstavlja apnena malta. V tehnologiji apna je namreč grajena večina stavb slovenskega podeželja ter mestnih hiš z bogatimi dekorativnimi fasadami. Kljub temu, da so mehanske lastnosti apnenih injekcijskih mešanic v primerjavi s cementnimi nižje, se doseže homogenizacija zidu, ki vodi do znatnega izboljšanja mehanskih lastnosti zidu. Poleg tega je uporaba hidravličnih apnenih injekcijskih mešanic koristna za zaščito mozaikov, fresk in dekorativnih elementov na površini zidov [22].



Slika 16: Zid z apneno malto

([http://www.opnes.net/dgbuilders/tiny\\_mce\\_image\\_upload/lime.jpg](http://www.opnes.net/dgbuilders/tiny_mce_image_upload/lime.jpg))

### Star postopek pridobivanja apna

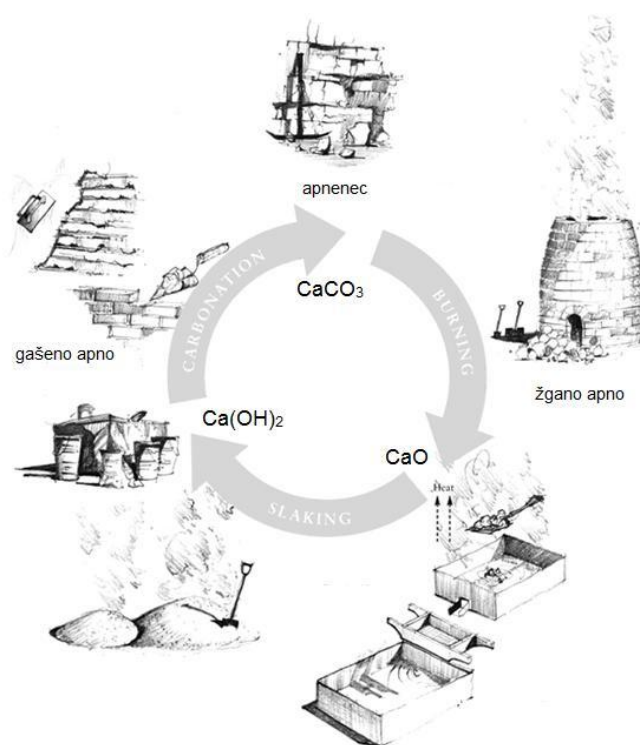
Star postopek pridobivanja apna je bil precej zahteven, zahteval je kar mesec dni trdega dela in veliko znanja. Apnenec je bilo potrebno zložiti v posebno peč, imenovano apnenica. Iz apnenca je bilo potrebno najprej narediti previdno zložen obok. Obstajala je namreč nevarnost, da bi se obok porušil, in nadaljnja proizvodnja živega apna ne bi bila več mogoča. Pod obokom je nastalo kurišče. Po narejenem nosilnem oboku se je apnenico do vrha napolnilo z apnencem. Nato se je kurišče zaprlo z železnimi vrati in zakurilo peč. Apnenec se je žgal pri temperaturi od 900°C-1200°C kar 5 do 6 dni. Po barvi ognja se je ugotovilo, kdaj je

bil apnenec dovolj žgan. Po dvodnevem ohlajanju apnenice so odstranili železna vrata, počistili ostanke pepela in pričeli z izkopavanjem žganega (tudi živega) apna [23].



Slika 17: Star način pridobivanja apna  
(<http://www.beljenje.com/index.php/postopek>)

Apno, kot glavna sestavina apnenih injekcijskih mešanic, je naravni material. Kot že omenjeno, se ga proizvaja v pečeh, kjer se žgejo kamnine na osnovi kalcija (apnenci in krede), školjke in korale. Optimalna temperatura za predelavo je okrog 900°C.



Slika 18: Potek pridobivanja apna [24]

Pri postopku žganja se iz apnenca izloči ogljikov dioksid in tako nastane kalcijev oksid - žgano apno, imenujemo ga tudi živo apno. Je material v kosih, ki se ga danes lahko zmelje tudi v fini prah. Kalcijev oksid je zelo nestabilen in težaven za shranjevanje, zato je praviloma gašen v vodi. Ta pojav je znan kot hidratacija, ki tvori hidratizirano apno. Lahko je gašeno z velikimi količinami vode, tako dobimo apneno testo, ali pa je zračno gašeno v vlažnem okolju. Tretja možnost je, da je gašen s pomočjo vlažnih agregatov kot nekakšna vroča zmes (živoapnena malta). Pri gašenju živo apno tvori kalcijev hidroksid, pri čemer se sprosti veliko

toplote. Ta eksotermna reakcija je lahko zelo nevarna, zato je pri rokovanju z živim apnom ter pri gašenju le tega potrebno biti zelo previden in nositi zaščitno opremo. Živo apno je najbolj reaktivno takrat, ko je uporabljen apnenec, ki vsebuje zelo malo gline, ko je žgan na optimalni temperaturi in gašen takoj, ko pride iz peči [24].

**Hidratizirano apno** je gašeno apno, ki mu je dodana teoretično določena količina potrebne vode. Vsa voda se porabi za kemijsko reakcijo, tako dobimo suho in praškasto vezivo, ki ga hranimo v vrečah. Glavna pomanjkljivost hidratiziranega apna je, da v vrečah ostane še vedno nekaj negašenega trdo žganega živega apna, kar pa lahko pri uporabi povzroči poškodbe ometa, malte ali injekcijske mase. Druga slabost je, da lahko prah v vreči karbonatizira, kar pomeni, da veže z ogljikovim dioksidom in tako izgubi del sposobnosti vezanja. Zato je potrebno suho apno uporabiti čim bolj sveže. Poleg tega se priporoča, da se hidratizirano apno vsaj nekaj dni pred uporabo zameša z vodo. Tako odležano apno ima izboljšane lastnosti glede na tisto, ki ga uporabimo takoj po zamešanju z vodo. Hidratizirano apno je poznano tudi kot nehidravljučno apno, in sicer zaradi svoje nesposobnosti strjevanja pod vodo.



Slika 19: Hidratizirano apno

([http://i00.i.aliimg.com/photo/v0/104707592/Hydrated\\_Lime.jpg](http://i00.i.aliimg.com/photo/v0/104707592/Hydrated_Lime.jpg))

**Apno testno** pridobimo z gašenjem apna v kosih z viškom vode. Je plastične konsistence in lahko vsebuje do 50% proste vode. V primeru, ko je dodane vode preveč in je dodana prehitro, lahko le-ta apno "utopi". V nasprotnem primeru lahko apno "zažgemo", kar pomeni, da ostanejo v apnenem testu grude živega apna [25].

**Hidravljučno apno** je produkt žganja kamna, ki ni čisti apnenec, temveč ima že primesi silikatov (npr. gline). Ima podobne lastnosti kot cement in ga včasih tudi imenujemo "naravni

cement" [26]. Več je vsebnosti gline, močnejša je malta iz hidravličnega apna. Stopnja temperature žganja, skupaj z vsebnostjo gline v kamnu, vplivata na trdnost nastale malte. Hidravlična apna se imenujejo tako zaradi svoje sposobnosti, da vežejo tudi v vodi. Ta lastnost jih uvršča med zelo uporabne pri podvodnih delih – v 18. stoletju so bila znana kot "vodna apna".

Imajo drugačne fizikalne in mehanske lastnosti kot nehidravlična apna. So sivo bela, siva ali rjavo rumena. Niso tako obdelavna in se manj krčijo. Malte, pripravljene iz hidravličnega apna imajo nižjo prepustnost vodne pare in poroznost, višjo tlačno trdnost in večjo odpornost na kristalizacijo soli.

Zaradi različnih vrst apna ali materialov na bazi apna, ki so danes na voljo in znanj o medsebojnem delovanju različnih materialov, smo dosegli točko, ko uporaba Portland cementa pri obnovi zgodovinskih stavb ni več potrebna ali upravičena [24].

### **5.2.3 Lastnosti cementa in apna**

Vsak material ima svoje prednosti in slabosti. Glavne prednosti cementa so, da je relativno poceni, je široko dostopen, enostaven in priročen za uporabo v večini vremenskih razmer in večini sezon, hitro se strdi in trdno drži, zato je lahko velik obseg zidov zgrajen hitro. Poleg tega je zgrajen element nosilen in tog v dnevni ali dveh. Veliko prej kot apno postane odporen na zmrzal.

Prednosti apna so, da je zelo uporaben, omogoča daljši delovni čas. Posledično se zmanjša njegov odpadek na mestu vgraditve. Je trajen, če se ga uporablja pravilno, omogoča zdravo bivanje v stavbah; apnene površine dihajo in vzdržujejo ravnovesje vlage, apno zmanjšuje propadanje lesa, lesno gnilobo in potrebo po kemijski obdelavi. Poleg tega zmanjšuje kondenzacijo, ki povzroča rast plesni in astmo, je razkužilo, zmanjšuje bolezni in škodljivce. Je estetsko prijeten, ima dobre toplotne in zvočne lastnosti in je negorljiv. Glavna slabost apna je, da zelo počasi veže in zato zelo počasi pridobiva na trdnosti. Končne trdnosti apnene malte ali injekcijske mase so bistveno nižje kot pri cementu, vendar praviloma dovolj visoke za določene namene uporabe, kot je na primer obnova zgodovinskih stavb [24].

»Ta stran je namenoma prazna.«



## 6 STANDARDNE PREISKAVE INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Pred pričetkom injektiranja smo morali izbrati ustrezno injekcijsko mešanico. V laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani smo najprej opravili preiskave različnih injekcijskih mešanic, ki so bile pripravljene na osnovi treh različnih apen. Ker so že obstoječe študije (Uranjek [27]) kazale dober potencial, smo želeli potrditi ustrezno mešanico, saj menimo, da je apnena injekcijska masa bolj primerna za zidane stavbe starejših objektov kulturne dediščine, kjer se je kot vezivo večinoma uporabljala apnena malta. Žal jih končni rezultati niso prikazali kot zadovoljivo rešitev, zato smo poizkusili še z apno-cementno mešanico z 80% masnim deležem cementa. Pripravili smo jih skladno z navodili proizvajalcev. Upoštevali smo predpisano vodovezivno razmerje in čas mešanja posamezne mešanice. Uporabili smo hidravlično apno, apneno testo ter že pripravljeno komercialno injekcijsko mešanico italijanskega proizvajalca. V komercialni apno-cementni mešanici je bilo uporabljeno hidratizirano apno.

V sklopu diplomske naloge smo naredili kar enajst preiskav vsake injekcijske mešanice, od tega so bili štiri testi opravljeni na sveži injekcijski mešanici. Preizkuse strjene injekcijske mešanice smo opravili na osemnajstih valjih in šestintridesetih prizmah pri starosti 28 dni.

### 6.1 Opisi standardnih preiskav sveže injekcijske mešanice

Na sveži injekcijski mešanici smo opravili 4 standardne teste. V skladu s standardom EN 1015-6 [28] smo ji določili prostorninsko maso. Poleg tega standarda smo uporabili še standard SIST EN 445:2008 [29], ki je sicer namenjen za injekcijske mase za prednapete kable. V skladu z njim smo določili pretočnost in izločanje vode. Meritve vodozadržnosti injekcijske mešanice so bile izvedene po standardu PSIST prEN 1015-8:2001 [30].

#### 6.1.1 Potreba po vodi

Običajno se pri vezivih, tudi pri injekcijskih mešanicah, uporablja izraz vodovezivno razmerje, ki pomeni razmerje med dodano vodo in vezivom. V injekcijskih mešanicah, poleg osnovnega veziva (v našem primeru apna), najdemo tudi veliko mineralnih dodatkov (v našem primeru tuf), zato je v tem primeru pravilnejši izraz vodovezivno razmerje. To pomeni količino dodane vode, ki jo mešanica potrebuje, da zadosti izbranim kriterijem.

Delež vode, ki jo dodamo mešanici, mora biti zadosti velik, da zagotovimo ustrezno pretočnost in injektibilnost mešanice. Vendar moramo pri tem paziti, da ni prevelik, saj se z večanjem vodovezivnega razmerja injekcijski mešanici poslabšajo mehanske lastnosti, poleg tega lahko mešanica postane nestabilna. Zato potrebo po vodi običajno kompenziramo s plastifikatorji in superplastifikatorji.

### 6.1.2 Prostorninska masa sveže mešanice

Omenjeno je, da smo prostorninsko maso določevali po standardu EN 1015-6 [28], kjer je za meritev predpisana kovinska cilindrična posoda z notranjim premerom  $d = 125$  mm in prostornino 1 l. Najprej smo stehali prazno posodo, nato še posodo, napolnjeno z injekcijsko mešanico ali s kakšnim drugim materialom, kateremu smo želeli določiti prostorninsko maso.

Prostorninsko maso sveže mešanice smo izračunali po enačbi:

$$\rho_m = \frac{(m_2 - m_1)}{V_v} \quad (1)$$

kjer je

$\rho_m$ ... prostorninska masa sveže mešanice [g/l]

$m_1$ ... masa prazne cilindrične posode [g]

$m_2$ ... masa cilindrične posode skupaj z mešanico [g]

$V_v$ ... prostornina cilindrične posode [l]

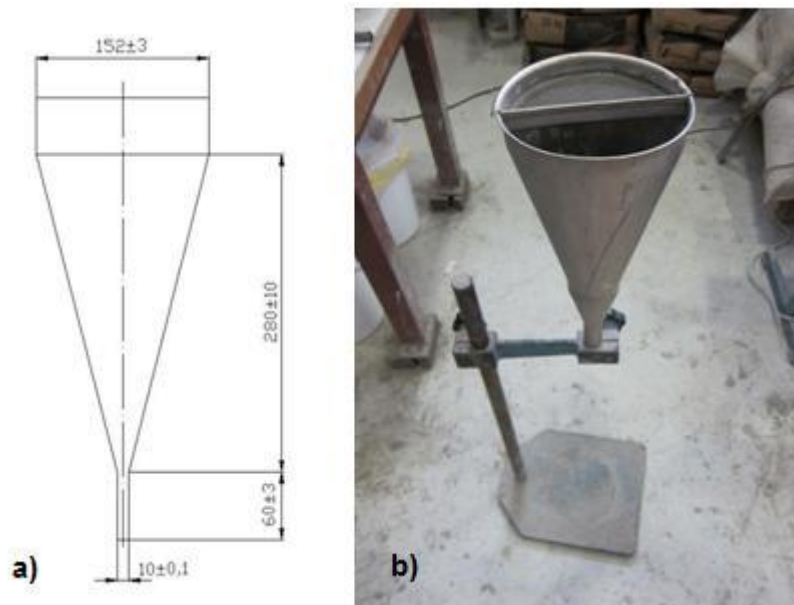


Slika 20: Določanje prostorninske mase

### 6.1.3 Pretočnost

Ustrezna pretočnost injekcijske mešanice ima velik pomen pri učinkovitem utrjevanju zidov s postopnim injektiranjem. Zagotavlja, da lahko votline in razpoke v zidu tudi pri morebitnih nižjih delovnih pritiskih kakovostno zapolnimo.

Standard SIST EN 445 zahteva za določitev pretočnosti injekcijske mešanice lijak standardnih dimenzij ter prostornino  $(1,7 \pm 0,17)$  l, kot prikazuje Slika 21.



Slika 21: Lijak za merjenje pretočnosti injekcijske mase: a) Dimenzije b) Dejanski izgled lijaka

Postopek meritve pretočnosti je zelo enostaven. Najprej je potrebno lijak ovlažiti ter zapreti njegovo spodnjo odprtino, nato skozi sito z velikostjo okenca 1,5 mm vlti pripravljeno injekcijsko mešanico, pod lijak postaviti merilni valj s prostornino 1 l. Istočasno, ko se odpre spodnja odprtina lijaka, se začne meriti čas, ki je potreben, da 1 l injekcijske mešanice steče skozi ustje lijaka.



Slika 22: Meritev pretočnosti injekcijske mešanice

Opraviti je potrebno dva testa pretočnosti, enega takoj po mešanju injekcijske mase, drugega 30 minut kasneje. V tem času je potrebno mešanico vsake toliko časa premešati.

Kriterij za ustrezen čas pretočnosti je, da je izmerjen čas, potreben, da skozi lijak steče 1 l injekcijske mešanice,  $t \leq 25$  s. Pri merjenjih ne sme biti razlike večje od 10 % (delta  $t \leq 10\%$ ) [31].

#### 6.1.4 Izločanje vode

Pri meritvah izločanja vode v skladu s standardom SIST EN 445 potrebujemo merilni valj prostornine 100 ml, s premerom 25 mm in višino 250 mm. V valj zlijemo med 95 in 100 ml injekcijske mešanice, valj postavimo na miren prostor in ga zaščitimo pred izhlapevanjem vode. Po preteku 3 ur s pomočjo merilne skale odčitamo količino vode, ki se je izločila iz injekcijske mešanice, in izračunamo izločanje vode po enačbi:

$$\frac{v_1}{v} * 100\% \quad (2)$$

kjer je

$v_1$ ...količina vode nad injekcijsko mešanico po preteku 3 ur [ml]

$v$ ...količina injekcijske mešanice [ml]

Kot kriterij za ustrezno izločanje vode upoštevamo vrednost  $\leq 2\%$ .

Izločanje vode nam torej pokaže količino vode, ki se je izločila iz injekcijske mešanice. Preveliko izločanje vode vodi do segregacije delcev veziva in morebitnih dodanih polnil v injekcijski mešanici. Rezultat tega bi bil, da zgornji del zidu s takšno mešanico ne bi bil ustrezno konsolidiran [31].

#### 6.1.5 Vodozadržnost

Preizkus vodozadržnosti je zelo pomemben, kajti povečana izguba vode, ki je stimulirana s kapilarnim srkom porozne podlage (poroznih kamnov, drobirja ali malte), vodi do poslabšanja mehanskih lastnosti injekcijske mešanice. Posledica tega je nezadostna sprijemnost s posameznimi gradniki zidu, ki ga utrjujemo [31].

Za meritve vodozadržnosti potrebujemo kalup standardnih dimenzij, filtrski papir, gazo in utež. Najprej stehamo prazen kalup ( $m_1$ ) in filtrski papir v suhem stanju ( $m_2$ ). Kalup napolnimo z injekcijsko mešanico, ga ponovno stehamo ( $m_3$ ), prekrijemo s filtrskim papirjem in gazo, obrnemo ter obtežimo z utežjo in pustimo stati 5 min  $\pm$  10 s. Po preteku 5 min kalup ponovno obrnemo in stehamo moker filtrski papir ( $m_4$ ). V primeru, ko je razlika mokrega in suhega filtrskega papirja večja od 10 g, je potrebno preiskavo ponoviti z večjim številom filtrov. Vodozadržnost injekcijske mešanice določimo s pomočjo naslednjih enačb:

$$\text{vodozadržnost:} \quad WRV = 100 - W_4\% \quad (3)$$

kjer je:

$$W_4 \dots \text{relativna izguba vode:} \quad W_4 = W_3 / W_2 * 100\% \quad (4)$$

$$W_3 \dots \text{masa absorbirane vode:} \quad W_3 = m_4 - m_2 \quad (5)$$

$$W_2 \dots \text{vsebnost vode v mešanici:} \quad W_2 = m_5 * W_1 \quad (6)$$

masa mešanice: 
$$m_5 = m_3 - m_1 \quad (7)$$

kjer je:

$m_1$ ...masa praznega kalupa [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 23: Test vodozadržnosti

## 6.2 Opisi standardnih preiskav strjene injekcijske mešanice

Preiskave strjene injekcijske mešanice so potekale po 28 dneh sušenja po vlitju sveže injekcijske mešanice v prej pripravljene valje in kalupe za prizme. Na valjih s premerom 15 cm in višino 30 cm smo izvajali preiskave tlačne trdnosti ter cepilne natezne trdnosti, medtem, ko smo na prizmah velikosti 4 cm x 4 cm x 16 cm<sup>3</sup> določili upogibno natezno in tlačno trdnost.

### Predpriprave preiskav strjene injekcijske mešanice

Pred prej omenjenimi preiskavami je bilo potrebno pripraviti valje, kalupe za prizme ter material, s katerim smo zapolnili valje. Valje smo s silikonom pritrdili na podlago, obe polovici valja s kovinskimi objemkami bolj trdno povezali, da jih ne bi pri injektiranju, ki poteka pod določenim pritiskom, ločilo narazen.



Slika 24: Pripravljanje valjev za preiskave

Pri večslojnih kamnitih zidovih je srednji sloj zidu navadno zapolnjen z drobirjem, ki ostane pri oblikovanju kamnov za gradnjo zunanjih slojev zidu. Poleg tega je v zidu veliko praznin, ki se jih nato zapolni s postopnim injektiranjem. Kljub temu, da naši zidovi niso imeli veliko votlin, smo z valjastimi preizkušanci želeli simulirati jedro običajnega zidu, ki ima več votlin. Potrebovali smo kamne različnih frakcij. Uporabili smo zidake dveh že prej preiskanih zidov, ki sta se med preiskavo porušila. Kamni so bili enako kot preskušani zidovi torej iz dolomita. Za lažje drobljenje smo za začetek uporabili hidravlično prešo, s katero smo pri nekaterih kosih kamenja uporabili kar 500 ton, da smo ga porušili.



Slika 25: Uporabljeni zidaki

Nadaljnje drobljenje je potekalo z macolo, kasneje še s kladivom.



Slika 26: Drobljenje kamenja

Vzporedno z drobljenjem kamnov smo izvajali še sejnalno analizo. Uporabili smo sita velikosti od 64 mm do 8 mm. Po zgledu doktorske disertacije Mojmirja Uranjeka [27], ki je preiskave valjev že izvajal, smo določili deleže posameznih frakcij. Največ, kar 37% celotne mase, smo pripravili kamenja največje frakcije 45/63 mm ter prav tako 37% mase frakcije 32/45 mm. Mase frakcije 16/32 mm smo potrebovali 25% ter 1% še mase frakcije 8/16 mm.



Slika 27: Sejnalna analiza

V valje smo naložili 7 kg kamenja. Določili smo, koliko kg je potrebnih za vsako frakcijo posebej in dobili:

$$masa_{45/63 \text{ mm}} = 0,37 * 7,0 \text{ kg} = \mathbf{2,59 \text{ kg}} \quad (8)$$

$$masa_{32/45 \text{ mm}} = 0,37 * 7,0 \text{ kg} = \mathbf{2,59 \text{ kg}} \quad (9)$$

$$masa_{16/32 \text{ mm}} = 0,25 * 7,0 \text{ kg} = \mathbf{1,75 \text{ kg}} \quad (10)$$

$$masa_{8/16 \text{ mm}} = 0,01 * 7,0 \text{ kg} = \mathbf{0,07 \text{ kg}} \quad (11)$$



Slika 28: Napolnjeni valji

Za preiskave smo pripravili še kalupe s prizmami, ki smo jih, zaradi lažjega odstranjevanja prizem iz kalupov namazali z oljem.

### 6.2.1 Prostorninska masa strjene mešanice

Strjenim prizmam smo, po preteku 22 dni od vlitja sveže injekcijske mešanice v kalupe, odstranili kalupe, določili maso in jim s pomočjo kljunastega merila izmerili dolžino, širino ter višino. Na podlagi teh rezultatov smo strjenim prizmam v skladu s standardom SIST EN 1015-10:2001/A1:2007 [32] določili prostorninsko maso, ki je dana z enačbo:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (12)$$

kjer je:

$\rho$ ... prostorninska masa prizme [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

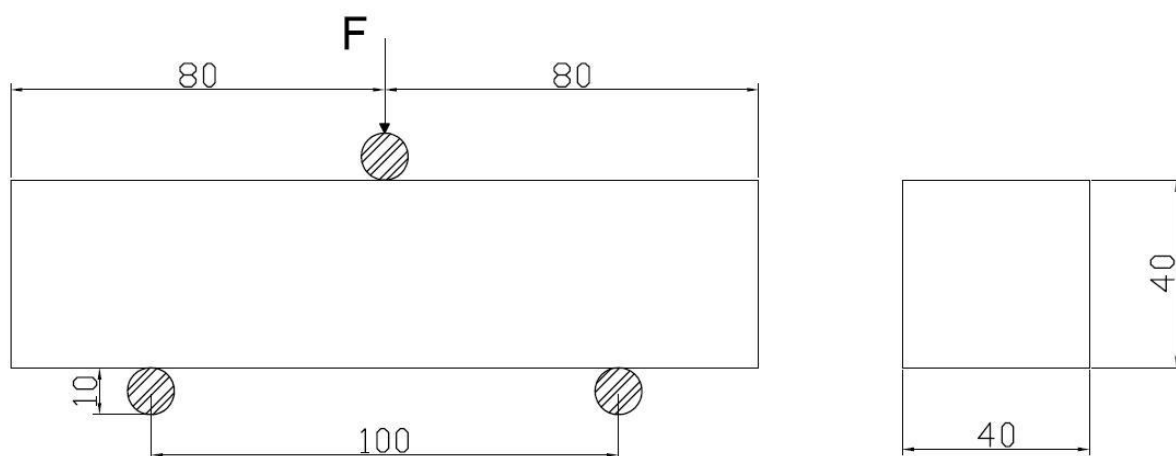
$m$ ...masa prizme [kg]

$V$ ...volumen prizme [ $\text{m}^3$ ]

### 6.2.2 Upogibna natezna trdnost prizem

Upogibno natezno trdnost smo določali na prizmah velikosti  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  v skladu s standardom EN 1015-11 [33]. Upogibno natezno trdnost smo določali s tritočkovnim preizkusom, katerega shema je prikazana na Sliki 29.





Slika 29: Shema tritočkovnega preizkusa za določitev upogibne natezne trdnosti

Pri preizkusu smo izmerili maksimalno upogibno silo  $F$ , pri kateri je prišlo do porušitve preizkušanca. Upogibno natezno trdnost smo določili z enačbo:

$$f_t = \frac{3Fl}{2d_1d_2^2} \quad (13)$$

kjer je:

$f_t$ ...upogibna natezna trdnost preizkušanca [ $\text{kN}/\text{cm}^2$ ]

$F$ ...maksimalna upogibna sila [kN]

$l$ ...razdalja med podporama [cm]

$d_1$ ...širina preizkušanca [cm]

$d_2$ ...višina preizkušanca [cm]

### 6.2.3 Tlačna trdnost prizem

Tlačno trdnost injekcijske mešanice smo določali na polovičkah prizem, ki so ostale od preizkusa upogibne natezne trdnosti, skladno s standardom EN 1015-11. Z enoosnim tlačnim preizkusom, katerega shema je prikazana na Sliki 30, smo dobili maksimalno tlačno silo, s katero smo po enačbi  $f_c = \frac{F}{a^2}$  (14) določili tlačno trdnost:

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

kjer je

$f_c$ ...tlačna trdnost preizkušanca [ $\text{kN}/\text{cm}^2$ ]

$F$ ...maksimalna tlačna sila [kN]

$a$ ...širina preizkušanca [cm]



Slika 30: Preizkus tlačne trdnosti

#### 6.2.4 Cepilna natezna trdnost valjev

Cepilno natezno trdnost smo določali na valjih premera 15 cm ter višine 30 cm skladno s standardom SIST EN 12390-6:2001 [34]. S preiskavo smo dobili največjo cepilno silo, cepilno natezno trdnost smo določili z izrazom:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi l d} \quad (15)$$

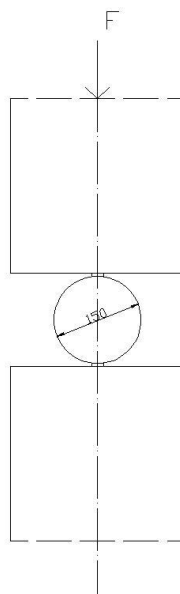
kjer je

$f_{ct}$ ...cepilna natezna trdnost preizkušanca [kN/cm<sup>2</sup>]

$F$ ...maksimalna cepilna sila [kN]

$l$ ...dolžina preizkušanca [cm]

$d$ ...premer preizkušanca [cm]



Slika 31: Sistem preizkusa cepilne natezne trdnosti

### 6.2.5 Tlačna trdnost valjev

Na valjih smo poleg največjih cepilnih nateznih napetosti testirali tudi odpornost na tlačne obremenitve. S preiskavo smo dobili maksimalno tlačno silo, ki jo valj prenese, na podlagi te sile se lahko določi tlačna trdnost valja, ki je enaka:

$$f_c = \frac{F}{\pi r^2} \quad (16)$$

kjer je

$f_c$ ...tlačna trdnost preizkušanca [kN/cm<sup>2</sup>]

$F$ ...maksimalna sila preizkušanca [kN]

$r$ ...polmer preizkušanca [cm]

### 6.2.6 Statični modul elastičnosti

Statični modul elastičnosti smo določili v skladu z jugoslovanskim standardom JUS U.M1.025 [35]. Po standardu se vzorce najprej obremenjuje in razbremenjuje, da se jih stabilizira, potem pa se določi sovisnost med tlačno napetostjo in pripadajočo vzdolžno deformacijo. Vzorci so valji premera 150 mm in višine 300 mm. Možni so tudi drugi tipi vzorcev, ki so v skladu z določbami standarda JUS U.M1.004 [36], pod pogojem, da je razmerje med dolžino  $L$  in  $d$  znotraj mej  $2 \leq L/d \leq 4$  in da je dimenzija  $d$  enaka najmanj štirikratni vrednosti maksimalnega zrna agregata za beton.

Statični modul elastičnosti  $E_c$  je definiran z enačbo:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (17)$$

kjer je:

$\Delta\sigma$ ...razlika napetosti  $\sigma_a$  (od 1/3 tlačne trdnosti betona) in začetne napetosti  $\sigma_b$  (od 0,5 MPa)

$$\Delta\sigma = \sigma_a - \sigma_b \quad (18)$$

$\sigma_a$  ...napetost pri obremenitvi  $\frac{f_c}{3}$ , v MPa

$\sigma_b$  ...začetna napetost ( $\sigma_b = 0,5$  MPa)

$\Delta\varepsilon$ ...razlika srednjih vrednosti deformacij, ki ustrezajo napetostim  $\sigma_a$  in  $\sigma_b$ , ter se določijo na osnovi diagrama  $\sigma - \varepsilon$  za primer razbremenitve

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\text{srednja vrednost razlike odčitavanja v zadnjem ciklusu}}{\text{dolžina vzorca}} \quad (19)$$

Instrumenti za merjenje deformacij morajo omogočati merjenje na dolžini najmanj  $2/3$  dimenzije  $d$  vzorca in morajo biti postavljeni tako, da so merilne točke na enakih razdaljah od koncev vzorca, hkrati pa mora biti oddaljenost od konca vzorca enaka najmanj  $1/4$  dolžine vzorca. Meritve je potrebno izvesti na vsaj dveh merilnih linijah, ki sta postavljeni na nasprotnih straneh vzorca.



Slika 32: Valj opremljen z merilnimi lističi

Vzorec se skupaj z merilnimi lističi postavi na sredino naprave za preizkušanje. Vzorec se obremeni z  $\sigma_b = 0,5$  MPa in odčita stanje v vsaki merilni liniji. Nato se napetost povečuje postopno s hitrostjo od  $0,6 \pm 0,4$  MPa na sekundo, dokler se ne doseže napetosti, ki je enaka tretjini tlačne trdnosti vzorca ( $\sigma_a = f_c/3$ ). Za določitev statičnega elastičnega modula je potrebno opraviti 3 cikle. En cikel predstavlja obremenjevanje do  $f_c/3$  in razbremenjevanje do 0,5 MPa. Za izračun statičnega modula elastičnosti  $E_c$  se vzame srednja vrednost, odčitana na merilnih linijah, pridobljena v zadnjem ciklusu razbremenjevanja.

### 6.2.7 Dinamični modul elastičnosti

Dinamični modul elastičnosti smo določevali z instrumentom imenovanim GrindoSonic na prizmah velikosti  $4 \times 4 \times 16$  cm<sup>3</sup>. Osnova metode z GrindoSonicom je vzbujanje valovanja v vzorcu z impulzom in omogoča določanje elastičnih lastnosti materialov. Metoda je enostavna in hitra. Ne povzroča porušitve materiala, zato nam omogoča veliko število meritev, s katerimi lahko spremljamo tudi karakteristike materiala skozi njegovo življenjsko dobo. Metoda je namenjena materialom, ki so elastični, homogeni in izotropni, so hranjeni na sobni temperaturi in so v obliki prizem pravokotnega prereza. Prav tako je namenjena kompozitnim, nehomogenim in neizotropnim materialom z natančnim upoštevanjem učinkov nehomogenosti.

Za sam preizkus so potrebne naslednje naprave:

- Naprava za natančno detekcijo, analizo in merjenje osnovne resonančne frekvence ali periode oddanega prostega valovanja.
- Impulser oz. kladivce, ki je orodje, s katerim z lahkim udarcem na točno določenem mestu na vzorcu ustvarimo impulz. Pri vzorcih običajne velikosti se uporablja 10 cm dolga plastična paličica, ki ima na koncu jekleno kroglico premera 5 mm, s katero ustvarimo udarec.
- Detektor signala, z njim izmerimo ostalo prosto valovanje v vzorcu.
- Elektronski sistem, ki je sestavljen iz ojačevalnika signala, analizatorja ojačenega signala in sistema, ki določi frekvenco in prikaže rezultat.
- Podpore, ki omogočajo izolacijo zunanjih vibracij na vzorec.



Slika 33: Meritev dinamičnega modula elastičnosti

Pred pričetkom meritev je potrebno vzorcu določiti različne točke. Označimo mesto, kjer med preizkusom vzorec nalega na podpore, mesto, kjer se s senzorjem dotikamo vzorca, in mesto, kjer udarjamo s paličico. Razdalja med koncem vzorca in podporo je določena z  $0,224 \cdot L$ , kjer je  $L$  dolžina vzorca. Ko so označena vsa mesta, se z detektorjem valovanja dotaknemo vzorca in ga usmerimo v smeri delovanja, nato lahko prične s kladivcem lahkotno udarjati. Za vsak vzorec smo naredili med 15 in 20 meritev in nato določili povprečne frekvenc [37].

Za določitev dinamičnega Youngovega modula potrebujemo maso in dimenzije vzorca, povprečno frekvenco v Hz ter korekcijski faktor  $T_1$ , ki je določen:

$$T_1 = 1 + 6,585 (1 + 0,0752\mu + 0,8109 \mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[ \frac{8,34 (1 + 0,2023\mu + 2,173 \mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4}{1 + 6,338 (1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (20)$$

kjer je

$T_1$ ...korekcijski faktor za osnovno upogibno frekvenco, ki upošteva geometrijo vzorca, Poissonovo število (za apnene injekcijske mešanice smo vzeli Poissonovo število [38], za apneno-cementno injekcijsko mešanico pa vrednost 0,34 [38])

$t$ ...debelina oz. višina vzorca [mm]

$L$ ...dolžina vzorca [mm]

$\mu$ ...Poissonovo število, ki je določeno z:

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (21)$$

Enačba za dinamični Youngov modul  $E_d$  se tako glasi:

$$E_d = 0,9465 \frac{m f_f^2 L^3}{b t^3} T_1 \quad (22)$$

kjer je

$m$ ...masa vzorca [g]

$f_f$ ...osnovna resonančna frekvenca vzorca za upogib [Hz]

$b$ ...širina vzorca [mm]

$t$ ...debelina oz. višina vzorca [mm]

$L$ ...dolžina vzorca [mm]

## 7 PREDHODNE PREISKAVE SVEŽIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Cilj predhodnih preiskav svežih injekcijskih mešanic je bil dobiti čim bolj optimalno injekcijsko mešanico, primerno za injektiranje. Kriterij za določitev lastnosti injekcijskih mešanic so bili standardi in njihove predpisane vrednosti za različne teste. Kriterija, ki smo jih najbolj upoštevali, sta bila pretočnost in izločanje vode, preizkušali smo tudi vodozadržnost in prostorninsko maso. Poleg tega je bil cilj dobiti tudi čim več prakse s samimi testi injekcijskih mešanic, saj je bilo na dan injektiranja veliko dela in so nam izkušnje iz predhodnih preiskav zelo koristile.

Predhodno smo testirali tri vrste injekcijskih mešanic na osnovi apna, v diplomu so označene z oznakami A, B in C.

### 7.1 Laboratorijske preiskave injekcijske mešanice A

Prvo mešanico smo pripravili iz naravnega hidravličnega apna. Za pripravo te mešanice smo potrebovali le pripravljeno suho mešanico, vodo ter po potrebi superplastifikator.

Plastifikatorji (P) in superplastifikatorji (SP) so v splošnem najbolj pomembna skupina kemijskih dodatkov za beton. Prav tako se jih uporablja za malte in injekcijske mešanice. Z njimi spremenimo lastnosti sveže oz. strjene mešanice; pripravimo lahko takšno mešanico, ki ima v svežem in/ali strjenem stanju želene lastnosti, ki jih sicer ne bi mogli doseči. So površinsko aktivne snovi, ki delujejo na principu elektrostatične stabilizacije (odboj), v določenih primerih pa tudi na principu prostorske stabilizacije. Vsi imajo enak učinek, omogočajo zmanjševanje vodovezivnega razmerja t.j. zmanjšujejo količine zamesne vode, potrebne za pripravo mešanice določene obdelavnosti. Posledica zmanjšane vodovezivnega razmerja je povečanje trdnosti in trajnosti mešanice. Zaradi nižje vsebnosti vode so mešanice manj porozne, manjše je krčenje in posledično manjša možnost nastanka razpok. Kot povedo že sama imena, ima plastifikator najmanjši vpliv, sledi superplastifikator in nato še superplastifikator nove generacije, ki ga pogosto poimenujejo hiperplastifikator [39].

**Plastifikatorji** omogočajo določeno stopnjo znižanja količine vode in izboljšajo obdelavnost mešanic.

**Superplastifikatorji** omogočajo visoko znižanje količine vode, ne da bi poslabšali zahtevano pretočnost. Vplivajo na disperzijo trdnih delcev, kar pozitivno vpliva na pretočnost hidravličnih injekcijskih mešanic [31].

**Hiperplastifikatorji** so superplastifikatorji nove generacije (v nadaljevanju označeni kot hiperplastifikatorji), ki imajo nekoliko drugačne lastnosti kot superplastifikatorji, le da je njihov vpliv še večji.

V prvi fazi smo za našo mešanico uporabili hiperplastifikator A na osnovi polikarboksilatov, ki smo ga dodali glede na maso veziva, v našem primeru apna.



Slika 34: Postopek priprave injekcijske mešanice A

Pri iskanju ustrezne mešanice smo variirali vodoapneno volumsko razmerje in delež hiperplastifikatorja. Izkazalo se je, da enak volumski delež vode in veziva ne da ustrezne mešanice. Bila je zelo tekoča, kar se je izkazalo tudi pri testu pretočnosti, kjer smo dobili čas samo dobrih 7 sekund. V kolikor izmerjena pretočnost takoj po mešanju ni bila ustrezna, je po 30 minutah nismo ponovno izmerili.

Preglednica 2: Rezultati pretočnosti v odvisnosti od vodovezivnega volumskega razmerja in hiperplastifikatorja A

Preizkus (meritve 11.1.2013)	v/v volumsko razmerje	hiperplastifikator A [%]	pretočnost [s]	
			takoj	po 30 min
1.	1,00	/	7,42	/
2.	0,50	0,5	31,52	/
3.	0,50	1,0	28,80	/
4.	0,55	1,0	30,00	/
5.	0,60	1,0	17,60	19,76

Kot je razvidno iz Preglednice 2, smo pri 4. preizkusu dobili nenavadne rezultate. V primerjavi s 3. preizkusom smo dobili daljši čas pretočnosti kljub temu, da smo povečali količino vode. Rezultat je lahko posledica različno dolgega mešanja obeh injekcijskih mešanic in hiperplastifikatorja oz. preveč intenzivnega delovanja hiperplastifikatorja. Hiperplastifikator deluje namreč na vse fine delce v mešanici in ne le na vezivo.

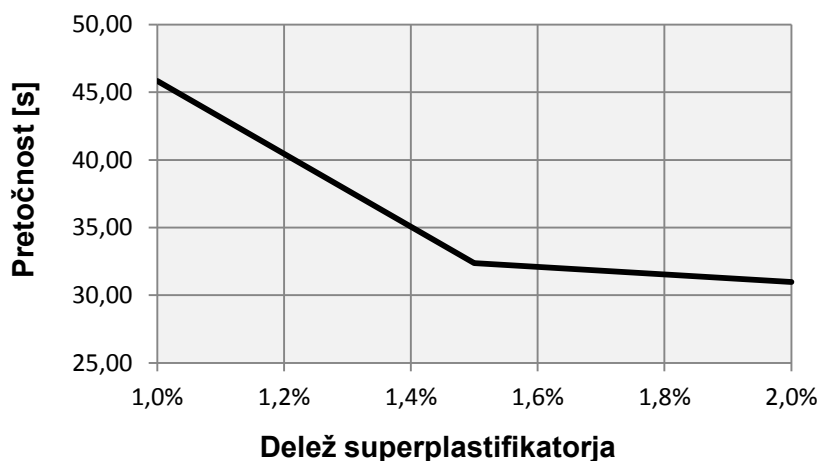
Zaradi negativnih učinkov hiperplastifikatorja smo se odločili, da bomo preizkuse ponovili z drugim, in sicer superplastifikatorjem, ki smo ga dobili v eni izmed betonarn.



Preglednica 3: Rezultati pretočnosti v odvisnosti od vodovezivnega volumskega razmerja in superplastifikatorja

Preizkus (meritve 15.1.2013)	v/v volumsko razmerje	superplastifikator [%]	pretočnost [s]	
			takoj	po 30 min
1.	0,60	1,0	45,84	/
2.	0,60	1,5	32,38	/
3.	0,60	2,0	30,97	/

Iz Preglednice 3 je razvidno, da superplastifikator ni dal zelenih pretočnosti. Pri 2,0% superplastifikatorja smo dosegli čas pretočnosti le 30 s. Več kot 2,0 % superplastifikatorja pa nismo želeli dodati. Poleg tega je opaziti, da je pri 2. in 3. preizkusu razlika v pretočnosti minimalna, kar pomeni, da je superplastifikator nehal učinkovati oz. je bilo najverjetneje doseženo zasičenje. Njegovo stagniranje je vidno tudi na Grafikonu 3.



Grafikon 3: Pretočnost v odvisnosti od % superplastifikatorja

Preizkusili smo še tretji plastifikator. Ponovno smo uporabili hiperplastifikator, tokrat druge vrste (B). Za tovrstni hiperplastifikator smo se odločili zato, ker ima lastnosti najbližje superplastifikatorju na bazi naftalen-sulfonatov. Rezultati so prikazani v Preglednici 4.

Preglednica 4: Rezultati pretočnosti v odvisnosti od vodovezivnega volumskega razmerja in hiperplastifikatorja B

Preizkus (meritve 15.1.2013)	v/v volumsko razmerje	hiperplastifikator B [%]	pretočnost [s]	
			takoj	po 30 min
1.	<b>0,60</b>	<b>1,0</b>	<b>22,07</b>	<b>22,76</b>
2.	0,60	1,5	19,00	21,90
3.	0,55	1,5	46,90	/

Že pri prvem preizkusu smo pri 1% hiperplastifikatorja dobili ustrezno pretočnost. Zanimalo nas je, če bo pretočnost še vedno ustrezna, v primeru, da dodamo injekcijski mešanici 0,5% več hiperplastifikatorja. Po pričakovanih se je čas pretočnosti zmanjšal, a ne za toliko, da bi bil premajhen. Smiselno je bilo preveriti še, ali lahko zmanjšamo količino vode. Dobljeni rezultati so nas prepričali, da to ni smiselno narediti, saj se je čas pretočnosti zelo povečal.

Po treh preizkušanih plastifikatorjih smo le dobili ustrezno injekcijsko mešanico, ki smo jo uporabili pri injektiranju valjev. Odločili smo se za varianto z vodovezivnim razmerjem 0,6 ter uporabo zadnje preizkušenega hiperplastifikatorja B z deležem 1% glede na maso veziva. Tej mešanici smo določili še prostorninsko maso, ki je znašala 1450 g/l.

## 7.2 Laboratorijske preiskave injekcijske mešanice B

Kot drugo mešanico smo uporabili že pripravljeno mešanico italijanskega proizvajalca, katere sestava je neznana. Po podatkih proizvajalca gre za hidravlično vezivo na bazi apna, ki vsebuje že vsa polnila, vendar brez vsebnosti cementa. Dodati je potrebno le predpisano količino vode. Glede na to, da je mešanica namenjena prav za utrditev po postopku injektiranja oslabilih votlih opečnih in kamnitih zidov zgodovinskih objektov, tudi temeljev, stebrov in obokov, nas je presenetil rezultat testa pretočnosti. Konsistenca mešanice je bila videti ustrezna, rezultati pretočnosti pa tega niso pokazali. Rezultati so prikazani v Preglednici 5.

Preglednica 5: Rezultati pretočnosti mešanice B

v/v razmerje (meritve 15.1.2013)	pretočnost [s]	
	takoj	po 30 min
0,35	119,03	98,88



Slika 35: Test pretočnosti injekcijske mešanice B

Glede na to, da je v navodilih za pripravo te mešanice podano masno vodovezivno razmerje 0,35, smo razmerje pustili tako kot je, kljub temu, da pretočnost ni ustrezala standardu SIST EN 445.

### 7.3 Laboratorijske preiskave injekcijske mešanice C

Tretjo injekcijsko mešanico smo pripravili sami. Sestava injekcijske mešanice je temeljila na rezultatih preiskav prikazanih v doktorski nalogi M. Uranjeka [27], ki je prav tako preizkušal injekcijske mešanice. Injekcijsko mešanico smo pripravili iz apnenega testa in tufa, ki veljata za "tradicionalna" materiala, kot polnilo smo dodali apnenčevo moko, po potrebi smo dodali še vodo ter hiperplastifikator B. V naših preiskavah smo pri vseh izračunih sestav mešanic z apnenim testom upoštevali 50% masni delež vode in 50% masni delež apna v apnenem testu.

**Apnenčeva moka** je praškast material, ki jo dobimo z odpraševanjem drobljenega apnenčevega agregata. Zaradi svoje porazdelitve velikosti zrn injekcijski mešanici izboljša fizikalne lastnosti, kot sta sposobnost zadrževanja vode in obdelovalnost. Sodi med polnila, ki so naravni ali umetni anorganski mineralni dodatki [27].

**Tuf** spada v družino naravnih pucolanov in nastane iz vulkanskega pepela, ki se usede na zemeljsko površje [40]. Je torej sedimentni sprimek materialov, izbruhanih iz vulkanov. Apnenim mešanicom se ga doda zaradi hitrejšega vezanja in doseganja trdnosti. V splošnem fino mleti pucolani (tufi, vulkanski pepel) poleg veziv in polnil (apnenčeva in kremenčeva moka) zmanjšujejo pretočnost, saj potrebujejo za popolno obvitje zelo finih delcev večjo količino vode. Zato je za ustrezno pretočnost potrebna uporaba superplastifikatorjev.

Uranjek je v doktorskem delu analiziral lastnosti štirih "tradicionalnih" injekcijskih mešanic. Pri tem je variiral količine sestavin, kot je prikazano v Preglednici 6.

Preglednica 6: Sestava injekcijskih mešanic [27] v masnih deležih (%)

Injekcijska mešanica	vezivo	polnilo	mineralni dodatek	SP	v/v razmerje
	apneno testo	apnenčeva moka	tuf	[%]	
IM5	80	0	20	1	0,95
IM6	60	0	40	1	0,71
IM7	60	20	20	1	0,97
IM8	40	20	40	1	0,68

Pri optimiranju vodovezivnega razmerja in količini dodanega superplastifikatorja je upošteval dva kriterija: čim boljšo pretočnost (ciljna vrednost čas okoli 20 s) in zmerno segregacijo (izločanje vode  $\leq 2,0$  %). Ugotovil je, da se z višanjem deleža superplastifikatorja izboljša

pretočnost, vendar lahko postane mešanica ob predoziranju superplastifikatorja nestabilna, pride do razmešanja in segregacije težjih delcev. Delež superplastifikatorja je postopoma povečeval in ugotovil, da je na trdnosti najbolj pridobila v primerjavi z ostalimi mešanicami mešanica z 1,0 % dodanega superplastifikatorja. V Preglednici 7 in Preglednici 8 so prikazani rezultati Uranjekovih testov svežih in strjenih injekcijskih mešanic.

Preglednica 7: Rezultati testov svežih injekcijskih mešanic

Injekcijska mešanica	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode [%]
		takoj	po 30 min	
1	1435	12,6	13,9	1,3
2	1516	17,6	18,1	0,8
3	1488	13,1	13,3	1,0
4	<b>1616</b>	<b>11,8</b>	<b>12,0</b>	<b>1,6</b>

Preglednica 8: Rezultati testov injekcijskih mešanic v strjenem stanju pri starosti 28 dni

Injekcijska mešanica	Upogibna trdnost [Mpa]	stdev	cov [%]	Tlačna trdnost [Mpa]	stdev	cov [%]
1	0,9	0,19	20,1	2,5	0,18	7,2
2	0,9	0,55	87,0	2,8	0,07	2,4
3	0,8	0,41	48,4	2,8	0,23	8,2
4	<b>1,1</b>	<b>0,12</b>	<b>10,9</b>	<b>2,9</b>	<b>0,10</b>	<b>3,5</b>

Iz prikazanih rezultatov vidimo, da je injekcijska mešanica 4 (v tabelah krepko označena) dosegla najboljše rezultate glede pretočnosti, upogibne ter tlačne trdnosti. Pri izločanju vode se sicer ni izkazala za najboljšo, vendar je še vedno znotraj kriterija 2 %.

Pripravili smo mešanico z enakim deležem apnenega testa, apnenčeve moke in tufa. Tik preden smo dodali vodo, smo mešanici dodali tuf. Onemogočil je nadaljnje mešanje sestavin, saj je nase vezal veliko količino vode iz apnenega testa. Potrebno je bilo dodati še veliko količino vode. Količino hiperplastifikatorja smo določili glede na maso veziva, torej tufa in apna, ter polnila - apnenčeve moke, ne glede na to, da se količino plastifikatorja vedno računa na maso veziva. Razlog je v tem, da smo uporabili hiperplastifikator, ki deluje na vse delce v mešanici, torej v tem primeru tudi na apnenčevo moko. Količine sestavin injekcijske mešanice in rezultati pretočnosti so prikazani v Preglednici 9, postopek priprave mešanice pa na Sliki 36. V našem primeru smo vodovezivno razmerje računali kor razmerje mase vode (vode v apnenem testu in dodane) proti masi apna in tufa. Tuf smo smatrali kot vezivo.

Preglednica 9: Količine sestavin injekcijske mešanice in rezultati pretočnosti (meritve 16.1.2013)

apneno testo [g] (apno+voda, 1:1)		1000
apnenčeva moka [g]		1000
tuf [g]		1000
v/v razmerje		1,33
dodana voda [g]		1500
hiperplastifikator [%]		1,2
pretočnost [s]	takoj	10,84
	po 30 min	/

Rezultati pretočnosti so bili dokaj pričakovani, vodovezivno razmerje je bilo veliko in zato tudi čas pretočnosti kratek.



Slika 36: Priprava mešanice: a) Apneno testo b) Apneno testo z dodano vodo c) Mešanica z dodano apnenčevo moko in tufom d) Z dodanim hiperplastifikatorjem

Nato smo se odločili, da bomo sestavili mešanico z enakim deležem apna, apnenčeve moke ter tufa. Količine sestavin injekcijske mešanice in rezultati pretočnosti so prikazani v Preglednici 10.

Preglednica 10: Rezultati pretočnosti za injekcijsko mešanico C (meritve 17.1.2013)

preizkus		1.	2.
apneno testo [g] (apno+voda, 1:1)		1200	1200
apnenčeva moka [g]		600	600
tuf [g]		600	600
v/v razmerje		1,00	1,00
dodana voda [g]		600	600
hiperplastifikator [%]		1,33	1,00
pretočnost [s]	takoj	17	/
	po 30 min	17,22	/

Pri prvem preizkusu smo dodali mešanici 2% hiperplastifikatorja glede na maso apna ter tufa, oz. kot je zapisano v Preglednici 10, 1,33% glede na maso apna, tufa ter apnenčeve moke. S temi količinami smo dobili ustrezno pretočnost, vendar nas je zanimalo, ali bo ustrezna tudi z samo z 1% hiperplastifikatorja. Hitro se je izkazalo, da pretočnosti sploh ne moremo določiti, saj je vsa masa kar obstala na situ. Malce pomoči je potrebovala tudi mešanica pri prvem preizkusu, a ne zato, ker bi bila pregosta, temveč zaradi manjših delčkov, ki so v apnenem testu in so se nabirali na situ z okencem 15 mm.

Pri prvem in pri drugem preizkusu smo injekcijskima mešanicama določili še izločanje vode. Pri prvi mešanici je bila izločena večja količina vode, kar razvidno iz rezultatov, ki so prikazani v Preglednici 11.

Preglednica 11: Rezultati izločanja vode za injekcijsko mešanico C

Preizkus (meritve 16.1.in 17.1.2013)	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	Izločanje vode [%]
1.	100	2	2,00
2.	98,5	0	0,00

Očitna razlika v izločanju vode obeh injekcijskih mešanic je vidna tudi na Sliki 37.



Slika 37: Primerjava izločanja vode pri dveh različnih mešanicah

#### **7.4 Povzetek**

Predhodne preiskave injekcijskih mešanic so bile nujno potrebne. Tako smo za vsako od injekcijskih mešanic poiskali takšno vodovozivno razmerje in dodali toliko superplastifikatorja, da smo dobili ustrezno pretočnost in izločanje vode. Izbrane mešanice smo uporabili za injektiranje pripravljenih valjev in kalupov za prizme.

»Ta stran je namenoma prazna.«



## 8 REZULTATI PREISKAV IZBRANIH INJEKCIJSKIH MEŠANIC

Na dan injektiranja pripravljenih valjev in vgrajevanja v kalupe za prizme so poleg injektiranja potekali tudi testi pretočnosti, izločanja vode, vodozadržnosti ter določevanje prostorninske mase. Naša naloga je bila, da smo zamešali injekcijske mešanice po recepturi, ki je dala pri predhodnih preiskavah najboljše rezultate. V mešalcu smo naenkrat zamešali dobrih 8 l injekcijske mešanice. Po zamešanju so izvajalci pričeli z injektiranjem valjev. Izkazalo se je, da smo z 8 l mešanice zapolnili le dobra 2 valja, kar pomeni, da smo natočili v vsak valj skoraj 4 l injekcijske mešanice.



Slika 38: Injektiranje valjev

Delež injekcijske mešanice v valju smo nato tudi izračunali. Določili smo mase napolnjenih valjev s kamni (še brez injekcijske mešanice) skupaj s podlogo, nato maso strjenih valjev skupaj s podlogo in iz razlike med masami dobili maso injekcijske mešanice v valju. Glede na to, da smo poznali prostorninske mase injekcijskih mešanic, smo določili, kakšen volumen zaseda injekcijska mešanica v valju in določili njen delež. Rezultati za vsako injekcijsko mešanico so prikazani v Preglednici 12.

Preglednica 12: Rezultati deležev injekcijskih mešanic v valjih

Injekcijska mešanica	Masa IM [kg]	Prostorninska masa IM [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen IM [l]	Volumen valja [l]	Delež IM [%]
A	3,30	1450	2,3	5,3	<b>43,0</b>
B	4,96	1870	2,7	5,3	<b>50,1</b>
C	3,61	1556	2,3	5,3	<b>43,8</b>
D	4,31	1626	2,6	5,3	<b>50,0</b>

Tudi iz izračuna je vidno, da je delež injekcijske mešanice v valjih znašal od 43% do 50%.

### 8.1 Rezultati preiskav svežih injekcijskih mešanic

V naslednjih podpoglavjih so predstavljeni rezultati izbranih svežih injekcijskih mešanic.

#### 8.1.1 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice A

Pri predhodni preiskavi mešanice smo ugotovili, da dobimo najboljše rezultate pri sestavi, povzeti v Preglednici 13.

Preglednica 13: Sestava injekcijske mešanice A

Mešanica	v/v volumsko razmerje	v/v masno razmerje	hiperplastifikator B [%]
A	0,60	0,93	1,0

Po zgornjih količinah pripravljena mešanica ni delala težav pri injektiranju. Tudi standardni testi so nam dali podobne rezultate, kot smo jih dobili pri predhodnih preiskavah iste mešanice (Preglednica 4). Rezultati so prikazani v Preglednici 14.

Preglednica 14: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode pri injekcijski mešanici A

Mešanica (meritve 21.1.2013)	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
		takoj	po 30 min	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	%
A	1450	18,96	19,41	98	2	2,04

Dobljeni rezultati pretočnosti so bili odlični, saj smo oba časa dobili pod 20 s, tudi razlika med njima ni bila večja od 10%. Slabši rezultat je bil pri izločanju vode, kjer smo dosegli dovoljeno mejo 2% iz standarda. Je pa imela injekcijska mešanica še dodatno pomanjkljivost, ki jo

preiskave na injekcijski mešanici v svežem stanju niso pokazale, se je pa pokazala na valjih. Po nekem času se je injekcijska mešanica začela posedati in iz mešanice so pogledali kamni.



Slika 39: Sesedanje injekcijske mešanice

Razlog sprememb bi lahko bil zrak, ki se je lahko vnesel pri injektiranju, ki pa ga je nato postopoma izrinila injekcijska mešanica. Razlog sprememb je lahko tudi v izločeni vodi, ki se je dvignila, ostal del injekcijske mešanice pa se je posedel. Vsekakor je bil to pokazatelj nestabilnosti injekcijske mešanice, kar je velika pomanjkljivost pri zagotavljanju učinkovitosti utrditvenega ukrepa z injektiranjem.

### 8.1.2 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice B

Injekcijska mešanica B je bila glede priprave in vgrajevanje najbolj preprosta. Po navodilih proizvajalca smo zamešali suho mešanico z vodo in sicer v razmerju, kot je prikazan v Preglednici 15.

Preglednica 15: Razmerje vode in suhe mešanice

Mešanica	v/v masno razmerje
B	0,35

Iz razmerja vode in suhe mešanice je vidno, da potrebuje ta mešanica zelo malo vode, vendar je kljub temu lepo tekoča. Že pri predhodnih preiskavah se je pokazalo, da je mešanica zelo "počasna", njen čas pretočnosti je bil ponovno okoli 2 minuti. Tokrat z izločanjem vode ni bilo težav, saj je na injekcijski mešanici ostalo le slabih 0,5 mm vode, kar ni problematično. Rezultati testov so vidni v Preglednici 16.

Preglednica 16: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode pri injekcijski mešanici B

Mešanica (meritve 21.1.2013)	Prostorninska masa [ $\text{kg/m}^3$ ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
		takoj	po 30 min	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	%
A	1870	130,78	129,96	96	0,5	0,01



Slika 40: Določanje prostorninske mase injekcijski mešanici B

Tudi pri tej injekcijski mešanici so bile vidne spremembe po nekem času. Tako kot injekcijska mešanica A se je tudi ta malo posedla, zgornje površine valjev so razpokale. Opazili smo tudi veliko spremembo v barvi in sami strukturi injekcijske mešanice. Tekoča injekcijska mešanica je bila čudovite bele barve, po preteku 48 ur smo opazili, da se je injekcijska mešanica rahlo obarvala modro. Valji so bili od vseh treh mešanic najhitreje strjeni. Celoten valj je deloval kot velika ledena kocka. Tudi glazura, ki se je naredila na površini, ki je bila izpostavljena zraku, je bila zelo gladka.



Slika 41: Primerjava valjev injektiranih z injekcijsko mešanico B takoj po injektiranju in po preteku 48 ur

Modro obarvani valji nam niso bili preveč všeč, začeli smo sumiti v njegovo sestavo. Očitno je bilo, da je suha mešanica vsebovala zelo učinkovite hidravlične dodatke, lahko celo cement .

### 8.1.3 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice C

Največ težav pri injektiranju je povzročala injekcijska mešanica C. Začelo se je že z apnenim testom, ki vsebuje veliko majhnih in malo večjih drobcov. Ti so nam povzročali težave tako pri testu pretočnosti kot tudi pri injektiranju, ker so se nabirali na situ. Poleg tega je apneno testo zelo kohezivno in mešanica se v tem večjem mešalcu, za razliko od predhodnih preiskav, kjer smo uporabili majhnega, ni dobro zamešala, na dnu je ostalo kar nekaj gostega materiala. Pri injektiranju valjev je injekcijska mešanica začela dvigovati kamne, zato smo si pomagali z leseno desko in jih zadržali. Dviganje kamnov je lahko povzročila lepljivost injekcijske mešanice, ki je posledica apnenga testa z visoko viskoznostjo.



Slika 42: Injektiranje valjev z injekcijsko mešanico C

Pri predhodnih preiskavah se je najbolje obnesla injekcijska mešanica, katere količine so povzete v Preglednici 17.

Preglednica 17: Vodovезivno razmerje in delež hiperplastifikatorja v injekcijski mešanici C

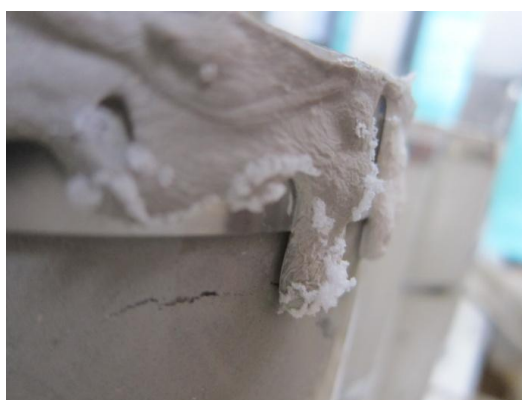
Mešanica	v/v masno razmerje	hiperplastifikator glede na apno in tuf [%]	hiperplastifikator glede na apno, tuf in apnenčevo moko [%]
C	1,00	2,00	1,33

Kljub nabiranju delcev na situ so bili rezultati pretočnosti dobri. Prav tako smo dobili dobre rezultate za izločanje vode, kajti iz injekcijske mešanice se ni izločilo nič vode. Dobljeni rezultati so prikazani v Preglednici 18.

Preglednica 18: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode pri injekcijski mešanici C

Mešanica (meritve 21.1.2013)	Prostorninska masa [ $\text{kg/m}^3$ ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
		takoj	po 30 min	v [ml]	$v_1$ [ml]	%
C	1556	17,79	18,51	98	0	0,00

Tudi na teh valjih smo po preteku 48 ur opazili spremembe. Na delih, kjer je injekcijska mešanica odtekala iz valjev, se je na injekcijski mešanici nabrala sol, ki je posledica vsebnosti tufa in ne predstavlja nobenih večjih težav.



Slika 43: Kristali soli, ki so se izločili iz injekcijske mešanice C

Bolj skrb vzbujajoče so bile razpoke na valjih ter izrazito krčenje pri prizmah. Vzrok krčenja je bila relativno velika količina vode v injekcijski mešanici, kljub uporabljenemu hiperplastifikatorju, ki je bila potrebna za zagotovitev lastnosti injekcijske mešanice v svežem stanju.



Slika 44: Izrazito krčenje prizem iz injekcijske mešanice C

Krčenje smo absolutno želeli zmanjšati, zato smo razmislili o uporabi novih sestavin in zamešali nove injekcijske mešanice. Pri prvi nadgradnji injekcijske mešanice C z injekcijsko mešanico, ki je v nadaljevanju označena s C1, smo namesto apnenčeve moke uporabili pesek frakcije 1 mm. S tem smo v injekcijski mešanici zmanjšali praškaste delce, ki imajo veliko potrebo po vodi. Cilj injekcijske mešanice je bilo preveriti, ali se bo krčenje z uporabo peska kaj zmanjšalo. Zavedali pa smo se, da ta mešanica ne bo uporabna za injektiranje zidov, saj bi agregat s premerom 1 mm povzročal težave pri napravi za injektiranje. Tudi na preizkusu se je izkazalo, da je potreba po vodi v tem primeru manjša, saj smo kljub temu, da je bilo količinsko več peska kot v prejšnji mešanici apnenčeve moke, zmanjšali količino vode. Za mešanico smo vzeli enak volumski delež veziva, torej apna in tufa in peska. Ostale količine so prikazane v Preglednici 19.

Preglednica 19: Vodovezivno masno razmerje injekcijske mešanice in delež dodanega hiperplastifikatorja

Mešanica	v/v masno razmerje	hiperplastifikator glede na apno, tuf in pesek [%]
C1	0,85	2,0

Injekcijski mešanici smo določili tudi pretočnost, prostorninsko maso in izračunali njeno izločanje vode. Pri vodovezivnem razmerju 0,80 smo dobili nekoliko prevelik čas pretočnosti, ki se je pri vodovezivnem razmerju 0,85 ustrezno zmanjšal. Rezultati so prikazani v Preglednici 20.

Preglednica 20: Rezultati pretočnosti injekcijske mešanice C1 v odvisnosti od vodovezivnega masnega razmerja

Mešanica (meritve 30.1.2013)	v/v masno razmerje	Pretočnost [s]	
		takoj	po 30 min
C1	0,80	28,73	/
C1	0,85	16,86	16,54

Pri novo zamešani mešanici smo po pričakovanju dobili nekoliko višjo prostorninsko maso, kar je posledica večjega prostorninskega deleža peska v primerjavi z apnenčevo moko. Prostorninska masa peska v nasutem stanju je namreč znašala  $1500 \text{ kg/m}^3$ , prostorninska masa apnenčeve moke pa  $1066 \text{ kg/m}^3$ . Masno razmerje peska z vezivom pri mešanici C1 je bilo 0,64, medtem ko je pri mešanici C masno razmerje apnenčeve moke z vezivom znašalo 0,50.

Preglednica 21: Primerjava rezultatov injekcijskih mešanic C in C1

Mešanica	v/v masno razmerje	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
			takoj	po 30 min	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	%
C	1,00	1556	17,79	18,51	98	0	0,00
C1	0,85	1610	16,86	16,54	97	0	0,00

Primerjalna Preglednica 21 nam potrjuje, da smo kljub manjšemu vodovezivnemu razmerju in večji prostornini zrn peska proti prostornini zrn apnenčeve moke dobili pri mešanici C1, kjer smo uporabili pesek, hitrejšo pretočnost. Potrdi se, da praškasti delci, kot je apnenčeva moka, potrebujejo večjo količino vode za enak učinek.

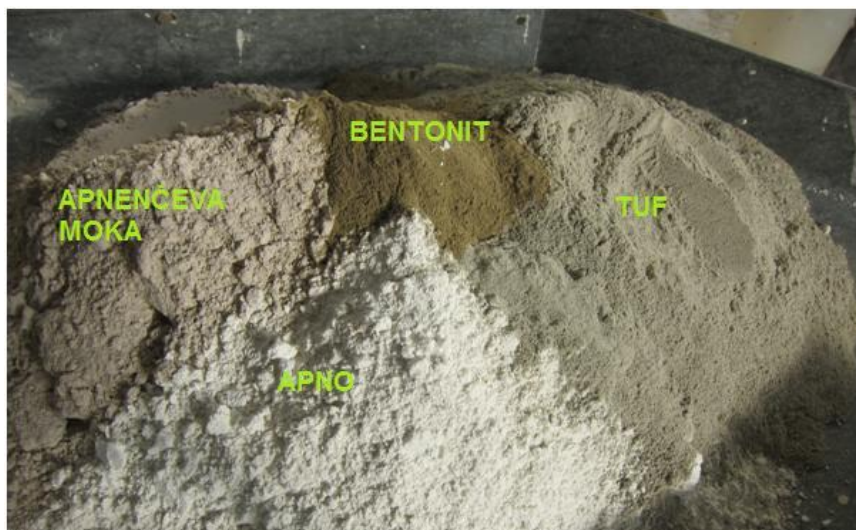
Pri drugi nadgradnji injekcijske mešanice C, ki je v nadaljevanju označena s C2, smo za zmanjšanje krčenja uporabili dodatek imenovan bentonit. Bentonit je vrsta gline. Njegova glavna sestavina je montmorilonit, ki nastaja s preperevanjem vulkanskega pepela. V odvisnosti od tega, kateri element prevladuje v kemijski sestavi (kalij, natrij, kalcij, aluminij), razlikujemo različne vrste bentonita. Je v praškasti obliki in je sive barve. V stiku s sveže litim betonom bentonit nabrekne in ustvari vodoneprepustno pregrado, ki se uporablja pri gradnji podzemnih prostorov, kanalizacije, rezervoarjev za vodo, skladiščenje jedrskih in drugih odpadkov [41]. Glavna značilnost bentonita torej je, da s povečanjem vsebnosti vode nabrekne, kar je tudi razlog, da smo ga dodali injekcijski mešanici. Predvidevali namreč smo, da bi s svojim nabrekanjem lahko kompenziral krčenje.

Količina sestavin nove injekcijske mešanice z bentonitom je bila popolnoma enaka prvotni injekcijski mešanici C, z razliko, da smo ji dodali le 3% bentonita glede na vezivo, torej apno in tuf. Sestava je prikazana v Preglednici 22.

Preglednica 22: Primerjava sestave injekcijske mešanice C in injekcijske mešanice C2 z dodanim bentonitom

Mešanica	v/v masno razmerje	Delež hiperplastifikatorja B glede na apno, tuf, apnenčevo moko in bentonit [%]	Delež bentonita glede na vezivo (apno in tuf) [%]
C	1,00	2,0	/
C2	1,00	2,0	3,0





Slika 45: Suhe sestavine injekcijskih mešanic C2 in C3

V Preglednici 23 je vidna primerjava rezultatov obeh injekcijskih mešanic, brez in z bentonitom. Rezultati so seveda zelo podobni, saj je bil delež bentonita zelo majhen in ni veliko vplival na rezultate sveže injekcijske mešanice. Kljub majhnemu deležu bentonita se je čas pretočnosti povečal za slabi 2 s. Z izločanjem vode ponovno ni bilo težav.

Preglednica 23: Primerjava rezultatov prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode injekcijskih mešanic C in C2

Mešanica (meritve 31.1.2013)	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
		takoj	po 30 min	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	%
C	1556	17,79	18,51	98	0	0,00
C2	1542	19,59	20,32	97	0	0,00

Zamešali smo še tretjo injekcijsko mešanico C3, tudi to z dodatkom bentonita. Razlika je bila le v apnu. Pri vseh dosedanjih mešanicah smo kot vezivo uporabili apneno testo in tuf, v tej injekcijski mešanici smo apneno testo nadomestili s hidratiziranim apnom. Predvidevali smo, da bomo zaradi hidratiziranega apna, ki je v praškasti obliki, potrebovali večje količine vode, a smo se zmotili. Vodovezivno razmerje je tudi v tem primeru ostalo 1,0.

Preglednica 24: Primerjava rezultatov prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode injekcijskih mešanic C2 in C3

Mešanica (meritve 31.1.2013)	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
		takoj	po 30 min	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	%
C2	1542	19,59	20,32	97	0	0,00
C3	1518	20,18	18,45	97	4,5	4,95

V Preglednici 24 lahko opazimo, da so rezultati pretočnosti v primerjavi z injekcijsko mešanico C2 precej razlikujejo. Izločanje vode injekcijske mešanice C3 je kar za 2,5 krat preseгло mejo 2%.

Odziv vseh treh nadgradenj injekcijske mešanice C na krčenje je predstavljen pri rezultatih strjenih injekcijskih mešanic.

#### 8.1.4 Rezultati preiskav sveže injekcijske mešanice D

Za razliko od ostalih injekcijskih mešanic je injekcijska mešanica D vsebovala cement. Masni delež cementa v injekcijski mešanici je bil 80%, preostalo je bilo apno v prahu. Recepture za injekcijsko mešanico nismo določili sami, temveč smo uporabili komercialen produkt, ki se ga v praksi uporablja za injektiranje kulturno zgodovinskih objektov. Suho mešanico, ki vsebuje cement, apno, mineralne in kemijske dodatke, ki prispevajo k boljši pretočnosti, preprečevanju segregacije, kompenzaciji krčenja in doseganju ustreznih trdnosti, smo zamešali skupaj z vodo v masnem razmerju 0,75.

Zaradi upoštevanja navodil za pripravo injekcijske mešanice nismo mogli vplivati na njene rezultate pretočnosti in izločanja vode.

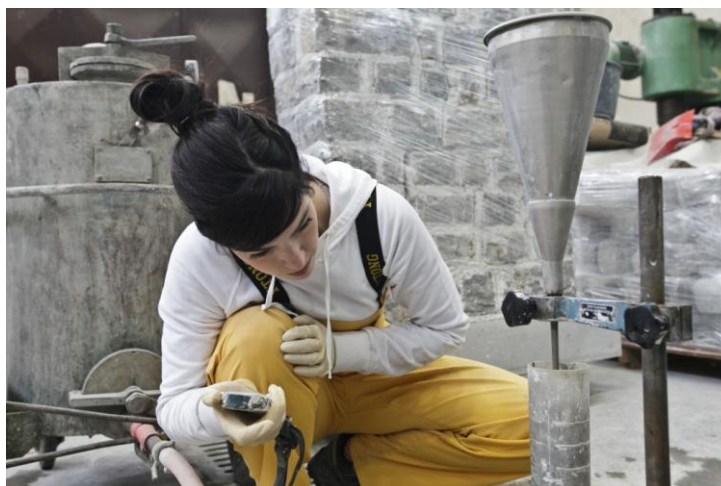


Slika 46: Pripravljanje testa segregacije vode

Dobili smo rezultate pretočnosti, ki niso bili v skladu s standardom SIST EN 445. Priporočljive so namreč vrednosti okoli 20 s, mi smo dobili 2 krat manjšo vrednost. Izločanje vode ni predstavljalo nobenih težav. Rezultati so prikazani v Preglednici 25.

Preglednica 25: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode injekcijske mešanice D

Mešanica (meritve 22.2.2013)	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
		takoj	po 30 min	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	%
D	1626	9,78	11,13	99	0	0,00



Slika 47: Merjenje časa pretočnosti apneno-cementne injekcijske mešanice

### 8.1.5 Povzetek

Pri preiskavah svežih injekcijskih mešanic smo vsaki izmed štirih svežih injekcijskih mešanic določili čas pretočnosti, delež izločanja vode in prostorninsko maso. Vodozadržnost smo testirali samo pri eni injekcijski mešanici, pri kateri smo pozabili na čas in pustili filtre predolgo namočene v injekcijsko mešanico. Posledično je bilo vode, ki se je zadržala na filtrih, preveč in bi morali test ponoviti, vendar zaradi pomanjkanja materiala to ni bilo mogoče. V Preglednici 26 so prikazani rezultati vseh treh mešanic.

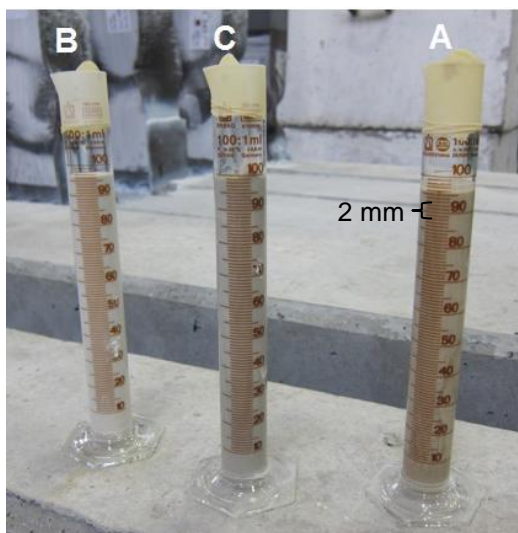
Preglednica 26: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode vseh injekcijskih mešanic

Mešanica	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
		takoj	po 30 min	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	%
A	1450	18,96	19,41	98	2	2,04
B	1870	130,78	129,96	96	0	0,00
C	1556	17,79	18,51	98	0	0,00
D	1626	9,78	11,13	99	0	0,00

Veliko razliko med injekcijskimi mešanicami opazimo pri pretočnosti, kjer je čas pretočnosti injekcijske mešanice B približno sedemkrat daljši od časa pretočnosti injekcijskih mešanic A in C. Izstopa tudi injekcijska mešanica D, vendar v nasprotno smer – z majhnim časom

pretočnosti. Vendar na pretočnost injekcijskih mešanic B in D nismo mogli oziroma želeli vplivati sami, saj smo pri mešanju upoštevali navodila proizvajalca.

Razlike so bile vidne tudi pri izločanju vode. Najbolj je izstopala injekcijska mešanica A, saj je dosegla mejni kriterij standarda SIST EN 445, ki velja za ta preizkus. Razlika je vidna tudi na Sliki 48.



Slika 48: Primerjava treh injekcijskih mešanic pri izločanju vode

Poleg injektiranja valjev in testov, ki smo jih izvajali sproti, smo pripravljene injekcijske mešanice zlili v kalupe za prizme in jih pustili odležavati 28 dni. Po preteku 28 dni smo jim določili prostorninsko maso, jih preizkušali na upogib in tlak ter jim z merjenjem dimenzij določili krčenje.



Slika 49: Pripravljanje prizem

Kot že omenjeno, smo zaradi velikega krčenja injekcijske mešanice C naredili še 3 variante te mešanice, s katerimi smo želeli zmanjšati vplive krčenja. Rezultati prostorninskih mas, pretočnosti in izločanja vode so prikazani v Preglednici 27.

Preglednica 27: Rezultati prostorninske mase, pretočnosti in izločanja vode vseh variant injekcijske mešanice C

Mešanica	v/v masno razmerje	Prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Pretočnost [s]		Izločanje vode		
			takoj	po 30 min	v [ml]	v <sub>1</sub> [ml]	%
C	1,00	1556	17,79	18,51	98	0	0,00
C1	0,85	1610	16,86	16,54	97	0	0,00
C2	1,00	1542	19,59	20,32	97	0	0,00
C3	1,00	1518	20,18	18,45	97	0	0,00

Vsem injekcijskim mešanicam je skupno, da niso imele težav z izločanjem vode. Tudi časi pretočnosti so bili primerni. Čas pretočnosti se je samo pri injekcijski mešanici s peskom zmanjšal glede na izhodiščno, pri ostalih dveh so se vrednosti nekoliko povečale, kar je verjetno posledica dodanega bentonita.

## 8.2 Rezultati preiskav strjenih injekcijskih mešanic

Rezultati v spodnjih podpoglavjih so dobljeni na podlagi prej opisanih preiskav strjenih injekcijskih mešanic v poglavju 6.2. Injekcijskim mešanicam smo določili prostorninsko maso, prizmam smo določili upogibno natezno in tlačno trdnost, valjem cepilno natezno ter tlačno trdnost. Dodatno smo na podlagi dimenzij prizem starih 28 dni določili še krčenje.

Za rezultate preiskav posamezne injekcijske mešanice smo določili še standardni odklon, ki je za posamezno mešanico viden na grafih. Iz standardnega odklona smo izračunali koeficient variacije. Definiran je kot razmerje med standardnim odklonom ( $\sigma$ ) in aritmetično sredino ( $\bar{x}$ ) in je dan z enačbo:

$$KV = \frac{100 \sigma}{\bar{x}} \quad (23)$$

Koeficient variacije nam pove, kakšna je razpršitev podatkov okoli aritmetične sredine njihove statistične populacije.

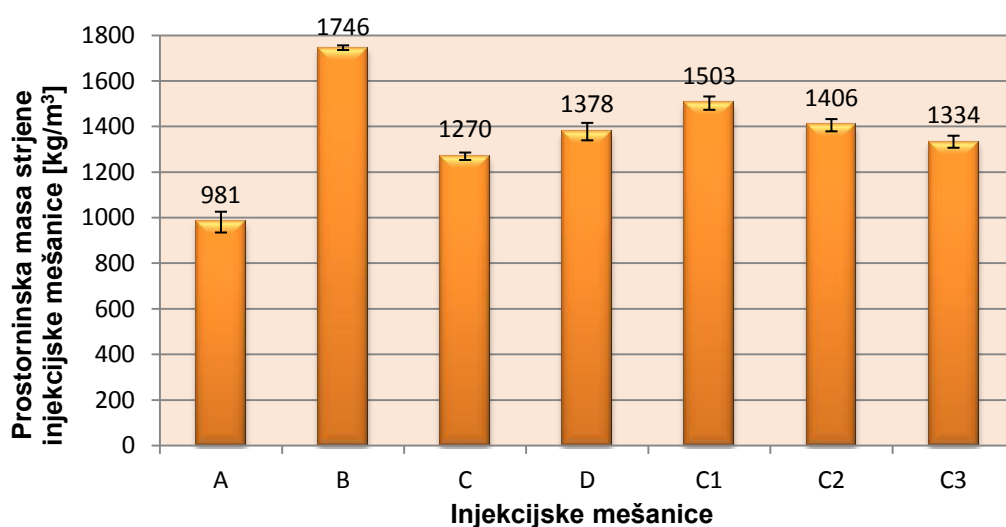
### 8.2.1 Prostorninska masa strjene mešanice

Prostorninske mase smo določali na podlagi mase preizkušancev in njihovih dimenzij in so se med seboj precej razlikovale. Poleg določitve prostorninskih mas smo injekcijskim mešanicam določili koeficient variacije. Rezultati so prikazani v Preglednici 28.

Preglednica 28: Primerjava povprečnih prostorninskih mas in koeficientov variacij vseh injekcijskih mešanic

Injekcijska mešanica	Povprečna prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Koeficient variacije [%]
A	981	4,65
B	1746	0,58
C	1270	1,29
D	1378	2,78

Injekcijska mešanica	Povprečna prostorninska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Koeficient variacije [%]
C1	1503	1,95
C2	1406	1,91
C3	1334	1,98



Grafikon 4: Primerjava rezultatov prostorninskih mas strjenih injekcijskih mešanic

Iz Preglednice 28 in Grafikona 4 je razvidno, da je najmanjšo prostorninsko maso dosegla injekcijska mešanica A s hidravličnim apnom, medtem ko je največjo dosegla komercialna injekcijska mešanica B. Izmed vseh treh variant injekcijske mešanice C je prostorninska masa injekcijske mešanice s peskom (C1) največja. Razlog je v večjem prostorninskem deležu zrn peska.

Največji koeficient variacije, torej največji relativni raztros rezultatov, je dosegla injekcijska mešanica s hidravličnim apnom. Razlog je v tem, da je le-ta največ odstopala od povprečja tako v masi, kot v višini preizkušancev. Za najbolj homogeno se je izkazala injekcijska mešanica B, medtem ko je imela apneno-cementna injekcijska mešanica presenetljivo velik koeficient variacije v primerjavi z ostalimi. Ta je posledica velikega raztrosa mas preizkušancev. Variacije injekcijske mešanice C imajo, kljub različnim sestavam, zelo podoben koeficient variacije, znaša približno 2.

## 8.2.2 Krčenje prizem

Krčenje prizem smo opazovali ves čas njihovega sušenja v kalupih. Pri tistih injekcijskih mešanicah, kjer je bilo krčenje zelo izrazito, se je to pokazalo že po sedmih dneh. Najbolj izrazito se je krčenje pokazalo pri injekcijski mešanici C, kjer smo uporabili apneno testo, apnenčevo moko, tuf ter hiperplastifikator.



Slika 50: Izrazito krčenje injekcijske mešanice C

Z variacijami injekcijske mešanice C smo, tako kot smo si želeli, dosegli manjše krčenje. Za najboljšo se je izkazala injekcijska mešanica z apnom v prahu. Prišli smo do zaključka, da je apneno testo tisto, ki povzroča večje krčenje. Z uporabo bentonita smo problem krčenja le malo ublažili, vendar ne toliko, kot smo si želeli.



Slika 51: Primerjava krčenja injekcijskih mešanice C1 z apnim testom in peskom, C2 z apnim testom in bentonitom ter C3 z apnom v prahu

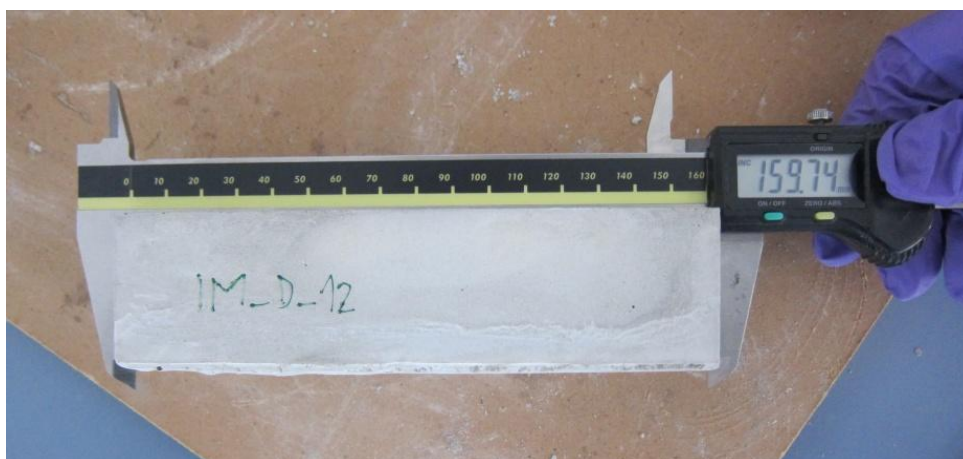
Bolj natančno smo krčenje prizem določili s pomočjo kljunastega merila, s katerim smo izmerili vse tri dimenzije prizem. Primerjave rezultatov so prikazane v Preglednici 29.

Preglednica 29: Primerjava dimenzij prizem po preteku 22 dni

Injekcijska mešanica	dolžina	višina	širina
	l [mm]	h [mm]	b [mm]
A	159,7	36,6	39,7
B	159,9	37,9	39,8
C	150,4	35,7	36,9
D	160,3	40,0	40,1

Injekcijska mešanica	dolžina	višina	širina
	l [mm]	h [mm]	b [mm]
C1	153,1	35,4	37,9
C2	152,1	35,4	37,8
C3	156,8	36,7	38,7

Iz dobljenih meritev je bilo zaznati skoraj nično krčenje injekcijskih mešanic A in B po dolžini ter skoraj centimetrsko spremembo dolžine pri injekcijski mešanici z apnenim testom C. Seveda takšna sprememba dimenzij ni sprejemljiva, saj se je prizma po dolžini skrčila za 6,0%, po višini za 10,75%, po širini za 7,75%. Kot je bilo videti že na oko, je njena varianta z apnenim prahom (C3) izboljšala krčenje, in sicer za kar dobrih 6 mm.



Slika 52: Določitev dimenzij s pomočjo kljunastega merila

Pri injekcijski mešanici D smo dobili celo malo večje vrednosti od standardnih dimenzij prizem, vendar je to posledica kalupov, ki niso čisto točnih dimenzij. Rezultati kažejo, da ni bilo krčenja teh injekcijskih mešanic.

Če bi na izbor ustrezne injekcijske mešanice vplivalo le krčenje, bi vsekakor izbrali injekcijsko mešanico D, torej apneno-cementno.

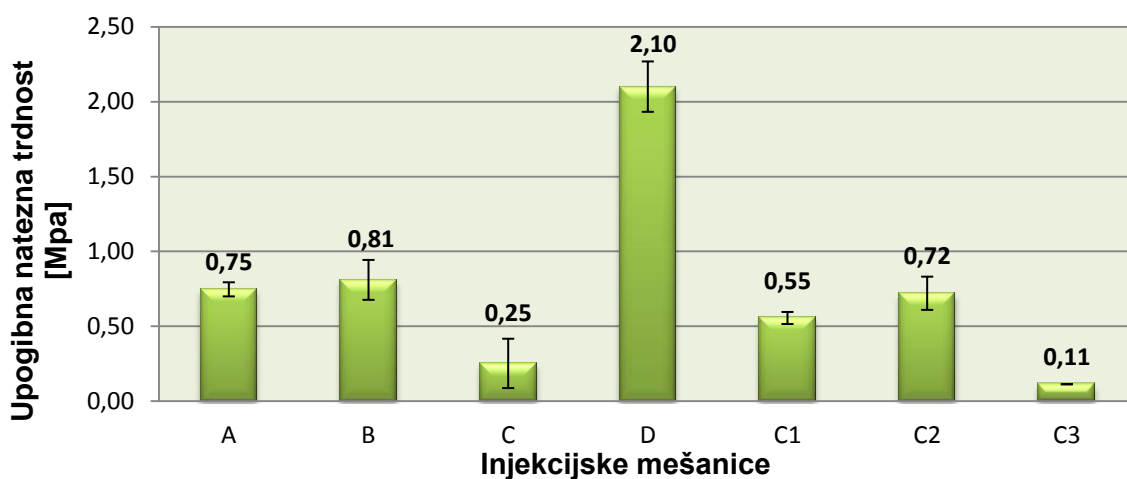
### 8.2.3 Upogibna natezna trdnost prizem

Vsaki injekcijski mešanici smo s pomočjo preizkušancev v obliki prizem določili povprečno upogibno natezno trdnost  $f_{mf}$ . Kot najboljša se je ponovno pričakovano izkazala injekcijska mešanica D. Rezultati so prikazani v Preglednici 30 in na Grafikonu 5.



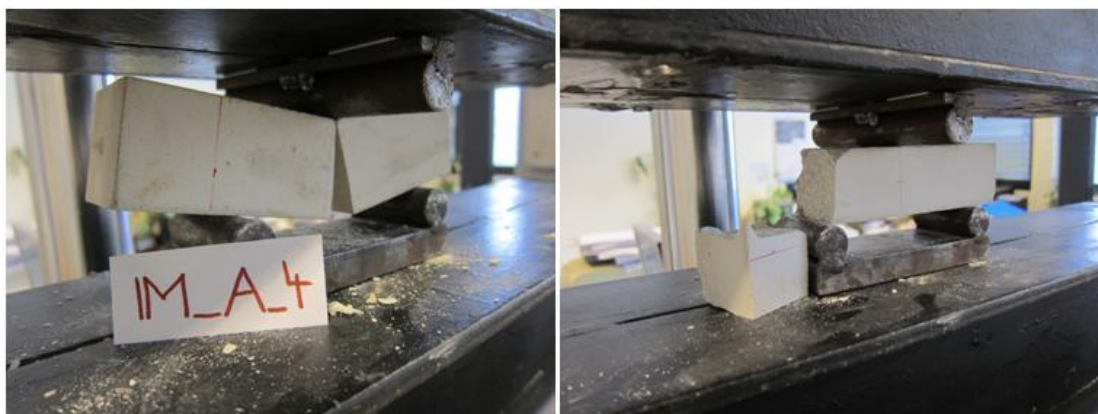
Preglednica 30: Rezultati povprečnih upogibnih nateznih trdnosti in koeficientov variacije za različne injekcijske mešanice

Injekcijska mešanica	Število vzorcev	F [kN]	razpon l [cm]	višina d1 [cm]	širina d2 [cm]	$f_{mf}$ [Mpa]	Koef. variacije [%]
A	5	0,25	10	3,97	3,59	0,75	6,32
B	9	0,31	10	3,98	3,78	0,81	16,47
C	9	0,08	10	3,69	3,57	0,25	65,60
D	6	0,90	10	4,03	4,00	2,10	8,02
C1	3	0,17	10	3,79	3,51	0,55	7,27
C2	3	0,23	10	3,79	3,53	0,72	15,41
C3	1	0,04	10	3,89	3,71	0,11	0,00



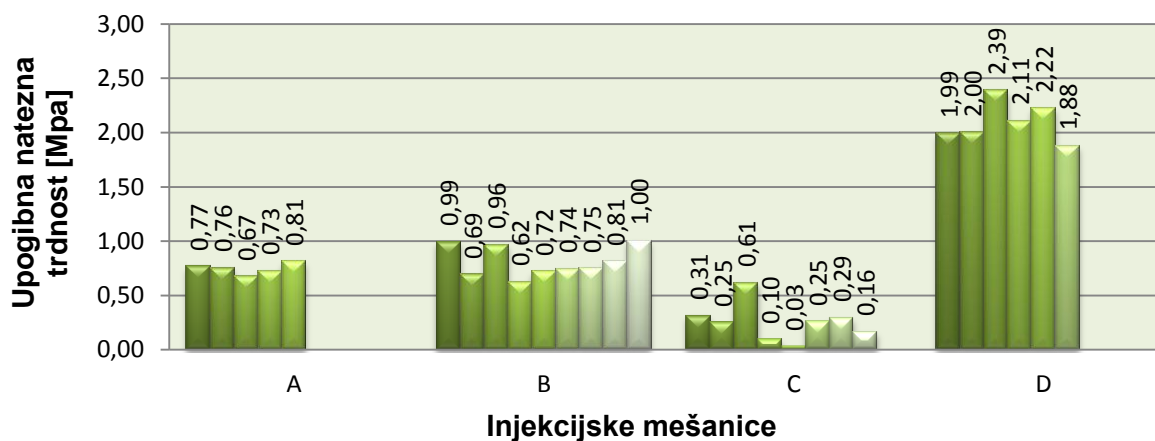
Grafikon 5: Povprečne upogibne natezne trdnosti preizkušancev

Od injekcijskih mešanic A, B, C in D je najnižjo upogibno natezno trdnost dosegla injekcijska mešanica C. Z dodanim peskom smo njeno upogibno natezno trdnost po pričakovanjih izboljšali, in sicer za kar 2,2 krat, medtem, ko smo jo z apnom v prahu zmanjšali za približno enako vrednost. Presenetljivo se je skoraj za 3 krat izboljšala upogibna natezna trdnost injekcijski mešanici z dodanim bentonitom (C2).



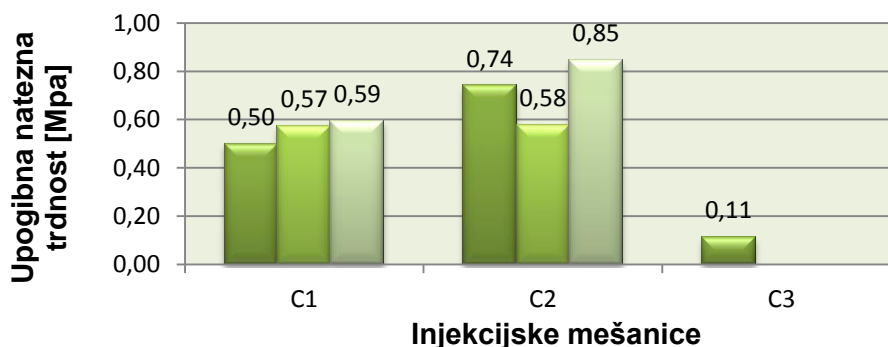
Slika 53: Primer tipične in netipične porušitve prizme pri upogibnem preizkusu

Injekcijskim mešanicam smo določili tudi koeficient variacije, ki je imel velika odstopanja. Največji koeficient variacije je imela injekcijska mešanica z apnenim testom in apnenčevo moko (C), kar kaže na to, kako zelo nehomogena je bila sama mešanica. Sledili sta ji injekcijska mešanica B ter injekcijska komercialna apneno-cementna injekcijska mešanica. Najmanjši raztros rezultatov med injekcijskimi mešanicami A, B, C in D je dosegla injekcijska mešanica s hidravličnim apnom (A). Zanimivo je, kako se je različicam injekcijske mešanice C raztros rezultatov močno zmanjšal. Z uporabo peska namesto apnenčeve moke je koeficient variacije manjši kar 8 krat, v primeru uporabe peska in bentonita pa za 4 krat.



Grafikon 6: Upogibne natezne trdnosti preizkušancev iz injekcijskih mešanic A, B, C ter D

Na Grafikonu 6 in Grafikonu 7 so prikazana medsebojna odstopanja posameznih injekcijskih mešanic. Do velikih odstopanj je prišlo pri injekcijski mešanici B, kjer je bilo največje odstopanje 23 % ter injekcijski mešanici C, kjer je bilo največje odstopanje kar 88 %. Za najbolj stabilno injekcijsko mešanico glede raztrosa rezultatov upogibne trdnosti se je izkazala mešanica s hidravličnim apnom.



Grafikon 7: Upogibne natezne trdnosti preizkušancev iz injekcijskih mešanic C1, C2 in C3

Pri injekcijski mešanici s peskom (oznaka C1) ni prišlo do večjih odstopanj, za manj zanesljivo se je izkazala injekcijska mešanica C2. Pri injekcijski mešanici z apnom v prahu nam je ostala samo ena prizma za tovrstne preizkuse, vse ostale so se porušile že pred preiskavami (pri razkalupljanju, merjenju dimenzij in mase).

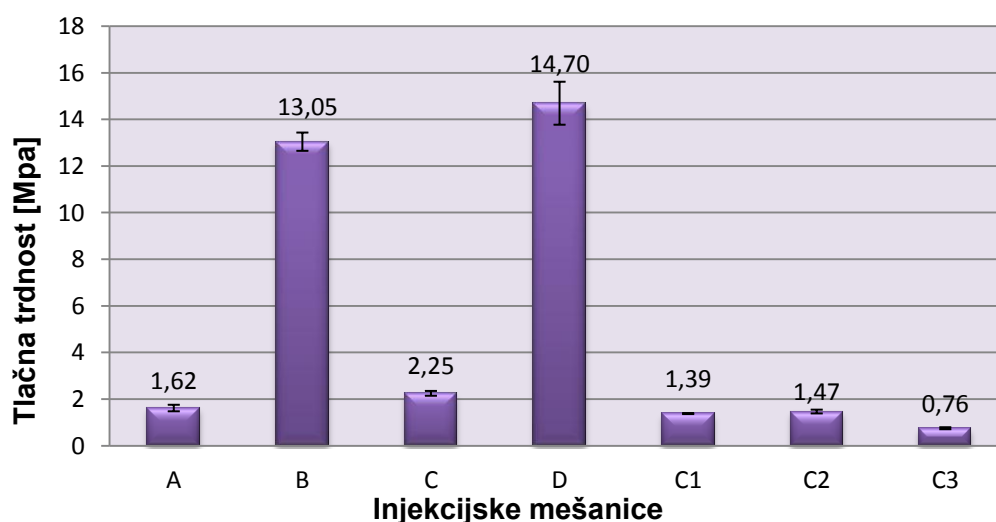
Torej, tudi v primeru upogibne natezne trdnosti, smo najboljše rezultate dobili pri komercialni apnenno-cementni injekcijski mešanici.

#### 8.2.4 Tlačna trdnost prizem

Tlačno trdnost prizem  $f_{mc}$  smo določili na polovičkih prizem, ki so ostale od upogibnega preizkusa. Ponovno smo dobili velike razlike med injekcijskimi mešanici, najbolj sta izstopali injekcijski mešanici B in D. Za injekcijsko mešanico D to odstopanje zaradi velikega deleža cementa ni bilo nič nenavadnega, medtem, ko z injekcijsko mešanico B, ki naj ne bi vsebovala cementa, tako visokih vrednosti nismo pričakovali. Ponovno smo posumili, da injekcijska mešanica B poleg apna ter pucolanov vsebuje tudi hidravlično vezivo, ki ga proizvajalec ne navaja v sestavi. Rezultati povprečnih tlačnih trdnosti so prikazani v Preglednici 31 in na Grafikonu 8.

Preglednica 31: Rezultati povprečnih tlačnih trdnosti za različne injekcijske mešanice

Injekcijska mešanica	Število vzorcev	F [kN]	širina a [cm]	$f_{mc}$ [MPa]	Koef. variacije [%]
A	6	2,56	3,97	1,62	8,66
B	18	20,70	3,98	13,05	3,00
C	18	3,07	3,69	2,25	4,61
D	12	23,80	4,03	14,70	6,27
C1	6	1,99	3,79	1,39	1,60
C2	6	2,11	3,79	1,47	5,49
C3	6	1,14	3,88	0,76	5,54

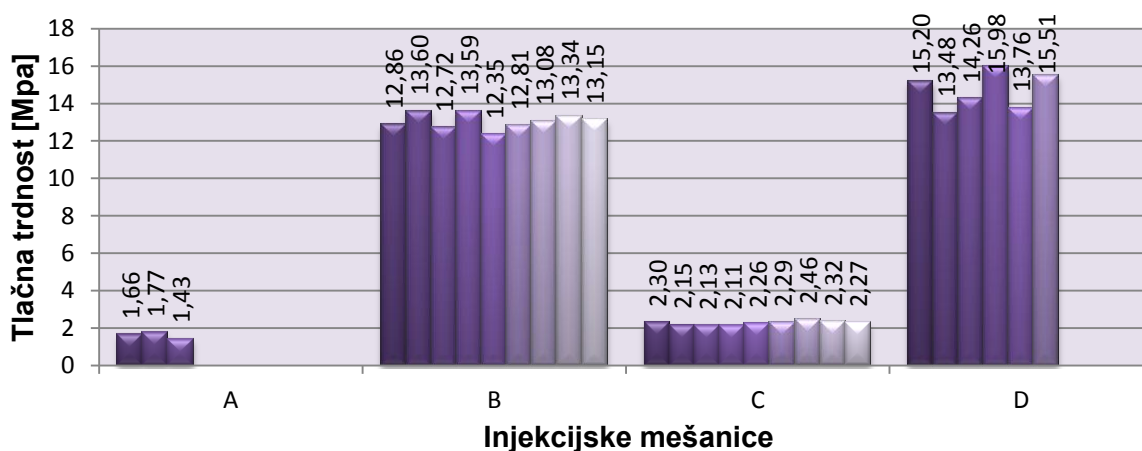


Grafikon 8: Povprečne tlačne trdnosti preizkušancev

Vrednosti povprečnih tlačnih trdnosti injekcijske mešanice D so skoraj 10 krat višje (pri injekcijski mešanici B 8 krat višje) od povprečnih vrednosti trdnosti ostalih injekcijskih mešanic. Ostale injekcijske mešanice so dosegle vrednosti od 0,76 MPa do 2,25 MPa. Tokrat

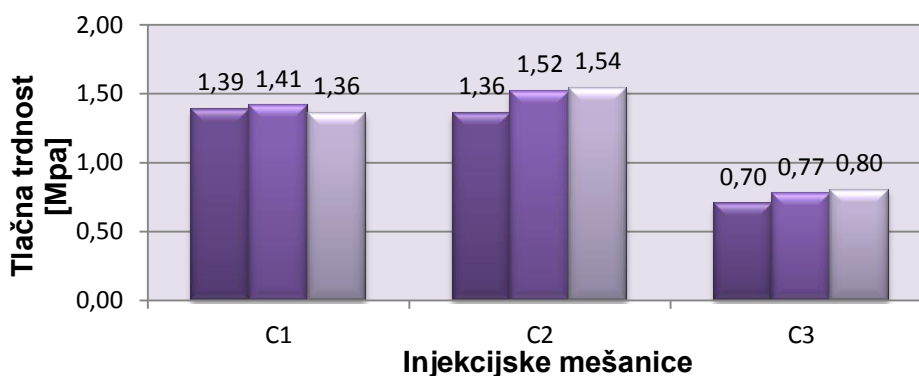
se je za najboljšo izkazala injekcijska mešanica z apnenim testom in tufom brez drugih dodatkov. Pričakovali bi, da bo injekcijska mešanica, ki je vsebovala pesek dimenzij 1 mm, dosegla višjo tlačno trdnost od mešanice z apnenčevom moko. Po pričakovanjih je injekcijska mešanica z apnom v prahu dosegla najnižjo tlačno trdnost, saj je v primerjavi z apnenim testom slabši material glede doseganja trdnosti.

Pri preizkušanju tlačne trdnosti injekcijskih mešanic se je za najbolj homogeno izkazala injekcijska mešanica z apnenim testom in peskom. Največja odstopanja je bilo opaziti pri injekcijski mešanici s hidravličnim apnom (A), kjer je koeficient variacije kar 5 krat večji od tistega za C.



Grafikon 9: Tlačne trdnosti preizkušancev iz injekcijskih mešanic A, B in C

Raztros rezultatov pri tlačni trdnosti je bil majhen. Od injekcijskih mešanic A, B, C in D je imela samo injekcijska mešanica A raztros večji od 10%.



Grafikon 10: Tlačne trdnosti preizkušancev iz injekcijskih mešanic C1, C2 in C3

Prav tako pri injekcijskih mešanicah C1, C2 in C3 ni v nobenem primeru prišlo do raztosa večjega od 10%.

Glede tlačne trdnosti smo pri apneno-cementni injekcijski mešanici ponovno dosegli najvišje vrednosti. Vendar se moramo zavedati, da največja trdnost in togost pri historičnih stavbah

nista nujno tudi najboljši. Tovrstni materiali lahko povzročijo dodatne poškodbe konstrukcijskih elementov takih stavb.

### 8.2.5 Cepilna natezna trdnost valjev

Preizkus cepilne natezne trdnosti  $f_{mt}$  pokaže kakovost povezave med gradniki (v našem primeru kamni) in sloji zidu. V našem primeru smo opazovali povezavo med kamni in injekcijsko mešanico. Po doseženi maksimalni cepilni sili smo dobili zelo različne porušitve valjev. Pri injekcijskih mešanicah A in C smo opazili zelo slab stik med kamnom in injekcijsko mešanico, saj je vsak kamen posebej padel ven brez kakršnekoli injekcijske mešanice. Povsem drugačna slika je bila pri injekcijski mešanici B, kjer je bil stik med kamni in injekcijsko mešanico tako močan, da je valj razpadel samo na dva dela, kar je prikazano tudi na Sliki 54. Nekje vmes je bilo obnašanje valja z injekcijsko mešanico D.

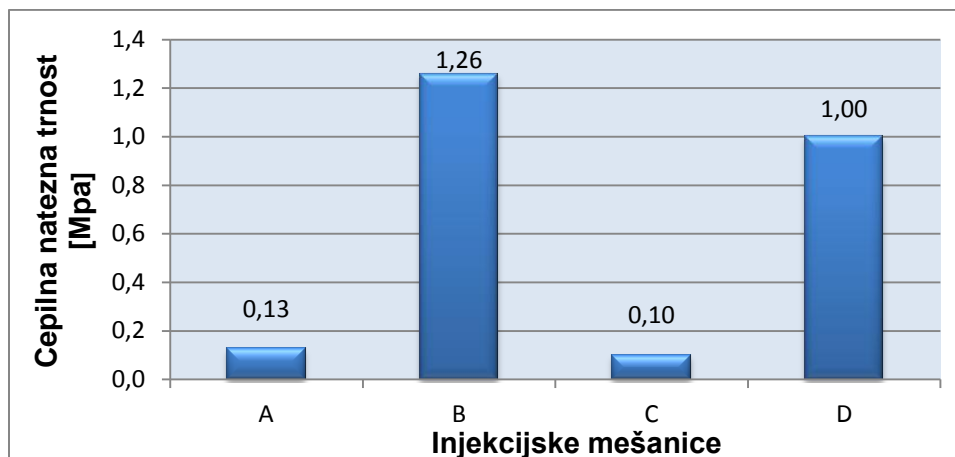


Slika 54: Primer porušitve valja z injekcijsko mešanico C (preizkušanec 14) ter injekcijsko mešanico B (preizkušanec 27)

V Preglednici 32 so prikazani rezultati povprečne vrednosti cepilne natezne trdnosti preizkušancev.

Preglednica 32: Povprečne vrednosti cepilne natezne trdnosti preizkušancev

Injekcijska mešanica	F [kN]	l [cm]	d [cm]	$f_{ct}$ [MPa]
A	9,05	30	15	0,13
B	88,95	30	15	1,26
C	7,96	30	15	0,11
D	70,75	30	15	1,00

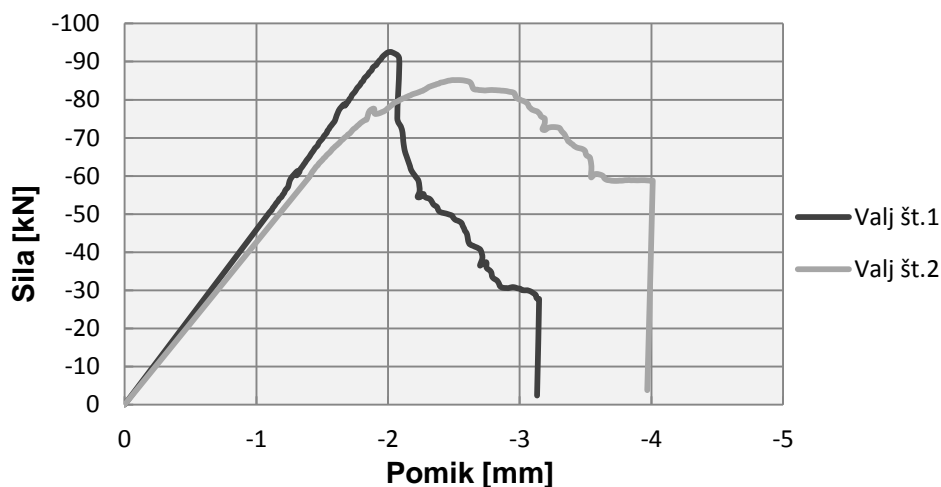


Grafikon 11: Povprečne vrednosti cepilne natezne trdnosti preizkušancev

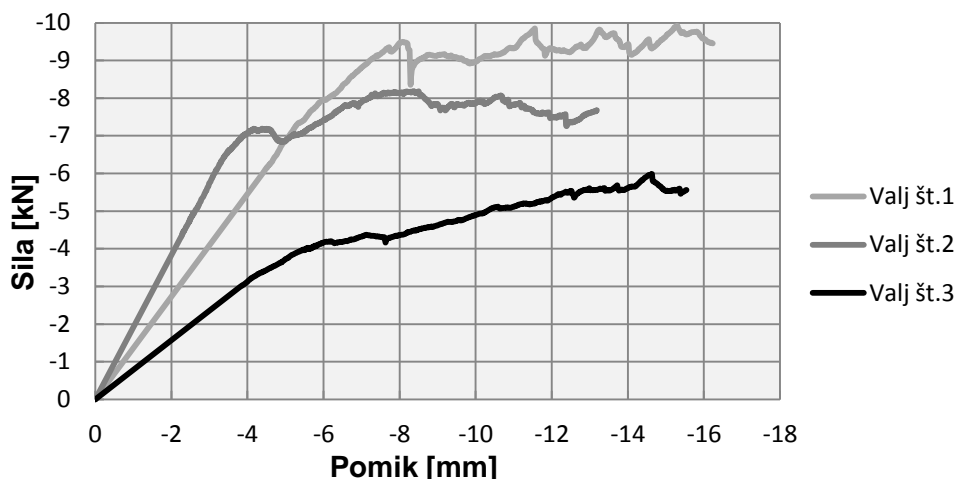
Rezultati cepilne natezne trdnosti kažejo na potrditev slike (Slika 54). Slab stik med kamni in injekcijsko mešanico A ter C je bil potrjen z nizko vrednostjo cepilne natezne trdnosti. Vrednost za injekcijsko mešanico B je bila od ostalih dveh višja za približno 10 krat, kar še enkrat kaže na to, da injekcijska mešanica B poleg apna najbrž vsebuje tudi hidravlično vezivo.

Raztrosa ni bilo smiselno oziroma mogoče analizirati, kajti za vsako mešanico smo imeli samo po dva preizkušanca.

S preizkusom smo dobili tudi graf (Grafikon 12 in Grafikon 13) tlačne sile v odvisnosti od pomika bata. Začetni odziv valjev iz injekcijske mešanice B je bil zelo podoben. Pri obeh je pričela sila naraščati takoj po nanosu obremenitve. Kasneje je bil njun odziv na obremenitev drugačen. Pri prvem valju je opazen hiter padec sile, medtem ko pri drugem valju sila pada počasneje. Razlog je lahko v načinu porušitve. Porušitev je pri drugem valju lahko potekala po stikih z zrni in ne naravnost čez zrna, kot se je lahko zgodilo pri prvem valju.



Grafikon 12: Graf sila – pomik pri cepilni natezni trdnosti valjev iz injekcijske mešanice B



Grafikon 13: Graf sila – pomik pri cepilni natezni trdnosti valjev iz injekcijske mešanice C

Na Grafikonu 13 je prikazan podoben graf, le da gre za injekcijsko mešanico iz apnenega testa, ki je dosegla veliko nižje cepilne natezne trdnosti. Tretji valj je prenesel veliko manjšo maksimalno silo, in sicer 6 kN, medtem ko je prvi valj dosegel skoraj 10 kN. Sklepamo, da je bilo pri tretjem valju v območju bata, s katerim smo valj obremenjevali, manj kamnov in da je bat deloval bolj na samo injekcijsko mešanico.

### 8.2.6 Tlačna trdnost valjev

Valji iz štirih različnih injekcijskih mešanic so se tudi tokrat obnašali zelo različno. Na spodnjih dveh slikah je prikazano obnašanje injekcijske mešanice A (Slika 55) in injekcijske mešanice B (Slika 56).



Slika 55: Obnašanje valja pod tlakom iz injekcijske mešanice A

Pri valjih, polnjenih z injekcijsko mešanico A (prav tako pri injekcijski mešanici C) je bilo zelo izrazito odpadanje injekcijske mešanice in kamnov, večina vsakega posebej. Pri valjih z injekcijsko mešanico B je bilo vidno le minimalno odpadanje injekcijske mešanice, ponovno se je izkazala s svojo odlično povezanostjo s kamenjem. Tudi apnenocementna injekcijska mešanica se je pod tlačno obremenitvijo obnašala dobro, odpadanje materiala je bilo sicer prisotno, vendar ne v tolikšni meri kot pri apnenih mešanicah. V primerjavi z injekcijsko mešanico B je dosegla nižjo trdnost.



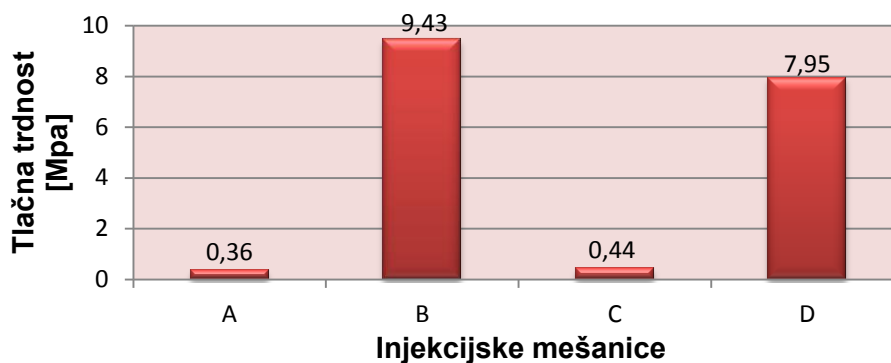
Slika 56: Obnašanje valja pod tlakom iz injekcijske mešanice B

V Preglednici 33 so prikazani rezultati povprečne vrednosti tlačne trdnosti preizkušancev.

Preglednica 33: Rezultati povprečne tlačne trdnosti valjev

Injekcijska mešanica	F [kN]	r [cm]	fc [MPa]
A	6,46	7,5	0,37
B	166,70	7,5	9,43
C	7,82	7,5	0,44
D	140,50	7,5	7,95

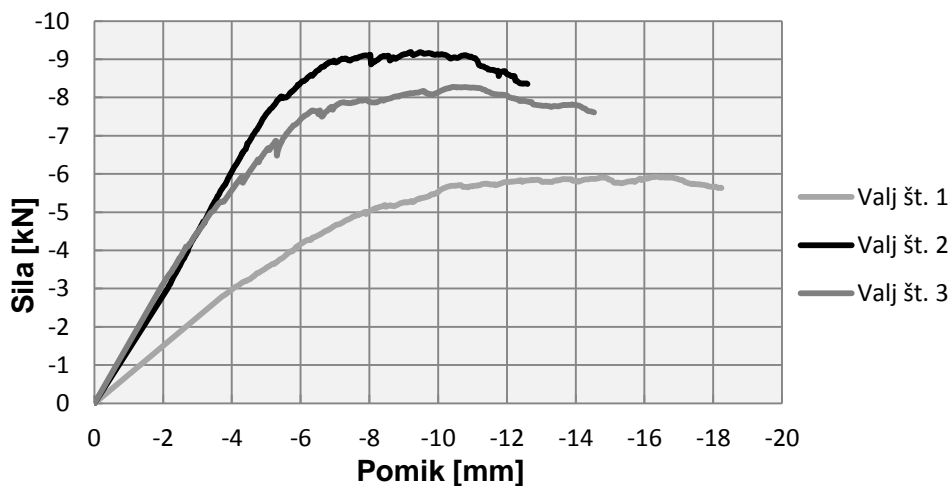




Grafikon 14: Rezultati povprečne tlačne trdnosti valjev

Iz Grafikona 14 sta razvidni dve skupini injekcijskih mešanic. Prvo skupino predstavljajo apnene injekcijske mešanice z nizkimi vrednostmi tlačnih trdnosti (A in C), v drugo pa spadajo injekcijske mešanice z visokimi vrednostmi tlačnih trdnosti (B in D). Njihova tlačna trdnost je v povprečju od ostalih večja kar za faktor 22, kar lahko kaže, da injekcijska mešanica B ne vsebuje samo apna in pucolanskih mineralnih dodatkov. Zanimivo je, da je pri preizkusih trdnosti na valjih celo prekoračila vrednosti apneno-cementne mešanice D.

Pri preizkušancih iz injekcijske mešanice iz apnenega testa, kjer nismo pričakovali velikih vrednosti, smo lahko pridobili sovisnosti med silo in pomikom (Grafikon 15).



Grafikon 15: Graf sila – pomik pri tlačni preiskavi valjev iz injekcijske mešanice C

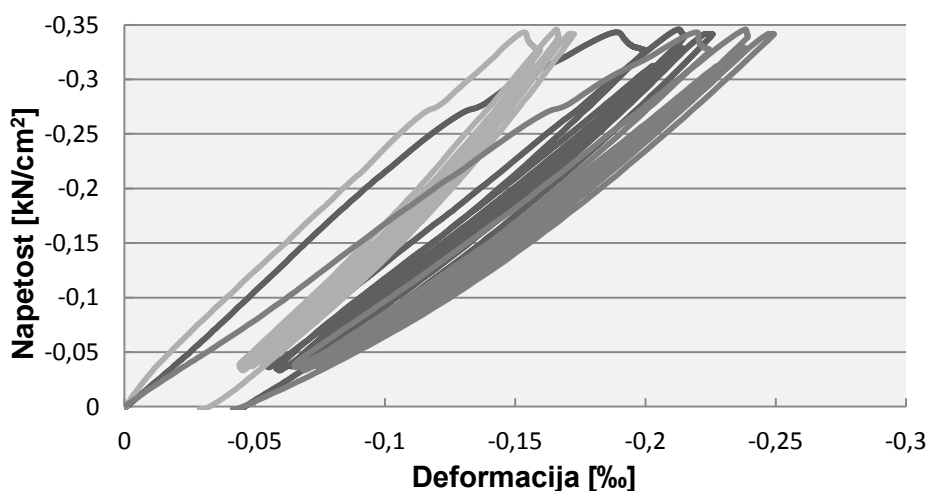
Kljub isti injekcijski mešanici so se valji obnašali precej različno. Prvi valj je dosegel precej nizko maksimalno tlačno silo v primerjavi z ostalima dvema, a je prenesel veliko večje pomike (18 mm), torej se je obnašal zelo duktilno. Obnašanje drugih dveh valjev je bilo precej podobno, drugi je prenesel maksimalno silo 9,2 kN in pomik 13 mm, tretji pa silo 8,3 kN in pomik 15 mm.

### 8.2.7 Statični modul elastičnosti

Statični modul elastičnosti je fizikalna količina, določena pri raztezanju in stiskanju teles kot razmerje med napetostjo (silo na enoto preseka) in relativnim raztezkom (deformacijo). Določevali smo ga s pomočjo merilnih lističev, nalepljenih v treh linijah valja premera 15 cm in višine 30 cm. Zaradi močno poškodovanih valjev, polnjenih z injekcijskima mešanicama A in C, določevanje elastičnega modula le-teh ni bilo smiselno. V veliko boljšem stanju sta bila valja iz injekcijskih mešanic B ter D, zato določevanje elastičnega modula na teh dveh ni bilo težko.

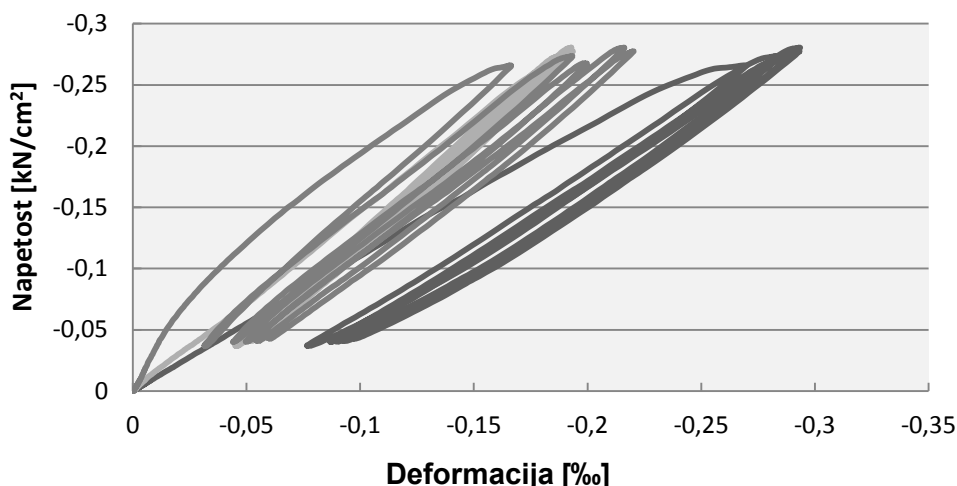
Pred samim preizkusom je bilo potrebno določiti 1/3 tlačne nosilnosti valja in vrednost sile pri 0,5 MPa. To sta namreč vrednosti, do katerih obremenjujemo oz. razbremenjujemo valj za določitev statičnega modela elastičnosti. Glede na to, da smo valje obremenjevali po pomikih, so te vrednosti pri nas približne. Po petih ciklih, kjer en cikel predstavlja obremenitev do 1/3 tlačne nosilnosti valja in razbremenitev do sile pri 0,5 MPa, smo preizkus zaključili.

Na Grafikonu 16 in Grafikonu 17 so prikazani cikli vseh treh merilnih lističev na valjih iz obeh injekcijskih mešanic, na podlagi katerih smo nato določili statični elastični modul.



Grafikon 16: Graf  $\sigma - \varepsilon$  vseh treh merilnih lističev pri valju iz injekcijske mešanice B

Maksimalne deformacije vseh treh lističev pri valjih iz obeh injekcijskih mešanic se precej razlikujejo. Sklepamo, da je bil merilni listič, pri katerem so deformacije manjše, nalepljen v območju kamna, kjer ni prišlo do takšnih deformacij kot pri ostalih območjih.



Grafikon 17: Graf  $\sigma - \epsilon$  vseh treh merilnih lističev pri valju iz injekcijske mešanice D

Iz primerjave grafikonov (Grafikon 16 in Grafikon 17) opazimo, da so valji z apnenocementno injekcijsko mešanico, torej valji z injekcijsko mešanico D, dosegli večjo maksimalno napetost, ki je znašala  $0,29 \text{ kN/cm}^2$ , kot valji z injekcijsko mešanico B, pri katerih je bila ta vrednost  $0,25 \text{ kN/cm}^2$ . To je posledica odstopanja od računsko določenih sil pri  $1/3$  porušne sile za posamezno injekcijsko mešanico.

Statični modul elastičnosti smo določili na približno  $1/3$  tlačne nosilnosti valja, ki sta bili različni za obe injekcijski mešanici. Vrednosti sta prikazani v Preglednici 34.

Preglednica 34: Vrednosti sile, pri kateri smo določili statični elastični modul

Injekcijska mešanica	$F_{\text{max.tlak}}$ [kN]	$F_{1/3}$ [kN]	$F_{\text{dejanska}}$ [kN]
B	166,7	55,6	61,1
D	140,5	46,8	49,6

Pri  $F_{\text{dejanska}}$ , ki je sicer malce večja, kot bi naj bila ( $F_{1/3}$ ), smo prebrali pripadajoče deformacije vseh treh lističev in s pomočjo Hookovega zakona določili elastični modul za vsak listič posebej, iz teh pa določili povprečno vrednost statičnega modula elastičnosti. Vrednosti povprečnega statičnega modula elastičnosti sta prikazani v Preglednici 35.

Preglednica 35: Vrednosti povprečnega statičnega modula elastičnosti valjev

Injekcijska mešanica	Povprečni statični elastični modul [GPa]
B	17,20
D	12,36

Višjo vrednost povprečnega statičnega modula elastičnosti je dosegla injekcijska mešanica B, ki je glede na svojo sestavo, ponovno presenetila. Standardni odklon rezultatov merilnih lističev je bil v obeh primerih velik, kar je povsem logično, saj smo imeli za vsako injekcijsko mešanico samo po en valj, na njem pa 3 merilne lističe, torej za vsak primer samo 3 rezultate.

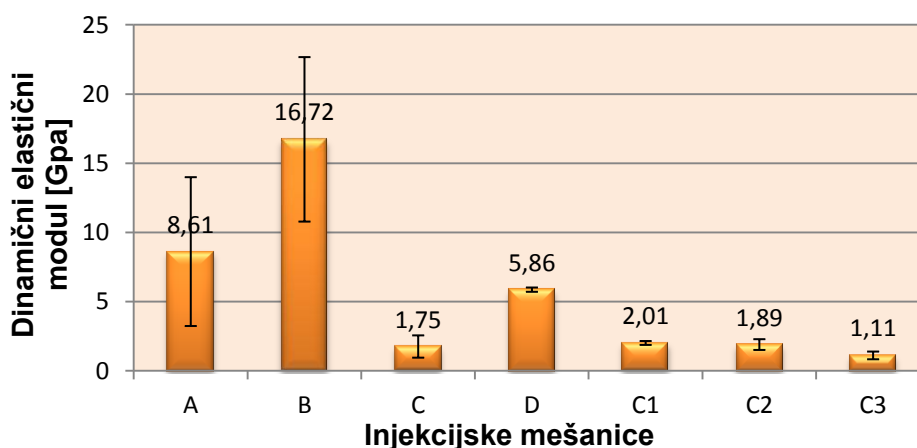
### 8.2.8 Dinamični modul elastičnosti prizem

Rezultati preizkusa z Grindo Sonicom, iz katerih smo izračunali dinamični modul elastičnosti, so od mešanice do mešanice precej variirali. Izkazalo se je, da imajo injekcijske mešanice s hidravličnim apnom, z apnenim testom ter injekcijska mešanica B velik raztros rezultatov. Rezultati so vidni v Preglednici 36.

Preglednica 36: Rezultati povprečnih vrednosti dinamičnega elastičnega modula in standardni odklon

Injekcijska mešanica	Elastični modul [Gpa]	Koeficient variacije [%]
A	8,61	62,4
B	16,72	35,5
C	1,75	46,0
D	5,86	2,6
C1	2,01	7,0
C2	1,89	20,6
C3	1,11	25,1

Velik koeficient variacije pri injekcijski mešanici C smo z njenimi različicami zmanjšali. V primeru, ko smo uporabili pesek namesto apnenčeve moke, se je raztros rezultatov zmanjšal za 6 krat, z dodanim bentonitom 2 krat in z uporabo hidratiziranega apna skoraj 2 krat. Odločilno vlogo pri tem ima prostorninska masa – večja kot je, boljši so rezultati.



Grafikon 18: Povprečne vrednosti dinamičnega elastičnega modula za vse injekcijske mešanice

Največji modul elastičnosti je po pričakovanju dosegla injekcijska mešanica B. Močno je preseгла celo apneno-cementno mešanico, katere dinamični elastični modul je skoraj 3 krat manjši od injekcijske mešanice B. Glede na prejšnje slabše rezultate, je z visoko vrednostjo dinamičnega modula elastičnosti presenetila injekcijska mešanica s hidravličnim apnom.

### **8.2.9 Povzetek**

Preiskave strjenih injekcijskih mešanic smo naredili na prej pripravljenih valjastih vzorcih, zapolnjenih s kamni ter injekcijsko mešanico in vzorcih prizem standardnih dimenzij injekcijske mešanice. Prizmam smo določili upogibno natezno in tlačno trdnost, dinamični modul elastičnosti, s pomočjo izmerjenih dimenzij smo določili prostorninsko maso in krčenje, valjem pa cepilno natezno in tlačno trdnost.

Po pričakovanjih smo najvišje vrednosti upogibne natezne in tlačne trdnosti dobili pri prizmah, pripravljenih iz komercialne apneno-cementne injekcijske mešanice z 80% masnim deležem cementa. Ostale tri injekcijske mešanice so bile na osnovi apna. Med njimi je najboljše rezultate upogibno nateznih in tlačnih trdnosti dosegla komercialna injekcijska mešanica italijanskega proizvajalca. Vrednosti so se močno približale vrednostim apneno-cementne injekcijske mešanice, zato smo podvomili v njeno sestavo. Mešanica naj bi bila na bazi apna, brez dodatkov cementa, a rezultati so kazali na to, da vsebuje zelo učinkovite hidravlične dodatke, morda celo cement.

Pri valjih smo najvišje vrednosti cepilne natezne in tlačne trdnosti dobili ponovno pri komercialni injekcijski mešanici italijanskega proizvajalca. Povezava injekcijske mešanice s kamni je bila odlična. Pri valjih iz hidravličnega apna in apnena testa je bil stik med kamni in injekcijsko mešanico zelo slab, kar se je odražalo v odpadanju kamnov in injekcijske mešanice v času preiskav.

Krčenje je bilo najbolj izrazito pri injekcijski mešanici z apnenim testom, kjer se je dolžina prizem v povprečju zmanjšala za skoraj 10 mm. Krčenje smo malce zmanjšali z njenimi različicami, kjer smo apnenčevo moko zamenjali s peskom, dodali bentonit ali apneno testo zamenjali s hidratiziranim apnom. Pri komercialnih injekcijskih mešanicah je bilo krčenje minimalno.

Statični modul elastičnosti smo določili samo na valjih iz komercialnih injekcijskih mešanic. Višjega je dosegla injekcijska mešanica italijanskega proizvajalca. Prav tako smo z injekcijsko mešanico dosegli najvišji dinamični modul elastičnosti, ki smo ga določevali na prizmah.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## 9 OPTIMIZACIJA UTRDITVE

Na izbor ustrezne utrditve je vplivalo kar nekaj dejavnikov. Kljub temu, da se v praksi od NSM (angl. "Near surface mounted") sistemov utrjevanja najbolj pogosto uporabljajo palice z vlakni, smo se, zaradi lažjega vgrajevanja in boljšega prileganja v fuge, odločili za vrvce. Od vlaken smo že na začetku izločili karbonska, ker bi pri našem zidu preveč prispevala k nosilnosti. Oklevali smo med uporabo bazaltnih in steklenih vlaken. Pred dokončno izbiro ustrezne vrvce in njenega premera, ki bi ustrezal našemu zidu in želenim mejnim nosilnostim, smo morali optimizirati postavitev ter vrsto in količino vrvic. Zato smo preverjali prispevek vrvic k strižni nosilnosti zidu za različne primere.

### 9.1 Splošna načela projektiranja po ACI

Ameriški inštitut za beton (angl. "American Concrete Institute" ali krajše "ACI") je tehnično in izobraževalno združenje in eno od vodilnih svetovnih organov za tehnologije betona [42]. V enem od svojih priročnikov za projektiranje [43] obravnava tudi FRP sisteme za utrditev nearmiranih zidanih konstrukcij.

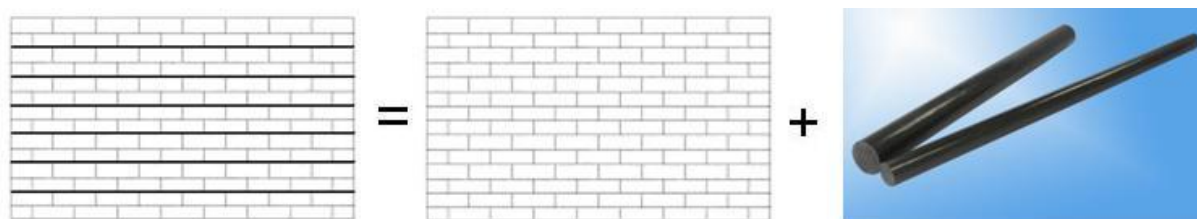
V skladu z ACI [43] smo torej določili prispevek strižne nosilnosti naše izbrane utrditve k strižni nosilnosti zidu skupaj z utrditvijo. Nominalna strižna nosilnost zidu skupaj z utrditvijo je po ACI določena kot vsota strižne nosilnosti neutrjenega zidu in strižne nosilnosti utrditve, kar prikazuje naslednja enačba:

$$V_{n,s} = V_n^{URM} + V_f \quad (24)$$

kjer je

$V_n^{URM}$ ...prispevek strižne nosilnosti neutrjenega zidu (angl. "unreinforced masonry")

$V_f$ ... prispevek strižne nosilnosti FRP utrditve



Slika 57: Nominalna strižna nosilnost je enaka prispevku strižne nosilnosti zidu in utrditve  
(<http://www.szfrpproducts.com/2-carbon-fiber/1-1-1b.jpg>)

Pred izračunom prispevka FRP utrditve  $V_f$  k strižni nosilnosti je potrebno določiti še mnogo parametrov, ki so prikazani v nadaljevanju.

## 9.2 Izračun prispevka utrditve k strižni nosilnosti zidu

Materialne lastnosti, ki jih posredujejo proizvajalci, kot je natezna trdnost, običajno ne upoštevajo dolgoročne izpostavljenosti pogojem okolja. Zato jih je potrebno obravnavati kot začetne lastnosti. Dolgoročna izpostavljenost različnim tipom okolja lahko zmanjša natezne lastnosti, lezenje in odpornost na utrujanje FRP laminatov. Materialne lastnosti, uporabljene v projektnih enačbah, morajo zato biti zmanjšane na podlagi pogojev izpostavljenosti okolju. Projektna natezna trdnost je določena z uporabo redukcijskega faktorja, ki je podan v Preglednici 37 za posamezno vrsto vlakna in pogoje izpostavljenosti.

Preglednica 37: Redukcijski faktor izpostavljenosti za različne vrste vlaken in pogojev izpostavljenosti

Pogoji izpostavljenosti	Tip vlakna	Redukcijski faktor izpostavljenosti $C_E$
Notranje okolje	Karbon	0.95
	Steklo	0.75
	Aramid	0.85
Zunanje okolje	Karbon	0.85
	Steklo	0.65
	Aramid	0.75
Agresivno okolje	Karbon	0.85
	Steklo	0.50
	Aramid	0.70

Na trajnost in odpornost izpostavljenosti okolju vplivajo sestavni materiali FRP sistema. Redukcijski faktorji izpostavljenosti, ki so vidni v Preglednici 37 so ocenjeni na podlagi relativne trajnosti vsake vrste vlakna. Če se FRP sistemi nahajajo v blagem, milem okolju, kot so zaprti prostori, je vrednost redukcijskega faktorja blizu 1,0. V nasprotnem primeru, ko se FRP sistem nahaja v agresivnem okolju (dolgotrajna izpostavljenost visoki vlažnosti, ciklom zmrzovanja in odtajanja, slani vodi ali alkalnosti), je potrebno uporabiti nižji redukcijski faktor. V našem primeru smo uporabili faktor izpostavljenosti 1,0, saj kratkoročnega vpliva okolja ni, poleg tega tako dobimo rezultate na varnejši strani.

Projektna natezna trdnost  $f_{fu}$  je določena z enačbo:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (25)$$

kjer je:

$f_{fu}$ ... projektna natezna trdnost FRP [MPa]

$C_E$ ...redukcijski faktor izpostavljenosti

$f_{fu}^*$ ... natezna trdnost FRP materiala dana od proizvajalca [MPa]



Projektna deformacija pri pretrgu  $\varepsilon_{fu}$  je prav tako zmanjšana za faktor izpostavljenosti  $C_E$  in je določena z enačbo:

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (26)$$

kjer je:

$\varepsilon_{fu}$ ... projektna deformacija pri pretrgu FRP utrditve [mm/mm]

$\varepsilon_{fu}^*$  ... končna deformacija pri pretrgu FRP utrditve, ki je podana od proizvajalca [mm/mm]

FRP materiali, ki so sestavljeni iz ene vrste vlakna, usmerjenega pretežno v eni smeri, so praktično linearno elastični vse do porušitve. Njihov modul elastičnosti  $E_f$  se z izpostavljenostjo okolju in zgodovino obremenitev bistveno ne spreminja. Izračuna se ga v skladu z enačbo:

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (27)$$

kjer je:

$E_f$ ... natezni modul elastičnosti FRP [MPa]

V primeru, ko zidovje ne prenese sile v FRP sistemu, pride do porušitve stika. Za tipičen FRP sistem, ki je linearno elastičen vse do porušitve, bo stopnja deformacij v FRP sistemu narekovala stopnjo napetosti, ki se razvijejo v sistemu. Za preprečitev porušitve stika je postavljena omejitev na stopnji deformacije, ki se razvije v FRP laminatu. Maksimalna deformacija in sodelujoča napetost, ki jo FRP sistem lahko doseže pred porušitvijo stika, je definirana kot efektivna deformacija  $\varepsilon_{fe}$  in efektivna napetost  $f_{fe}$ .

Efektivna deformacija  $\varepsilon_{fe}$  in efektivna napetost  $f_{fe}$ , ki se uporabljata za projektiranje strižnega utrjevanja s FRP v ravnini zidovja, se lahko izračunata v skladu z enačbama:

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu}^* \leq C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (28)$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (29)$$

kjer je:

$\kappa_v$ ... redukcijski koeficient zaradi stika

Redukcijski koeficient zaradi stika je za strižne porušne mehanizme odvisen od FRP utrditvenega indeksa  $\omega_f$ , ki je definiran v enačbi:

$$\omega_f = \frac{1}{85} \frac{A_f E_f}{A_n \sqrt{f'_m}} \quad (30)$$

kjer je:

$\omega_f$ ... indeks FRP utrditve

$A_f$ ...prečni prerez FRP utrditve [ $\text{mm}^2$ ]  
 $A_n$ ...neto površina prereza malte/injekcijske mešanice  
 $f_m'$ ... tlačna trdnost zidu

Koeficient je za strižne porušne mehanizme enak za oba sistema, za FRP laminate in NSM FRP sisteme, in je dan z enačbo:

$$\kappa_v = \begin{cases} 0.40 & \text{za } \omega_f \leq 0.20 \\ 0.64 - 1.2 \omega_f & \text{za } 0.20 < \omega_f \leq 0.45 \\ 0.10 & \text{za } \omega_f > 0.45 \end{cases} \quad (31)$$

Zgornja enačba se uporablja samo v primeru, kadar sila na enoto palice oziroma utrditev v posamezni spojnici [N/palica], ki jo FRP sistem prenese na zidovje, izpolnjuje omejitve, ki so za NSM utrjevanje dane v naslednji enačbi:

$$p_{fv} = A_{f,palica} f_{fe} \leq 44,500 \text{ N/palico} \quad (32)$$

kjer je

$p_{fv}$ ...sila na enoto utrditve v posamezni spojnici  
 $A_{f,palica}$ ... površina FRP palice [ $\text{mm}^2$ ]  
 $f_{fe}$ ...efektivna stopnja napetosti v FRP utrditvi

Tako smo dobili vse potrebne parametre za izračun prispevka FRP utrditve  $V_f$  k strižni nosilnosti.  $V_f$  je dan z enačbo:

$$V_f = p_{fv} \frac{d_v}{s_f} \quad (33)$$

kjer je

$V_f$ ...prispevek FRPjev k nominalni strižni nosilnosti za s FRPji utrjene zidove  
 $s_f$ ...razdalja med utrditvami  
 $d_v$ ...efektivna globina zidu, določena z enačbo:

$$d_v = \min (H, L) \quad (34)$$

kjer je

$H$ ...višina zidu  
 $L$ ... dolžina zidu.

### 9.2.1 Določanje prispevka utrditve k strižni nosilnosti z bazaltnimi vlakni

Za določitev ustrezne utrditve je bilo potrebno najprej določiti njen prispevek k nosilnosti celotnega zidu utrjenega s FRP utrditvami. Od predhodnih preiskav smo že imeli podatek o strižni nosilnosti neutrjenega zidu, ki je znašala maksimalno 130 kN. Glede na to, da smo pri strižnem testu zaradi kapacitete bata omejeni s silo, ki jo lahko vnesemo v zid z 250 kN, smo si z rezervo zadali, da prispevek utrditve ni smel biti večji od 100 kN.

Omenjeno je, da smo prvotno za utrditev izbrali vrvico iz bazaltnih vlaken. Od proizvajalca smo pridobili potrebne tehnične podatke za izračun. Prikazani so v Preglednici 38.

Preglednica 38: Tehnični podatki vrvice z bazaltnimi vlakni

Vrsta vlakna	Visoko odporen bazalt
Specifična gostota [g/ cm <sup>3</sup> ]	2,60
Natezna trdnost [N/mm <sup>2</sup> ]	4840
Natezni modul elastičnosti [GPa]	89
Raztezek pri pretrgu [%]	2

Proizvajalec vrvice z bazaltnimi vlakni je ponudil vrvico premera 10 mm. S pomočjo posredovanih tehničnih podatkov smo preverili njen prispevek k celotni strižni nosilnosti. Ta je bil zaradi velike natezne trdnosti vrvice velik oz. za naš primer prevelik. Rezultati so prikazani v Preglednici 39.

Preglednica 39: Prispevek  $V_f$  k strižni nosilnosti s premerom vrvice z bazaltnimi vlakni 10 mm

Parametri	Shema 1	Shema 2
Tlačna trdnost zidu $f'_m$ [Mpa]	6	6
Število fug z utrditvami	10	5
Število utrditev v fugi	1	2
Premer vrvice $d_b$ [mm]	<b>10</b>	<b>10</b>
$A_{f,utrditve}$ [mm <sup>2</sup> ]	78,5	78,5
$f_{fu}^*$ [MPa]	4840	4840
$\epsilon_{fu}^*$	0,02	0,02
$C_E$	1	1
$E_f$ [MPa]	242000	242000
$W_f$	2,28	2,28
$k_v$	0,1	0,1
$\epsilon_{fe}$	0,002	0,002
$f_{fe}$ [MPa]	484	484

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 39

$p_{fv}$ [N/utrditev v spojnicij]	38013	44500
$d_v$ [mm]	1000	1000
$s_f$ [mm]	136	272
$V_f$ [kN]	<b>279,5</b>	<b>163,6</b>

Variirali smo število fug z utrditvami in število utrditev v eni fugi. Naši zidovi so bili zgrajeni iz enajstih vrst, vsak zid je vseboval deset fug. Predpostavili smo, da je utrditev v vsaki fugi, kar pomeni, da je medsebojna razdalja utrditev po zidu 136 mm. Ta predpostavka se je izkazala za pretirano, saj bi z vrstico iz bazaltnih vlaken v vsaki fugi dosegli prispevek utrditve kar 280 kN. Posledično je bila nosilnost s po dvema utrditvama v vsaki fugi še toliko večja. V nadaljevanju smo predpostavili utrditve v vsaki drugi fugi, kar pomeni, da bi bile na razmiku 272 mm. Zanimivo, da tudi ta varianta ni bila ustrezna, prispevek utrditve je bil še vedno nekoliko prevelik. Prišli smo do zaključka, da bi bilo potrebno zmanjšati premer vrvice. Možno bi bilo seveda tudi zmanjšati število utrditev in s tem povečati njihovo medsebojno razdaljo, vendar se nam to ni zdelo smiselno, saj bi tako zid utrdili samo s tremi utrditvami. Pri tem smo upoštevali, da se količina utrditev za celotni zid ni spreminjala. Če bi imeli torej enojne utrditve v vsaki fugi (10 utrditev na razdalji 136 mm), bi na razdalji 272 mm (vsaka druga fuga) imeli po dve utrditvi (2 x 5 utrditev na razdalji 272 mm).

Preverili smo prispevek utrditve s premerom vrvice 6 mm. Rezultati so prikazani v Preglednici 40.

Preglednica 40: Prispevek  $V_f$  k strižni nosilnosti s premerom vrvice z bazaltnimi vlakni 6 mm

Parametri	Shema 1	Shema 2
Tlačna trdnost zidu $f'_m$ [MPa]	6	6
Število fug z utrditvami	10	5
Število utrditev v fugi	1	2
Premer vrvice $d_b$ [mm]	<b>6</b>	<b>6</b>
$A_{f,utrditve}$ [mm <sup>2</sup> ]	28,3	28,3
$s_f$ [mm]	136	272
$V_f$ [kN]	<b>100,6</b>	<b>100,6</b>

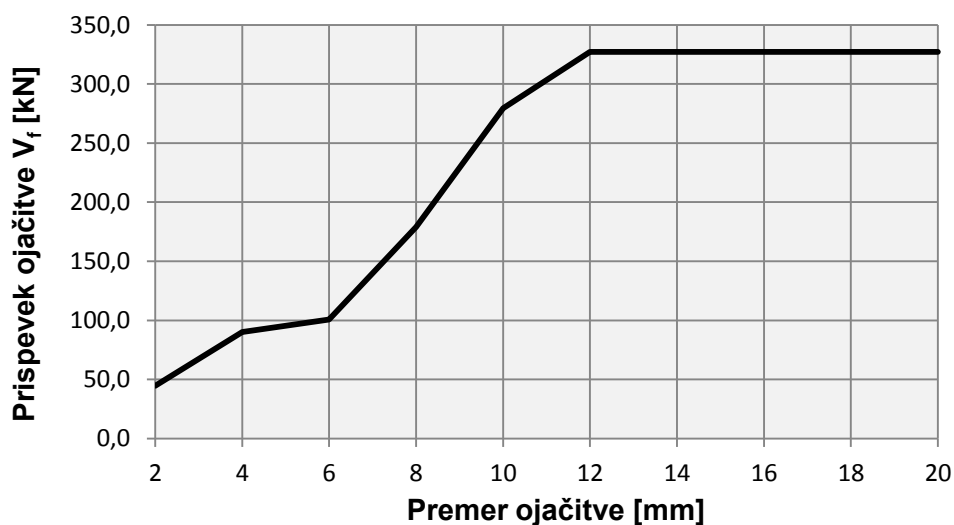
Opazimo lahko, da se je prispevek utrditve  $V_f$  zmanjšal za več kot dvakrat. Obe shemi lahko označimo kot primerni, saj prispevek utrditve znaša v obeh primerih približno 100 kN.

## 9.2.2 Variiranje različnih parametrov pri vrvicah z bazaltnimi vlakni

Zanimalo nas je tudi, kako različni parametri, kot so premer vrvice, razdalja med utrditvami in dolžina zidu, vplivajo na prispevek utrditve  $V_f$  k strižni nosilnosti. Rezultati so prikazani v naslednjih preglednicah (od Preglednice 41 do Preglednice 43).

Preglednica 41: Variiranje premera vrvice z bazaltnimi vlakni

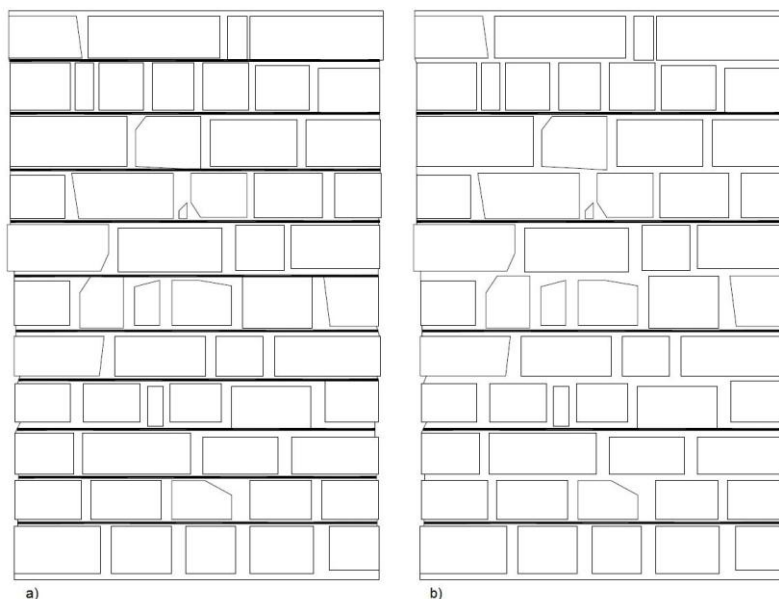
Premer vrvice $d_b$ [mm]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$V_f$ [kN]	44,7	90,3	100,6	178,9	279,5	327,2	327,2	327,2	327,2	327,2



Grafikon 19: Prispevek utrditve  $V_f$  v odvisnosti od premera utrditve

Iz Grafikona 19 je razvidno, da prispevek utrditve narašča vse do premera 12 mm, kjer je njen prispevek maksimalen možni, saj z večjim premerom utrditve (nad 12 mm) prispevek utrditve ostane enak. To je posledica omejitve sile na enoto palice  $p_{fv}$ , ki znaša 445 kN. V primerih, kjer je premer večji od 12 mm, je vrednost 445 kN prekoračena. Ker je to največja dovoljena vrednost, je v vseh nadaljnjih premerih vrednost  $p_{fv}$  enaka 445 kN in posledično je enak tudi prispevek utrditve.

Variirali smo tudi medsebojno razdaljo med utrditvami. V primeru utrditev v vsaki fugi je medsebojni razmik med utrditvami 136 mm.

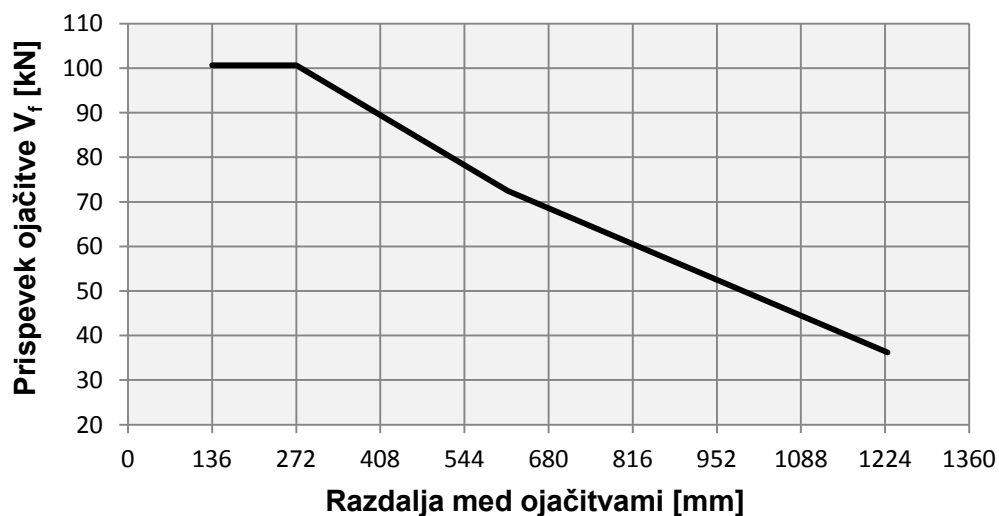


Slika 58: Prikaz zidov z utrditvami: a) medsebojna razdalja utrditev 136 mm b) medsebojna razdalja utrditev 272 mm

Pri premeru utrditve 6 mm znaša prispevek utrditev pri tej razdalji približno 100 kN. Pri medsebojni razdalji utrditev 272 mm je prispevek ostal enak, nato pa se je pričel postopoma zmanjševati. To je prikazano tudi na Grafikonu 20.

Preglednica 42: Variiranje medsebojne razdalje med vrvicami z bazaltnimi vlakni

$s_f$ [mm]	136	272	1228
$V_f$ [kN]	100,6	100,6	36,2

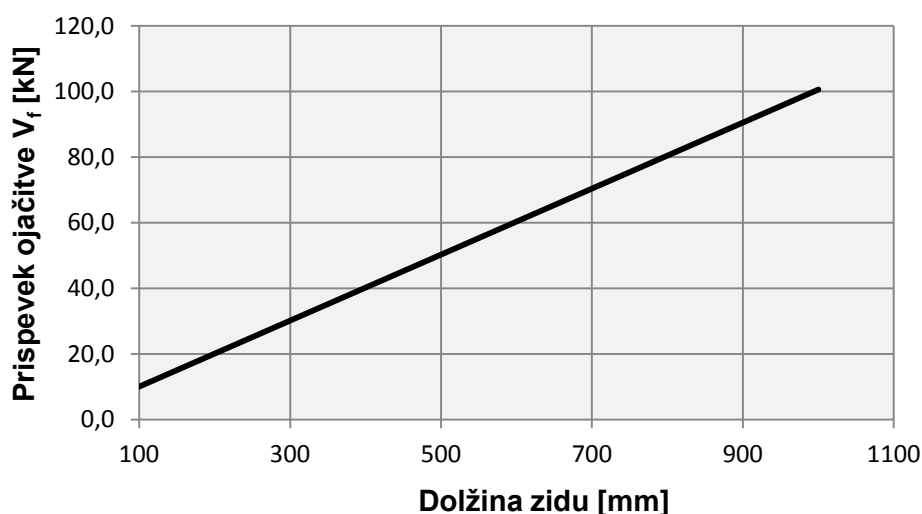


Grafikon 20: Prispevek utrditve  $V_f$  pri vrvicah iz bazaltnih vlaknen v odvisnosti od medsebojne razdalje utrditve

Nazadnje smo variirali še dolžino zidu. Na Grafikonu 21, ki prikazuje rezultate prispevka utrditve v odvisnosti od dolžine zidu, je viden linearni odnos med obema količinama, kar je razvidno tudi iz enačbe  $V_f = p_{fv} \frac{d_v}{s_f}$  (33) za prispevek utrditve  $V_f$ . Torej se prispevek utrditve linearno povečuje s povečevanjem dolžine zidu.

Preglednica 43: Variiranje dolžine zidu pri izbranih bazaltnih vlaknih

$d_v$ [mm]	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
$V_f$ [kN]	100,6	90,6	80,5	70,4	60,4	50,3	40,2	30,2	20,1	10,1



Grafikon 21: Prispevek utrditve  $V_f$  pri vrvici iz bazaltnih vlaken v odvisnosti od dolžine zidu

### 9.2.2 Nov izbor vrvice

Zaradi prevelikega prispevka  $V_f$  pri vrvici z bazaltnimi vlakni, ki smo ga dobili pri izračunu po ACI, smo se odločili za vrvico s steklenimi vlakni, ki ima nekoliko slabše materialne karakteristike (Preglednica 44) in njen prispevek ne bi smel biti tako velik.

Preglednica 44: Tehnični podatki vrvice s steklenimi vlakni

Vrsta vlakna	E - steklo
Specifična gostota [ $\text{g/cm}^3$ ]	2,62
Natezna trdnost [ $\text{N/mm}^2$ ]	2560
Natezni modul elastičnosti [GPa]	80,7
Raztezek pri pretrgu [%]	3-4



Slika 59: Vrvica s steklenimi vlakni, ki smo jo vgradili v naše zidove

Po izračunih, ki so prikazani na prejšnjih straneh, smo ugotovili, da bi pri vrvici iz bazaltnih vlaken potrebovali premer vrvice 6 mm. Žal tega premera pri proizvajalcu nismo mogli pridobiti, kljub temu, da so ga imeli v prodajnem katalogu, zato smo se odločili za nov tip vrvice – vrvico iz steklenih vlaken.

Ponovno smo pričeli z izračunom za premer vrvice 10 mm, kjer smo pričakovano dobili prevelik prispevek utrditev k strižni nosilnosti, da bi ta premer uporabili pri samem utrjevanju. Rezultati so prikazani v Preglednici 45.

Preglednica 45: Prispevek  $V_f$  k strižni nosilnosti s premerom vrvice s steklenimi vlakni 10 mm

Parametri	Shema 1	Shema 2
Tlačna trdnost zidu $f'_m$ [MPa]	6	6
Število fug z utrditvami	10	5
Število utrditev v fugi	1	2
Premer vrvice $d_b$ [mm]	<b>10</b>	<b>10</b>
$A_{f,utrditve}$ [mm <sup>2</sup> ]	78,5	78,5
$s_f$ [mm]	136	272
$V_f$ [kN]	<b>147,8</b>	<b>147,8</b>

Poizkusili smo še s premerom vrvice 6 mm, ki pa je dal presenetljive rezultate (Preglednica 46), saj se je računsko prispevek utrditve celo povečal.

Preglednica 46: Prispevek  $V_f$  k strižni nosilnosti s premerom vrvice s steklenimi vlakni 6 mm

Parametri	Shema 1	Shema 2
Tlačna trdnost zidu $f'_m$ [MPa]	6	6
Število fug z utrditvami	10	5

se nadaljuje...



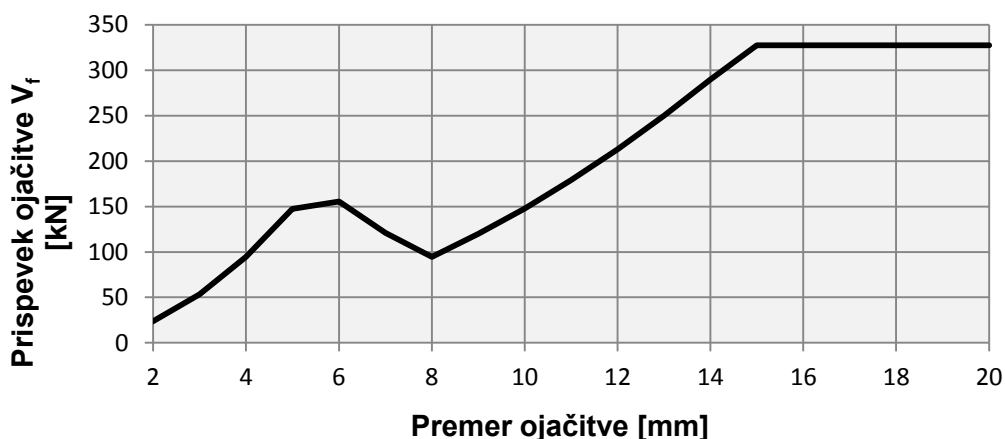
...nadaljevanje Preglednice 46

Število utrditev v fugi	1	2
Premer vrvice $d_b$ (mm)	<b>6</b>	<b>6</b>
$A_{f,utrditve}$ (mm <sup>2</sup> )	28,3	28,3
$s_f$ (mm)	136	272
$V_f$ (kN)	<b>155,6</b>	<b>155,6</b>

Izračunani rezultati niso bili smiselni. Malo je verjetno, da bi z manjšim premerom vrvice več prinesli k strižni nosilnosti. Glede na to, da smo pri izračunu z bazaltno vrvico premera 6 mm dobili približno 100 kN prispevka k strižni nosilnosti, bi bilo smiselno, da bi bil ta prispevek pri vrvici iz steklenih vlaken manjši, saj ima skoraj 2 krat manjšo natezno trdnost od vrvice iz bazaltnih vlaken.

#### 9.2.4 Variiranje različnih parametrov pri vrvicah s steklenimi vlakni

Ponovno smo variirali premer vrvice, razdaljo med utrditvami in dolžino zidu.



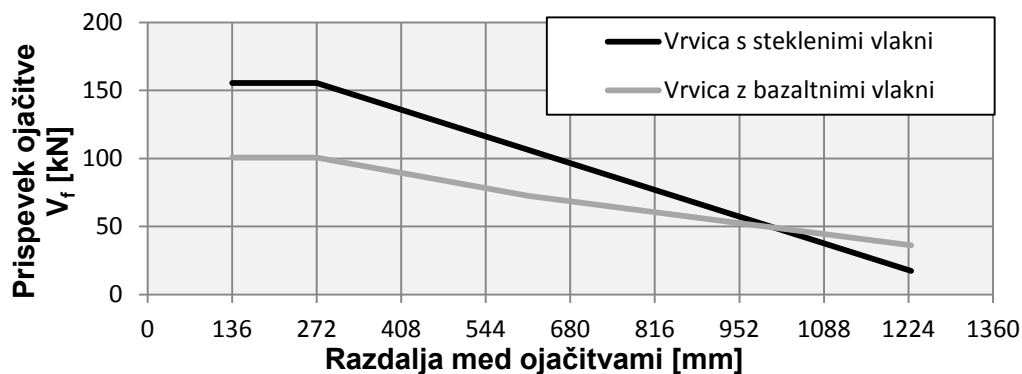
Grafikon 22: Prispavek utrditve  $V_f$  v odvisnosti od premera utrditve

Opazimo lahko nesmiseln grafikon. Z večanjem premera utrditve bi moral naraščati tudi njen prispevek k strižni nosilnosti. Do premera 6 mm se prispevek utrditve smiselno povečuje nad 150 kN, nato pade pod 100 kN. Razlog je v vrednosti  $p_{fv}$ , ki je v pri vrednosti 7 mm oz. 8 mm v primerjavi z vrednostjo pri premeru 6 mm padla. Nižja vrednost  $p_{fv}$  je posledica manjše vrednosti, ki ga da produkt števil utrditev v fugi, prereza utrditve in efektivne stopnje napetosti v FRP utrditvi  $f_{fe}$ .

Ponovno smo variirali razdaljo med utrditvami, kjer smo še vedno upoštevali enako število utrditev po zidu. Torej, če smo imeli utrditve v vsaki spojnici, to je na razdalji 136 mm, je bilo skupaj 10 utrditev, v kolikor pa je bila razdalja med utrditvami 272 mm, smo upoštevali 2 utrditvi na spojnico. V tem primeru smo imeli še vedno skupaj 10 vrvic. Rezultati so prikazani v Preglednici 47.

Preglednica 47: Variiranje medsebojne razdalje med vrvicami s steklenimi vlakni

$s_f$ [mm]	136	272	1228
$V_f$ [kN]	155,6	77,8	17,2



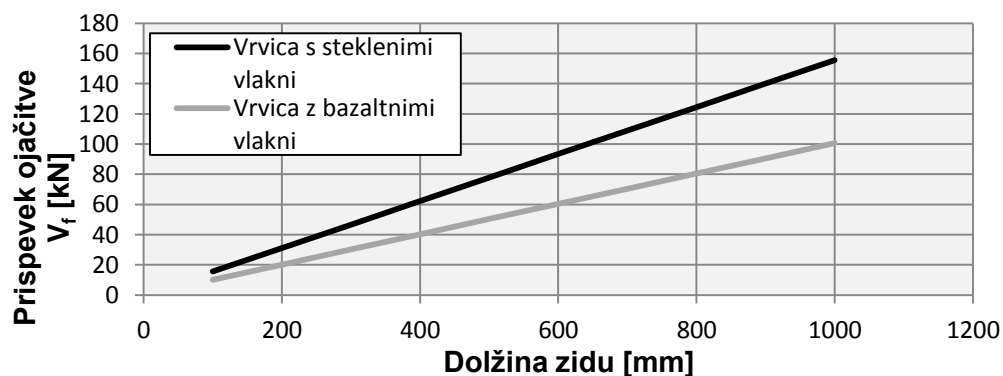
Grafikon 23: Prirpevek utrditve  $V_f$  pri vrvicah iz steklenih in bazaltnih vlaken v odvisnosti od medsebojne razdalje utrditve

Na Grafikonu 23 je vidna primerjava vrvic s steklenimi in bazaltnimi vlakni, kjer smo variirali medsebojno razdaljo utrditev. Prirpevek utrditve k strižni nosilnosti je skoraj ves čas večji pri vrvici s steklenimi vlakni, kljub temu, da imajo nižjo natezno trdnost od bazaltnih. Sklepamo, da k večjemu prirpevku prispeva višja vrednost raztezka pri pretrgu.

Podobno je bilo tudi pri primerjavi vrvic pri variiranju dolžine zidu, ko je bil prirpevek utrditve  $V_f$  vedno večji pri vrvici iz steklenih vlaken. Rezultati so prikazani v Preglednici 48.

Preglednica 48: Variiranje debeline zidu pri izbiri steklenih vlaken

$d_v$ [mm]	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
$V_f$ [kN]	155,6	140,0	124,5	108,9	93,4	77,8	62,2	46,7	31,1	15,6



Grafikon 24: Prirpevek utrditve  $V_f$  pri vrvicah iz steklenih in bazaltnih vlaken v odvisnosti od dolžine zidu

### **9.3 Povzetek**

Optimizacijo utrditve smo izvedli z izračuni, ki so navedeni v priročniku ACI [43]. Za vrvice iz bazaltnih vlaken so bili izračuni ustrezni, medtem, ko je pri vrvici s steklenimi vlakni prišlo do nenavadnih odstopanj. Zaupali smo svojemu razmišljanju in nazadnje uporabili vrvice s steklenimi vlakni manjšega premera, čeprav jih po dobljenih izračunih ne bi bilo smiselno vgrajevati. Njihov prispevek utrditve je bil še večji, kot pri vrvicah iz bazaltnih vlaken, pri katerih smo dobili vrednost prispevka približno 100 kN, kolikor je bilo tudi blizu naši zgornji meji zmogljivosti preizkuševalne opreme v laboratoriju.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## 10 PREGLED UTRJEVANJ IZ LITERATURE

V literaturi je mogoče zaslediti veliko napisanega na temo utrjevanj in preizkusov njihove učinkovitosti različnih zidov; kamnitih, opečnatih ali betonskih.

### 10.1 Gostič, Simonič, Bosiljkov

V članku In-situ preiskave opečnih zidov utrjenih s karbonskimi trakovi [44] avtorji navajajo rezultate strižnih testov na opečnih zidovih z različnimi razporeditvami trakov. Zidovi so bili grajeni iz polnih opečnatih zidakov in povezani s šibko podaljšano apneno malto. Debelini zidov sta bili različni, in sicer 30 cm oz. 45 cm, širina zidov je bila 100 cm ter višina 200 cm. Za utrditev so bili uporabljeni karbonski trakovi širine 10 cm, ki so jih na obe strani zidu nalepili s pomočjo epoksidne smole. Testirali so obnašanje zidov z dvema načinoma razporeditve trakov: diagonalno in kombinacijo vertikalnih trakov ob robovih ter horizontalnih trakov, ki so objeli zid, prikazano na Sliki 60. Preizkušanci so bili obremenjeni s ciklično horizontalno obtežbo ob konstantni vertikalni obremenitvi.

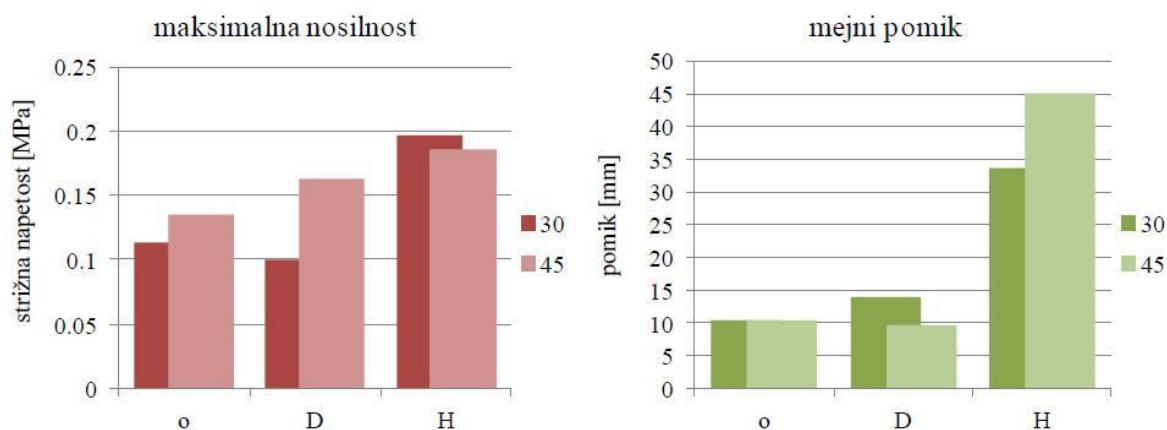


Slika 60: Diagonalna in kombinirana razporeditev karbonskih trakov [44]

Pri preiskavi so bili zidovi simetrično vpeti. Za primerjavo so strižno preiskali tudi neutrjeni zid, pri katerem so se prve razpoke pojavile pri 70 do 80 % maksimalne strižne sile, pri čemer je dosegel pomik od 2 do 3 mm. Do porušitve je prišlo zaradi razvoja diagonalnih razpok, pomik na koncu je znašal 12 mm. Maksimalna sila je bila pri zidu debeline 30 cm dosežena pri 34 kN, medtem ko pri zidu debeline 45 cm 61 kN. Mejni pomik (t.j. pomik, pri katerem je nosilnost padla pod 80% maksimalne nosilnosti) je znašal 10 mm.

Pri diagonalno utrjenih zidovih so opazili le več manjših razpok. Prva diagonalna razpoka se je pojavila pri 60 % maksimalne sile oz. pri 5 do 8 mm pomika. Na konkavnih delih zidu je prišlo do odlepljanja trakov. Maksimalna sila, ki jo je dosegel zid debeline 30 cm, je bila 30 kN, kar je celo manj od neutrjenega zidu. Pri zidu debeline 45 cm je bila maksimalna sila 73 kN.

Za bolj učinkovito se je izkazala utrditev s kombinacijo horizontalnih in vertikalnih trakov. Pri tem je prišlo do porušitve zaradi tlačnega drobljenja opeke znotraj FRP objetja in zaradi nastanka diagonalnih razpok. Maksimalna sila pri zidu debeline 30 cm je bila dosežena pri pomiku 34 mm in je znašala 59 kN, pri zidu debeline 45 cm pa je bila dosežena pri pomiku 45 mm in je znašala 84 kN. Tudi tukaj je prišlo do lokalnega odlepljanja in trganja karbonskih trakov.



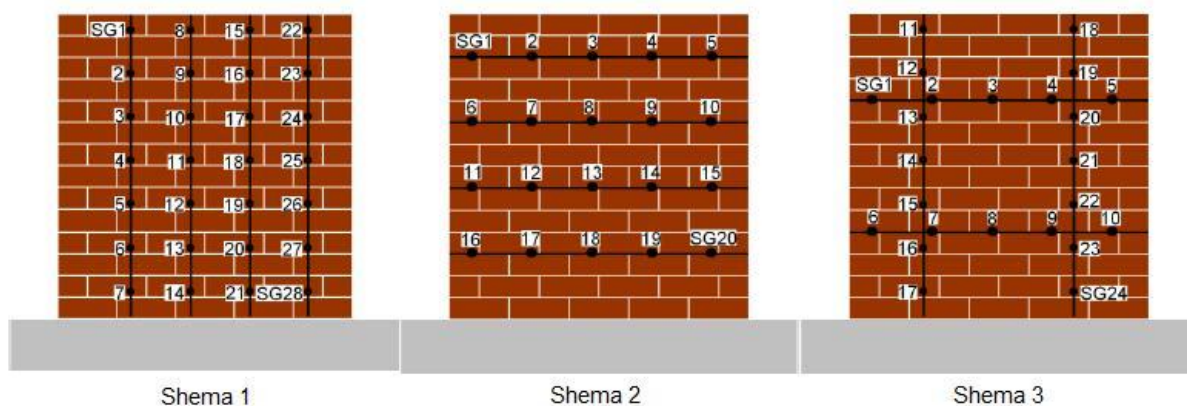
Grafikon 25: Prikaz učinkovitosti metod utrjevanja [44]

Opomba: o pomeni osnovni, primerjalni zid, D predstavlja zid z diagonalno razporeditvijo trakov, H zid s kombinacijo vertikalnih in horizontalnih trakov

S kombinacijo horizontalnih in vertikalnih trakov so dosegli kar 154 % nosilnost osnovnega neutrnjenega preizkušanca. Povečanje mejnega pomika pri tem načinu utrditve je bilo skoraj 4 krat (380%) večje od primerjalnega, medtem ko je bilo pri utrditvi z diagonalnimi trakovi večje za 113%. Slednji način utrditve se ni izkazal za najboljšega, saj je prišlo do prezgodnjega odtrganja trakov s površine zidu. Sicer pa utrditev s trakovi avtorji navajajo za primerno s stališča reverzibilnosti ukrepa, saj so trakovi lahko snemljivi in zato primerni za utrjevanje stavb kulturne dediščine.

## 10.2 Konthesingha, Masia, Petersen, Page

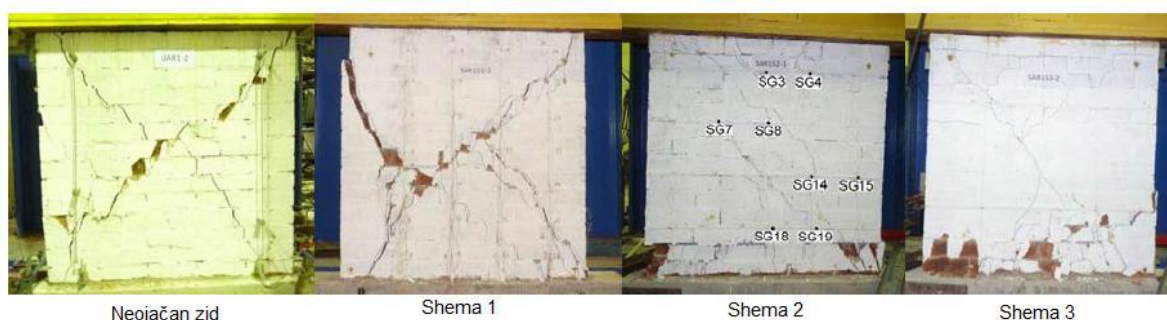
Avtorji v članku [45] obravnavajo obnašanje opečnatih zidov, utrjenih s FRP trakovi. Zidovi so grajeni iz polnih zidakov in povezani z malto v razmerju cement:apno:pesek 1:1:6. Višina in širina zidov je 120 cm, debelina pa 11 cm. Obravnavali so tri različne postavitve trakov, in sicer trakove orientirane v vertikalni smeri, v horizontalni smeri in s kombinacijo vertikalnih in horizontalnih trakov, dva zidova so pustili, za primerjavo, neutrnjena. Preizkušanci so bili obremenjeni s ciklično horizontalno obtežbo ob konstantni vertikalni obremenitvi.



Slika 61: Tri različne razporeditve trakov [45]

Vsaka od shem je vsebovala enako količino FRP materiala, s tem, da so bili zidovi utrjeni samo z ene strani, saj je v praksi običajno težko utrditi zid na obeh straneh.

Pri vseh treh shemah je prišlo do velikih pomikov, v povprečju so bili več kot 133% večji od primerjalnega, neutrjenega zidu. Prišlo je tudi do povečanja duktilnosti, v povprečju se je v primerjavi z osnovnim zidom povečala za več kot 108%. Do porušitve pri osnovnem zidu je prišlo zaradi diagonalnih razpok, poleg tega je bil na dnu zidu opažen minimalen zdrs. Pri zidu z vertikalno razporeditvijo trakov je do porušitve prav tako prišlo zaradi razvoja diagonalnih razpok. Tudi tukaj je prišlo do minimalnega zdrsa pri dnu (2,5 mm v vsaki smeri). Pomiki so se v primerjavi z osnovnim zidom povečali za 75%, pri horizontalni postavitvi trakov za 133% ter pri kombinaciji za kar 242%. Slednja je dosegla tudi najvišji faktor duktilnosti. Pri shemi 2, kjer so trakovi razporejeni horizontalno, je prišlo do porušitve zaradi zdrsa in ne zaradi nastanka diagonalnih razpok. Pri shemi 3 pa so porušitev prvotno povzročile diagonalne razpoke ob prisotnosti minimalnega drobljenja zidu na dnu, kar je vidno tudi na Sliki 62.



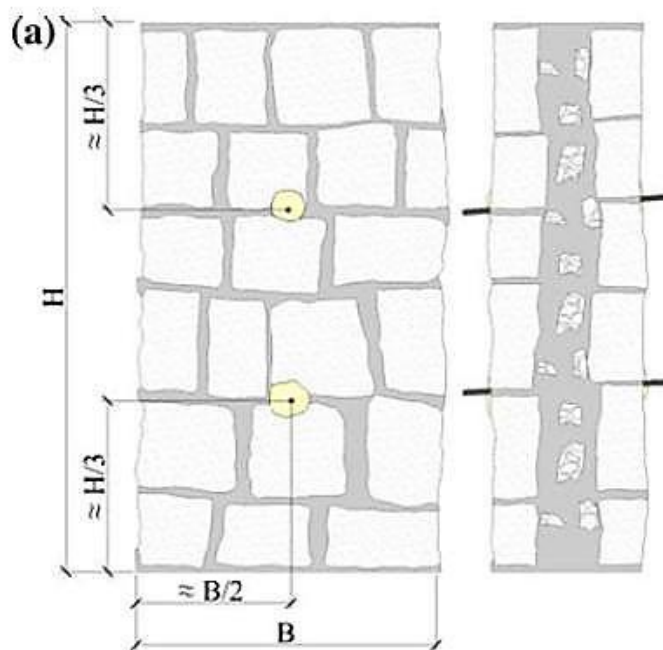
Slika 62: Porušni mehanizmi pri različnih shemah utrjevanja zidov [45]

Od vseh shem se je najboljšo obnašala shema 3 (kombinacija vertikalnih in horizontalnih trakov). Pri nobeni od shem ni prišlo do pretrganja trakov.

### 10.3 Oliveira, Silva, Garbin, Lourenço

Avtorji [46] so prikazali učinek treh metod utrditve troslojnih kamnitih zidov na tlačno nosilnost, in sicer utrjevanje s prečno povezavo s pomočjo palic iz steklenih vlaken (GFRP), injektiranje in kombinacijo injektiranja ter prečnih povezav. Zidovi so bili dimenzij  $110 \times 60 \times 30 \text{ cm}^3$  (višina  $\times$  širina  $\times$  debelina). Zidovi, ki so bili utrjeni s palicami, so bili prečno povezani z GFRP palicami premera 10 mm na tretjini višine zidu. Po dve palici sta položeni v odprtini, ki sta bili izvrtani po debelini zidu. Prečna povezava zunanjih plasti je bila namenjena izboljšanju povezave med plastmi z direktno povezavo med njimi. Omogoča zmanjšanje krhkega odziva in omejuje prečne deformacije zidu.

Zidaki so bili grajeni iz granitnih kamnov, med seboj so povezani z apneno malto, kjer je vezivo predstavljalo hidravlično apno in metakaolin v razmerju 1:4. Vezivo in pesek sta bila v razmerju 1:3, vodovozivno razmerje je znašalo 0,80; 10% mase veziva je predstavljal pucolan.



Slika 63: Prikaz prečno povezanega zidu z GFRP palicami [46]

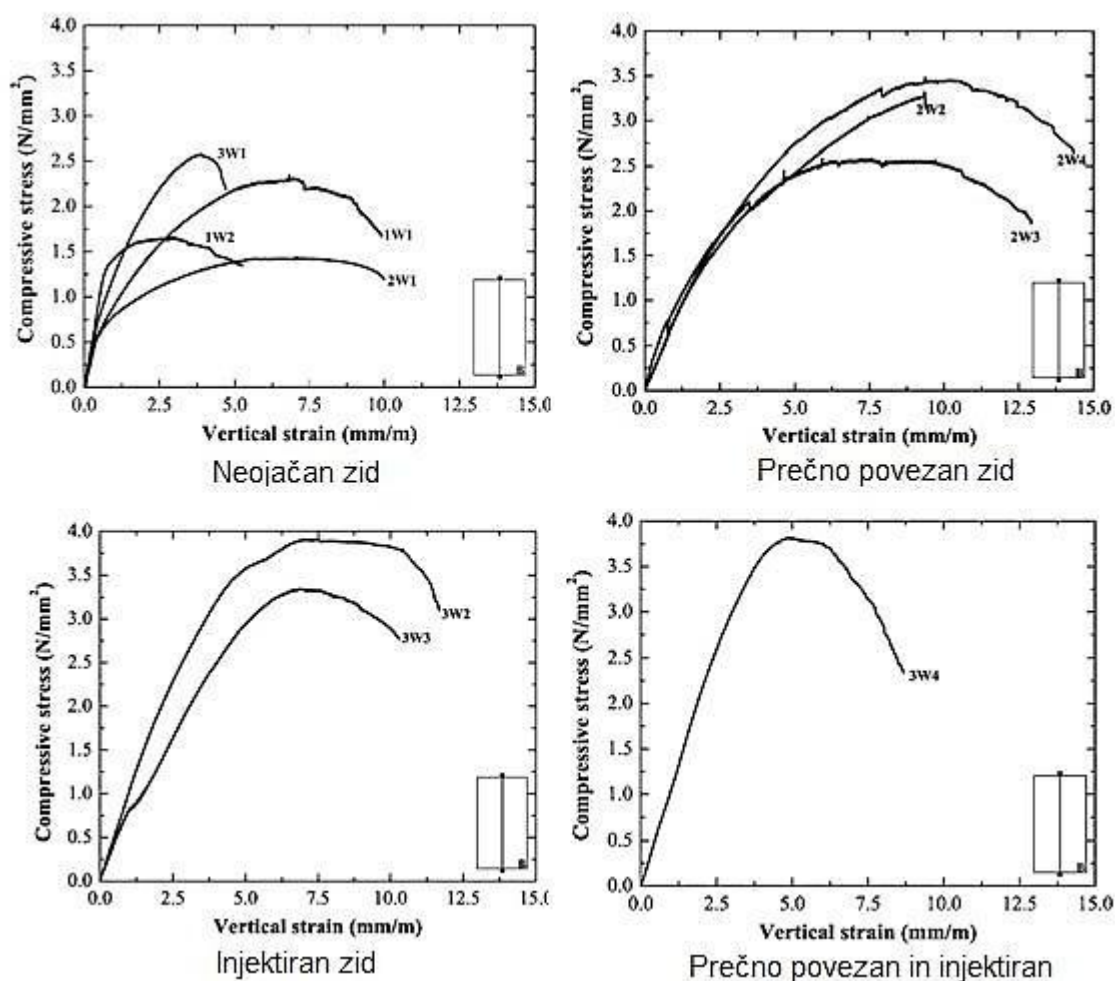
Najslabše med utrjenimi zidovi se je obnašal zid s prečno povezavo, kjer se je tlačna trdnost v primerjavi z osnovnim zidom povečala za 55%, pri injektiranem zidu za 80% ter pri zidu, ki je bil injektiran in povezan, za 90%.

Največji vertikalni in horizontalni pomik je dosegel prečno povezan zid. Pri injektiranem zidu se je horizontalni pomik v primerjavi z neutrim zidom zmanjšal za 6%, medtem ko pri prečno povezanem in injektiranem zidu, za kar 68,5%.



Preglednica 49: Rezultati povprečne tlačne trdnosti in vertikalnih  $\varepsilon_{V,povpr}$  ter horizontalnih deformacij  $\varepsilon_{H,povpr}$  različno utrjenih zidov [46]

Tip zidu	$f_{c,povpr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_{V,povpr}$ [mm/m]	$\varepsilon_{H,povpr}$ [mm/m]
Neutrjen	2	5,73	4,54
Prečno povezan	3,1	8,21	7,01
Injektiran	3,6	6,93	4,26
Prečno povezan in injektiran	3,8	4,86	1,43



Grafikon 26: Prikaz tlačnih napetosti v odvisnosti od vertikalnih deformacij [46]

Na Grafikonu 26 so prikazani grafi  $\sigma$  v odvisnosti od  $\varepsilon$ . Iz grafov je razvidno, da so bili prečno povezani zidovi najbolj duktilni, najvišjo tlačno trdnost pa dosežeta injektiran in kombiniran zid. Največjo napetost pred porušitvijo doseže prečno povezan zid. Poleg povečanja tlačne trdnosti v primerjavi z osnovnih zidom so vsi trije načini utrditve povečali tudi začetno togost zidov, in sicer prečno povezan zid za 13%, injektiran za 16% in kombiniran za 104%. Torej je v vseh pogledih injektiran in prečno povezan zid prispeval največ k izboljšanju rezultatov. Prečne povezave imajo tudi pomanjkljivost, namreč v območjih izven svojega delovanja ne nadzorujejo ločevanja plasti zidu, kar se odraža v lokalnih porušitvah, ki so odgovorne za

globalno porušitev zidu. Poleg tega so pri neometanih zidovih vidne in pri prisotnosti neodstranljivih dekorativnih elementov neuporabne [46].

#### **10.4 Valluzzi, Porto, Modena**

V članku [47] so bile obravnavane tri različne metode utrjevanja troslojnih kamnitih zidov. Zidovi dimenzij 140 x 80 x 50 cm<sup>3</sup> (višina x širina x debelina) so bili ali injektirani ali so stike med kamni ponovno zapolnili z malto (angl. "repointing") ali pa so uporabili prečno povezavo, ki povezuje zunanja sloja. Zidaki so bili med seboj povezani z malto, kjer sta vezivo predstavljala naravno hidravlično apno in apneno testo v razmerju 1:3, razmerje med vezivom in peskom je bilo prav tako 1:3, vodovezivno razmerje pa 0,50 (vsa razmerja so volumska). Zidovi so bili tlačno preizkušeni.

Pri injektiranih zidovih je bila uporabljena apnena injekcijska mešanica. Injektiranje se je izkazalo za zelo učinkovito pri izboljšanju mehanskih lastnosti, medtem ko imata ostali dve metodi manjši vpliv na trdnost, a lahko odpravita krhko porušitev (prečna povezava) in izboljšata obnašanje zidu (prefugiranje, angl. "repointing" ). Tlačna trdnost injektiranih zidov se je v primerjavi z osnovnim zidom povečala za 35%, pri prefugiranju, prečni povezavi in kombinaciji teh dveh pa ni bilo bistvenega povečanja tlačne trdnosti in togosti v primerjavi z neutrjenimi zidovi, razen v kombinaciji z injektiranjem. Pri vseh je bilo zaznati zmanjšanje deformacij. Pri prefugiranju in prečno povezanih zidovih so se prečne deformacije pri najvišji napetosti povprečno zmanjšale za 50%.

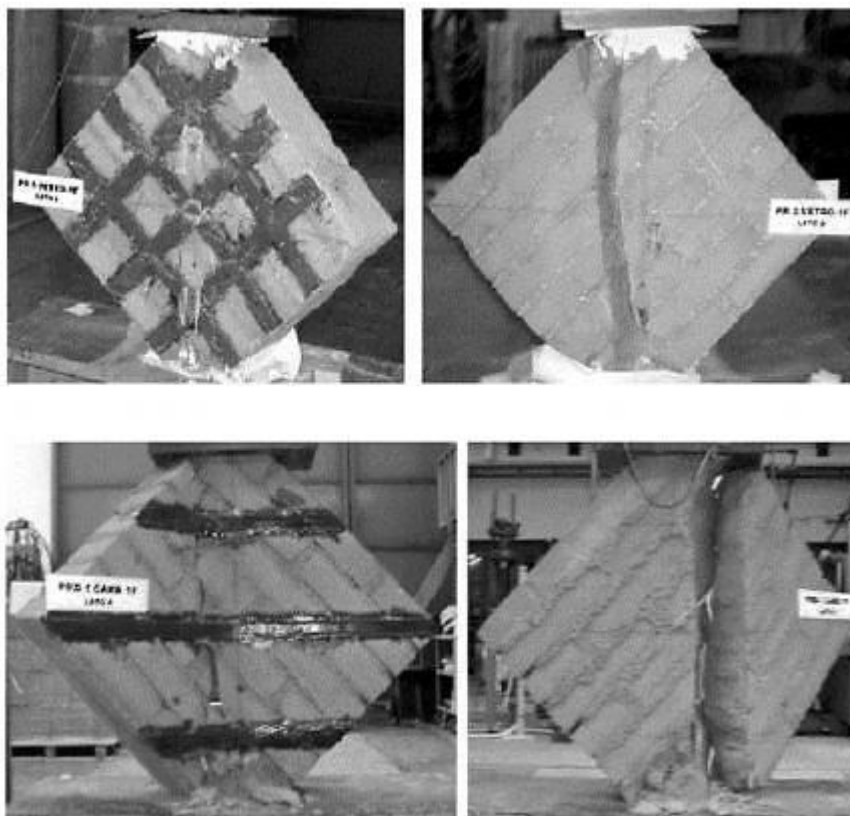
Injektiranje se je izkazalo za najbolj učinkovito tudi pri homogenizaciji plasti, povišanju končne nosilnosti (več kot 50% osnovnega zidu) in izboljšanju povezave med plastmi zidu. Prefugiranje in prečna povezava zidov sta bila najbolj učinkovita predvsem pri zmanjšanju horizontalnih deformacij, v kombinaciji z injektiranjem izboljšata obnašanje zidu.

Pri injektiranih zidov je bilo tudi ugotovljeno, da trdnost injekcijske mešanice ne vpliva bistveno na končno tlačno trdnost zidov, saj pri uporabi visoko trdnostnih injekcijskih mešanic zid ni sposoben izkoristiti svojega celotnega prispevka trdnosti. Porušitev teh zidov je bila bolj krhka, kar je bilo dokazano z zelo nizkimi vrednostmi tlačnih deformacij tik pred poružitvijo.

#### **10.5 Valluzzi, Tinazzi, Modena**

Avtorji so v članku [48] obravnavali panele, grajene iz opek, katere so utrdili s FRP laminati in so vsebovali bodisi karbonska bodisi steklena oz. polivinil alkoholna vlakna. Opečnati paneli so bili dimenzij 51 x 51 x 12 cm<sup>3</sup> (višina x širina x debelina), zidaki so bili povezani z malto iz anorganskega veziva, ki je bila s peskom v razmerju 1:3, vodovezivno razmerje je znašalo 0,70. Utrjeni paneli so bili podvrženi diagonalnemu tlačnemu preizkusu.

Obravnavali so dve različni postavitvi utrditev: trakove, razporejene v obliki mreže, in diagonalno nalepljene trakove, orientirane ortogonalno na obremenjeno diagonalno. V obeh primerih je bila uporabljena enaka količina utrditev.



Slika 64: Trakovi, razporejeni v obliki mreže in ortogonalno na obremenjeno diagonalno, ter porušitev zidkov [48]

Pri neutrenih panelih je prišlo do razcepitve panela vzdolž obremenjene diagonale. Povprečna porušna obtežba je znašala 100,7 kN.

Pri enostransko utrjenih panelih je prišlo do razcepitve panela z vidno diagonalno razpoko. Zanimivo je bilo, da je bila končna porušna sila pri mnogih panelih manjša od referenčne vrednosti. Zaradi čistega upogiba, ki se je zgodil vzdolž neutrene diagonale, so bile glavne poškodbe panela skoncentrirane na neutrjeni strani. Upogib je bil posledica vidne razlike togosti na nasprotnih straneh, posledice nesimetričnega utrjevanja. Višjo učinkovitost med enostransko utrjenimi paneli je pokazala diagonalna razporeditev trakov in ne mrežna.

V vseh primerih je prišlo do nenadnega zmanjšanja sodelovanja med utrditvijo in panelom, ali zaradi razslojevanja (luščenja) površinskih delov panela ali pretrga FRP trakov. Zidovi, utrjeni z mrežno razporeditvijo trakov, so kazali poškodbe na širšem območju panela, medtem ko se je v vseh diagonalno utrjenih panelih pojavila čista razcepitvena razpoka. Povečanje končne trdnosti je bilo vidno v vseh primerih, le panel, utrjen s karbonskimi FRP

trakovi, je bil zaradi razslojevanja resno poškodovan. Nenadna porušitev neutrjenih panelov je bila odpravljena, še posebej z mrežno razporeditvijo utrditev.

K strižni nosilnosti panelov je izmed obeh razporeditev trakov več prinesla diagonalna razporeditev, vseeno pa so pri mrežni razporeditvi boljše prerazporejene napetosti po panelu, ki so povzročale širjenje razpok na večjem območju in manj krhko porušitev.

Izkazalo se je, da je v večini primerov manj tog FRP material bolj učinkovit v smislu povišanja končne trdnosti in togosti. Sklepajo, da se stiki hitreje porušijo pri uporabi bolj togih materialov.

Opazen je bil tudi nizek prirastek k strižni nosilnosti, kar prepisujejo lupljenju, ki se je zgodil na delu poleg tlačne obremenitve (kjer visoke napetosti povzročajo prezgodnje razpoke) in nizki natezni trdnosti opek, kar povzroča cepitev panelov preko samih opek.

## 10.6 Tumialan, Huang, Nanni, Silva

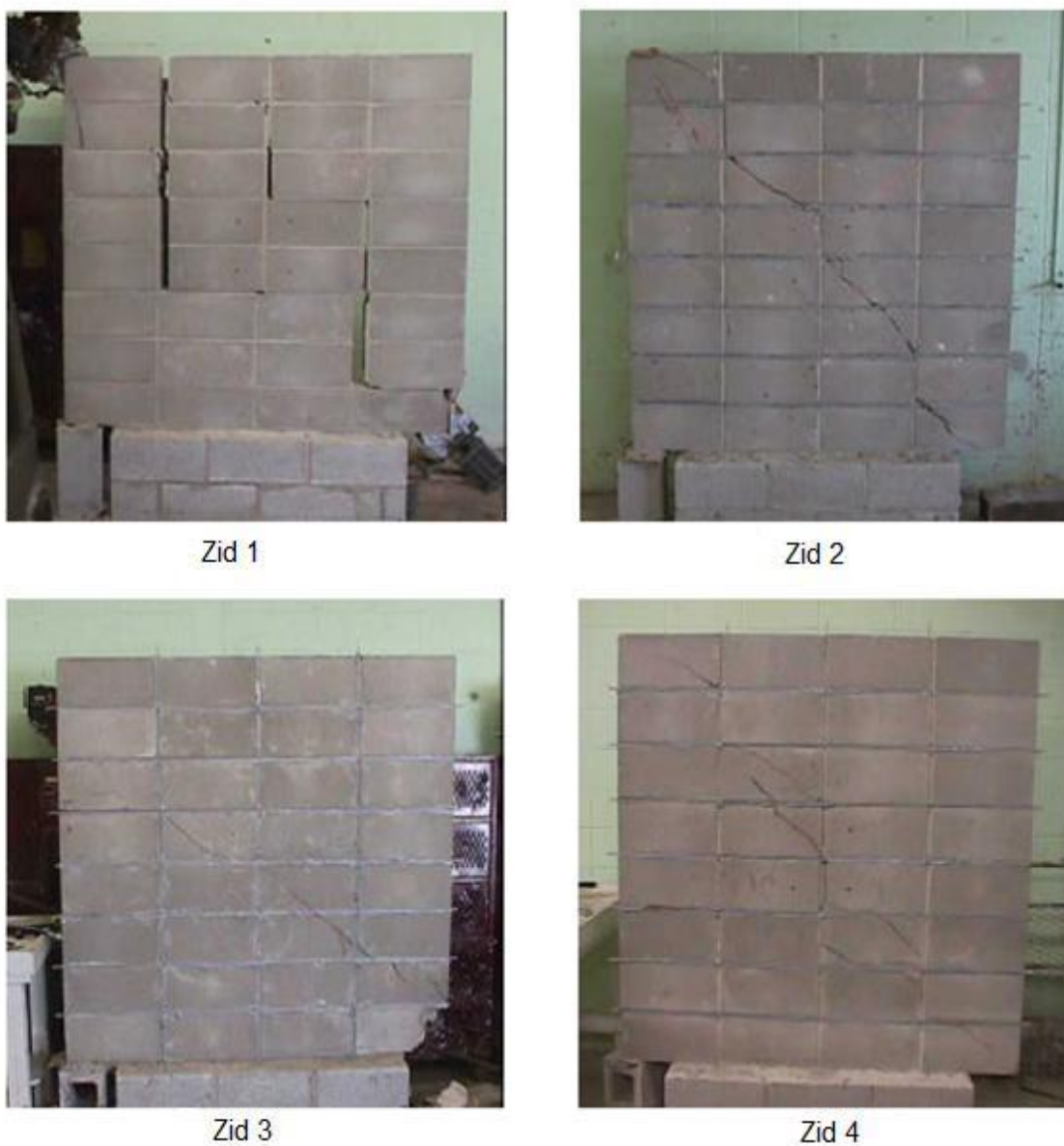
V članku [49] so obravnavani štiri kamniti zidovi, od katerih so bili trije utrjeni s palico iz steklenih vlaken premera 6,25 mm, en pa je ostal, za primerjavo, neutrjen. V Preglednici 50 so prikazani načini utrditve vseh omenjenih zidov.

Preglednica 50: Načini utrditve zidov [49]

Zid	Utrditev	Sprednja stran	Zadnja stran
1	brez	brez	brez
2	GFRP	vsaka horizontalna spojnica	brez
3	GFRP	vsaka horizontalna in vertikalna spojnica	brez
4	GFRP	vsaka horizontalna spojnica	vsaka vertikalna spojnica

Pri četrtem zidu je bilo število utrditev enako kot pri tretjemu, le, da so bile utrditve enkrat samo na eni strani, drugič so bile porazdeljene po obeh straneh zidu. Povezava med palico in zidom je bila zagotovljena z epoksi smolo. Da je bil zagotovljen dober stik med njima, je bilo potrebno očistiti prah, ki je nastal pri odstranjevanju spojnic, v katere se vstavi FRP palice.

Obremenjevanje zidov je potekalo diagonalno. Pri neutrjenem zidu je prihajalo do krušenja materiala, medtem ko pri ostalih krušenje ni bilo opazno. Na neutrjenih zadnjih straneh oz., kjer je bilo malo utrditev (četrty zid), so se pojavile široke razpoke. Poleg tega so se utrjeni zidovi nagnili v smeri utrjene strani zidu. V isti smeri so se širile tudi razpoke. Razpoka, ki jo povzroči porušitev stika zidakov in malte na zadnji strani, potuje po širini zidu dokler ne popusti stik epoksi smole in zidakov. Takrat se zidovi porušijo, saj se natezne napetosti ne prenesejo na palice.

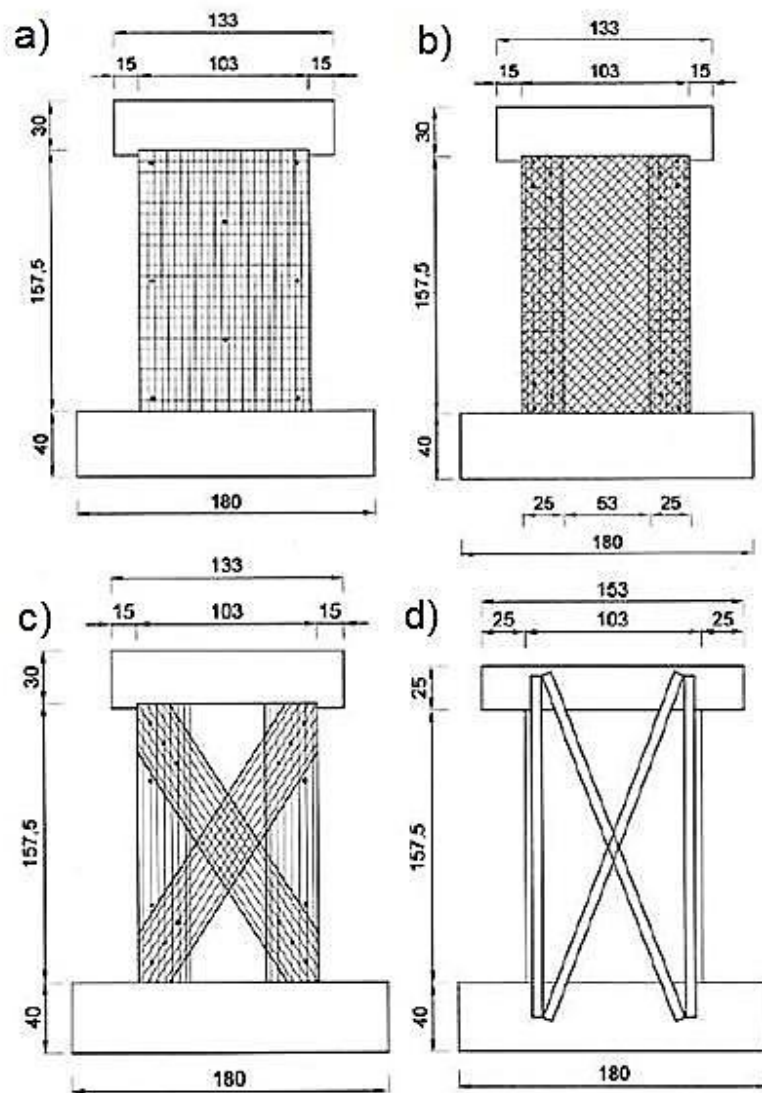


Slika 65: Zidovi po preizkusu [49]

Utrjeni zidovi so pripomogli k več kot 100% večji nosilnosti zidu. Različno utrjeni zidovi pa so se med seboj obnašali zelo podobno, ne glede na to, ali so bili utrjeni na eni ali na obeh straneh.

### 10.7 Tomaževič, Gams, Berset

Avtorji [50] so preučevali učinkovitost različnih utrjevanj opečnatih zidov. Zidovi so bili utrjeni s kompozitno armiranim ometom, kjer so utrditev predstavljali GFRP mreža oz. tkanina (t.j. mreža oz. tkanina s steklenimi vlakni, G angl. "glass"), CFRP tkanina (t.j. tkanina s karbonskimi vlakni, C angl. "carbon") v epoksi matrici in CFRP trakovi.



Slika 66: Različni načini utrditev: a) vertikalno postavljena GFRP mreža, b) diagonalno postavljena GFRP mreža z dodatnimi navpičnimi trakovi, c) diagonalni in navpični GFRP in CFRP trakovi, d) diagonalni in navpični CFRP trakovi/plošče [50]

Dimenzije zidov so bile  $150 \times 100 \times 25 \text{ cm}^3$  (višina x širina x debelina). Zidovi so predstavljali zgodovinske opečnate zidove v Sloveniji. Opeke so bile med seboj povezane s cementno-apneno malto, z razmerjem cement:apno:pesek  $c:a:p = 0,25:1:8$ . Zidovi so bili vpeti v napravo za preizkušanje na eni strani, torej so bili testirani kot vertikalne konzole.

Zaradi primerjave rezultatov so pustili nekaj zidov neutrjenih. Pri njih so se sprva pojavile diagonalne razpoke na sredini zidu. S povečanjem vsiljenih pomikov so se pojavile nove razpoke, potekale so skozi maltne spojnice in opeke, ki so se razširile po celi površini zidu. Material na stranskih delih zidu se je ločil od diagonalnih razpok in pričel padati z zidu.



Slika 67: Porušitev neutrjenega zidu [50]

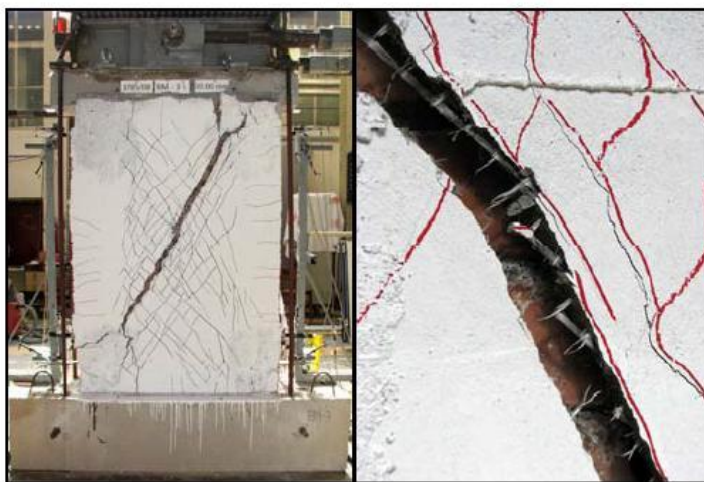
Pri zidovih, utrjenih z GFRP mrežo, kjer je bila uporabljena cementna malta, je prišlo do odstopanja ometa od zidu, v odvisnosti od števila in položaja sider. Pri zidovih, ki niso bili sidrani, so se razpoke (pretežno diagonalne) najprej pojavile na ometu, po doseženem maksimalnem pomiku neutrjenega zidu pa se je omet v celoti porušil. Sidranje je preprečilo popolno porušitev zidu, razvile so se horizontalne razpoke tik nad spodnjo linijo sider. Čeprav so se pojavile razpoke po celotni površini ometa, je prišlo do porušitve ometa samo v spodnjem delu med sidri.

V primeru, ko so uporabili tanjši sloj malte za omet, se je v zadnji fazi razvila velika diagonalna razpoka, vzdolž razpoke so se pretrgala steklena vlakna mreže. Posledično ni bilo skoraj nobenega izboljšanja nosilnosti in doseženih pomikov v primerjavi z neutrjenim zidom.



Slika 68: Porušitev zidu s tankim slojem ometa [50]

Pri zidovih, kjer je bil omet utrjen z diagonalno položeno mrežo iz steklenih vlaken in dodatnimi vertikalnimi trakovi, ki so bili sidrani, so se v srednjem delu med vertikalnimi trakovi pojavile enakomerno razporejene diagonalne razpoke. Ko so pomiki presegli maksimalne pomike primerjalnega zidu, so se v vertikalnih trakovih na obeh koncih zidu razvile horizontalne natezne razpoke. Na koncu je prišlo do strižne porušitve zidu zaradi pretrga diagonalno položene mreže vzdolž strižne razpoke v srednjem delu zidu. Tudi v tem primeru je prišlo na nekaterih delih do porušitve stika med ometom in zidom. Kljub vsemu je bila končna nosilnost in kapaciteta pomikov (duktilnost) močno izboljšana v primerjavi z neutrjenim zidom.



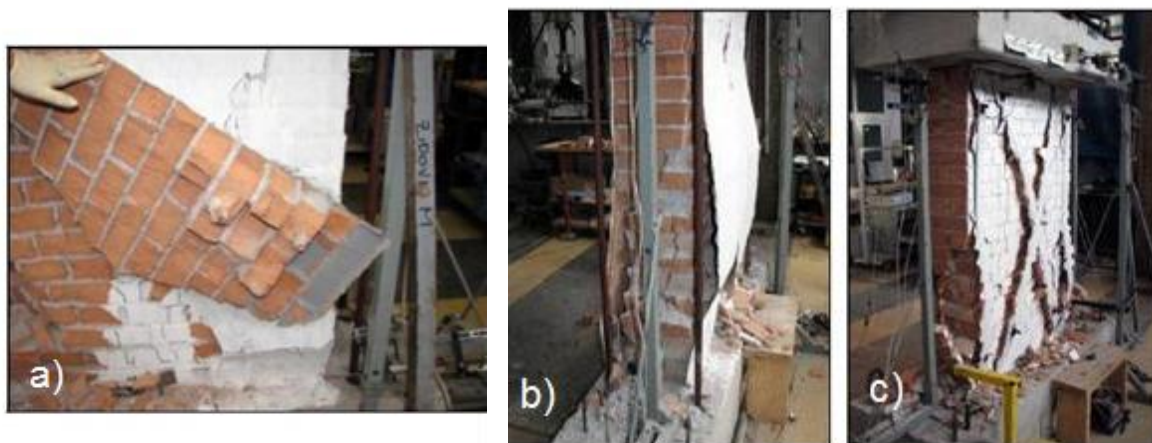
Slika 69: Strižne razpoke in natezne razpoke v vertikalnih trakovih [50]

Pri zidovih, ki so bili utrjeni s tkanino iz steklenih oz. karbonskih vlaken in so bila sidra skoncentrirana v vogalih zidu, se je omet bodisi odlepil ali izbočil po celi površini zidu. V primeru, ko so bila sidra razporejena po celi površini zidu, je prišlo samo do lokalnega izbočenja/uklona ometa.

Pri zidovih, ki so vsebovali trakove oz. plošče s karbonskimi vlakni, so trakovi pri relativno majhnih pomikih odstopili in se upognili. Tako plošče, ki so se delaminirale, niso imele več vpliva na nosilnost in kapaciteto pomikov.

Očitno je, da je porušitev stika med ometom in zidom (delaminacija) in pojav izbočenja/uklona ometa posledica različnih togosti oziroma deformabilnosti zidu in utrditvenih materialov. Pojav je bil izrazit predvsem pri zidovih, utrjenih s CFRP trakovi/ploščami, ki so bili direktno prilepljeni na zid. Pri omenjenih zidovih je v primerjavi z neutrjenimi zidovi prišlo le do povečanja togosti, nobenega izboljšanja ni bilo opaziti pri nosilnosti in duktilnosti. Pri ostalih je poleg povečanja togosti prišlo v manjši ali večji meri tudi do povečanja nosilnosti (20-130%). Povečanje duktilnosti je bilo, zaradi prevladujoče porušitve stika med ometom in zidom, manj izrazito (10-50%).





Slika 70: Slika a) Odlučitev b) Izbočitev/uklon GFRP tkanine c) Porušitev stika med ometom in zidom pri utrditvi s CFRP trakovi [50]

Učinek utrjevanja zidov z debelim ali tankim ometom je bil podoben, pri prvem se je nosilnost povečala od 20% do 70%, pri drugem od 17% do 42%. Po pričakovanjih je debelina ometa vplivala na togost. Zidovi z debelim ometom so bili bolj togi od zidov s tankim ometom. Proti pričakovanju pa število in razpored sider ni bistveno vplivalo na izboljšanje končne nosilnosti.

Najboljše rezultate nosilnosti in kapaciteto pomikov med vsemi zidovi je dosegel zid, utrjen z diagonalno razporejeno mrežo in dodatnimi vertikalnimi trakovi.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## 11 UTRDITEV ZIDOV Z VRVICO

Poleg linijskega injektiranja zidov smo kot utrditveni ukrep izvedli še utrjevanje zidov z vgraditvijo vrvic iz steklenih vlaken v naležne spojnice. Ta ukrep je, prav tako kot injektiranje, primeren predvsem za ohranitev stavb kulturne dediščine, saj ostane zunanji izgled popolnoma ohranjen. Sicer se ga v praksi ne uporablja pogosto, postopek je precej dolgotrajen in drag.

V naših preiskavah smo zidove utrdili z vrvicami, potekale so horizontalno po dolžini zidu. Za samo vgraditev vrvic smo določili malto, s katero smo zapolnili spojnice, iz katerih smo predhodno deloma odstranili prvotno malto. V spojnice smo nato z izbrano malto vgradili stekleno vrvico, dolžina vrvic je bila enaka dolžini zidu.

Skupno smo na strižni preizkus zidov pripravili osem zidov, od katerih sem za svoje preiskave uporabila dva; edina, ki sta še imela omet. Pri vseh ostalih zidovih je omet pri predhodnem preizkusu odpadel. Eden, v sklopu diplome preskušanih zidov, je ostal samo injektiran, drugi je bil poleg injektiranja tudi ne eni strani zidu utrjen z vrvico v vseh desetih fugah.

### 11.1 Izbira malte v fugah

Pri izbiri malte v fugah je bil najpomembnejši dejavnik zagotovitev dobre povezave med zidom in vrvico. Namen tega je, da se omogoči prenos sile, s katero obremenjujemo zid iz kamna na vrvico. Običajno se za vgraditev uporablja epoksidna smola, ki velja za eno izmed najboljših matric. Njena glavna prednost je, da je zelo dobro sprijemljiva z vlakni. Z njo lahko dosežemo želene mehanske lastnosti kot so žilavost, odpornost proti agresivnosti okolja in trajnost. Kljub odličnim lastnostim se pri naših preiskavah zanjo nismo odločili, ker smo želeli ohraniti naravne materiale [4].

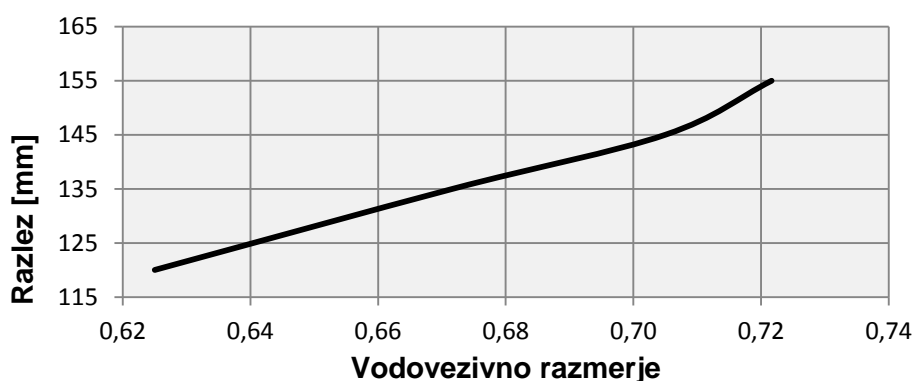
Na podlagi premisleka o primernosti in zidarske tradicije smo se odločili za podaljšano cementno malto. Izbrali smo mešanico z masnim razmerjem cementa, apna in peska  $c:a:p = 1:1:6$ , je eno izmed najbolj pogostih razmerij. Uporabili smo hidratizirano apno, običajen cement (CEM I) in pesek frakcije 0/2 mm. Vodovezivno razmerje malte smo določili s pomočjo preizkusa razleza, ki ga določa standard SIST EN 1015-3. V primerjavi s cementno malto ima podaljšana cementna daljši proces strjevanja in se jo lahko vgradi nekoliko kasneje.

Pričeli smo z vodovezivnim razmerjem v/v 0,63 in končali z razmerjem 0,72, pri tem pa dosegli želen razlez okoli 150 mm.

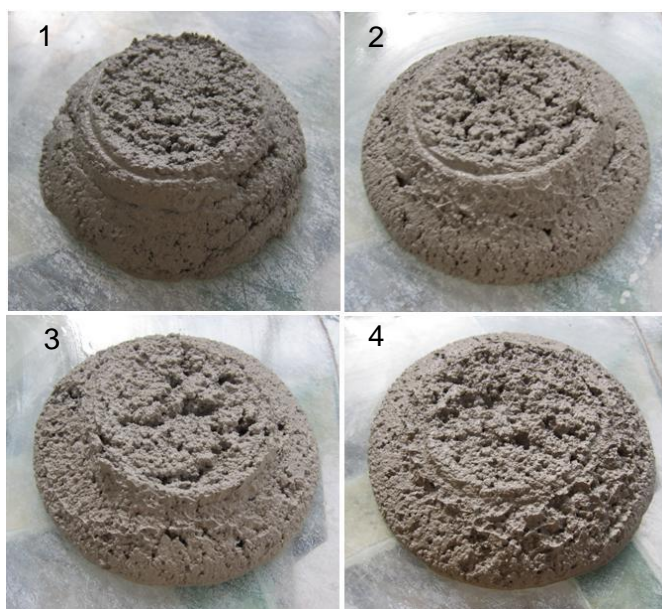
Preglednica 51: Rezultati razleza v odvisnosti od vodovezivnega razmerja malte

Preizkus	v/v razmerje	Razlez [mm]
1	0,63	120
2	0,67	135
3	0,71	145
4	0,72	155

Razlez se je v primerjavi z vodovezivnim razmerjem hitreje povečeval. Pri zadnjem preizkusu je bilo vodovezivno razmerje od prvega večje za 1,14 krat, medtem ko se je premer razleza povečal kar za 1,29 krat. Naraščanje premera razleza je vidno tudi na Grafikonu 27.



Grafikon 27: Razlez malte v odvisnosti od vodovezivnega razmerja



Slika 71: Razlez malte vzorcev z različnimi vodovezivnimi razmerji

Poleg razleza sveže malte smo določili tudi prostorninsko maso, upogibno in tlačno trdnost malte na 6 vzorcih 28 dni starih prizem. Rezultati so prikazani v Preglednici 52 in Preglednici 53.

Preglednica 52: Masa, dimenzije in prostorninska masa 28 dni starih prizem iz podaljšane cementne malte

Malta za vrvice (meritve 22.4. 2013)	Masa [g]	Dolžina [mm]	Višina [mm]	Širina [mm]	Prostorninska masa [g/dm <sup>3</sup> ]
	466,80	159,54	40,51	39,88	1811,26

Prostorninska masa strjene podaljšane cementne malte je znašala preko 1800 g/dm<sup>3</sup>, kar je največ od vseh injekcijskih mešanic, ki smo jih preizkušali v okviru diplomske naloge.

Preglednica 53: Povprečna upogibna natezna in tlačna trdnost prizem iz podaljšane cementne malte

Malta za vrvice (meritve 22.4. 2013)	$f_t$ [Mpa]	$f_c$ [Mpa]
	2,29	9,29

Upogibna natezna trdnost  $f_t$  je prav tako presegla vse vrednosti upogibnih nateznih trdnosti injekcijskih mešanic, kjer smo pri apneno-cementni injekcijski mešanici dosegli vrednosti med 0,11 MPa in 2,10 Mpa. Tlačna trdnost prizem iz podaljšane cementne malte je bila nižja od dveh injekcijskih mešanic (apneno-cementne D in komercialno pripravljene B), medtem ko je apnene injekcijske mešanice (A in C) presegla.

## 11.2 Postopek utrjevanja zidov

Pred samim vnosom vrvic v spojnice je bilo potrebno na mestih, kjer je bila predvidena vrvica, iz spojníc odstraniti prvotno malto. S pomočjo vseh možnih pripomočkov smo odstranili 5 cm debel sloj apnene malte v fugah. Nato smo območje, kjer smo fuge izpraznili, dobro očistili s sesalcem in nato še rahlo popršili z vodo. Pri celotnem postopku utrjevanja so nam pomagali zunanji izvajalci-mojstri, ki se z utrditvami profesionalno ukvarjajo.



Slika 72: Izpraznjene fuge

Po izpraznitvi spojnic smo pripravili vrvice in jih narezali na dolžine dobrih 100 cm. Vrvico smo namočili v epoksi smolo, jo povaljali v kremenčevem pesku premera 1 do 2 mm in vgradili v spojnice. Kremenčev pesek smo uporabili zaradi boljše sprijemnosti med epoksijem in izbrano malto za vgradnjo oziroma kamnom., Izkazal se je za zelo praktičnega, saj se je kremen prijel na epoksi in ta pri vgrajevanju vrvic ni odtekal.



Slika 73: Namakanje vrvic v epoksi in valjanje vrvic v kremenčevem pesku

V temeljito sčiščene spojnice smo vgradili pripravljeno podaljšano apneno cementno malto. Zaradi same vgradnje smo jo pripravili z vodovezivnim razmerjem 0,77, kar je nekoliko več kot smo predvidevali. Pri tem smo dobili razlez 180 mm. Nato smo hitro, da se ne bi malta preveč strdila, v fugo vstavili vrvico (Slika 74) in fugo do konca napolnili z malto, pri čemer smo uporabili vodovezivno razmerje 0,75. Zaradi lažjega zaključnega vgrajevanja malte je bilo vodovezivno razmerje nekoliko manjše. Dosežen razlez malte je bil 160 mm.



Slika 74: Vrvice, nameščene v fugah

Nekateri zidovi so imeli poleg vrvic, vgrajenih po dolžini zidu, tudi vrvic vgrajene prečno po širini, ki so služile povezovanju vseh slojev zidu. Izvajalci so skozi zidove izvrtali luknje, skozi potegnili vrvic, prav tako namočene v epoksi in posute s peskom (Slika 75). Vsi zidovi so imeli po pet takšnih povezav.



Slika 75: Povezovanje vseh treh slojev zidu z vrvico

Vgrajevanje vrvic je bilo zamudno, potrebna je bila dobra organizacija, kajti imeli smo opravka z epoksi smolo, ki zelo hitro veže in apneno cementno malto, ki se je zelo hitro trdila. Zaradi tega smo malto ves čas mešali sproti, z njo namazali nekaj spojníc, vrvico pa vmes hitro pripravili na vgraditev.

»Ta stran je namenoma prazna.«



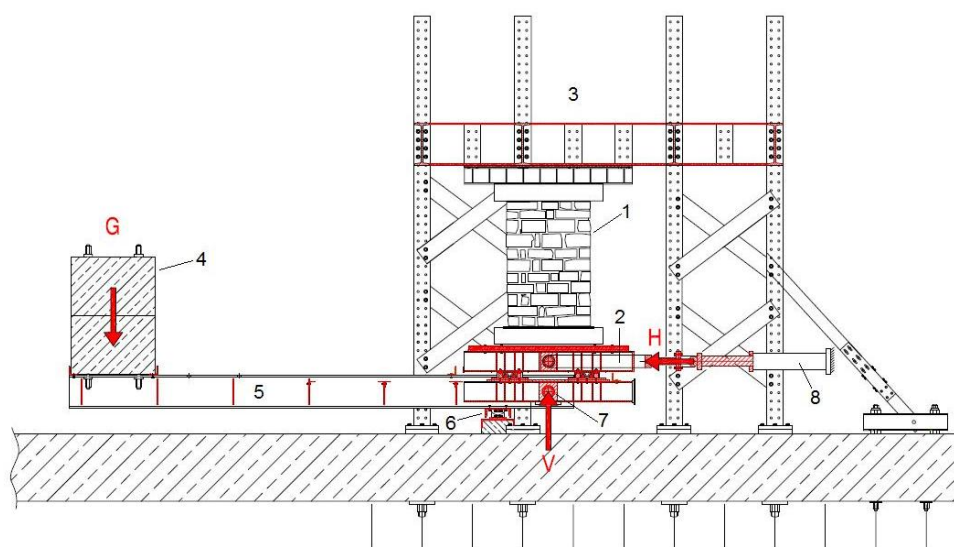
## 12 STRIŽNO PREIZKUŠANJE ZIDOV

V sklopu diplomske naloge sem strižno preizkusila dva zidova. Na enem od zidov je bil preizkušan vpliv učinka linijskega injektiranja na strižno obnašanje zidu, na drugem pa poleg injektiranja, tudi vpliv utrditve zidu z vrvicami iz steklenih vlaken.

### 12.1 Naprava za strižne preiskave in sistem preizkušanja

Zidove smo na strig preizkušali v posebni napravi (Slika 76), ki se na fakulteti v ta namen uporablja že vrsto let. Naprava omogoča določanje strižne nosilnosti zidov pri konstantni vertikalni obtežbi in vodoravnemu cikličnemu obremenjevanju. Preizkušanec (1) smo s pomočjo žerjava prenesli na voziček (2) napravo, malo nejasen stavek s katerim smo zid zapeljali v napravo. Preizkušanec na spodnjem robu nalega na voziček, na zgornjem robu pa je vpet v okvirno konstrukcijo (3). Naprava deluje kot vzvod, saj se betonski bloki (4), ki predstavljajo balast in nalegajo na koncu jeklenega nosilca (5), prenašajo na zid v obliki vertikalne obremenitve preko vrtljive podpore (6). Vertikalna obremenitev preizkušanca je namreč nujno potrebna za zagotovitev strižnega porušnega mehanizma. Poleg tega z njo zagotovimo podobne pogoje kot vladajo v konstrukciji. Paziti je bilo potrebno na ustrezno velikost obremenitve, saj bi lahko prišlo do zdrsa kamnitih slojev po spojnici oz. do upogibnega porušnega mehanizma. v primeru premajhne vertikalne obtežbe. Vrtljiva podpora (6) ima lahko pod nosilcem več položajev.

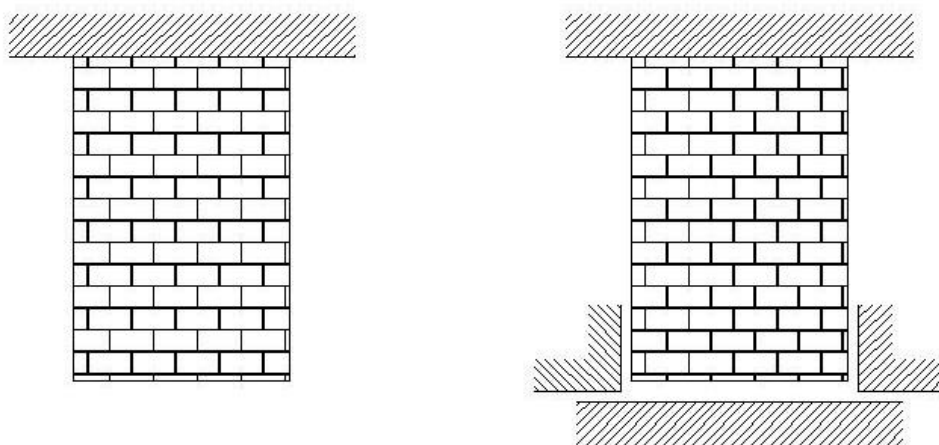
V našem primeru je bilo razmerje med razdaljo od členkastega mehanizma (7) in podpore ter od vrtljive podpore do obtežbe 1:5. Torej smo za vnos 380 kN vertikalne obtežbe, kolikor smo jo potrebovali za naš preizkušanec, kar je približno 38 ton mase, morali nosilec naložiti z  $\frac{38}{5} ton = 7,6$  tonami. S spreminjanjem vodoravnega pomika se spremeni tudi razmerje ročic vzvoda. S tem se malo spreminja vrednost vertikalne sile na preizkušanec. Ker gre za tako majhno spreminjanje, lahko to spremembo sile zanemarimo.



Slika 76: Skica naprave za strižni preizkus [8]

Preko posebnega členkastega mehanizma (7) vzvod jeklenih nosilcev z vozičkom sledi navpičnim deformacijam preizkušanca in s tem zagotavlja konstantno vrednost navpične obtežbe v preizkušancu. Horizontalno obtežbo na preizkušanec vnašamo preko servo hidravličnega bata, ki je povezan z vozičkom, ta pa se giblje po nosilcu z minimalnim trenjem. Hidravlični bat zidu vsiljuje pomike z največjo vrednostjo sile 250 kN.

Zidovi so v napravo vpeti na zgornjem robu, na spodnjem robu pa naprava dopušča dve možnosti. Če so zidu na spodnjem robu dopuščeni horizontalni pomiki in rotacija, deluje naprava kot obrnjena konzola, v primeru, če je preprečena spodnja rotacija, je zid obojestransko vpet z dopuščenimi horizontalnimi in vertikalnimi pomiki na spodnjem robu.



Slika 77: Več možnosti vpetja pri napravi: obrnjena konzola in vpet preizkušanec z dopuščenimi horizontalnimi in vertikalnimi pomiki

## 12.2 Potek strižnih preiskav

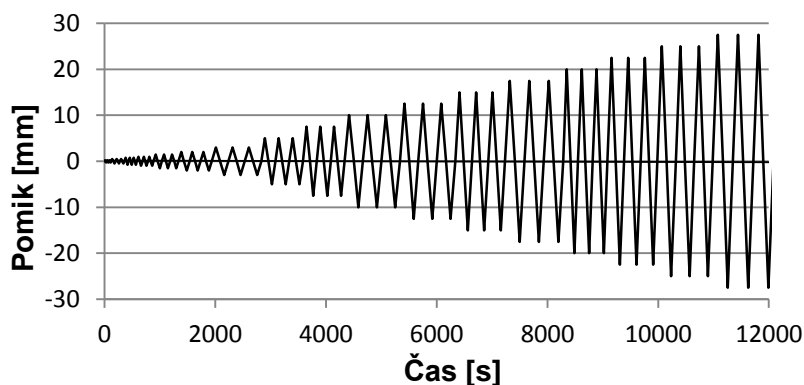
Pri strižnih preiskavah s hidravličnim batom pri konstantni vertikalni obtežbi potiskamo zid enkrat v eno drugič v drugo smer. Premiku bata iz ravnotežne lege proti maksimalnemu pomiku v pozitivni smeri (ko bat vleče zid k sebi), nato nazaj v ravnotežno lego in še do maksimalnega pomika v negativni smeri (ko bat zid potiska) ter nazaj v sredino, pravimo en cikel. V sklopu naših strižnih preiskav smo za vsako amplitudo pomika opravili tri cikle. Pri treh ciklih se namreč togost in nosilnost preizkušanca, ki pri ponavljajoči obtežbi sicer upadata, običajno stabilizirata [1].

Pomike smo merili z induktivnimi merilci, ki so bili priključeni na procesor za beleženje pomikov, ta pa na namizni računalnik, kjer smo spremljali celoten proces. S programom smo določili protokol obremenjevanja, ki je bil voden s pomiki induktivnega merilca, imenovanega H6, na betonskem temelju pod zidom. Batu smo določili hitrosti obremenjevanja in amplitude pomikov, ki so prikazani v Preglednici 54 in na Grafikonu 28. Začeli smo z majhnimi pomiki; 0,25 mm; in majhnimi hitrostmi obremenjevanja; 0,025 mm/s. Hitrost obremenjevanja smo postopoma povečevali, saj bi z začetno hitrostjo preizkus trajal predolgo.

Preglednica 54: Protokol obremenjevanja

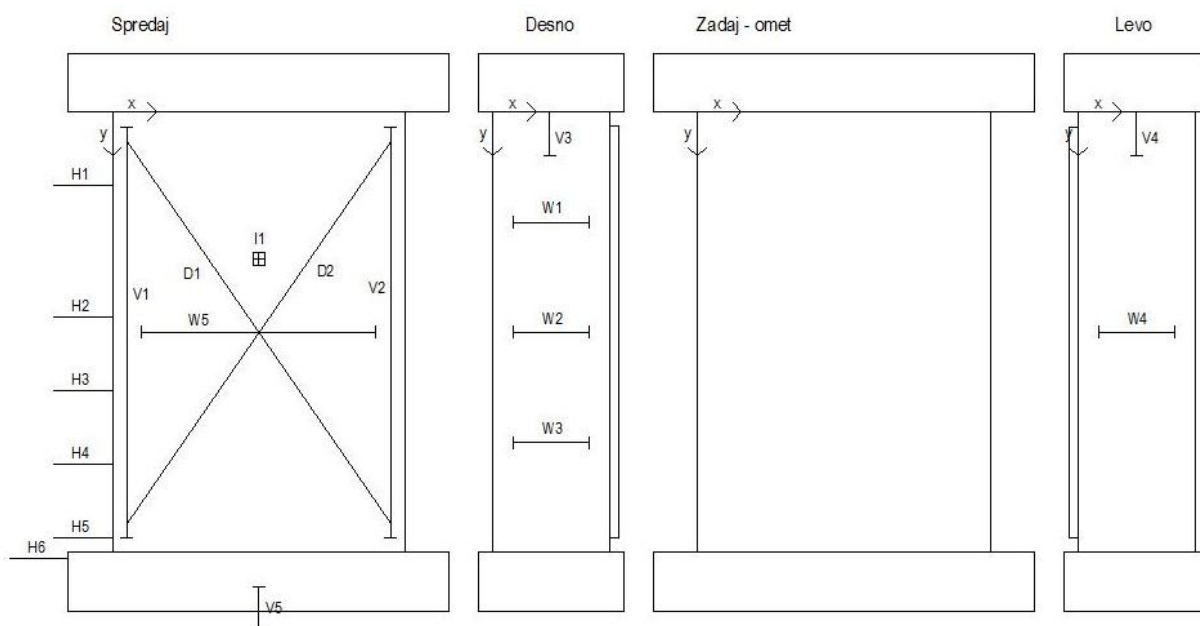
<b>Pomik [mm]</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7,5</b>
<b>Hitrost [mm/s]</b>	0,025	0,025	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,08	0,12

<b>Pomik [mm]</b>	<b>10</b>	<b>12,5</b>	<b>15</b>	<b>17,5</b>	<b>20</b>	<b>22,5</b>	<b>25</b>	<b>27,5</b>	<b>30</b>
<b>Hitrost [mm/s]</b>	0,12	0,15	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3



Grafikon 28: Protokol obremenjevanja

Induktivne merilce, s katerimi smo zagotavljali varnost samega preizkusa ter sledili izven ravninskemu odpiranju kamnitih slojev, nastanku strižnih razpok, upogibnemu odpiranju in stiskanju, smo postavili na tri strani zidu. Na stran, kjer je bil omet, jih nismo lepili, saj smo med preiskavo pričakovali njegovo porušitev. Uporabili smo 19 induktivnih merilcev, od tega smo jih 11 namestili v horizontalni (W1-W5, H1-H6) in 5 v vertikalni smeri (V1-V5), 2 sta potekala diagonalno po sprednji strani zidu (D1 in D2), z enim pa smo merili horizontalne pomike pravokotno na sprednjo stran zidu (I2).



Slika 78: Prikaz razporeditve induktivnih merilcev po zidu

### 12.3 Poškodbe zidov

V času trajanja strižne preiskave smo opazovali zidova in si beležili razpoke, ki so se s potiskanjem zidu enkrat na eno, drugič na drugo stran, hitro širile. V nadaljevanju so prikazane poškodbe obeh. Zid 1 se nanaša na nepovezan in z apneno-cementno injekcijsko mešanico injektiran zid, oznaka Zid 2 pa na povezan, injektiran in dodatno utrjen zid, pri čemer se izraza povezan in nepovezan nanašata na morfologijo zidov in ne na utrditveni ukrep povezovanja.

#### Poškodbe injektiranega zidu (Zid 1)

Prve razpoke smo opazili že pri pomiku 3 mm. Pri pomiku zidu za 5 mm so se prvič pojavile strižne in upogibne, ki so bile najbolj izrazite v najvišji spojnici. Ves čas smo spremljali tudi obnašanje ometa. Na začetku njegovega odstopanja od zidu nismo mogli opazovati, ker je bil ves premazan s hitro vezočo malto od injektiranja, pri velikih pomikih pa je tudi odstopanje prišlo do izraza. Pri pomiku zidu za 20 mm, tik preden je prišlo do porušitve ometa, je ta od zidu odstopil kar za dober centimeter (Slika 79). Do porušitve ometa je prišlo na koncu prvega cikla pri amplitudi pomika 20 mm, ko je bil bat ravno v ravnotežni legi.



Slika 79: Odstopanje ometa od Zidu 1

Na zidu so bile vidne velike upogibne razpoke, ki so se kazale v odpiranju zgornje maltne spojnice. Po odstopu ometa so se na strani, kjer je bil omet, pričele vidno širiti tudi strižne razpoke in ustvaril se je tipičen strižni porušni mehanizem (Slika 80).



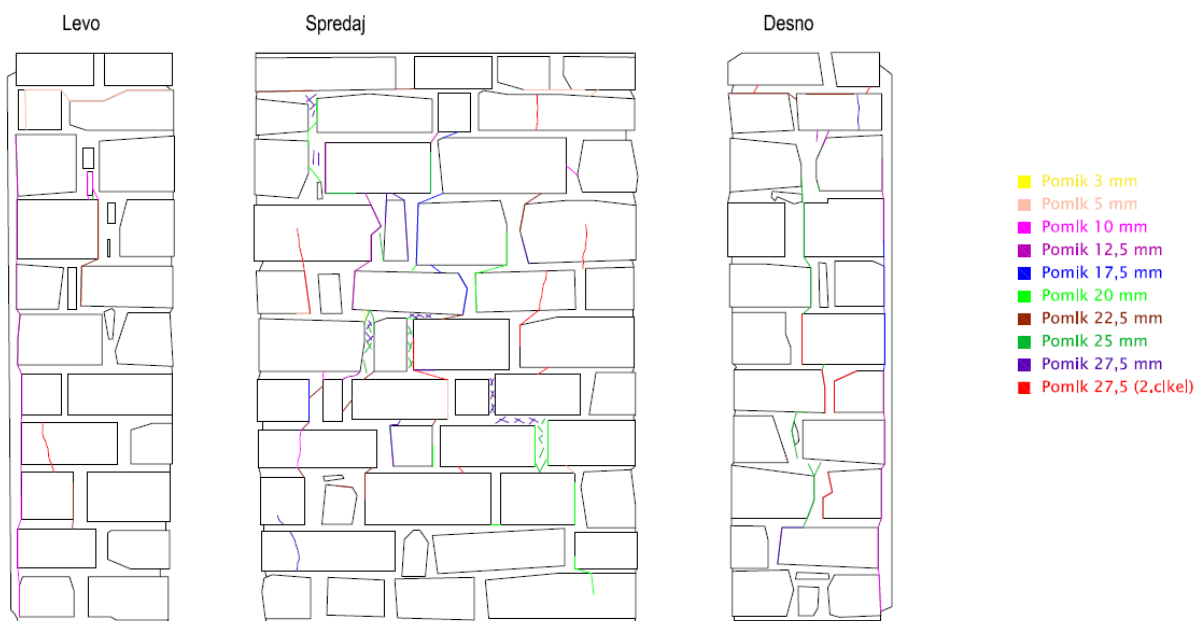
Slika 80: Zid 1 pred in po strižni preiskavi

Prišlo je do izven ravninskega odpiranja zidu v obeh horizontalnih smereh, predvsem so se v sredini zidu nekatere spojnice vidno izpraznile in ostale brez malte, razpokalo je tudi nekaj kamnov, kar je bilo mogoče med preiskavo tudi slišati.



Slika 81: Poškodbe Zidu 1: izven ravninsko odpiranje zidu, izpraznjene spojnice, razpokani kamni

Razpoke, ki so nastajale med strižnimi preiskavami, smo ves čas beležili. Razvoj razpok pri različnih amplitudah pomikov in končna poškodovanost zidov je vidna na Sliki 82 in Sliki 83.



Slika 82: Zaznane razpoke Zidu 1 pri različnih pomikih



Slika 83: Razpoke na zadnjem delu Zidu1, z ometom in brez

### Poškodbe injektiranega in z vrvico utrjenega zidu (Zid 2)

Obnašanje injektiranega in dodatno utrjenega zidu je bilo po pričakovanjih povsem drugačno. Dolgo časa ni bilo opaziti nobenih večjih sprememb na zidu, prisotne so bile le manjše razpoke. Glavna razpoka na ometu, ki je bila posledica predhodnih preiskav, se je počasi

širila, pojavilo se je tudi večje število manjših. Pri pomiku zidu za 20 mm je bila močno vidna razpoka, ki je potekala vzporedno z glavno razpoko.



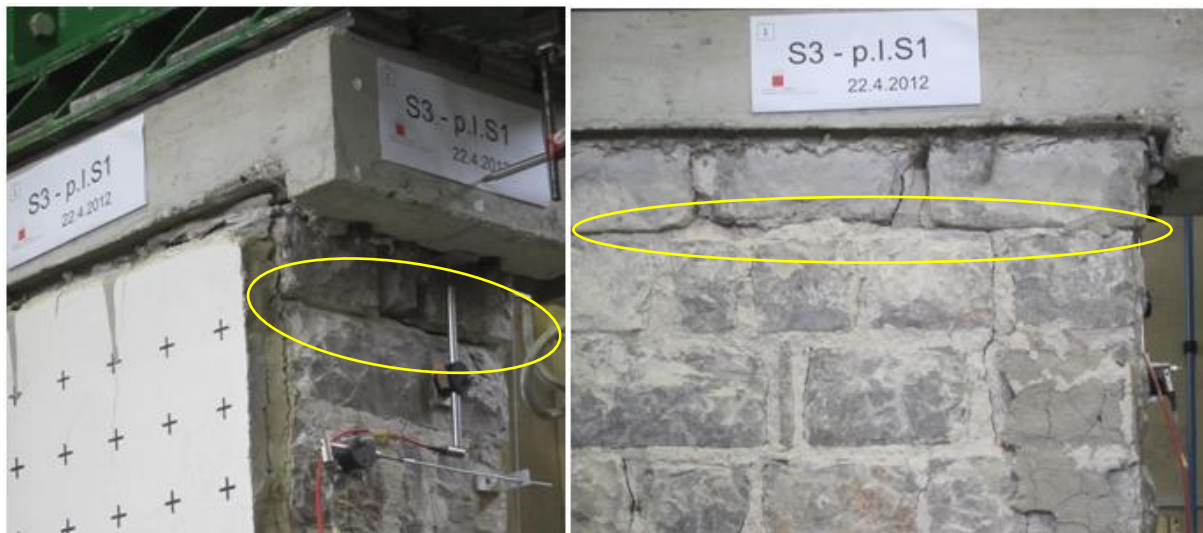
Slika 84: Širjenje razpok na ometu Zidu 2

Levi zgornji del ometa je pričel močno odstopat od zidu in pri pomiku 30 mm tudi dokončno odstopil. Kmalu je sledila porušitev preostalega zgornjega dela ometa. Dokončno je omet odpadel šele pri pomiku 45 mm, kjer smo našo preiskavo tudi zaključili.



Slika 85: Delna in dokončna porušitev ometa Zidu 2

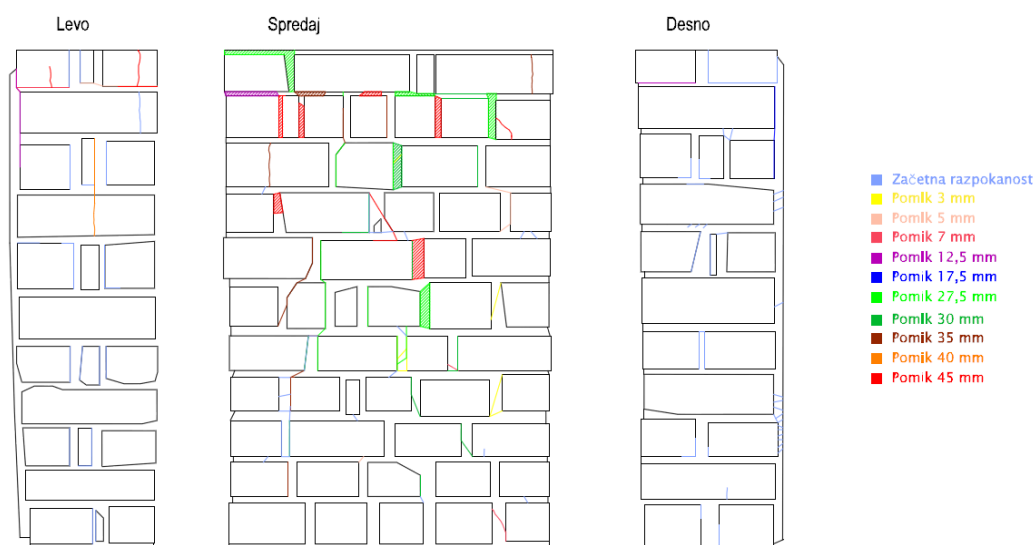
Kot že omenjeno, smo prvo večjo strižno razpoko zasledili pri pomiku 17,5 mm. Tudi kasneje niso bile izrazite, prevladoval je upogibni porušni mehanizem. V zgornji fugi je namreč prišlo do odpiranja zidu in odpadanja malte iz spojníc, kar je vidno na Sliki 86.



Slika 86: Odpiranje Zidu 2 in izpraznitev zgornje spojnice

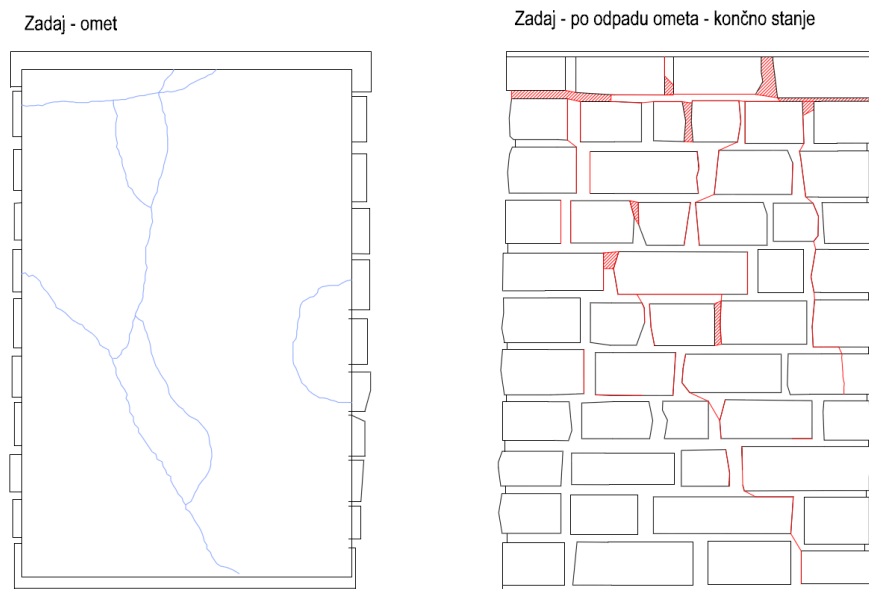
Dosegli smo želen rezultat. Kljub veliki vertikalni sili (15% tlačne trdnosti zidu neutrenega zidu) smo dosegli začetno upogibno obnašanje zidu. Sklepamo, da je bila to posledica horizontalnih utrditev, ki so dobro prenašale obremenitve. Po poružitvi ometa so se na strani, kjer je bil omet, pojavile tudi strižne razpoke, ki so se razširile po celotni površini zidu. Pričele so se drobiti tudi vertikalne spojnice, odkrušil se je en del kamna, opaziti je bilo tudi izven ravninsko odpiranje zidu.

Razvoj razpok pri različnih amplitudah pomikov in končna poškodovanost zidov je vidna na Sliki 87 in Sliki 88.



Slika 87: Zaznane razpoke Zidu 2 pri različnih pomikih





Slika 88: Razpoke na zadnjem delu Zidu 2, z ometom in brez

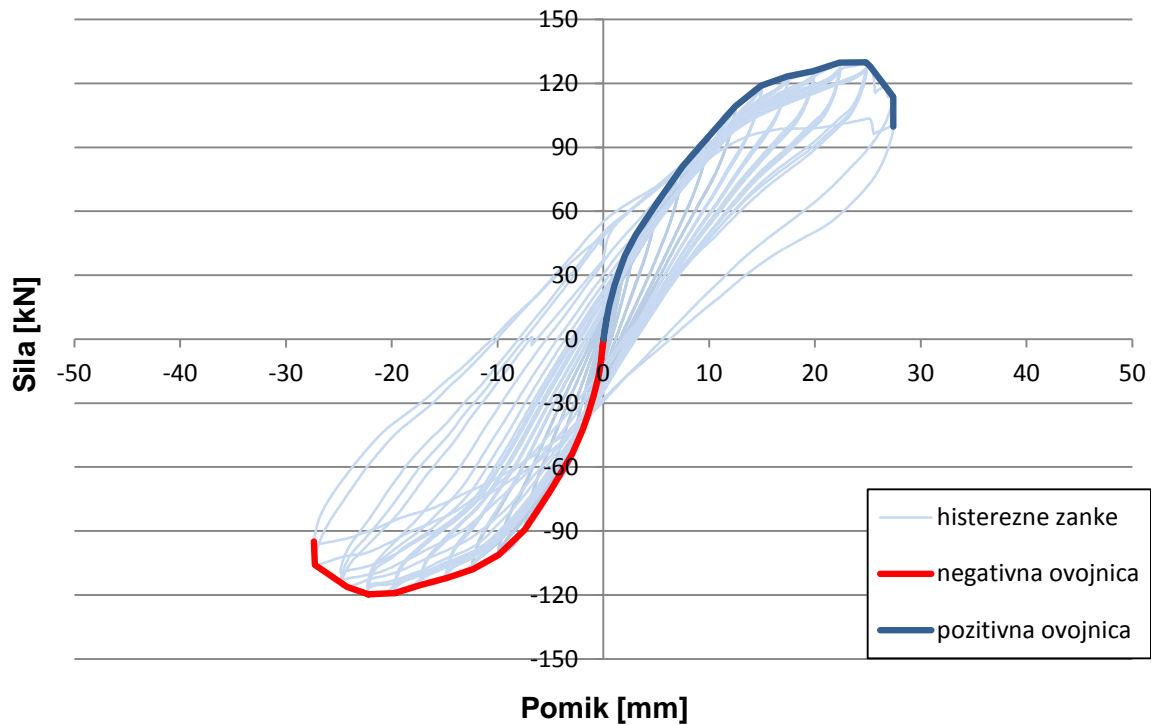
## 12.4 Rezultati

Podatke, pridobljene med strižnima preiskavama, smo obdelali s pomočjo programa Excel. Dobili smo pomike od vseh devetnajstih induktivnih merilcev, čas in pripadajočo silo. Kot že omenjeno, sem analizirala dva različno utrjena zidova. V nadaljevanju so prikazani rezultati obeh, njuna primerjava ter primerjava s predhodnimi preiskavami, ko še nista vsebovala utrditvenih ukrepov.

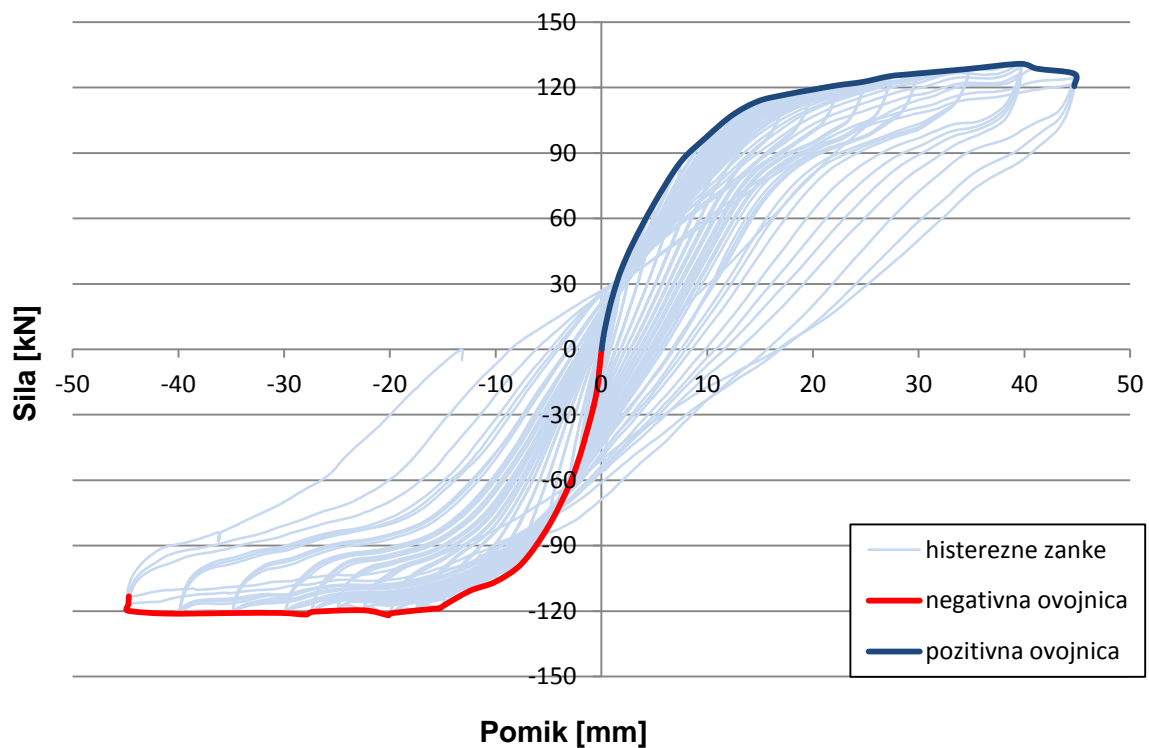
### 12.4.1 Histerezne zanke

Ves čas strižnih preiskav so se nam izrisovale krivulje sile v odvisnosti od pomika oz. histerezne zanke. Celoten histerezen odziv sile v odvisnosti od pomika induktivnega merilca H6 ter pozitivna in negativna ovojnica obeh zidov so prikazani na spodnjih dveh grafikonih (Grafikon 29 in Grafikon 30). Prikazani ovojnice povezujeta vse maksimalne oz. minimalne vrednosti sil, ki sta jih preizkušanca dosegla pri določenem amplitudnem pomiku. V zadnjem delu sta povezani tudi z maksimalnim oz. minimalnim pomikom, s čimer smo zaobjeli vse histerezne zanke.

## Primerjava grafov histereznega odziva utrjenih zidov



Grafikon 29: Histerezen odziv in ovojnici Zidu 1



Grafikon 30: Histerezen odziv in ovojnici Zidu 2

Maksimalni sili, ki jo preizkušavec lahko prenese v eni smeri obremenjevanja, pravimo strižna nosilnost. Maksimalna sila, ki jo je Zid 1 dosegel pri amplitudnem pomiku 25 mm, je znašala skoraj 130 kN, natančneje 129,94 kN. Zid 2 je maksimalno silo dosegel pri

amplitudnem pomiku 40 mm. Vrednost je bila podobna vrednosti Zidu 1, 130,79 kN. Maksimalna sila zidov v negativni smeri je bila sila nekoliko manjša, in sicer -119,76 kN za Zid1 oz. -121,94 kN za Zid 2. Razlog je v tem, da smo začeli z obremenjevanjem v pozitivno smer in nadaljevali v negativno. V območju, ko se bližamo maksimalnim silam, je preizkušanec že poškodovan, poškodbe pa se kopičijo z vsakim obremenjevanjem. S poškodbami tudi togost postopoma pada, zato je nižja tudi nosilnost negativne ovojnice. Kot omenjeno smo za vsak amplitudni pomik opravili tri cikle. Izjemoma smo pri Zidu1 pri amplitudnem pomiku 27,5 mm opravili samo 2. Razlog je, da je nosilnost znotraj tega amplitudnega pomika padla za 19% oz. 20% glede na maksimalno nosilnost, hkrati pa smo tudi ocenili, da bi bilo zaradi izkazanih poškodb nadaljevanje s preizkusom prenevarno. Padec sile je posledica številnih razpok v zidu in izčrpanosti nosilnosti zidu.

Kljub podobnim vrednostim maksimalne pozitivne in negativne sile sta grafikona histereznih zank in njihovih ovojnic precej različna. Zid 2 se je v primerjavi s prvim obnašal veliko bolj duktilno, kar je razvidno iz velikosti mejnih pomikov in položnega dela oziroma platoja ovojnice. V tem območju se je sila povečevala zelo počasi oz. je, v primeru obremenjevanja v negativno smer, ostala praktično nespremenjena. Maksimalen pomik, do katerega smo zid obremenjevali, je znašal 45 mm. Sklepamo, da je bilo duktilno obnašanje posledica utrditev. Predvidevamo, da bi ob pretrgu utrditev prišlo do nenadnega padca sile in porušitve preizkušanca. Nismo želeli tvegati, zato smo preizkus končali, preden je bil dosežen očitni padec sile.

V Preglednici 55 je prikazana primerjava rezultatov obeh zidov pri pozitivni in negativni smeri obremenjevanja.

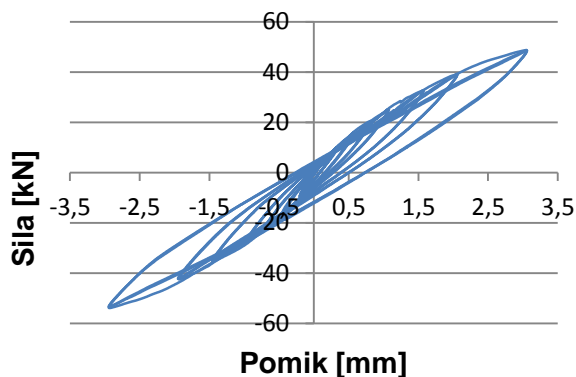
Preglednica 55: Rezultati  $H_{max}$ ,  $d_{prip}$ ,  $d_{max}$ ,  $H_{prip}$ ,  $H_{cr}^{str}$ ,  $d_{prip\_cr}^{str}$  za oba zidova

Zid	Zid 1		Zid 2	
	Pozitivna	Negativna	Pozitivna	Negativna
$H_{max}$ [kN]	129,94	-119,76	130,79	-121,94
$d_{prip}$ [mm]	24,79	-22,19	39,63	-20,18
$d_{max}$ [mm]	27,40	-27,36	44,70	-44,83
$H_{prip}$ [kN]	113,69	-94,87	120,52	-119,75
$H_{cr}^{str}$ [kN]	63,50	-70,55	115,64	-118,71
$d_{prip\_cr}^{str}$ [mm]	5,03	-4,92	44,70	-44,83

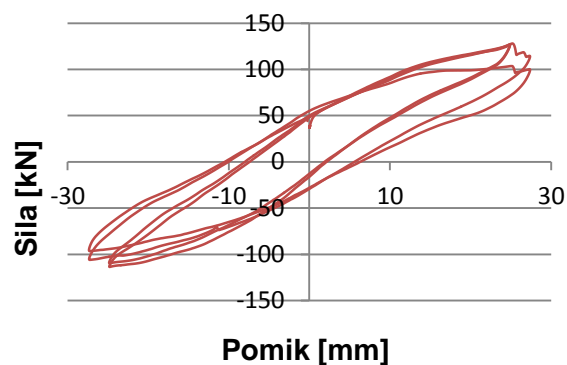
### Padanje nosilnosti

Pri začetnih amplitudnih pomikih pri obeh zidovih potek histereznih zank sovпада pri vseh treh ciklih. Prav tako so bile vrednosti maksimalnih sil vsakega cikla podobne oz. so celo naraščale, kljub temu, da je za kamnite zidove značilno, da nosilnosti padajo [1]. Razlog je v začetnem utrjevanju zidu, ko se kamni med seboj zagozdijo in sila tako še rahlo narašča. Obratno je bilo pri končnih amplitudnih pomikih, predvsem pri Zidu 1, pri Zidu 2 pa le v

končnem ciklu v negativni smeri, ko je nosilnost začela znotraj treh ciklov močno padati. Primerjava je prikazana na naslednjih dveh grafikonih za Zid 1 (Grafikon 31 in Grafikon 32).



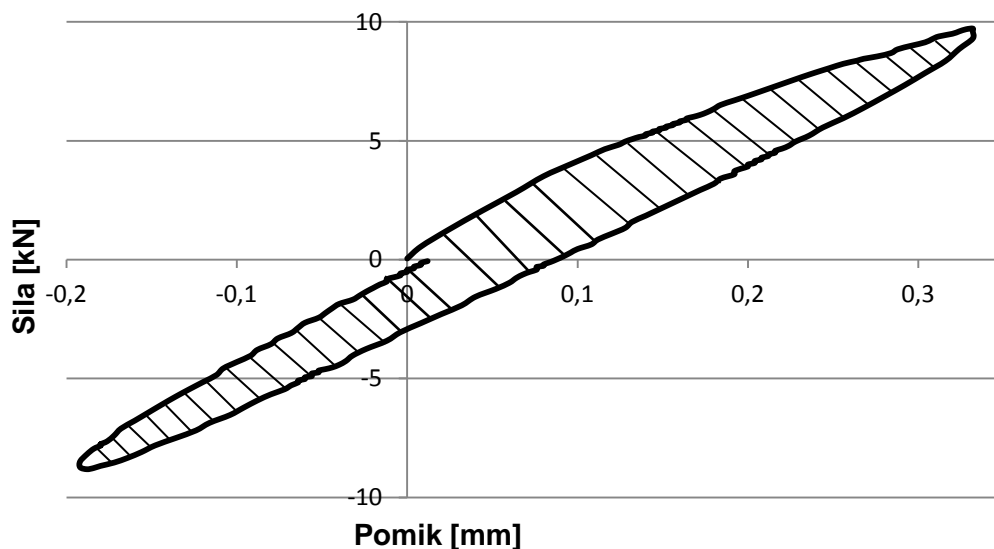
Grafikon 31: Histerezne zanke Zidu 1 pri amplitudnih pomikih od 0,25 mm do 3 mm



Grafikon 32: Histerezne zanke Zidu 1 pri amplitudnih pomikih 25 mm in 27,5 mm

### Disipacija energije

Pri analizi histerezni zank je pomembna tudi disipirana energija, t.j. razlika energije, ki je bila potrebna za premaknitev zidu iz ravnotežne lege do pozitivne oziroma negativne amplitudne lege ter nazaj do ravnotežne lege. Grafično disipirana energija predstavlja površino, ki jo oklepa histerezna zanka.



Grafikon 33: Površina histerezne zanke

Na Grafikonu 33 je prikazana površina znotraj histerezne zanke enega cikla, ki predstavlja disipirano energijo. Površino te histerezne zanke izračunamo tako, da najprej določimo površino, ki jo oklepata zgornja krivulja zanke in abscisna os, in od nje odštejemo površino, ki jo oklepata spodnja krivulja histerezne zanke in abscisna os. Večja kot je poškodovanost zidu, večja je tudi disipirana energija. Disipacije numerično v sklopu diplome nismo analizirali, je pa različna disipacija v različnih fazah obremenjevanja obeh zidov vidna iz oblike histerezni zank; pri Zidu 1 se je površina enakomerno povečevala, medtem ko je pri

Zidu 2 do očitnega »trebuška«, torej večjih poškodb in večje disipacije energije prišlo šele pri zadnji oziroma zadnjih dveh amplitudnih pomikih.

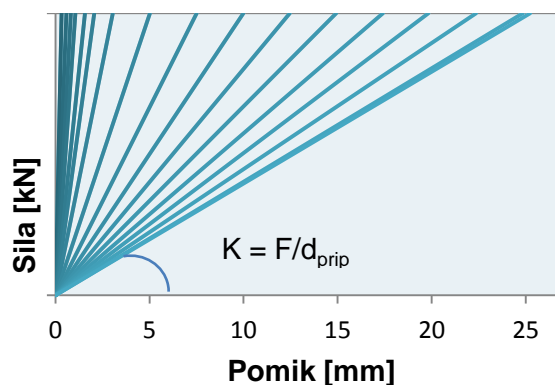
### Strižna togost

V začetnem delu histereznih zank (okoli koordinatnega izhodišča) je vidno pretežno linearno naraščanje oz. padanje sile, ki v primeru Zidu 1 kasneje preide v položnejši del, ko sile naraščajo počasneje, ali drugače; togost zidu ves čas počasi pada. Togost, v našem primeru govorimo o strižni togosti, ki je definirana z razmerjem med silo in pripadajočim pomikom oz. je sila, ki je potrebna, da konstrukcijo premaknemo za enotski pomik:

$$K = \frac{F}{d_{prip}} \quad (35)$$

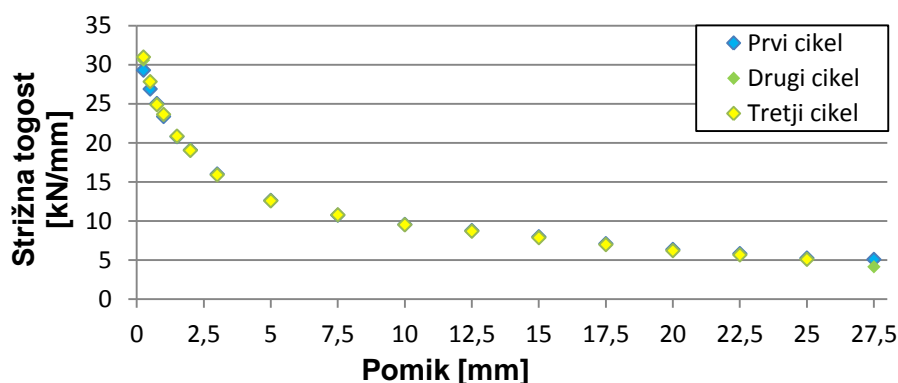
Togost je torej definirana z naklonom premice, ki povezuje koordinatno izhodišče in točko z določeno silo in pripadajočim pomikom.

Za Zid 1 so na Grafikonu 34 za pozitivno smer obremenjevanja prikazane togosti pri maksimalnih silah različnih amplitudnih pomikov. Vidno je padanje naklona premic oz. strižne togosti. Podoben grafikon bi dobili tudi za Zid 2.



Grafikon 34: Premice strižne togosti za Zid 1

Na Grafikonu 35 so prikazane togosti za vse tri cikle pri posameznem pomiku za Zid 1. Točke na grafikonu predstavljajo togosti pri določenem pomiku.



Grafikon 35: Upadanje togosti s povečevanjem pomikov pri Zidu 1

Vidno je, da togosti pri začetnih majhnih pomikih zidu naraščajo s številom ciklov, nato so si nekaj časa vrednosti zelo podobne, na koncu pa je znotraj ciklov enakih amplitud že opazen padec togosti. V splošnem pa togost ves čas pada.

### 12.4.2 Idealizacija ovojnice

Ovojnica histereznih zank je lahko zelo razgibana funkcija. Ker je namen preiskav uporaba rezultatov v praktične namene, npr. pri projektiranju konstrukcij ali pa zgolj za primerjavo rezultatov različnih testov, je potrebno dobljene odzive poenostavljeno predstaviti. Zato smo uporabili idealizirani diagram, natančneje bi-linearni diagram, ki se pri zidanih konstrukcijskih elementih najpogosteje uporablja, ker je preprost in praktičen za izračune. Idealizirani diagram smo dobili z izenačitvijo površine pod histerežno ovojnico in površine pod idealiziranim diagramom. Pri tem smo predpostavili naklon linearnega dela diagrama, ki smo ga določili z dvema kriterijema: s kriterijem 2/3 maksimalne sile in kriterijem 1. strižne razpoke. Vrednost idealizirane sile  $H_u$  določili v programu Excel.

#### 1. Kriterij: Kriterij 2/3 maksimalne sile $H_{max}$

Za določitev naklona linearnega dela diagrama smo si pri prvem kriteriju izbrali točko, ki predstavlja 2/3 maksimalne sile, in odčitali pripadajoči pomik. Točka, povezana s koordinatnim izhodiščem, nam je dala naklon diagrama.

#### 2. Kriterij: Kriterij prve strižne razpoke

Z opazovanjem zidu med strižno preiskavo smo ugotovili, pri katerem amplitudnem pomiku je prišlo do prvih strižnih razpok. Pri tem ciklu smo odčitali maksimalno silo  $H_{cr}$  in zabeležili pripadajoči pomik. Nadaljevanje je potekalo tako kot pri prvem kriteriju. Pri Zidu 1 se je prva strižna razpoka pojavila pri pomiku 5 mm, medtem ko se je pri Zidu 2 pojavila veliko kasneje, pri pomiku 17,5 mm, k čemur so pripomogle horizontalno vgrajene vrvice.

Obema preizkušancema smo torej določili  $H_{cr}^{2/3H_{max}}$  ali  $H_{cr}^{23/H_{min}}$  oz.  $H_{cr}^{str}$ , tem silam pripadajoč pomik  $d_{cr}$ , idealizirano horizontalno nosilnost  $H_u$ , maksimalen pomik zidu  $d_u$ , pomik na meji elastičnosti  $d_e$ , efektivno togost  $K_e$ , faktor duktilnosti  $\mu$  in natezno trdnost  $f_t$ .

Faktor duktilnosti  $\mu$  predstavlja razmerje med mejnim in elastičnim pomikom ter je definiran z enačbo:

$$\mu = \frac{d_u}{d_e} \quad (36)$$

Natezna trdnost  $f_t$  [1] je definirana z enačbo:

$$f_t = -0,5\sigma_v + \sqrt{(0,5\sigma_v)^2 + (b\tau)^2} \quad (37)$$

kjer je

$f_t$ ... vrednost glavne natezne napetosti v zidu pri sili, pri kateri zid doseže svojo maksimalno nosilnost

$\sigma_v$ ...povprečna tlačna trdnost v vodoravnem prerezu zidu zaradi navpične obtežbe [MPa]

$$\sigma_v = \frac{F}{A} = \frac{(F_v - G)}{A} = \frac{(380 \text{ kN} - 10 \text{ kN})}{100 \text{ cm} * 40 \text{ cm}} * 10 = 0,925 \text{ MPa} \quad (38)$$

kjer je

$F_v$ ...vertikalna obremenitev zidu [kN]

$G$ ...lastna teža polovice zidu, saj računamo napetosti na sredini zidu [kN]

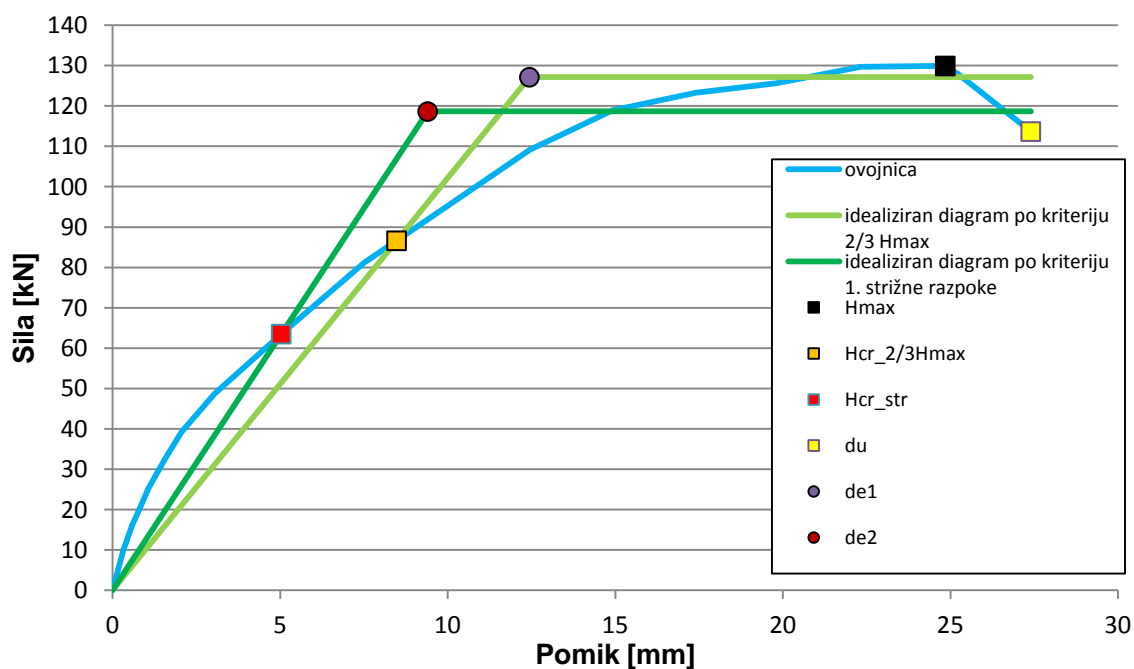
$A$ ...površina vodoravnega prereza zidu [cm<sup>2</sup>]

$b$ ...faktor razporeditve strižnih napetosti po vodoravnem prerezu zidu, ki variira od 1,5 v primeru vitkih zidov do 1,1 v primeru čokatih zidov. Za naš zid smo vzeli vrednost  $b = 1,5$ .

$\tau$ ...povprečna strižna napetost v vodoravnem prerezu zidu pri maksimalni sili  $H_u$  [MPa], definirana z enačbo:

$$\tau = \frac{H_u}{A} \quad (39)$$

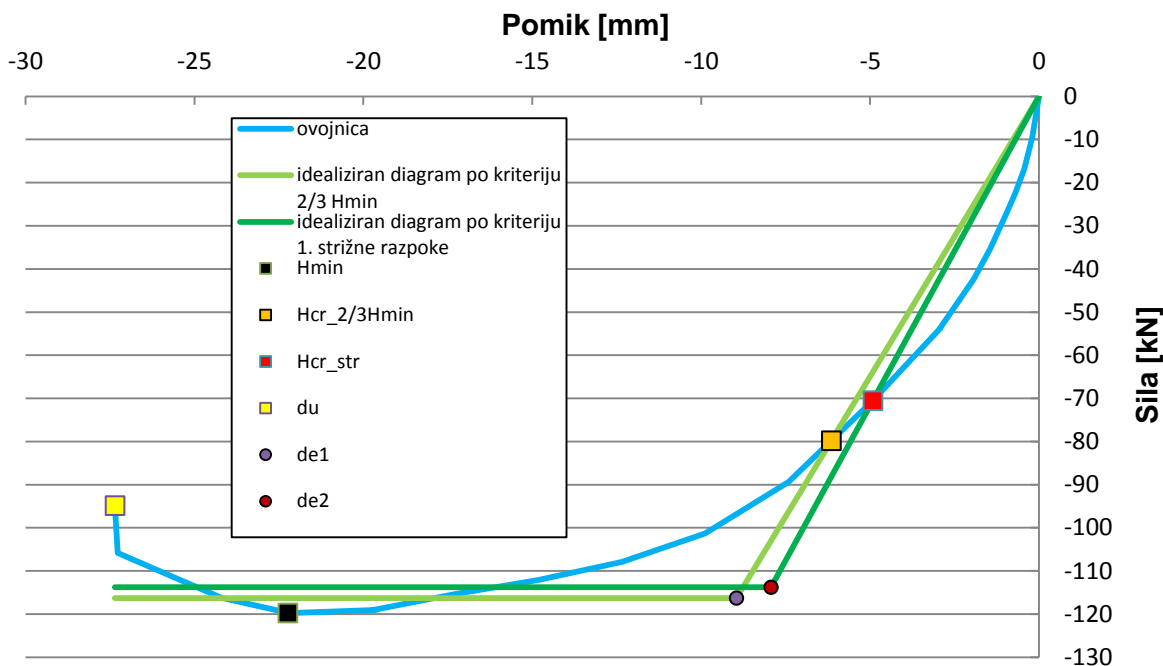
### Primerjava idealiziranih diagramov po obeh kriterijih za Zid 1



Grafikon 36: Idealizirana diagrama po obeh kriterijih za pozitivno ovojnico za Zid 1

S primerjavo idealiziranih diagramov po obeh kriterijih opazimo, da ima idealiziran diagram po kriteriju 2/3 maksimalne sile manjši naklon linearnega dela diagrama oz. manjšo efektivno togost od idealiziranega diagrama po kriteriju prve strižne razpoke. To je povsem razumljivo, saj je vrednost 2/3 maksimalne sile večja od sile, kjer se je pojavila prva strižna razpoka. Tako je za idealiziran diagram, ob upoštevanju drugega kriterija, dobljena večja efektivna

togost in večji faktor duktilnosti, medtem ko je idealizirana horizontalna nosilnost  $H_u$  manjša. Podobno obnašanje zasledimo tudi pri negativni ovojnici, le da so vse vrednosti, razen togosti in duktilnosti, nekoliko manjše kot pri pozitivni ovojnici, manjše pa je tudi razhajanje med idealizacijama po obeh kriterijih.



Grafikon 37: Idealizirana diagrama po obeh kriterijih za negativno ovojnico za Zid 1

Karakteristične vrednosti idealiziranih krivulj po obeh kriterijih za obe ovojnici, pozitivno in negativno, so prikazane v Preglednici 56.

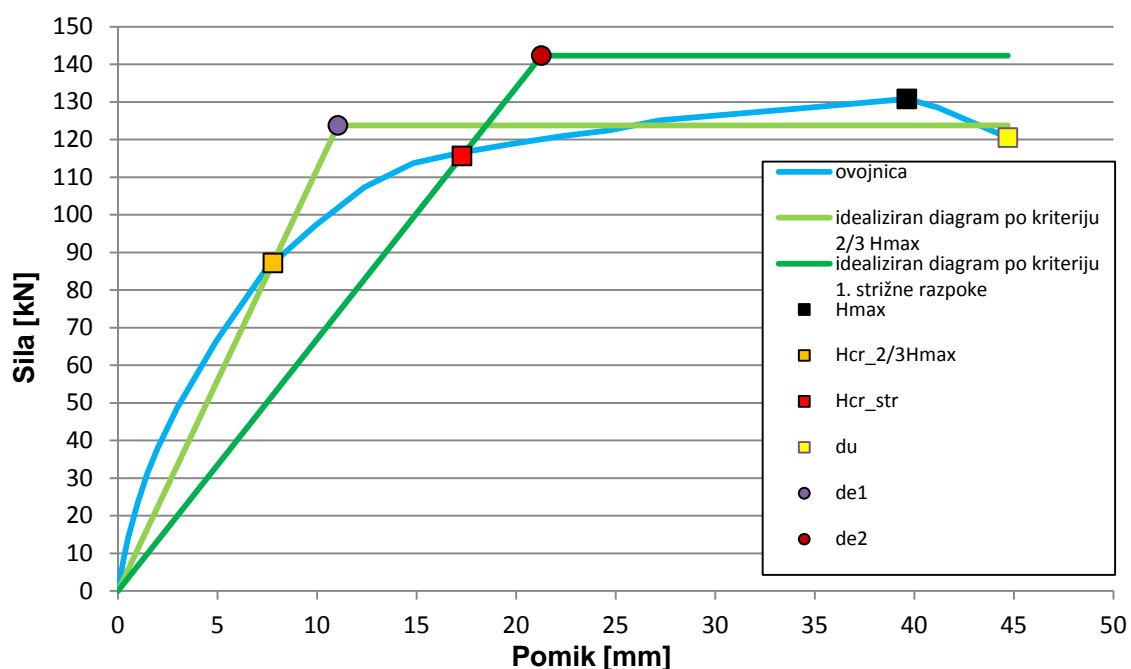
Preglednica 56: Rezultati  $H_{cr}$ ,  $H_u$ ,  $d_{cr}$ ,  $d_u$ ,  $d_e$ ,  $K_e$ ,  $\mu$  in  $f_t$  za idealizirana diagrama po obeh kriterijih za Zid 1

Ovojnica	Kriterij	$H_{cr}$ [kN]	$H_u$ [kN]	$d_{cr}$ [mm]	$d_u$ [mm]	$d_e$ [mm]	$K_e$ [kN/mm]	$\mu$	$f_t$ [Mpa]
Pozitivna	1. kriterij	86,63	127,15	8,47	27,40	12,44	10,22	2,20	0,20
	2. kriterij	63,50	118,65	5,03	27,40	9,40	12,62	2,91	0,18
Negativna	1. kriterij	-79,84	-116,3	-6,15	-27,36	-8,96	12,98	3,05	0,17
	2. kriterij	-70,55	-113,8	-4,92	-27,36	-7,94	14,34	3,45	0,17

Glede na to, da je pri idealiziranem diagramu po kriteriju 2/3 maksimalne oz. minimalne sile horizontalna odpornost  $H_u$  večja od horizontalne odpornosti po kriteriju prve strižne razpoke, je razumljivo večja tudi natezna trdnost zidu.

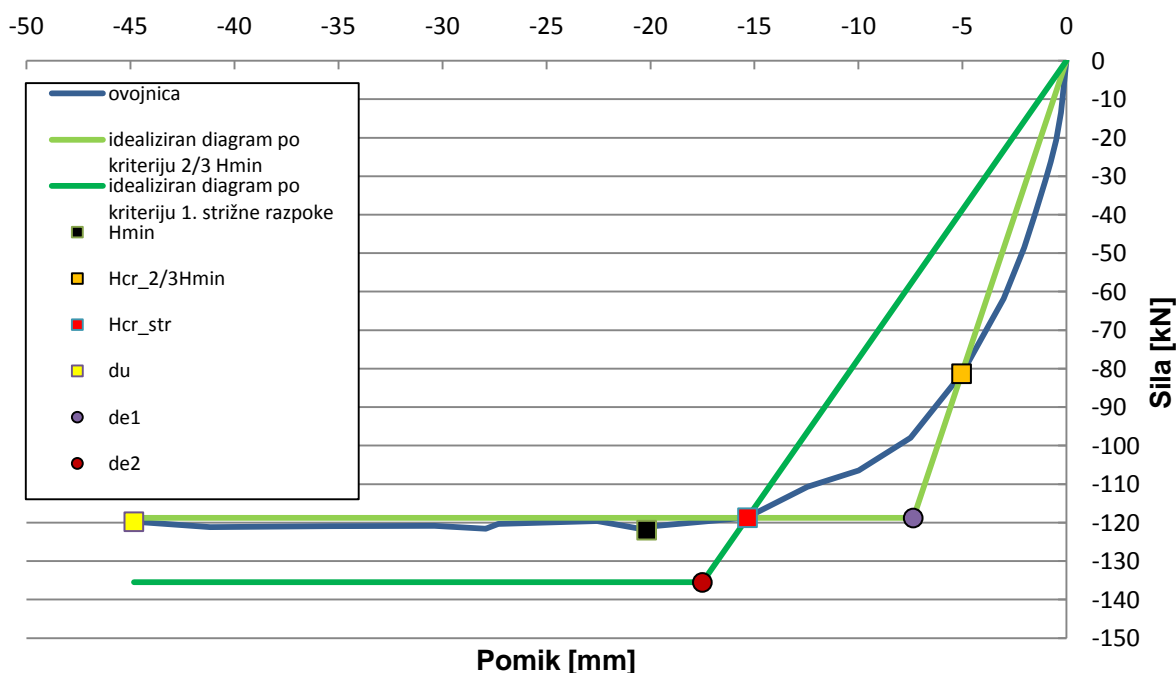


### Primerjava idealiziranih diagramov po obeh kriterijih za Zid 2



Grafikon 38: Idealizirana diagrama po obeh kriterijih za pozitivno ovojnico za Zid 2

Iz primerjave obeh idealiziranih diagramov po obeh kriterijih je ponovno vidna še očitnejša razlika v naklonu linearnega dela diagramov, kar je posledica pojava strižne razpoke nekoliko kasneje – pri 17,5 mm pomika. Glede na to, da pa je pri Zidu 2 prevladoval upogibni porušni mehanizem, uporaba kriterija prve strižne razpoke ni najbolj smiselna. Naklon oz. efektivna togost in duktilnost sta tako manjša po kriteriju prve strižne razpoke. Podobno je pri negativni ovojnici, kjer je razlika togosti in duktilnosti med obema kriterijema še večja.



Grafikon 39: Idealizirana diagrama po obeh kriterijih za negativno ovojnico za Zid 2

Rezultati izračunov so prikazani v Preglednici 57.

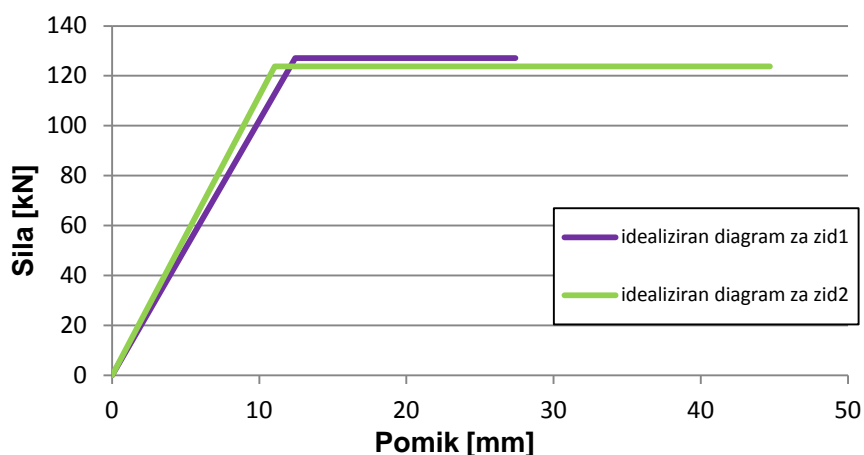
Preglednica 57: Rezultati  $H_{cr}$ ,  $H_u$ ,  $d_{cr}$ ,  $d_u$ ,  $d_e$ ,  $K_e$ ,  $\mu$  in  $f_t$  za idealizirana diagrama po obeh kriterijih za Zid 2

Ovojnica	Kriterij	$H_{cr}$ [kN]	$H_u$ [kN]	$d_{cr}$ [mm]	$d_u$ [mm]	$d_e$ [mm]	$K_e$ [kN/mm]	$\mu$	$f_t$ [Mpa]
Pozitivna	1. kriterij	87,19	123,76	7,78	44,70	11,05	11,20	4,05	0,19
	2. kriterij	115,64	142,31	17,28	44,70	21,27	6,69	2,10	0,24
Negativna	1. kriterij	-81,29	-118,78	-5,04	-44,83	-7,37	16,12	6,09	0,18
	2. kriterij	-118,71	-135,52	-15,33	-44,83	-17,50	7,74	2,56	0,22

Z izračunom smo pokazali, da je togost po kriteriju 2/3 maksimalne sile skoraj 1,7 krat večja od kriterija prve strižne razpoke. Za skoraj faktor 2 je večja tudi duktilnost.

### Primerjava idealiziranih odzivov obeh zidov

Za primerjavo obnašanja obeh preizkušenih zidov smo vzeli pozitivna idealizirana diagrama po obeh kriterijih. Najprej smo analizirali obnašanje po kriteriju 2/3 maksimalne sile. Rezultati so prikazani na Grafikonu 40 in v Preglednici 58.



Grafikon 40: Primerjava pozitivnih idealiziranih diagramov obeh zidov po 1. kriteriju

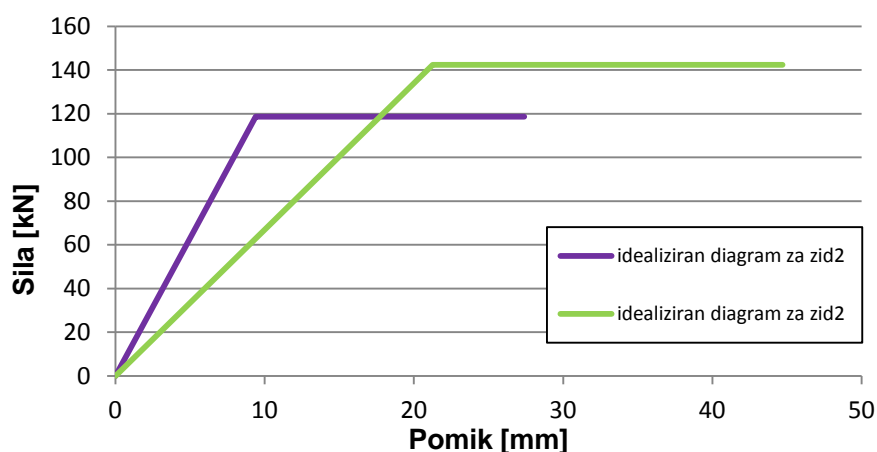
Preglednica 58: Vrednosti  $H_{cr}$ ,  $H_u$ ,  $d_{cr}$ ,  $d_u$ ,  $d_e$ ,  $K_e$ ,  $\mu$  in  $f_t$  za idealizirana diagrama obeh zidov po kriteriju 2/3 maksimalne sile za pozitivno ovojnico

Zid	$H_{cr}$ [kN]	$H_u$ [kN]	$d_{cr}$ [mm]	$d_u$ [mm]	$d_e$ [mm]	$K_e$ [kN/mm]	$\mu$	$f_t$ [Mpa]
Zid 1	86,63	127,15	8,47	27,40	12,44	10,22	2,20	0,2
Zid 2	87,19	123,76	7,78	44,70	11,05	11,20	4,05	0,19
Zid 2/Zid 1	1,01	0,97	0,92	1,63	0,89	1,10	1,84	0,95

Rezultati, prikazani na Grafikonu 40 in v Preglednici 58, kažejo na zelo podobno togost obeh zidov in veliko razliko v duktilnosti. Pri Zidu 2, ki je bil utrjen z vrvicami, je duktilnost skoraj

2 krat večja od duktilnosti neutrenjenega zidu, kar je v skladu z našimi pričakovanji. Vrednost idealizirane horizontalne nosilnosti  $H_u$  je sicer malo manjša pri Zidu 2 in s tem tudi natezna trdnost zidu.

V nadaljevanju (na Grafikonu 41 in v Preglednici 59) sta prikazani primerjavi po kriteriju prve strižne sile.



Grafikon 41: Primerjava pozitivnih idealiziranih diagramov obeh zidov po 2. Kriteriju

Preglednica 59: Vrednosti  $H_{cr}$ ,  $H_u$ ,  $d_{cr}$ ,  $d_u$ ,  $d_e$ ,  $K_e$ ,  $\mu$  in  $f_t$  za idealizirana diagrama obeh zidov po kriteriju prve strižne razpoke za pozitivno ovojnico

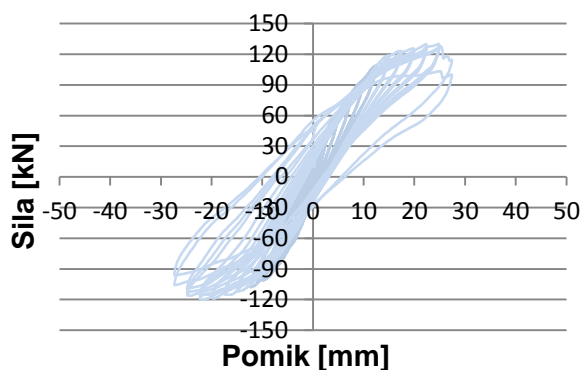
Zid	$H_{cr}$ [kN]	$H_u$ [kN]	$d_{cr}$ [mm]	$d_u$ [mm]	$d_e$ [mm]	$K_e$ [kN/mm]	$\mu$	$f_t$ [Mpa]
Zid1	63,50	118,65	5,03	27,40	9,40	12,62	2,91	0,18
Zid2	115,64	142,31	17,28	44,70	21,27	6,69	2,10	0,24
Zid 2/Zid 1	1,82	1,20	3,44	1,63	2,26	0,53	0,72	1,33

Pri primerjavi po kriteriju prve strižne razpoke je vidna velika razlika v naklonu obeh diagramov oz. v togosti zidu, medtem ko je posledično duktilnost obeh zelo podobna. Pri tem kriteriju ima večjo idealizirano horizontalno nosilnost  $H_u$  Zid 2, kar je posledica kasnejšega pojava prve strižne razpoke. Primerjava še enkrat pokaže, da je v primeru upogibnega obnašanja zidov kriterij 1. strižne razpoke nesmiseln, saj je vrednost efektivne togosti nesmiselna.

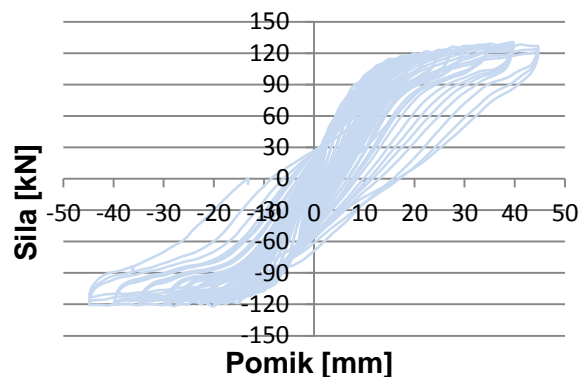
#### 12.4.3 Primerjava odziva neutrenjenih zidov z odzivom utrjenih zidov

Poleg dosedanjih primerjav smo naredili še primerjavo med predhodno preskušanimi neutrenjenimi zidovi in v sklopu diplome preskušanima utrjenima zidovoma. Pri tem nismo primerjali rezultatov testov istih zidov, temveč tiste z istimi vpetostnimi pogoji in vertikalno obremenitvijo, kot smo ju uporabili pri naših strižnih preiskavah, saj je odzive nesmiselno primerjati ob različnih robnih pogojih, saj le ti pogojujejo odziv.

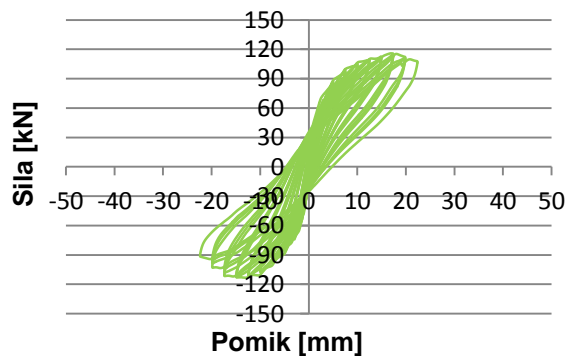
Na grafikonih (od Grafikona 42 do Grafikona 47) so prikazane histerezne zanke vseh zgoraj omenjenih zidov.



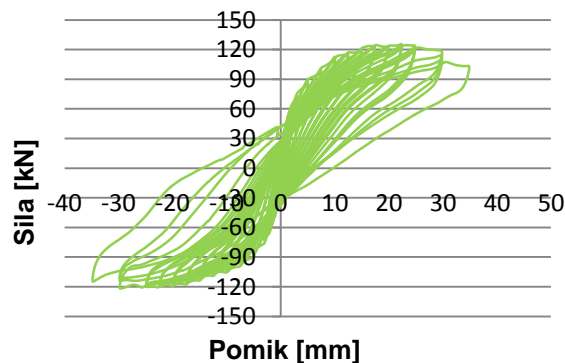
Grafikon 42: Histerezne zanke nepovezanega zidu (Zid 1)



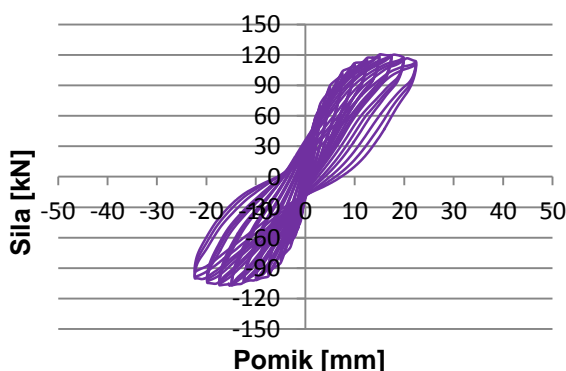
Grafikon 43: Histerezne zanke injektiranega in z vrvico utrjenega povezanega zidu (Zid 2)



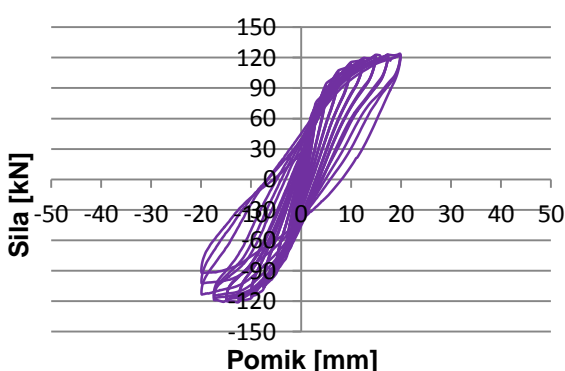
Grafikon 44: Histerezne zanke neutrjenega, nepovezanega zidu (1. test)



Grafikon 45: Histerezne zanke neutrjenega, nepovezanega zidu (2. test)



Grafikon 46: Histerezne zanke neutrjenega, povezanega zidu (1. test)



Grafikon 47: Histerezne zanke neutrjenega, povezanega zidu (2. test)

Pri predhodnih preiskavah neutrjenih zidov sta bili narejeni dve ponovitvi za določene robne pogoje in morfologijo zidov. Iz primerjave histereznihih zank Zidu 1 in histereznihih zank neutrjenega in nepovezanega zidu (Grafikon 42, Grafikon 44 in Grafikon 45) lahko opazimo, da je dosežena maksimalna sila neutrjenega zidu malo nižja od maksimalne sile Zidu 1. Pri

predhodnih preiskavah je bil odziv obeh nepovezanih zidov precej različen, saj je bil dosežen maksimalen pomik 22 mm pri prvem in 34 mm pri drugem testu. Slednji je bil torej večji od Zidu 1, ki je bil injektiran.

Pri primerjavi Zidu 2 z rezultati povezanih zidov (Grafikon 43, Grafikon 46 in Grafikon 47) je razvidno, da se je pri injektiranem in z vrvico utrjenem zidu močno povečal maksimalni pomik. Pri neutrjenem zidu je znašal okoli 20 mm, pri utrjenem je pomik dosegel vrednost 45 mm. S tem utrditvenim ukrepom smo zidu torej močno povečali njegovo duktilnost.

V Preglednici 60 in Preglednici 61 je prikazana primerjava vrednosti maksimalnih oz. minimalnih sil in pomikov in njihove pripadajoče vrednosti pred in po utrjevanju za primer nepovezanega in povezanega zidu. V našem primeru je bil Zid 1 nepovezan in Zid 2 povezan.

Preglednica 60: Primerjava  $H_{max}$ ,  $d_{Hmax}$ ,  $H_{min}$ ,  $d_{Hmin}$ ,  $d_{max}$ ,  $H_{dmax}$ ,  $d_{min}$ ,  $H_{dmin}$  testov neutrjenih zidov in rezultatov injektiranega nepovezanega zidu

Nepovezan zid	$H_{max}$ [kN]	$d_{Hmax}$ [mm]	$H_{min}$ [kN]	$d_{Hmin}$ [mm]	$d_{max}$ [mm]	$H_{dmax}$ [kN]	$d_{min}$ [kN]	$H_{dmin}$ [kN]
Neutrjen (povpr.)	120,64	20,00	-117,60	-22,50	28,64	104,64	-28,61	-101,96
Utrjen	129,94	25,00	-119,76	-22,50	27,40	113,69	-27,36	-94,87
Utrjen/Neutrjen	1,08	1,25	1,02	1,00	0,96	1,09	0,96	0,93

Z injektiranjem, ki je bil utrditveni ukrep nepovezanega zidu, smo dosegli malenkost večje maksimalne in minimalne sile, medtem ko sta maksimalni in minimalni pomik manjša, kar pa je posledica velikih pomikov enega predhodno preizkušenega zidu. Z injektiranjem smo torej dobili tako podobno nosilnost kot tudi podobno duktilnost, s čimer smo dosegli sposobnost obnašanja prvotnega stanja.

Preglednica 61: Primerjava  $H_{max}$ ,  $d_{Hmax}$ ,  $H_{min}$ ,  $d_{Hmin}$ ,  $d_{max}$ ,  $H_{dmax}$ ,  $d_{min}$ ,  $H_{dmin}$  testov neutrjenih zidov in rezultatov injektiranega ter z vrvico utrjenega povezanega zidu

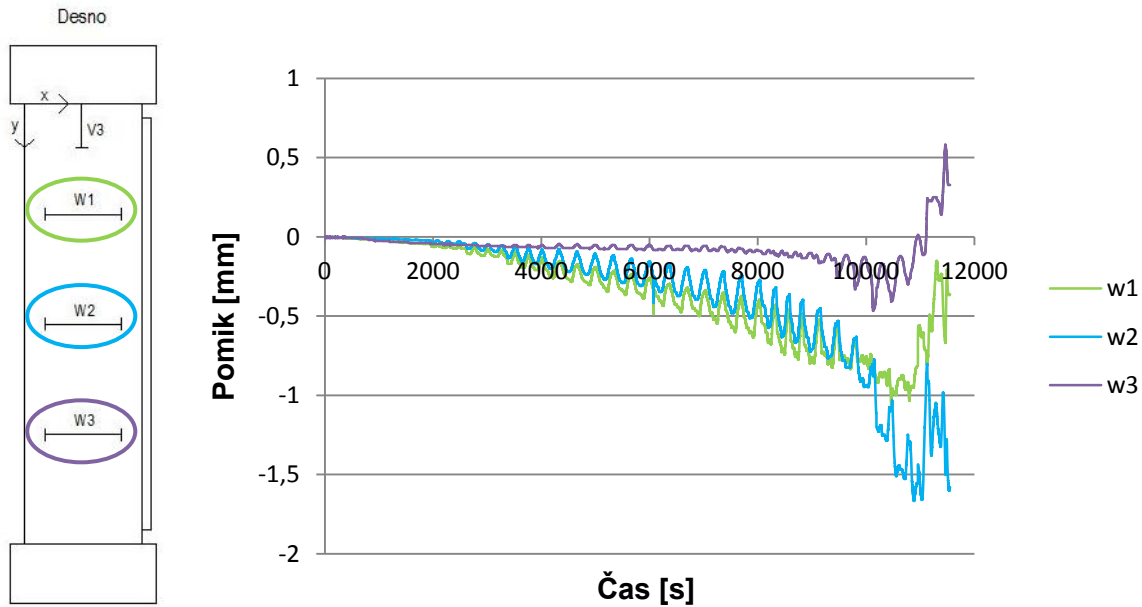
Povezan zid	$H_{max}$ [kN]	$d_{Hmax}$ [mm]	$H_{min}$ [kN]	$d_{Hmin}$ [mm]	$d_{max}$ [mm]	$H_{dmax}$ [kN]	$d_{min}$ [mm]	$H_{dmin}$ [kN]
Neutrjen (povpr.)	122,25	17,50	-114,25	-15,00	21,14	115,14	-21,15	-90,40
Utrjen	130,79	40,00	-121,94	-22,50	44,70	120,52	-44,73	-119,75
Utrjen/Neutrjen	1,07	2,29	1,07	1,50	2,11	1,05	2,12	1,32

Razlika med utrjenim in neutrjenima zidovima je bila večja pri povezanih zidovih oziroma pri ukrepu injektiranja in utrjevanja z vrvico. Povečanje maksimalne in minimalne sile je bilo sicer minimalno, je pa prišlo do večje razlike pri doseženih maksimalnih in minimalnih pomikih. Povečali so se za faktor 2. Z dodatnim utrditvenim ukrepom (vrvice s steklenimi vlakni) smo torej dosegli precej bolj duktilno obnašanje zidu.

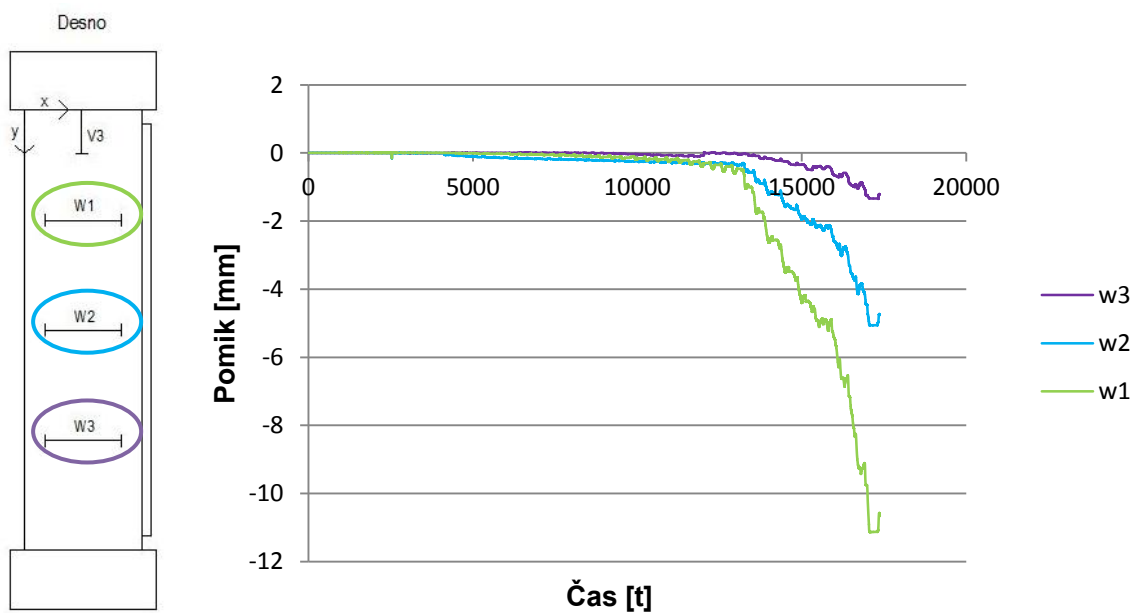
#### 12.4.4 Primerjava pomikov induktivnih merilcev obeh zidov

Zidov nismo samo opazovali, temveč smo njune pomike analizirali na rezultatih induktivnih merilcev. Dobili smo nekaj zanimivih grafikonov, ki so prikazani na naslednjih straneh.

Zanimiva je bila primerjava izven ravninskih horizontalnih pomikov na desni strani zidov (W1-W3), s katerimi smo zaznavali horizontalno odpiranje zidu.

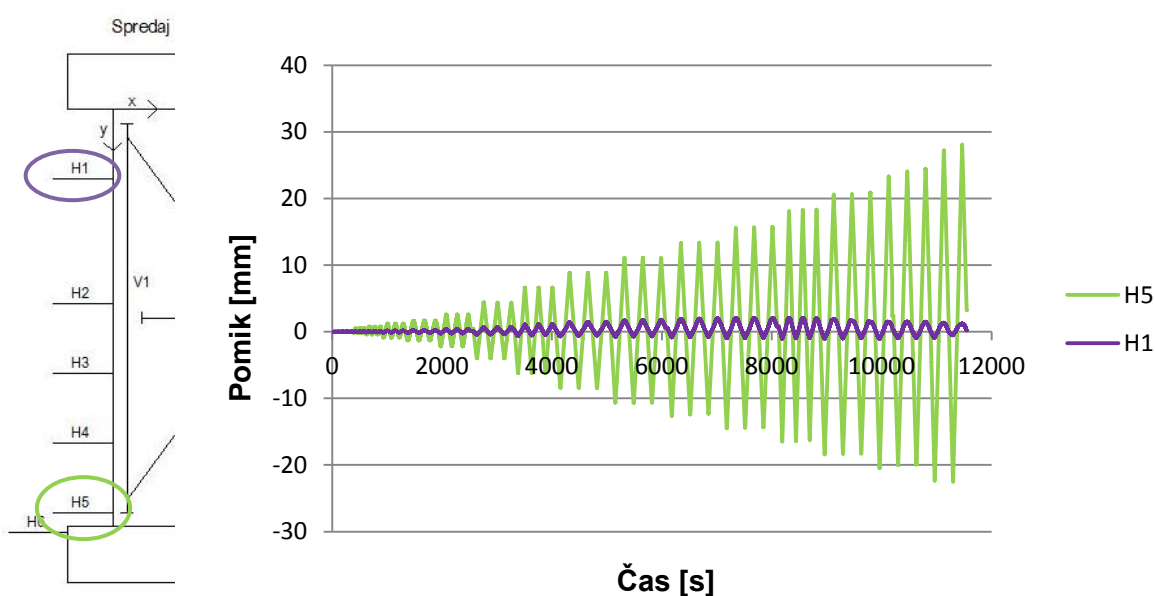


Grafikon 48: Izven ravninski horizontalni pomiki desne strani Zidu 1

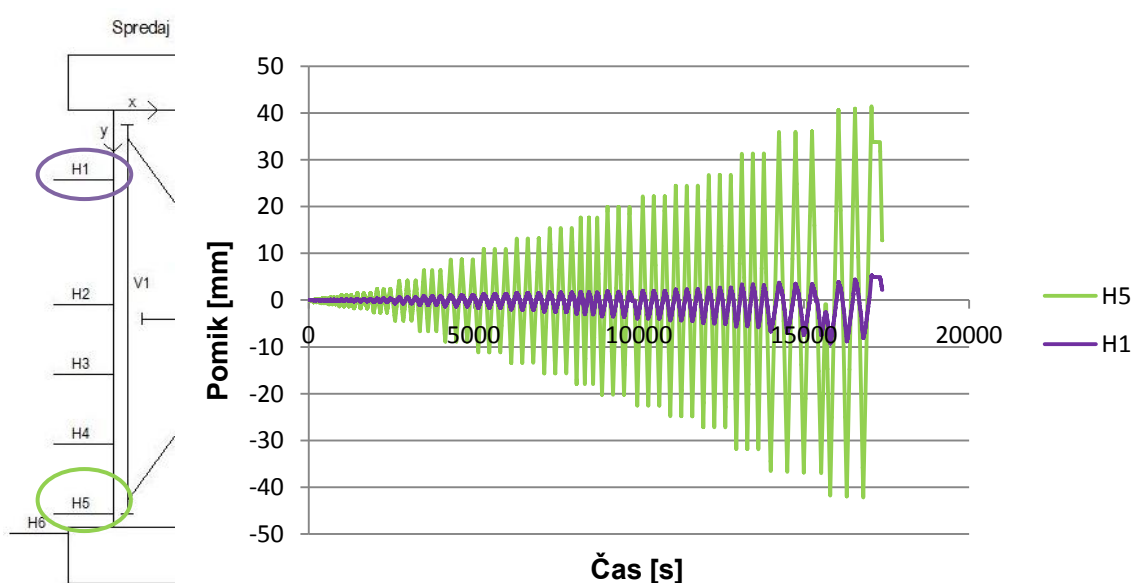


Grafikon 49: Izven ravninski horizontalni pomiki desne strani Zidu 2

Pri obeh zidovih smo zaznali večje izven ravninsko odpiranje zidu v zgornjem in spodnjem območju, iz tega sklepamo, da je bila to posledica vpetega zgornjega dela zidu. Odpiranje zidu je v spodnjem delu zidu potekalo zelo počasi, nato pa je odpiranje sunkovito naraslo. Odpiranje pri Zidu 1 je v zgornjem delu zidu naraščalo postopoma in je naraslo vse do pomika -1,08 mm. Odpiranje v srednjem delu je bilo večino časa manjše od odpiranja v zgornjem delu, vse dokler ni odpiranje v srednjem delu zidu hitro naraslo, kar je verjetno posledica večjih lokalnih napetosti v sredini zidu. Pri Zidu 2 je bilo odpiranje zidu ves čas največje v zgornjem delu, sledila sta srednji in spodnji del zidu. Pri tem so bili za Zid 2 zabeleženi veliko večji pomiki, saj je induktivni merilec W1 zabeležil pomik, velik 11 mm, medtem ko je največji pomik pri Zidu 1 znašal 1,7 mm.



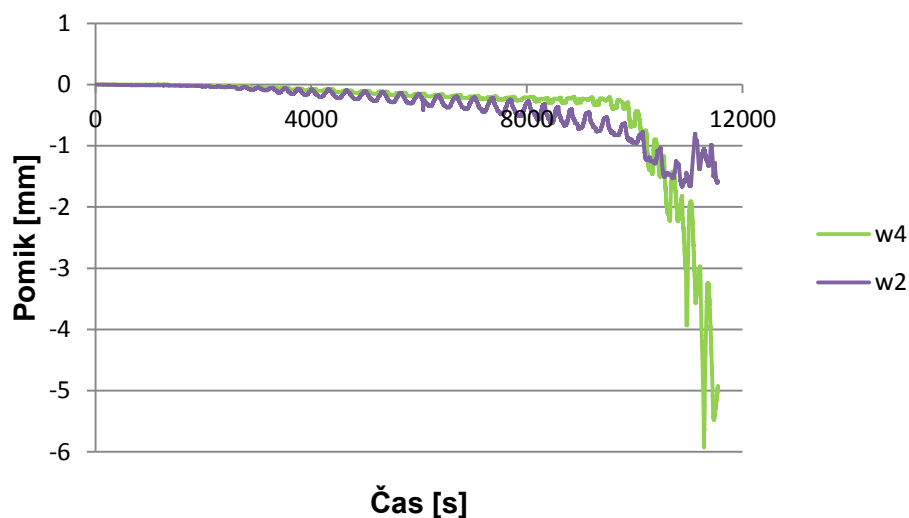
Grafikon 50: Horizontalni pomiki zgornjega in spodnjega sprednjega dela Zidu 1



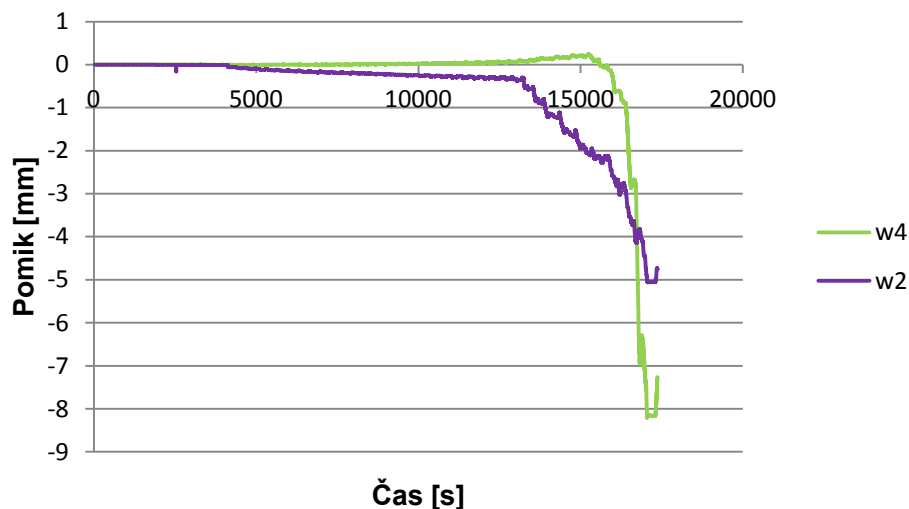
Grafikon 51: Horizontalni pomiki zgornjega in spodnjega sprednjega dela Zidu 2

Induktivni merilci, označeni od H1 do H5, so bili, poleg tega, da so bili pritrjeni na zidu, pritrjeni še na drog poleg zidu in so tako sledili cikličnemu obremenjevanju bata. Razumljivo, induktivni merilec je zabeležil veliko večje pomike spodaj, saj zid v spodnjem delu ni bil togo vpet, kot je bil zgoraj. Induktivni merilec je zabeležil praktično iste pomike, kot jih je induktivni merilec H6, s katerim smo vodili naše obremenjevanje.

Primerjali smo tudi izven ravninsko odpiranje zidov na sredini na obeh straneh (Grafikon 52 in Grafikon 53).



Grafikon 52: Izven ravninsko odpiranje Zidu 1 na različnih straneh

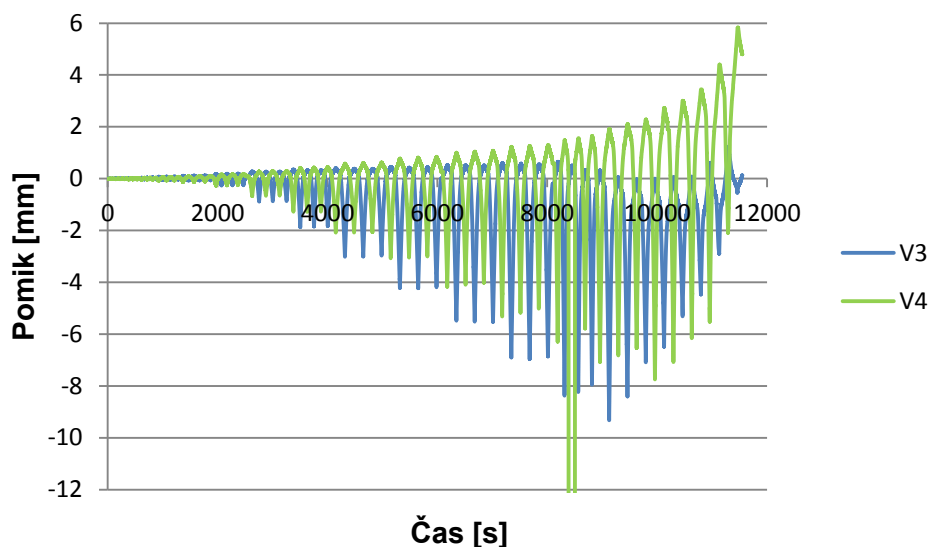


Grafikon 53: Izven ravninsko odpiranje Zidu 2 na različnih straneh

Prišli smo do spoznanja, da je bilo odpiranje zidu v obeh primerih večje na desni strani, torej na nasprotni strani od hidravličnega bata. Lahko je posledica ekscentrične sestave zidu, ekscentričnega nanosa obtežbe, večje poškodovanosti zidu na desni strani, itd.

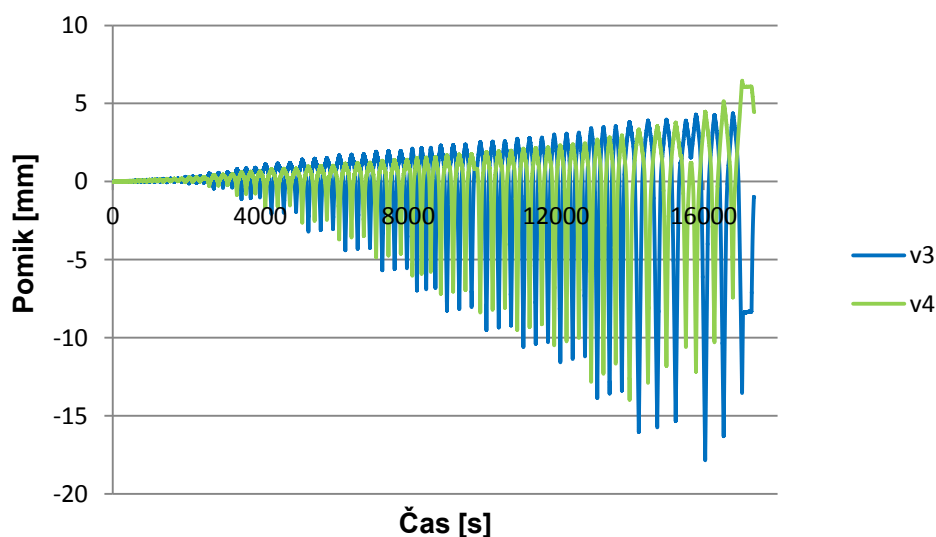


Poleg horizontalnih pomikov smo analizirali tudi vertikalne (V1-V5). Zanimiva je bila predvsem primerjava pomikov vertikalnih induktivnih merilcev, ki sta potekala samo čez eno in sicer zgornjo spojnico, s katero smo analizirali njuno odpiranje.



Grafikon 54: Primerjava vertikalnih pomikov v zgornji spojnici na obeh straneh Zidu 1

V primeru cikličnega obremenjevanja v pozitivno smer, (t.j., ko je bat vlekla zid k sebi), je prišlo do zapiranja zidu v območju induktivnega merilca V3 in odpiranja na drugi strani. Pri Zidu 1 lahko opazimo, da se graf induktivnega merilca V3 pri času približno 9000 s premakne malce navzdol, kar je lahko posledica razpokanega kamna pod induktivnim merilcem, ki se je verjetno premaknil malce nižje.



Grafikon 55: Primerjava vertikalnih pomikov v zgornji spojnici na obeh straneh Zidu 2

Do večjih vertikalnih pomikov je prišlo pri drugem zidu, kjer je bilo odpiranje zidu tudi bolj izrazito.

## 12.5 Povzetek

S strižnimi preiskavami na dveh zidovih smo analizirali strižno obnašanje utrjenih zidov. Zidova sta bila v napravo za strižne preiskave enostransko vpeta in vertikalno obremenjena s silo, ki je predstavljala 15% tlačne trdnosti zidu pred utrditvijo. Oba zidova sta po predhodnih preiskavah vsebovala omet. Z devetnajstimi induktivnimi merilci, nameščenimi na treh straneh zidu, smo beležili pomike zidu, ki jih je povzročal servo hidravlični bat. Z beleženjem pomikov in pripadajočih sil smo dobili histerezen odziv, kateremu smo po kriteriju enakosti energij določili idealiziran odziv pozitivne in negativne ovojnice histerez. Zidovoma smo določili porušni mehanizem in iz idealiziranega odziva izračunali strižno nosilnost, efektivno togost, faktor duktilnosti in natezno trdnost zidu.

Izkazalo se je, da se nosilnost in duktilnost injektiranemu zidu v primerjavi z neutrjenim, nista dosti spremenili, s čimer smo izpolnili naše cilje. Opaziti je bilo izrazito povečanje duktilnosti in minimalno nosilnosti pri zidu, dodatno utrjenem z vrvicami.

Pri obeh zidovih je bilo prisotno izven ravninsko odpiranje. Pri injektiranem zidu je bilo izven ravninsko odpiranje največje v srednjem delu, pri dodatno utrjenem pa v zgornjem. Horizontalni pomiki v smeri obremenjevanja so bili pri obeh zidovih veliko večji spodaj, saj zid v spodnjem delu ni bil togo vpet. Z vertikalnimi induktivnimi merilci, s katerimi smo merili odpiranje zgornje spojnice, smo zabeležili veliko večje pomike pri dodatno utrjenem zidu, kjer je bil izrazit upogibni porušni mehanizem.

### 13 ZAKLJUČEK

V strokovni literaturi in praksi obstaja več različnih načinov utrditve zidov v odvisnosti od vrste, teksture in morfologije zidov. V svoji diplomski nalogi smo na dveh kamnitih zidovih preizkusili učinkovitost nekaterih ukrepov na strižno odpornost zidov, pri čemer smo bili omejeni z izbiro utrditvenih ukrepov, ki so primerni za utrditev starih objektov kulturne dediščine. Za utrditveni ukrep kamnitih zidov smo si izbrali linijsko injektiranje (vzdolž obstoječih strižnih razpok) in utrditev s horizontalno razporejenimi vrvicami iz steklenih vlaken.

Pred začetkom praktičnega dela smo proučili strokovno literaturo o različnih metodah utrjevanja zidov in iskali ustrezno rešitev za naš primer. Praktično delo je potekalo štiri mesece v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Pred injektiranjem smo, med štirimi injekcijskimi mešanici, izbrali komercialno apneno-cementno z 80% deležem cementa. Poleg apneno-cementne injekcijske mešanice smo preiskovali še tri injekcijske mešanice na osnovi apna. Ena izmed njih je vsebovala hidravlično apno, druga je bila pripravljena iz apnenega testa, tretja pa je bila komercialen proizvod italijanskega proizvajalca. Za apneno-cementno smo se odločili na podlagi preiskav sveže in strjene injekcijske mešanice. Pri preiskavah svežih injekcijskih mešanic smo, vsaki izmed štirih svežih injekcijskih mešanic, določili čas pretočnosti, delež izločanja vode in prostorninsko maso, pred tem pa smo pri nekomercialnih mešanicah morali poiskati tudi ustrezna razmerja materialov. Preiskave strjenih injekcijskih mešanic smo izvedli na prej pripravljenih valjih in prizmah standardnih dimenzij. Prizmam smo določili upogibno natezno trdnost, tlačno trdnost, dinamični modul elastičnosti ter prostorninsko maso in krčenje, valjem pa cepilno natezno in tlačno trdnost. Najvišje vrednosti trdnosti smo dosegli s komercialno pripravljenima injekcijskima mešanica. Vrednosti komercialne injekcijske mešanice italijanskega proizvajalca, ki bi naj bila na osnovi apna, so bile zelo podobne vrednostim apneno-cementne injekcijske mešanice. Tako smo začeli dvomiti v njeno sestavo in sklepali, da vsebuje tudi hidravlične dodatke, morda tudi cement. V začetku smo si, da bi uporabili materiale kompatibilne z materiali starih objektov, zamislili injektiranje z eno izmed apnenih injekcijskih mešanic. Zaradi nezadovoljivih rezultatov, predvsem krčenja ter slabe povezave med injekcijsko mešanico in kamni, se zanje nismo odločili.

Oba kamnita zidova, ki smo ju preizkušali, sta bila grajena iz treh slojev in na eni strani ometana. Z linijskim injektiranjem smo obema zapolnili razpoke in odprtine, ki so nastale pri predhodnih strižnih preiskavah. Rezultati strižnih preiskav injektiranega zidu so pokazali podobno strižno nosilnost kot tudi duktilnost v primerjavi z rezultati neutrjenih zidov. S tem smo zid utrdili in ga vrnili v stanje pred poškodovanostjo. Zid, ki je bil poleg injektiranja utrjen tudi z vrvicami iz steklenih vlaken, pa je dosegel dvakrat večje maksimalne pomike kot neutrjen zid. Z vrvicami, ki smo jih vgradili v vsako horizontalno spojnico na eni strani zidu, smo torej dosegli bolj duktilno obnašanje zidu. Toda namen utrjevanja ni nujno velik prirast nosilnosti in duktilnosti, dovolj je, da v zidovih vzpostavimo prvotno stanje.

Izboljšano obnašanje zidov je bilo vidno tudi pri razvoju različnih porušnih mehanizmov. Pri enaki vertikalni sili, s katero smo obremenili zid, smo pri injektiranem zidu dobili tipični strižni porušni mehanizem. Pri dodatno utrjenem zidu z vrvicami pa se je tvoril upogibni mehanizem z izrazitim odpiranjem zgornje spojnice. Za odlično izbiro se je izkazala tudi izbira podaljšane apneno-cementne malte, ki smo jo skupaj z vrvicami premera 6 mm vgradili v spojnice zidu. Njena ključna naloga je bila, da prenese strižno obremenitev iz zidu tudi na vrvico.

S preiskavami v sklopu diplomske naloge smo torej dokazali, da je bila izbira apneno-cementne injekcijske mešanice ustrezna, saj smo dosegli stanje pred poškodovanostjo zidu. Istočasno smo zidu, utrjenemu z vrvicami, povečali tudi duktilnost in dosegli spremembo mehanizma porušitve iz strižne v upogibno porušitev zidu.

## 14 DIPLOMSKA NALOGA V SLIKAH



Slika 89: Pripravljanje kamnov



Slika 90: Pripravljanje valjastih preizkušancev



Slika 91: Pripravljanje injekcijske mešanice A



Slika 92: Pripravljanje injekcijske mešanice B



Slika 93: Pripravljanje injekcijske mešanice C



Slika 94: Preiskave svežih injekcijskih mešanic



Slika 95: Injektiranje valjev



Slika 96: Pripravljanje prizem



Slika 97: Valji v času sušenja



Slika 98: Prizme v času sušenja





Slika 99: Preiskave strjenih injekcijskih mešanic



Slika 100: Priprava transporta zidov po laboratoriju in sam transport



Slika 101: Priprava zidov za injektiranje



Slika 102: Injektiranje zidov



Slika 103: Injektiranje zidov za ometom



Slika 104: Izpraznitev in čiščenje spojnic



Slika 105: Spojnice pripravljene na vgraditev vrvic



Slika 106: Vrice iz steklenih vlaken



Slika 107: Vgrajene vrvice



Slika 108: Naprava za strižne preizkuse



Slika 109: Zidovi opremljeni z induktivnimi merilci



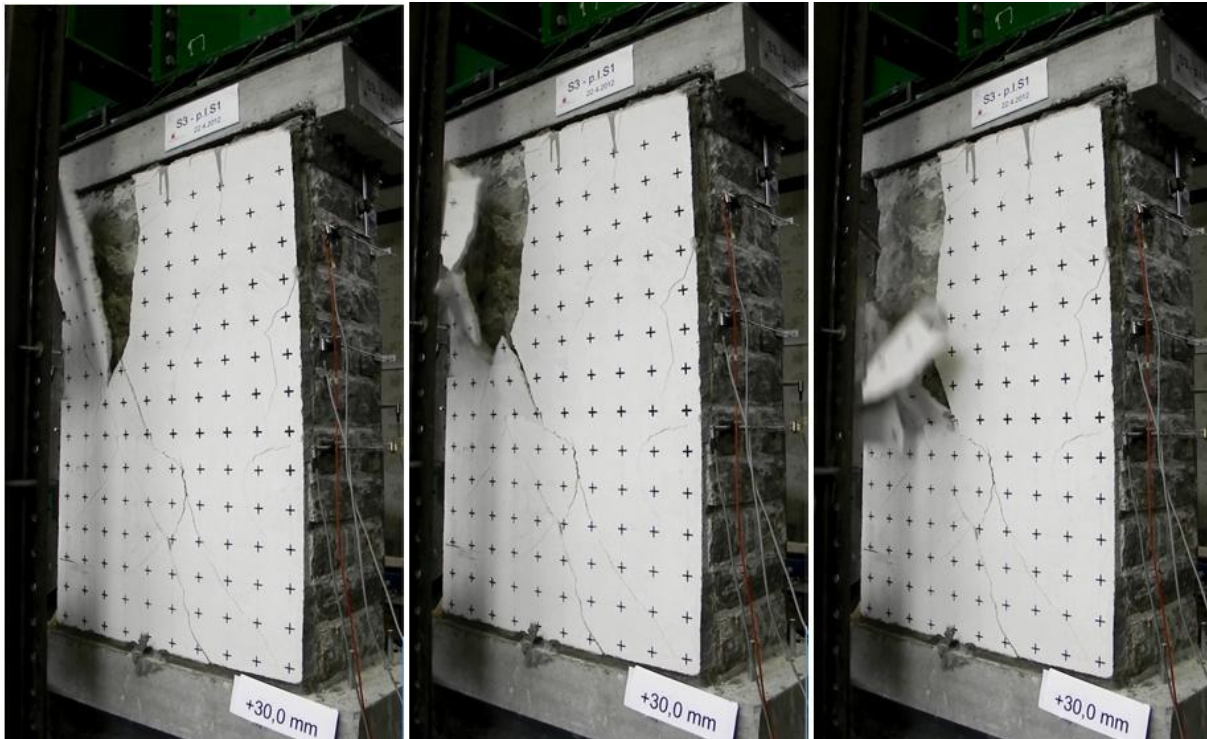
Slika 110: Poškodovanost injektiranega zidu



Slika 111: Izpraznjene spojnice injektiranega zidu



Slika 112: Začetna in končna razpokanost ometa injektiranega in dodatno utrjenega zidu



Slika 113: Porušitev ometa



Slika 114: Delno porušen omet





Slika 115: Poškodovanost injektiranega in dodatno utrjenega zidu

»Ta stran je namenoma prazna.«

## VIRI

- [1] Tomaževič, M. 1987. Zidane zgradbe na potresnih območjih. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: loč. pag.
- [2] Kržan, M., Cotič, P., Bosiljkov, V. 2012. Laboratorijske preiskave troslojnih kamnitih zidov. V: Zbornik 34. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Hotel Golf, 11.-12. oktober 2012. Ljubljana : Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, 2012: str 203-210.
- [3] Kurnjek, L. 2012. Ciklo - program za analizo rezultatov histereznega odziva zidov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Kurnjek): 94 str.
- [4] Gostič, S., Mezgec, A., Žarnić, R. 2005. Protipotresne utrditve zidanih konstrukcij s CFRP kompoziti. Gradbenik: 37-41.
- [5] Pravilnik o začasnih tehničnih ukrepih in pogojih za grajenje na potresnih področjih. 1964. Ljubljana, Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije: 23 str.
- [6] Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih. 1981. Ljubljana, Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije: 31 str.
- [7] Tomaževič, M. 2009. Potresno odporne zidane stavbe. Ljubljana, Tehnis d.o.o.: 301 str.
- [8] Bosiljkov, V., Kržan, M. 2012. Perpetuate: Deliverable D15 - Results of laboratory and in-situ tests on masonry properties and tables with mechanical parameters to be adopted in numerical modelling. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 529 str.
- [9] SIST EN 1998-3:2005/A101:2007. 3.del, Evrokod 8 - Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij. Ocena in prenova stavb - Nacionalni dodatek. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo.
- [10] Kulturna dediščina. 2012.  
<http://www.zvkds.si/sl/zvkds/nasveti-za-lastnike/kulturna-dediscina>  
(Pridobljeno 11. 12. 2012.)
- [11] Bergant, M., Dolinšek, B. Utrjevanje kamnitih in opečno-kamnitih zidov z injektiranjem. 2012  
<http://www.gi-zrmk.si/images/TC/9%20%C4%8Dlanek.pdf> (Pridobljeno 18. 12. 2012.)
- [12] Mapei. 2013. Ojačitve betonskih in zidanih konstrukcij s kompozitnimi materiali. Osebna komunikacija. (10. 1. 2013.)
- [13] Balsamo, A., Iovinella, I., Morandini, G. Experimental campaign on tuff masonry strengthened with FRG. Osebna komunikacija. (3. 1. 2013.)

- [14] Kržan, M. 2009. Kompoziti. Nauk o materialih za inženirje. Osebna komunikacija. (16. 1. 2013.)
- [15] Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.
- [16] Bank, L. C. 2006. Composites for construction : structural design with FRP materials. Hoboken: J. Wiley & Sons: 551 str.
- [17] Basalt fiber properties. 2012.  
<http://www.build-on-prince.com/basalt-fiber.html> (Pridobljeno 15. 12. 2012.)
- [18] Fibre comparison. 2013.  
[http://www.resintex.co.uk/products\\_10.asp](http://www.resintex.co.uk/products_10.asp) (Pridobljeno 14. 2. 2013.)
- [19] Myers, J. J. 2011. An overview of the American Concrete Institute design approach for strengthening unreinforced masonry structures using externally bonded fiber-reinforced polymer systems. V: INGHAM, Jason M. (ur.). Proceedings of the 9th Australasian Masonry Conference : Queenstown, New Zealand, 15-18 February 2011. Queenstown: Australasian Masonry Conference, 2011: loč. pag.
- [20] Tomaževič, M. Apih, V. 1993. Ojačevanje kamnitega zidovja z zidovju prijaznim injektiranjem. Gradbeni vestnik 42: 45-48.
- [21] Vintzileou, E., Tassios, T. P. 1995. Three-Leaf Stone Masonry Strengthened by Injecting Cement Grouts. Journal of Structural Engineering 121: 848-856.
- [22] Vintzileou, E., Miltiadou-Fezans, A. 2008. Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts. Engineering Structures 30: 2265-2276.
- [23] Beljenje. 2013.  
<http://www.beljenje.com/index.php/postopek> (Pridobljeno 2. 3. 2013.)
- [24] Russell, H. 2010. Materials and Skills for Historic Building Conservation. Construction Management & Economics 28: 101-102.
- [25] Kikelj, K. 2006. Vpliv vrste apna, dodatkov in tehnik izdelave na karakteristike apnenih fasad. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kikelj): 128 str.
- [26] Gnom. 2013.  
[http://www.gnom.si/koristne\\_informacije.php](http://www.gnom.si/koristne_informacije.php) (Pridobljeno 3. 3. 2013.)
- [27] Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek): 261 str.
- [28] SIST EN 1015-6:1999. Metode preskušanja zidarskih malt – 6. del: Ugotavljanje prostorninske mase sveže malte.

- [29] SIST EN 445:2008. Injekcijska masa za prednapete kable : preskusne metode.
- [30] PSIST prEN 1015-8:2001. Metode preskušanja zidarske malte – 8. del: Določanje zadrževanja vode sveže malte.
- [31] Uranjek, M. 2008. Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek): 166 str.
- [32] SIST EN 1015-10:2001/A1:2007. Metode preskušanja zidarske malte - 10. del: Določevanje suhe prostorninske mase strjene malte.
- [33] SIST EN 1015-11:2001 – Metode preskušanja zidarskih malt – 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.
- [34] SIST EN 12390-6:2001 – Preskušanje strjenega betona – 6. del: Cepilna natezna trdnost strjenega betona.
- [35] JUS U. M1. 025. 1983. Beton - Određivanje statičkog modula elastičnosti pritiskom.
- [36] JUS U. M1. 004. 1976. Ispitivanje betona. Epruvete (betonska tela). Oblik, mere i dozvoljena odstupanja.
- [37] Hočevar, A. 2007. Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hočevar): 72 str.
- [38] Bosiljkov, V. 2000. Eksperimentalne in računске raziskave vpliva modificiranih malt na mehanske lastnosti opečne zidovine. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 128 str.
- [39] Černilogar, L. 2011. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji.  
[http://www.tkk.si/filelib/prakticni\\_nasveti/clanki/gr\\_12\\_2010\\_tkk.pdf](http://www.tkk.si/filelib/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf) (Pridobljeno 18. 2. 2013.)
- [40] Novak, M. 2012. Ko se vulkanski pepel usede na zemeljsko površje.  
<http://m.delo.si/clanek/181170> (Pridobljeno 2. 3. 2013.)
- [41] Bentonit-prirodan i koristan. 2013.  
[http://gorazemun.weebly.com/uploads/2/6/5/5/2655770/sve\\_o\\_bentonitu.pdf](http://gorazemun.weebly.com/uploads/2/6/5/5/2655770/sve_o_bentonitu.pdf)  
(Pridobljeno 23. 2. 2013.)
- [42] American Concrete Institute. 2013.  
[http://www.concrete.org/MEMBERS/MEM\\_INFO.HTM](http://www.concrete.org/MEMBERS/MEM_INFO.HTM) (Pridobljeno 16.3.2013)
- [43] Guide for the design and construction of externally bonded fiber-reinforced polymer systems for strengthening unreinforced masonry structures. 2010. Farmington Hills [MI], A. C. Institute: loč. pag.

- [44] Gostič, S., Jarc Simonič, M., Bosiljkov, V. 2012. In-situ preiskave opečnih zidov utrjenih s karbonskimi trakovi. V: Roman, Humberto Ramos (ur.), Parsekian, Guilherme Aris (ur.). Proceedings of the 15th International Brick and Block Masonry Conference : June 03rd to 06th, 2012, Florianópolis, Santa Caterina, Brazil. Florianópolis: Federal University of Santa Catarina: loč. pag.
- [45] Konthesingha, C., Masia, M., Petersen, R., Page, A. 2012. Cyclic in-plane shear behaviour of unreinforced masonry wall panels strengthened with NSM FRP strips. V: Roman, Humberto Ramos (ur.), Parsekian, Guilherme Aris (ur.). Proceedings of the 15th International Brick and Block Masonry Conference : June 03rd to 06th, 2012, Florianópolis, Santa Caterina, Brazil. Florianópolis: Federal University of Santa Catarina: loč. pag.
- [46] Oliveira, D., Silva, R., Garbin, E., Lourenço, P. 2012. Strengthening of three-leaf stone masonry walls: an experimental research. *Materials and Structures*: 1-18.
- [47] Valluzzi, M., da Porto, F., Modena, C. 2004. Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls. *Materials and Structures* 37: 184-192.
- [48] Valluzzi, M. R., Tinazzi, D., Modena, C. 2002. Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials* 16: 409-416.
- [49] Tumialan, G., Huang, P.-C., Nanni, A., Silva, P. 2001. Strengthening of masonry walls by FRP structural repointing. V: *Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-5*, Cambridge, July 16-18, 2001: p. 1-10.
- [50] Tomaževič, M., Gams, M., Berset, T. 2012. Seismic strengthening of stone masonry walls with polymer coating. V: *15th World Conference on Earthquake Engineering : 24 to 28 september 2012, Lisbon, Portugal*. Lisbon: Sociedade Portuguesa do Engenharia Sísmica: International Association for Earthquake Engineerin: p. 1-10.